

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-148-159>
УДК 528.9:504.064.1:911.2(476.5)

Поступила в редакцию 14.04.2026
Received 14.04.2026

ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВЫХ ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УРБОЛАНДШАФТАХ г. БОБРУЙСКА

Е. А. Кухлевский, А. А. Карпиченко

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье изложена методика и представлены результаты ГИС-моделирования потоковых ландшафтно-геохимических систем г. Бобруйска с использованием ArcGIS Pro (модуль Arc Hydro). Актуальность исследования обусловлена необходимостью выявления особенностей миграции химических элементов в антропогенно изменённой городской среде, где поверхностный сток регулируется инженерной инфраструктурой.

Цель работы – выделить и картографировать локальные водосборы на территории города как основу анализа потоковых ландшафтно-геохимических систем, выявления, интерпретации и прогноза аномалий техногенных веществ в компонентах урболандшафтов.

Методика исследований включала обработку цифровой модели рельефа, поэтапное выделение направлений и аккумуляции стока, идентификацию водотоков, векторизацию и ручную корректировку границ водосборов, а также увязку полученных полигонов с коллекторной сетью города. По результатам ГИС-моделирования создана схема исходных природообусловленных локальных водосборов на территории г. Бобруйска, полученная в результате автоматической генерации границ водосборов. На основе данной схемы путём её интеграции с коллекторной сетью города создана схема современной структуры водосборов на территории города с выделением 11 водосборных бассейнов, формирующих систему потоковых ландшафтно-геохимических систем города.

Ключевые слова: урболандшафты; водосборные бассейны; потоковые ландшафтно-геохимические системы; ГИС; модуль ArcHydro; ливневая канализация.

Для цитирования. Кухлевский Е. А., Карпиченко А. А. ГИС-моделирование потоковых ландшафтно-геохимических систем в урболандшафтах г. Бобруйска // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 148–159.

GIS MODELING OF FLOW LANDSCAPE AND GEOCHEMICAL SYSTEMS IN URBAN LANDSCAPES OF BOBRUIISK

E. A. Kukhlevski, A. A. Karpichenka

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. This article presents the methodology and results of GIS modeling of flow landscape-geochemical systems in the city of Bobruisk using ArcGIS Pro (ArcHydro module). The relevance of the study stems from the need to identify migration patterns of chemical elements in an anthropogenically modified urban environment where surface runoff is regulated by utility infrastructure.

The goal of the study is to identify and map local watersheds within the city as a basis for analyzing flow landscape geochemical systems, identifying, interpreting and predicting anomalies of technogenic substances in urban landscape components.

The research methodology included processing of digital elevation models (DEM), step-by-step identification of flow directions and accumulation, stream identification, vectorization, manual adjustment of catchment boundaries, linking the resulting polygons to the city's drainage network. Based on GIS modeling results, a map of original naturally conditioned local watersheds in Bobruisk city was created by automatic generation of watershed boundary. This map was integrated with the city drainage network to create a map of current catchment structures. It identified 11 watersheds forming the city landscape-geochemical system.

Keywords: urban landscapes; watersheds; flow landscape-geochemical systems; GIS; ArcHydro module; storm sewers.

For citation. Kukhlevski E. A., Karpichenka A. A. GIS modeling of flow landscape and geochemical systems in urban landscapes of Bobruisk. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 148–159.

Введение. Большинство современных геохимических исследований почв городов подразумевает отбор верхнего почвенного горизонта по регулярной сети. Данная система пробоотбора не учитывает особенности рельефа, который является одним из ведущих факторов в перераспределении химических элементов в почвенно-грунтовой покрове города. В Европейском союзе принята следующая методика составления сети пробоотбора, созданная в рамках Европейского проекта по геохимическому картографированию городских почв [1]. Суть методики заключается в наложении на топографическую карту или кадастровый план (обычно масштаба 1 : 5000 или 1 : 10 000) регулярной сети с ячейками 500 м × 500 м в центральных плотно застроенных районах и 1000 м × 1000 м в пригородах [1]. Узлы сетки служат точками отбора проб. Для города типовой площадью около 100–125 км² формируется сеть из 400–500 пробоотборных точек. Такой подход обеспечивает равномерное пространственное покрытие городской территории и стандартизирует процедуру, делая её пригодной для межгородских и международных сравнений, а также для проведения мониторинга и анализа динамики загрязнения. Основное преимущество регулярной сетки – простота планирования работ, воспроизводимость и возможность статистической обработки полученного массива данных. Однако данный метод не учитывает градостроительные, природные и функциональные особенности отдельных зон города, поэтому может быть менее чувствителен к локальным источникам загрязнений и результатам миграционного перераспределения химических элементов. В Беларуси применяют схожие подходы при проведении ландшафтно-геохимического обследования городов, при этом существуют различия в технических нормативных правовых актах относительно требований к плотности сети отбора проб почв и размерам пробных площадок [2].

Альтернативой данному подходу является выделение элементарных ландшафтов в городах, что является основой ландшафтно-геохимического картографирования урбанизированных территорий. Такой подход предполагает деление городской среды на относительно однородные по природным и антропогенным признакам участки, обладающие единым направлением миграции веществ, сходными геохимическими барьерами, источниками загрязнения и режимами аккумуляции элементов. Классическим примером является схема, предложенная М. А. Глазовской [3] и развиваемая А. Н. Курбатовой [4], где городской ландшафт представляется как мозаика элементарных геохимических участков, сформированных сочетанием рельефа, характера застройки, типов почвы, растительности, гидросети и функционирования инженерных коммуникаций. Каждая элементарная ландшафтная ячейка считается геохимически самостоятельным микрорайоном, для которого в дальнейшем проводят специализированный пробоотбор, анализ миграции и аккумуляции тяжёлых металлов либо органических загрязняющих веществ. Например, А. Н. Курбатова рекомендовала формировать каскадную ландшафтно-геохимическую систему с учётом транспортных потоков, плотности застройки, типа функционального использования участка (жилой, промышленный, рекреационный, дорожный), особенностей гидродинамики и дренажной системы городов. Ландшафт как потоковая система – это сложная пространственно-организованная целостность, в которой ведущую роль играют процессы переноса вещества и энергии между различными морфологическими элементами ландшафта. Основу потоковой организации составляет наличие устойчивых направлений и механизмов миграции вещества – воды, растворённых соединений, взвешенных почвенных частиц (включая различные поллютанты), которые передвигаются по определённым миграционным каналам, обусловленным рельефом, фильтрационными свойствами приповерхностных отложений, характером гидрологической сети и зарегулированностью поверхностного стока. Такой функционально-генетический подход позволяет не только дифференцировать городскую территорию по уровням содержания химических веществ в компонентах ландшафта, но и выявлять и интерпретировать локализацию ореолов загрязнения и их связь с источниками поступления поллютантов и геохимическими барьерами на путях миграции химических веществ.

