

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДНОГО СТОКА МАЛОЙ ГОРОДСКОЙ РЕКИ СЕТУНИ (МОСКВА)

И.С. Денисова¹, О.Д. Лошков², М.А. Самохин³, С.Р. Чалов⁴

^{1–4} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра гидрологии суши

¹ Институт водных проблем РАН

¹ Инженер; аспирант; e-mail: ira.denisova@icloud.com

² Студент; e-mail: ollo107@mail.ru

³ Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: gidromiha@mail.ru

⁴ Проф., д-р геогр. наук; e-mail: srchalov@geogr.msu.ru

Рост московского мегаполиса определил глубокие изменения гидрологических процессов рек, расположенных в черте города. В статье на основе данных мониторинга на реке Сетунь, осуществлявшегося на сети станций в бассейне в 2019–2024 гг., проводится оценка формирования речного стока в условиях урбанизации. Распространение непроницаемых поверхностей (от 25 до почти 40% водосборов разных постов), влияние промышленных и коммунальных стоков объясняет формирование особого типа водного режима, который характеризуется определяющей ролью летних дождевых паводков по сравнению с половодьем, их большим количеством (до 29 в год) и малым временем бассейнового добегания. С применением модели расчленения стока GrWat выявлено, что двукратное увеличение плотности жилых районов и непроницаемых территорий вниз по течению реки не влияет на соотношение источников питания реки. Свойствами формирующегося водного режима являются размытие сезонной структуры гидрографа и трансформация грунтовой составляющей стока в техногенно преобразованную, отличающуюся большим по сравнению с естественными условиями объемом стока. В разные годы на разных станциях она определяет от 50 до 75% годового стока, объем весеннего половодья – от 3,8 до 16,7%, а дождевого стока – от 20 до 33,3%. По сравнению со второй половиной XX в., увеличение больше чем на 15% (на 30 км²) площади селитебных территорий, зимние оттепели, в том числе вызванные региональными климатическими изменениями, определили двукратное снижение водности весеннего половодья и почти десятикратный рост повторяемости паводков. Все это приводит к ежегодным наводнениям в долине реки и ущербу инфраструктуре города, что определяет актуальность результатов мониторинга для городского хозяйства.

Ключевые слова: городская гидрология, урбанизированные территории, GrWat, паводки, экстремальные дожди

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.10

ВВЕДЕНИЕ

Московская агломерация характеризуется плотной застройкой, что приводит к значительной трансформации водного баланса. Формирование стока на урбанизированных территориях изучено не столь систематически, как на водосборах с ненарушенными условиями его формирования [Болгов и др., 2020]. В условиях городского острова тепла наблюдается изменение интенсивности и продолжительности осадков [Бруслова и др., 2019; Стулов, 1993; Ярынич и др., 2023; Varentsov et al., 2018], проявляющееся в их росте по сравнению с прилегающими к городу территориями. Увеличивается повторяемость экстремальных осадков, составляющая более 50 мм в сутки. К началу XXI в. отмечались изменения режима р. Москвы, годовой сток которой вырос почти на 10% по сравнению с нормой, а в летне-осенний период – на 27% [Коронкевич и др., 2019].

Отмечалось, что 1% роста площади урбанизированных ландшафтов на современном этапе приводит к аналогичному увеличению стока, а 1% роста водонепроницаемых территорий в составе урбанизированных ландшафтов – к увеличению стока на 2–3%. Объем весеннего половодья вырос менее чем на 10% при снижении доли вклада в годовой сток в 1,4 раза [Коронкевич, Мельник, 2015].