А. Н. Курбатова акцентирует внимание на том, что ландшафтная потоковая система формируется в результате совместного действия природных (например: сток воды, ветровая и гравитационная эрозия, инфильтрация через почву) и антропогенных (строительство, транспортные коммуникации, сброс сточных вод) процессов. В городской среде потоки меняют направление или усиливаются из-за дренажа территорий, канализации вод, выноса и аккумуляции загрязняющих веществ в понижениях рельефа, поймах, оврагах и других аккумуляционных зонах. В рамках этого подхода ландшафт рассматривается не как совокупность статических единиц, а как динамичная система взаимодействующих потоков вещества и энергии, структура и функционирование которой определяются как особенностями природных условий, так и характером и интенсивностью техногенной нагрузки. Анализ потоковых систем, картографирование путей миграции и геохимических барьеров [5], определение функциональных зон позволяют более глубоко понять процессы формирования геохимического поля урболандшафтов и их пространственную структуру.

При анализе потоковых систем необходимо учитывать специфику геохимической обстановки в урболандшафтах. В отличие от естественных условий, в городских почвах и грунтах вследствие поступления и накопления различных загрязняющих веществ изменяются кислотнo-щелочные свойства почвенной среды в сторону подщелачивания (данная особенность характерна и для г. Бобруйска [6]), что является важным фактором, оказывающим влияние на подвижность поллютантов (тяжёлых металлов). От уровня pH зависит форма существования этих элементов, их сорбция и миграционная способность [7]. При снижении pH, т. е. при возрастании кислотности, количество свободных ионов водорода в почвенном растворе увеличивается, и эти ионы вытесняют в почвенный раствор ионы тяжёлых металлов из почвенного-поглощающего комплекса, что способствует их миграции. Как правило, в кислых почвах ($\text{pH} < 5,0$) такие элементы, как кадмий, цинк, свинец, никель, медь, марганец становятся гораздо менее прочно связанными с глинистыми минералами и органическим веществом, и их концентрация в почвенном растворе существенно возрастает. Это происходит по той причине, что при высоком содержании ионов водорода металлы менее интенсивно удерживаются в составе нерастворимых гидроксидов, карбонатов и органо-минеральных соединений, а их десорбция с поверхности почвенных частиц облегчается. Кроме того, при низких значениях pH разрушаются органические и органо-минеральные комплексы, в которых металлы обычно слабо мигрируют, а также снижается микробиологическая активность, способствующая созданию труднорастворимых форм металлов [7]. В результате в кислых дерново-подзолистых почвах металлы демонстрируют значительно большую подвижность, легче вымываются в более глубокие горизонты, попадают в грунтовые воды и становятся доступными растениям.

В урболандшафтах ситуация иная, как отмечалось ранее. Щелочность почв – частое явление в городах из-за обильного поступления золы, пыли со строительных площадок, известкования, влияния бетона и цемента, антигололёдных реагентов. В нейтральной и особенно щелочной среде ($\text{pH} > 7,0$) ряд тяжёлых металлов осаждается в виде малоподвижных соединений, их миграционная активность резко падает, и они в основном фиксируются в верхних горизонтах почвенно-грунтовой толщи. Металлы, такие как свинец, медь, цинк, кадмий и никель, при таких условиях переходят в формы, слабо растворимые в воде, поскольку в щелочной среде их обычные катионы быстро связываются с ионами OH^- , CO_3^{2-} и PO_4^{3-} , образуя нерастворимые или слаборастворимые осадки [7]. Это значительно снижает их радиальную миграцию по профилю. При высокой щёлочности ($\text{pH} 8,0\text{--}8,5$ и выше) металлы не только плохо мигрируют вглубь, но и часто концентрируются в тонком поверхностном слое почв/грунтов, образуя поверхностные скопления, особенно вблизи источников загрязнения (дороги, строящиеся объекты, промзоны) откуда они затем могут переноситься вместе с поступающими атмосферными осадками в нижележащие гипсометрические уровни. Исходя из этого можно говорить о том, что латеральная миграция тяжёлых металлов в городской среде существенным образом преобладает над радиальной, особенно там, где почва подвержена уплотнению, присутствует развитая сеть дорог, тротуаров, заасфальтированных участков и локальных впадин. Латеральная миграция металлов реализуется главным образом с поверхностным стоком, таянием снега, перемещением частиц почвы и пыли ветром. Омывающий поток задерживается рельефом (склоны, низины, придорожные канавы), а сами металлы задерживаются или накапливаются в поверхностных и аккумуляционных зонах – понижениях, у обочин, в руслах технических водотоков. Эта особенность объясняет концентрацию поллютантов в местах сбора воды и осадков, а также приводит к формированию ореолов загрязнения, не обнаруживаемых на участках с однородным регулярным пробоотбором. Особую роль техногенной миграции, происходящей на территории городов, является сеть дренажной канализации, которая существенным образом определяет миграцию и накопление элементов. Вымываясь потоками дождевых вод с вышележащих элементов рельефа, химические элементы перенаправляются в сеть коллекторов, расположенных, как правило, на более низких участках рельефа, где они потенциально могут аккумулироваться.

В итоге в урболандшафтах формируется довольно сложная пространственная структура миграционных потоков химических веществ, геохимических полей и ореолов загрязнения различной интенсивности и конфигурации, которую затруднительно выявить и отобразить традиционными методами исследований и картографирования, но применение современных ГИС-технологий позволяет найти новые подходы к решению данной задачи.

Методика и результаты ГИС-моделирования. Выделение потоковых ландшафтно-геохимических систем (локальных водосборов) в городской среде позволяет оценивать вероятные потоки миграции химических элементов. В гидрологическом аспекте городская среда отличается от природных территорий наличием технических сооружений, которые регулируют поверхностный сток, тем самым перенаправляя потоки миграции элементов. С технической точки зрения городская канализационная сеть состоит из ливневых траншей, труб, дренажных труб и впускных коллекторов, куда с водосбора направляется поверхностный сток. Подобное моделирование ранее производилось для территории г. Минска с целью картографирования исторической гидрографической сети [8].

На основании цифровой модели рельефа (ЦМР) и данных о локализации сети ливневой канализации на территории г. Бобруйска, полученных с генерального плана города, проведён гидрологический ГИС-анализ в среде ArcGIS Pro. Для выделения локальных водосборов на территории города использован гидрологический модуль Arc Hydro. Исходные данные на исследуемую территорию представлены ЦМР, полученной методом фотограмметрической обработки пилотируемой аэрофотосъёмки с пространственным разрешением 2 м. Модель была предварительно очищена от техногенных объектов (мосты, здания и другие сооружения). Процесс (этапы) выделения водосборов представлен на концептуальной схеме моделирования (рис. 1).



Рис. 1. Концептуальная схема моделирования

Fig. 1. Conceptual scheme of modeling

На первом этапе исходная ЦМР была обработана с помощью функции Fill Sinks, которая предназначена для устранения понижений, блокирующих корректное моделирование стока и препятствующих формированию непрерывных дренажных сетей, в результате чего формируется гидрологически корректная модель рельефа (рис. 2). Этот инструмент находит и автоматически заполняет локальные понижения, которые чаще всего возникают как артефакты исходных данных из-за ошибок измерения, недоработок интерполяции или ограниченного разрешения ЦМР. Удаление ложных впадин позволяет трассировать сток воды по поверхности и корректно рассчитывать параметры водосборных бассейнов, а также строить модели потоков и водосборных площадей. Вместе с тем автоматическое заполнение понижений может вызывать эффект сглаживания рельефа, при котором частично нивелируются мелкие или даже некоторые естественные углубления, представляющие ценный морфологический или

гидрологический интерес. Именно поэтому после применения данной процедуры часто требуются дополнительный экспертный анализ и возможное ручное редактирование полученного результата, чтобы компенсировать чрезмерное сглаживание поверхности и сохранить значимые элементы природного рельефа, такие как замкнутые котловины, озёра или иные гидрографические особенности, важные с точки зрения реалистичности построенной модели.

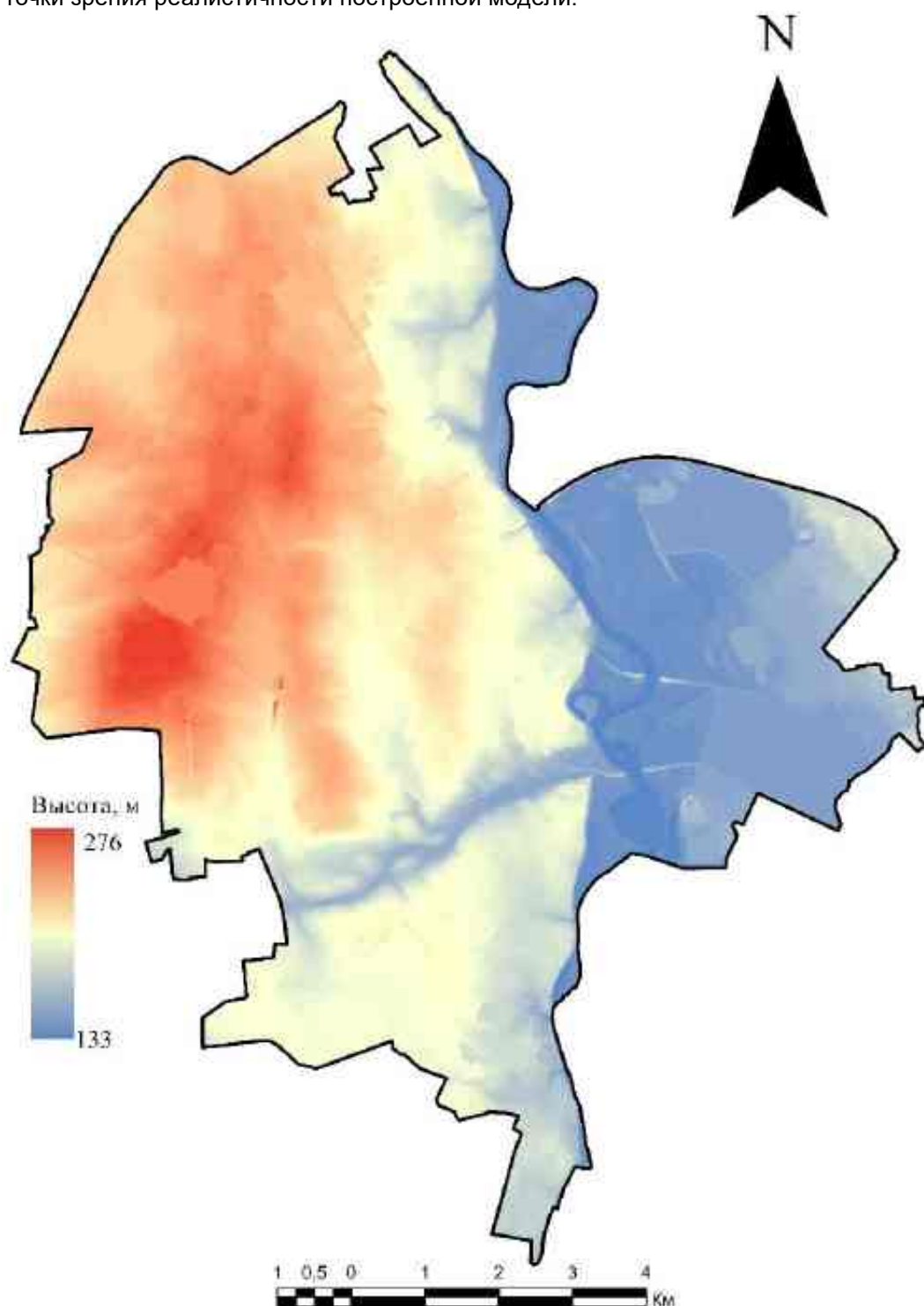


Рис. 2. Модель рельефа территории г. Бобруйска, полученная с применением функции Fill Sinks