Указанные изменения в значительной мере коснулись и малых рек Московского региона. Многие из них в последние десятилетия характеризовались крайне негативной экологической обстановкой. Увеличение стока талых и ливневых вод послужило причиной активизации эрозионных процессов на водосборе, повышения стока наносов [Цыпленков и др., 2021]. На качество воды существенное воздействие оказывает поверхностный смыв с автодорог [Цыпленков и др., 2021], отличающихся высоким

уровнем накопления токсичных веществ [Власов и др., 2022]. В то же время информация по малым рекам Москвы крайне ограничена в условиях полного отсутствия здесь станций государственной гидрологической сети. Созданная силами сотрудников географического факультета МГУ система гидролого-геохимического мониторинга, функционирующая в бассейне крупнейшего притока Москвы – р. Сетуни с 2019 г. [Касимов и др., 2023], позволила получить основу для изучения малой городской реки, расположенной целиком в пределах Московской агломерации [Sokolov et al., 2021; Tereshina et al., 2020]. Именно анализ накопленных массивов данных для характеристики современных особенностей формирования речного стока стал целью настоящей работы. В ней решались задачи анализа землепользования на разных участках водосбора р. Сетуни и их влияния на речной сток; исследование источников питания р. Сетуни в разные годы путем реализации модели GrWat; определение степени трансформации речного стока р. Сетуни в начале XXI в.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Физико-географические характеристики бассейна р. Сетуни. Сетунь является крупнейшим правым притоком Москвы-реки в черте столицы и во

всем верхнем и среднем течении. Ее длина составляет 38 км, а площадь водосбора – 190 км². Река протекает через городские районы Солнцево, Ново-Переделкино, частично в Одинцовском районе Московской области, пересекает МКАД в районе Сколковского шоссе, затем Аминьевское шоссе, Минскую улицу и впадает в р. Москву ниже Бережковского моста. Основные притоки Сетуни – р. Сетунька (в верховьях), Навершка и Раменка (в нижнем течении). Притоки р. Сетунь зарегулированы системой прудов, в некоторых случаях они в значительной мере канализованы (например, сток р. Навершки).

Значительная часть площади водосбора р. Сетуни находится на урбанизированных территориях. Для пространственного анализа водосбора Сетуни (рис. 1) были использованы данные OpenStreetMap [OpenStreetMap, 2024] для оценки землепользования и типов земельного покрова. Выделялось девять категорий: 1) природные заказники; 2) земли под застройку (заброшенная территория, которая ранее использовалась, или незастроенная территория, которую планируется застраивать); 3) кладбища; 4) строительные площадки; 5) промышленные зоны; 6) свалки; 7) водоемы; 8) жилые зоны; 9) лесные массивы. Помимо этого, были проанализированы доли водонепроницаемых поверхностей в бассейне.