Fig. 2. Relief model of the Bobruisk territory obtained by applying the Fill Sinks function

Вторым этапом обработки ЦМР являлось определение направления поверхностного стока для каждой ячейки раstra с помощью инструмента Flow Direction, на основе полученной ранее гидрологически скорректированной модели рельефа. Эта функция реализует алгоритм, который для каждой ячейки анализирует значения высот соседей в восьми направлениях – по сторонам света и диагоналям – и вычисляет величину уклона к каждому из соседей. На основе этого анализа каждой ячейке присваивается значение, соответствующее направлению наиболее крутого спуска, т. е. туда, куда вода потенциально будет стекать естественным образом под действием гравитации. Такой подход основан на классической D8-схеме, что подразумевает возможность движения воды в одном из восьми возможных направлений. В результате работы инструмента формируется специфический растр направлений стока, где пиксели содержат коды направлений, позволяющие моделировать движение воды по поверхности и формировать впоследствии карты накопления стока, водосборных бассейнов и гидрографических сетей. Расчёт направлений учитывает не только реальные физические перепады высот, но и морфологические особенности рельефа: экспозицию склонов, форму и крутизну поверхности, что позволяет более точно симулировать распределение поверхностного стока. Такой алгоритм является стандартом при гидрологическом анализе, так как он обеспечивает баланс между производительностью вычислений и достаточной степенью детализации для большинства прикладных задач, связанных с анализом дренажных систем, выделением водоразделов и автоматическим построением речных сетей. Точность этапа определения направлений стока крайне важна для дальнейших гидрологических построений, поскольку ошибки или артефакты на этом этапе могут привести к необоснованному формированию ложных бассейнов, неправильному направлению потоков и искажению структуры водосборов в итоговой модели поверхности.

На третьем этапе гидрологического моделирования ЦМР был реализован расчёт суммарного количества ячеек, сток которых направлен в каждую конкретную ячейку раstra, при помощи функции Flow Accumulation. Входными данными для этого этапа служит растр направлений стока (полученный на предыдущем этапе) позволяющий определить, от каких ячеек поверхностный сток доходит до каждой текущей ячейки по цепочке вниз по склону. Инструмент Flow Accumulation последовательно просматривает все ячейки выше по потоку для каждого пикселя, суммируя их количество и тем самым рассчитывая площадь водосбора, приходящуюся на данную точку рельефа. В результате каждая ячейка накопительного раstra получает значение, соответствующее числу всех вышележащих ячеек, из которых по направлению стока вода потенциально поступает к данной точке. Полученные значения позволяют наглядно визуализировать основные линии поверхностного стока: чем больше сумма, тем выше вероятность, что эта точка расположена в долине, на русле водотока или на нижнем участке склона, принимающем воду со значительной территории. Минимальные значения, вплоть до нуля, приобретают ячейки, лежащие на водоразделах или возвышенных элементах рельефа, – эти точки не аккумулируют сток, а только отдают его, что позволяет точно определить линии водораздела и внутреннюю структуру водосборных бассейнов. Используемая на этом этапе карта аккумуляции служит основой для построения расчетной сети речных потоков: путем применения порогового значения выделяются те ячейки и участки поверхности, суммарная площадь водосбора которых превышает заданный лимит, что позволяет формировать только основные гидрографические элементы и избежать детализации малозначимых стоковых линий. Таким образом, инструмент Flow Accumulation выполняет критически важную функцию пространственного анализа ЦМР, поскольку обеспечивает определение гидрологической иерархии поверхностного стока, формирует каркас будущей речной сети и позволяет проводить дальнейший анализ морфометрических и гидрологических характеристик рельефа.

Четвёртым этапом гидрологического моделирования стало выделение и моделирование структуры речной сети с помощью инструмента Stream Definition, который формирует растр водотоков на основе ранее рассчитанной сетки аккумуляции стока. Для выделения тех ячеек, которые будут идентифицированы как элементы водотока, используется пороговое значение накопления – только те участки, чья суммарная площадь водосбора превышает установленный минимум, классифицируются как постоянный водоток. Распространённым (стандартным) в практике порогом является 1 % от общей площади рабочей территории, что обеспечивает определение действительно значимых гидрографических элементов при минимальном шуме и избыточной детализации. Использование такого критерия позволяет воспроизвести структуру речной сети, максимально приближенную к наблюдаемым в реальности условиям стока, одновременно минимизируя ложные или малозначимые ветвления и пересыхающие русла, которые могли бы появиться при менее строгом пороге. Инструмент Stream Definition принимает на вход растр аккумуляции (Flow Accumulation) и создаёт специализированный выходной слой, в котором каждому пикселю, соответствующему выявленному водотоку, присваивается уникальное значение, а оставшиеся ячейки получают значение «фонового» класса. Такой подход облегчает последующую сегментацию речной сети – выделение водотоков, их разветвлений, соединений и головных участков. Настройка порога выделения является ключевым моментом, так как допускает адаптацию анализа под

специфику изучаемой местности: повысив порог, можно выделить лишь наиболее крупные, постоянно действующие водотоки, а снизив – учесть и временные или малые ручьи. Выбранное в исследовании значение 1 % от общей площади соответствует рекомендациям авторов используемого модуля [9] и стандартной практике гидрологического моделирования, что гарантирует сравнимость и корректную интерпретацию полученных результатов во всех последующих фазах пространственного анализа.

Пятым этапом пространственного анализа представлялась сегментация водотоков с применением функции Stream Segmentation, позволяющая автоматически разбивать гидрографическую сеть на отдельные последовательные участки – так называемые сегменты. Каждый из таких сегментов формируется между ключевыми топологическими точками, такими как истоки, устья, места слияния или разветвления потоков. Для каждого сегмента при выполнении функции присваивается уникальный идентификатор, который затем сохраняется в атрибутивной таблице слоя. Это обеспечивает возможность индивидуального обращения к каждому участку при последующем анализе гидрологической сети, включая вычисление характеристик отдельных сегментов – длины, среднего уклона, площади водосбора, а также моделирование связанных с ними экологических и потоковых параметров. Разделение на сегменты с уникальными идентификаторами существенно облегчает задачи тематической визуализации: становится возможным дифференцировать участки по цвету в зависимости от состояния, источников загрязнения, потенциальной нагрузки или иных расчетных индикаторов, а также интегрировать эти данные с другими пространственными информационными слоями. Благодаря такому подходу появляются новые возможности для детального картографирования, экологического моделирования и комплексного анализа пространственной организации потоковой сети.

На шестом этапе анализа гидрографической сети с помощью функции Catchment Grid Delineation производилось построение пространственной сетки водосборных территорий, представляющей собой регулярное покрытие исследуемого района ячейками. Эта функция автоматически оценивает направление и площадь стока для каждого сегмента водотока, определённого на предыдущих этапах, используя данные ЦМР и структуру потоковой сети. Каждая ячейка в данной сетке анализируется на предмет того, к какому сегменту водотока направлен основной поверхностный сток с её территории. На основании этого анализа ячейке присваивается уникальный код (идентификатор), который соответствует определённому водосборному участку и, следовательно, «привязывает» её к соответствующему сегменту русловой сети. В результате формируется детализированная модель водосборов, где видно, какие части территории обеспечивают поступление стока в тот или иной участок (сегмент) потоковой сети. Такая пространственная детализация необходима для расчёта площади каждого микробассейна, пространственной интерпретации гидрологических и геохимических процессов, визуализации потоков вещества и загрязняющих компонентов, а также моделирования сценариев распространения загрязнения в системе водотоков. Данный этап интегрирует результаты предыдущей сегментации потоков и позволяет увязать линейные элементы гидросети с поверхностным покровом и его функциональными зонами, что важно для правильной последующей интерпретации пространственных данных.

Седьмой этап моделирования заключался в обработке и векторизации полученной сетки водосборов с использованием функции Catchment Polygon Processing. Эта функция переводит исходный растровый слой, где каждая ячейка имеет код водосборного участка, в векторные объекты, объединяя все соседние ячейки с одинаковыми значениями в единый полигон. По ходу операции автоматически устраняются мелкие артефакты – небольшие ошибочные участки, которые могли образоваться в результате технических неточностей построения сетки или особенностей микрорельефа. Итогом становится компактная карта водосборов, реализованная в виде набора корректных замкнутых векторных полигонов, каждый из которых соответствует своему сегменту территории. Однако автоматическая генерация таких границ нередко приводит к появлению фрагментов с неестественно прямыми или угловатыми линиями, что отчётливо видно в восточной части города (рис. 3), особенно на участках речных долин и в пределах сложного рельефа, что связано с ограничениями цифровой модели местности, сглаживанием и разрешением исходных данных. Поэтому после завершения автоматизированного этапа выполнялась ручная доработка – границы полигонов водосборов корректировались и уточнялись, в первую очередь там, где они пересекают речные долины, огибают русла или существенно расходятся с морфологическими особенностями территории. Для правильной корректировки была построена ЦМР с проведёнными тальвегами, благодаря которым можно более достоверно провести границу. Такая доработка позволяет добиться максимального соответствия полученной структуры реальному положению природных водоразделов.

После данного этапа, если бы территория была естественной, не нарушенной, можно было бы остановиться на этом, но так как изучаемая территория в значительной степени преобразована, необходимо учитывать искусственную зарегулированность поверхностного стока, о чем говорилось ранее. Естественные водосборные границы, выделенные по ЦМР, корректировали с учётом наличия городской

дренажно-коллекторной инфраструктуры. Для этого локальные водосборы, выделенные ранее на базе ЦМР и направления поверхностного стока, подвергали повторной классификации: если в пределах водосборного участка обнаруживали трубы только одного коллектора, то весь такой участок полностью относили к данному коллектору и присваивали ему уникальный идентификатор коллектора (порядковый номер). Также производили ручную корректировку границы водосбора с учётом дренажной канализации. Такой подход позволяет максимально адекватно интегрировать данные гидрологической модели с объектами городской инфраструктуры, так как именно ручная доработка на современном этапе развития ГИС даёт более адекватный результат.