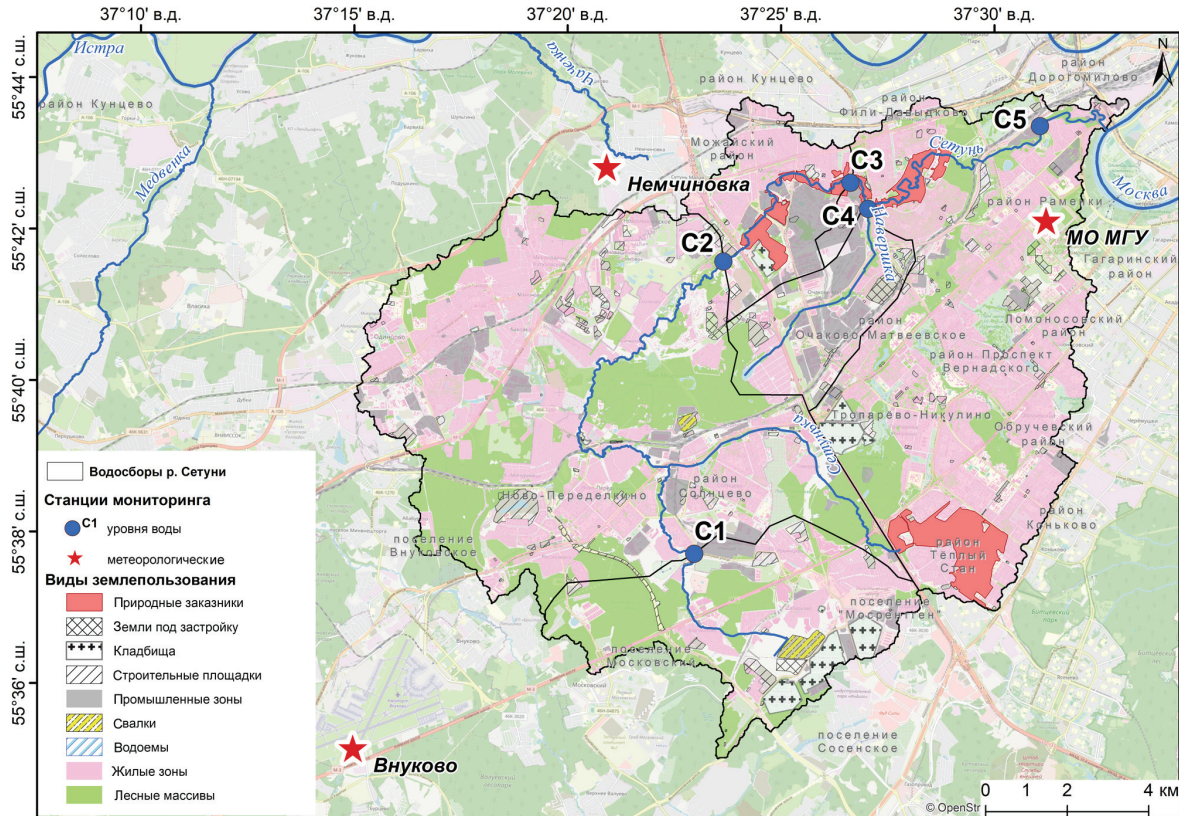


Рис. 1. Станции мониторинга и типы землепользования в бассейне р. Сетуни

Fig. 1. Gauging stations and land use types within the Setun River basin

Мониторинговые данные. Данные на сети станций мониторинга были получены с помощью автоматизированных датчиков уровня воды НОВО U20L, Solinst Levellogger 5 Junior и Keller DCX-22-ECO с дискретностью записи 30 мин, начиная с 14 ноября 2019 г. (табл. 1). Всего в статье задействована информация по пяти постам, четыре из которых расположены на р. Сетуни (С1, С2, С3 и С5) и один (С4) – на р. Навершка, протекающей в одной из наиболее урбанизированных частей водосбора. С учетом различных факторов, в первую очередь вандализма, из-за которого были утрачены некоторые датчики, продолжительность записи на разных

постах отличается. По станциям С1 и С4 ряды не покрывают целиком ни один полный год из всех лет мониторинга.

Логгеры фиксируют суммарное давление воды и атмосферы. Для расчета уровня воды над логгером производилась барометрическая компенсация (1):

$$h = (P_{\text{logger}} - P_0) \cdot 0,0101972, \tag{1}$$

где h – уровень воды над логгером (м), P_{logger} – суммарное давление воды и атмосферы (гПа), P_0 – величина атмосферного давления (гПа) на метеостанции. Компенсация проводилась по данным ближайших метеостанций: для постов выше МКАД была выбрана метеостанция Внуково, ниже МКАД – Балчуг.

Таблица 1

Описание автоматизированной сети гидрологических станций

Станция	Река	Координаты, с. ш., в. д.	Площадь водосбора, км ²	Длина реки до устья, км	Периоды измерений, даты
С1	Сетуни	55.63208, 37.38753	23,64	32	14.12.2019 – 28.02.2020
С2	Сетуни	55.69654, 37.39623	99,59	17	14.12.2019 – 05.03.2022
С3	Сетуни	55.71449, 37.44519	112,01	12	14.11.2019 – 26.06.2020 24.11.2020 по н.в.
С4	Навершка	55.70948, 37.45264	11,2	0,1	24.11.2020 – 12.07.2021 30.09.2021 – 11.04.2022
С5	Сетуни	55.72790, 37.51862	180,14	2	14.11.2019 по н.в.

На всех постах эпизодически, в разные фазы водного режима, измерялись расходы воды методом «скорость – площадь» при помощи измерителя скорости потока ИСП-1М. Эти измерения позволили получить зависимости $Q = f(H)$ и перейти к расходам воды за весь период мониторинга с шагом 30 мин.