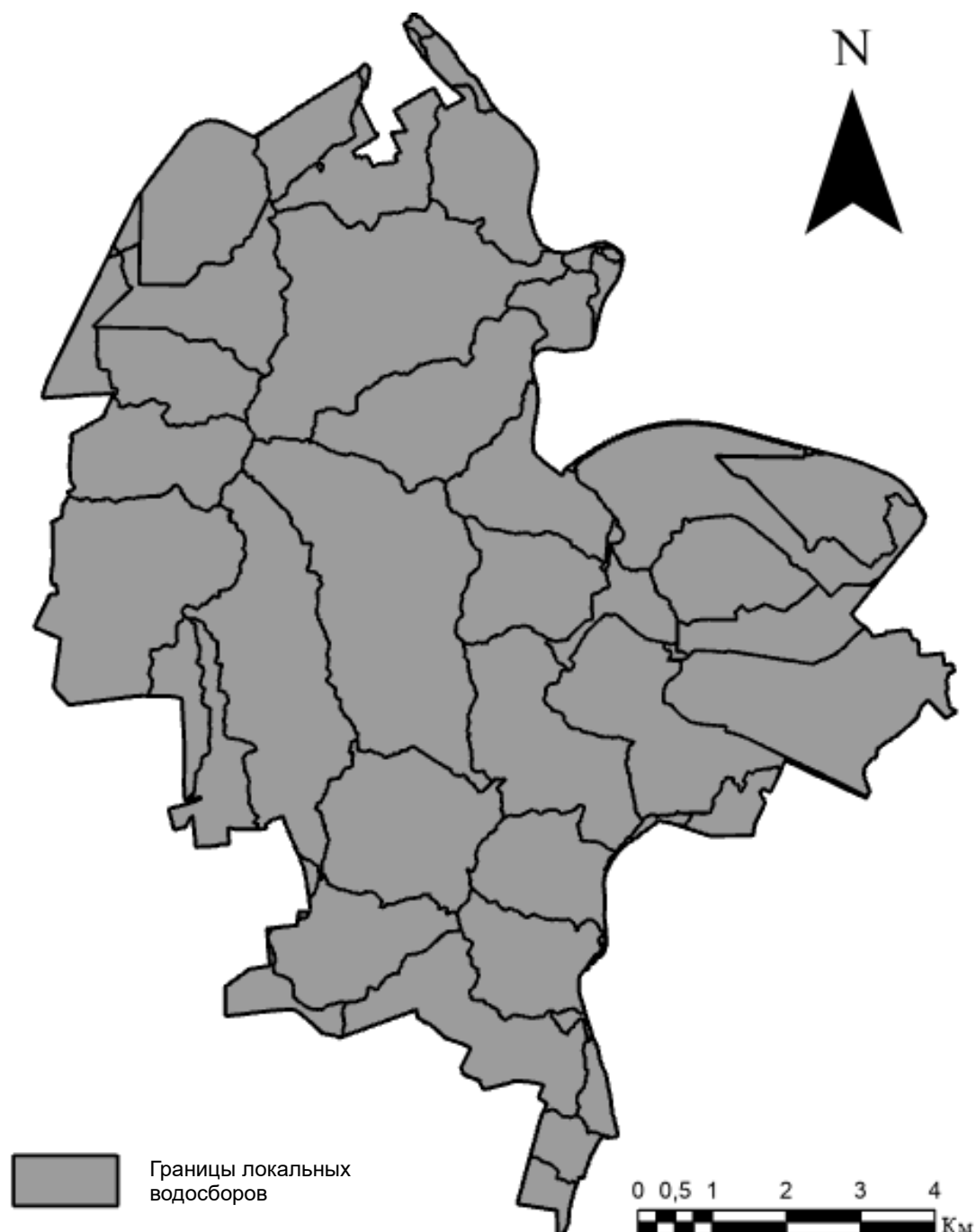


Рис. 3. Схема локальных водосборов на территории г. Бобруйска, полученная в результате автоматической генерации границ водосборов (без ручной корректировки)

Fig. 3. The scheme of local watersheds of the Bobruisk territory obtained as a result of the automatic generation of watershed boundaries (without manual adjustments)

В процессе работы обязательно анализировали направления поверхностного стока и устройство улично-дорожной сети, так как именно дороги, тротуары и связанные с ними искусственные водоотводящие конструкции часто становятся фактическими водосборами для коллекторной системы, направляя сток с обширных территорий в заданные приёмные точки, что особенно выражено при ливневых осадках, когда практически все взвешенные и растворенные вещества уносятся в коллекторные сети. В результате проведённого пространственного анализа и картографирования было выделено 11 водосборных бассейнов, а также несколько участков с неорганизованным поверхностным стоком. Последние участки характеризуются либо внутренним стоком, приводящим к локальной аккумуляции воды и загрязняющих веществ (например: в низинах, зелёных зонах, на неасфальтированных площадях), либо постепенным инфильтрационным просачиванием воды в грунт, что особенно актуально в районах с развитой задернованной поверхностью.

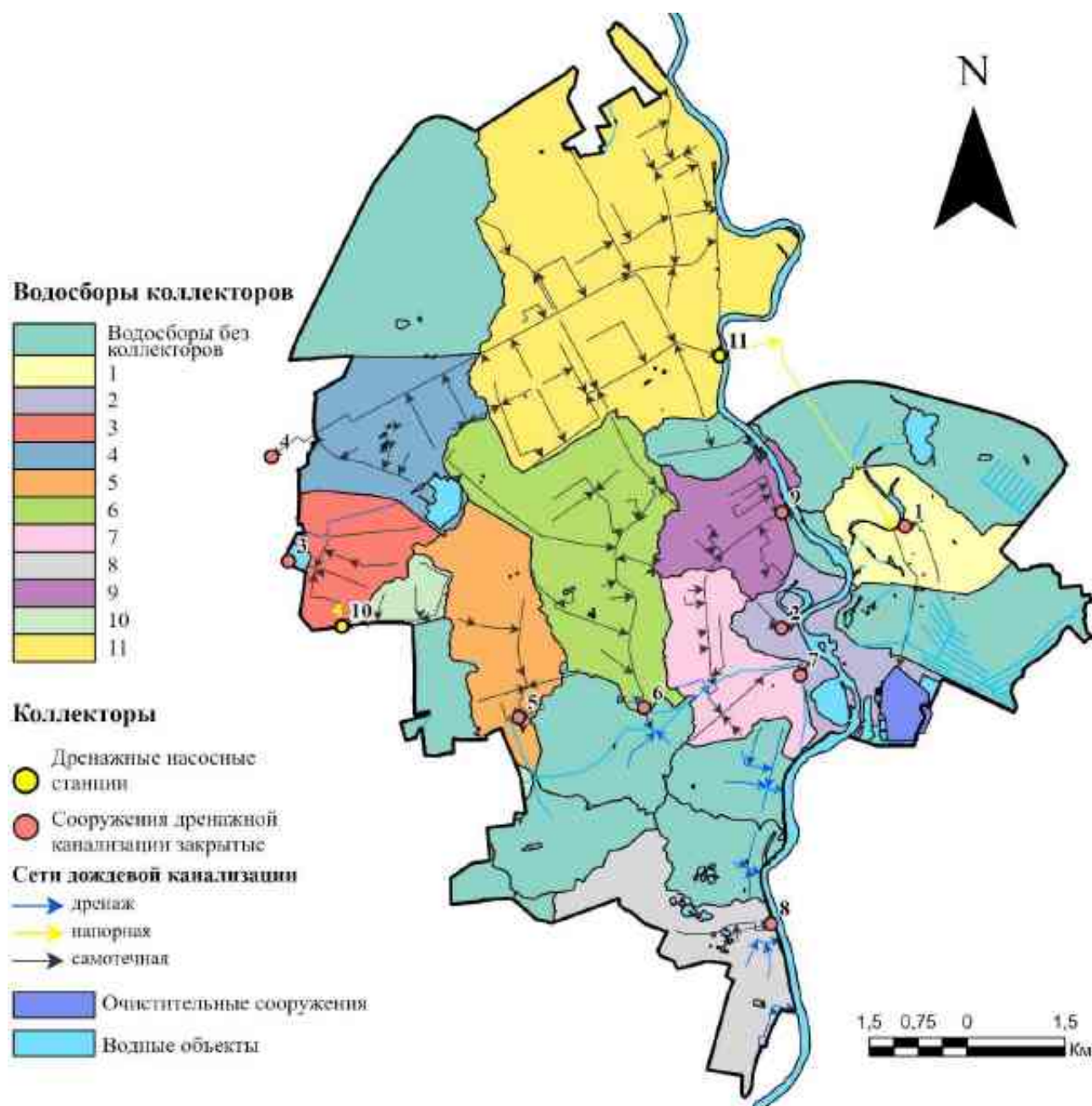


Рис. 4. Современная структура водосборных бассейнов на территории г. Бобруйска с учётом сети дождевой канализации

Fig. 4. The current structure of watersheds of the Bobruisk territory, taking into account the storm drainage network

С точки зрения геохимической структуры урболандшафтов полученная модель позволяет чётко отделить зоны интеграции техногенных потоков вещества – такие участки функционируют как мощные интеграторы смешанных стоков, объединяя фрагменты с различным генезисом почвообразующих пород и химическим составом почвенных горизонтов.

Полученная модель современной структуры водосборных бассейнов с учётом сети дождевой канализации (рис. 4) позволяет не только визуализировать степень зарегулированности поверхностного стока, но и проанализировать специфику проявления техногенных процессов водной миграции и аккумуляции тяжёлых металлов и других загрязняющих веществ в условиях городской среды. Соответственно, выделенные водосборные бассейны на территории города можно рассматривать в качестве *техногенных потоковых ландшафтно-геохимических систем*.

Таким образом, пути водной миграции тяжёлых металлов (в ионной или взвешенной форме [10]) в городах с развитой коллекторной сетью коренным образом отличаются от урболандшафтов с незарегулированным стоком, что определяет формирование специфических паттернов накопления поллютантов. В итоге техногенной трансформации стока именно коллекторные сети приобретают ведущую роль в переносе тяжёлых металлов и других загрязняющих веществ, которые в итоге могут накапливаться в зонах воздействия городских очистных сооружений. Последние являются одним из наиболее проблемных мест и могут оказывать существенное влияние на окружающую среду [11].

К городским очистным сооружениям Бобруйска стекаются воды, в том числе с самой крупной промышленной зоны города – территории завода «Белшина». Это приводит к высокой концентрации техногенного стока, в составе которого может содержаться значительная доля тяжёлых металлов и органических загрязнителей, связанных с производственным циклом предприятия (каучук, сажа и др.). Сток направляется по напорной канализации к очистным сооружениям на востоке города, что делает именно этот водосбор ключевой зоной поступления и аккумуляции загрязняющих веществ.

Полученная ГИС-модель стока в перспективе позволит разрабатывать сети пробоотбора с учётом локальных особенностей миграции загрязняющих веществ, устанавливать возможные источники загрязнения, выявлять пути миграции поллютантов и места локализации техногенных геохимических аномалий и в конечном счете принимать оперативные меры по устранению или минимизации негативных последствий.

Заключение. Традиционные регулярные схемы пробоотбора, применяемые для мониторинга городских почв, часто не учитывают рельефно-гидрологические особенности городских территорий и инженерную инфраструктуру. Более точный анализ возможен при делении территории на потоковые ландшафтно-геохимические системы, сформированные не только природными, но и техногенными процессами. ГИС-анализ, основанный на цифровой модели рельефа и интеграции данных о дренажных системах, позволяет выделить водосборные участки, отражающие реальные потоки миграции загрязняющих веществ в городах.

В пределах г. Бобруйска выделено 11 водосборных бассейнов, соответствующих дренажным коллекторам, а также участки с неорганизованным поверхностным стоком. Каждый из таких участков функционирует как самостоятельная потоковая ландшафтно-геохимическая система – интегратор поступающих с поверхности загрязняющих веществ, включая тяжёлые металлы и органические поллютанты. Взаимосвязь рельефа и городской инфраструктуры определяет направления техногенных миграций: загрязняющие вещества поступают в ливневые коллекторы, где могут концентрироваться, аккумулироваться и далее транспортироваться к городским очистным сооружениям, формируя локальные геохимические аномалии.

Особенности миграции загрязняющих веществ в урболандшафтах в значительной мере определяются техногенным влиянием, проявляющемся в трансформации рельефа, сооружении коллекторных систем, что ведёт к преобладанию латеральной (горизонтальной) миграции над радиальной.

Автоматизированное выделение водосборов и их последующая экспертная корректировка позволяют максимально приближённо отразить реальные техногенные потоки вещества, что важно для мониторинга техногенных токов загрязнения и локализации мест накопления. Полученная модель может использоваться для оптимизации системы экологического контроля, корректировки пробоотборных сеток с учётом реальных путей миграции загрязняющих веществ, а также для проектирования инженерных решений по управлению стоками и снижению техногенных нагрузок на городские очистные сооружения.

ГИС-моделирование потоковых ландшафтно-геохимических систем интегрирует природную морфологию и антропогенную инфраструктуру города. Такой подход позволяет выявлять функциональные зоны накопления и миграции загрязняющих веществ, способствует более глубокому пониманию геохимии урболандшафтов, осознанному планированию очистных мероприятий и научно обоснованной интеграции экологических и инженерных данных для повышения качества городской среды и здоровья населения.

Список использованных источников

1. Demetriades, A. Urban Topsoil Geochemical Mapping Manual (URGE II). EuroGeoSurveys / A. Demetriades, M. Birke. – Brussels, 2015. – 52 p.
2. Хомич, В. С. О методах изучения и оценки загрязнения почв в Беларуси / В. С. Хомич // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 98–106.
3. Глазовская, М. А. Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов / М. А. Глазовская. – М. : Изд-во МГУ, 1964. – 229 с.
4. Курбатова, А. С. Ландшафтно-экологические основы формирования градостроительных структур / А. С. Курбатова. – М. : Маджента, 2004. – 400 с.
5. Глазовская, М. А. Геохимические барьеры в почвах равнин, их типология, функциональные особенности и экологическое значение / М. А. Глазовская // Вестник Московского университета. Серия 5, География. – 2012. – № 1. – С. 8–14.
6. Кухлевский, Е. А. Анализ пространственного распределения кислотности почв г. Бобруйска / Е. А. Кухлевский, А. А. Карпиченко // ГИС-технологии в науках о Земле : материалы респ. науч.-практ. семинара студентов и молодых ученых, Минск, 16 нояб. 2022 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: А. А. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Мн. : БГУ, 2022. – С. 187–190.
7. Путилина, В. С. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции : аналит. обзор / В. С. Путилина, И. В. Галицкая, Т. И. Юганова. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2009. – 155 с.
8. Овчарова, Е. П. Оценка трансформации пространственной структуры водосборов урбанизированной территории с применением гидрологического моделирования в ГИС на примере г. Минска / Е. П. Овчарова, С. В. Алисиевич, Н. В. Ковальчик // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2025. – № 1. – С. 24–34.
9. Maidment, D. Arc Hydro: Overview of Terrain Preprocessing Workflows / D. Maidment, D. Djokic D. – Redlands, CA : Esri, 2019. – 18 p.
10. Груздков, Д. Ю. Оценка миграции тяжелых металлов в почвах / Д. Ю. Груздков, Л. А. Ширкин, Т. А. Трифонова // Вестник Московского университета. Серия 17, Почвоведение. – 2009. – № 4. – С. 40–45.
11. Басалай, Е. Н. Влияние городских очистных сооружений на природные воды и почвы / Е. Н. Басалай, В. С. Хомич. – Мн. : Бел. навука, 2025. – 201 с.

References

1. Demetriades A., Birke M. Urban Topsoil Geochemical Mapping Manual (URGE II). EuroGeoSurveys. Brussels Publ., 2015, 52 p.
2. Khomich V. S. O metodah izucheniya i ocenki zagryazneniya pochv v Belarusi [About the methods of studying and assessing soil pollution in Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 98–106. (in Russian)
3. Glazovskaya M. A. *Geohimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovaniya prirodnih landshaftov* [Geochemical foundations of typology and methods for studying natural landscapes]. Moscow, MSU Publishing House, 1964, 229 p. (in Russian)
4. Kurbatova A. S. *Landshaftno-ekologicheskie osnovy formirovaniya gradostroitel'nyh struktur* [Landscape-ecological foundations of forming urban structures]. Moscow, Madzhenta Publ., 2004, 400 p. (in Russian)
5. Glazovskaya M. A. *Geohimicheskie bar'ery v pochvah ravnin, ih tipologiya, funktsional'nye osobennosti i ekologicheskoe znachenie* [Geochemical barriers in plain soils, their typology, functional features, and ecological significance]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, 2012, no. 1, pp. 8–14. (in Russian)
6. Kukhlevsky E. A., Karpichenko A. A. Analiz prostranstvennogo raspredeleniya kislotnosti pochv g. Bobrujska [Analysis of the spatial distribution of soil acidity in Bobruisk]. *GIS-tehnologii v naukah o Zemle: materialy respublikanskogo nauchno-prakticheskogo seminar studentov i molodyh uchenykh, Minsk, 16 noyabrya 2022 g.* [GIS technologies in Earth sciences: Proceedings of the republican scientific and practical seminar of students and young scientists, Minsk, November 16, 2022]. Belarusian State University; ed. board: A. A. Sazonov (ed.-in-chief) [et al.], Minsk, BSU Publ., 2022, pp. 187–190. (in Russian)
7. Putilina V. S., Galitskaya I. V., Yuganova T. I. *Adsorbtsiya tyazhelykh metallov pochvami i gornymi porodami. Harakteristiki sorbenta, usloviya, parametry i mekhanizmy adsorbtsii: analiticheskij obzor* [Adsorption of Heavy Metals by soils and rocks. sorbent characteristics, conditions, parameters, and adsorption mechanisms: Analytical review]. Novosibirsk, GPNTPB SB RAS Publ., 2009, 155 p. (in Russian)
8. Ovcharova E. P., Alisevich S. V., Kovalchik N. V. *Ocenka transformatsii prostranstvennoy struktury vodosborov urbanizirovannoy territorii s prime-neniem gidrologicheskogo modelirovaniya v GIS na primere g. Minska* [Assessment of the transformation of the spatial structure of watersheds in urbanized areas using hydrological modeling in GIS (case study of Minsk)]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya = Journal of Belarusian State University. Geography. Geology*, 2025, no. 1, pp. 24–34. (in Russian)
9. Maidment D., Djokic D. Arc Hydro: Overview of Terrain Preprocessing Workflows. Redlands, CA, Esri Publ., 2019, 18 p.

10. Gruzdkov, D. Yu., Shirkin L. A., Trifonova T. A. *Ocenka migracii tyazhelyh metallov v pochvah* [Assessment of heavy metal migration in soils]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17, Pochvovedenie = Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science*, 2009, no. 4, pp. 40–45. (in Russian)
11. Basalai E. N., Khomich V. S. *Vliyanie gorodskih ochestnyh sooruzhenij na prirodnye vody i pochvy* [Impact of urban wastewater treatment facilities on natural waters and soils]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2025, 201 p. (in Russian)

Информация об авторах

Кухлевский Егор Александрович – аспирант кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: kuhllevskiegor@gmail.com

Карпиченко Александр Александрович – кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой физической географии мира и образовательных технологий факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: karpi@bsu.by

Information about the authors

Egor A. Kuhllevski – Postgraduate student at the Department of Soil Science and Geographic Information Systems, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University (16, Leningradskaya St., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: kuhllevskiegor@gmail.com

Aliaksandr A. Karpichenka – Ph. D. (Geography), Associate Professor, Head of the Department of Physical Geography of the World and Educational Technologies, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University (16, Leningradskaya St., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: karpi@bsu.by