Уровни воды, записанные логгерами, были пересчитаны в расходы воды для всех станций мониторинга. За основу были взяты фактические измерения расходов воды, которые в дальнейшем позволили выявить взаимосвязь между уровнями (H , м) и расходами воды (Q , м³/с) (2–6):

$$Q_{C1} = 2,026H - 0,299, \tag{2}$$

$$Q_{C2} = 3,218H - 1,930, \tag{3}$$

$$Q_{C3} = 5,274H - 4,058, \tag{4}$$

$$Q_{C4} = 2,887H - 1,603, \tag{5}$$

$$Q_{C5} = \begin{cases} 8,935H^2 - 4,056H, & \text{если } H < 1,07, \\ 15H - 10,15, & \text{если } H > 1,07 \end{cases}, \tag{6}$$

где Q – расход воды (м³/с), H – уровень воды над самой глубокой точкой створа (м).

Для собранных рядов была проведена обработка при помощи фильтра Савитцки–Голея [Kong et al., 2022; Savitzky, Golay, 1964], реализованного в пакете *phenofit* языка программирования *R*, для удаления выбросов и сглаживания рядов (удаление

краткосрочных и слабоинтенсивных колебаний расходов воды). Использование весов позволяет определять значимость конкретной величины расхода для дальнейшего сглаживания: веса изменяются от 0 до 1, где 0 – это полное игнорирование значений. Для распределения весов по временным рядам с помощью ПО STATISTICA был определен размах (без выбросов) изменения расходов за единицу времени (30 мин). Значениям, выходящим за данный диапазон, присваивались веса, равные 0,2. Если встречалось три значения расхода с весом 0, то это определялось как выброс, вес которого становился равным 0.

Для станций и лет, где имелся достаточно продолжительный круглогодичный ряд измерений (например, С2 – 2021, С3 – 2021–2023, С5 – 2020–2023 гг.), проводилось выделение фаз водного режима путем реализации алгоритма автоматизированного расчленения гидрографа GrWat, определяющего подземную составляющую стока, весеннее половодье, паводки (дождевые и оттепельные). В основу модели заложен подход, предложенный Б.И. Куделиным [Рец и др., 2022]: во время подъема уровня речные воды создают подпор связанным с ними грунтовыми водам, подземное питание резко уменьшается и на пике половодья принимается равным 0. На спаде половодья воды из водоносных слоев вновь начинают поступать в русло, подземное питание

восстанавливается. При этом учитывалось, что в условиях города подземная составляющая стока сочетает в себе воды, поступающие в русловую сеть как из подземных горизонтов, так и различных утечек из водопроводных и канализационных систем, и вследствие технического перераспределения воды (полив улиц, топление снега, мойки машин и др.).

Задача была реализована с использованием языка программирования R с программным пакетом *GrWat* [Samsonov, 2024], при этом расход воды был получен на основе обработки данных логгеров, а также метеорологических данных, содержащих суточное количество осадков (в мм) и температуры (в °C), полученных с метеостанций МГУ, Немчиновки и Внуково методом кригинга.

В программе все данные были приведены к ежедневным наблюдениям, которые затем были разделены на водохозяйственные годы. Каждый год отсчитывается с начала половодья в текущем календарном году до начала половодья в следующем году. Выходные файлы содержат информацию о расчетном грунтовом стоке, быстром стоке талой составляющей, быстром стоке дождевых и оттепельных паводков, а также о характеристиках водного режима [Чинова и др., 2021; Рец и др., 2022]. Данный метод основан на предположении, что реакция базисного стока на осадки или снеготаяние возникает гораздо медленнее по сравнению с быстрым стоком. Основным калибровочным параметром модели является параметр интенсивности спада/подъема расхода воды за счет базисной составляющей, что соответствует концепции кривых спада базисного стока. Начало и конец оттепельных и дождевых паводков в период зимней и летней межени определяется в модели по резкому градиенту изменения расхода воды, отделение паводка происходит по линейной интерполяции. Интенсивность спада/подъема расхода воды за счет базисной составляющей варьировала (*grad1*) от 1,5 до 26% сут⁻¹, тот же параметр для периода спада половодья (*grad2*) составил от 0,5 до 2% сут⁻¹; количество дней с начала половодья, за которое проходит основная волна половодья, составило 5–30 дней; количество дней с даты максимального расхода, когда действует *grad2*, после этого переходит на *grad1* – от 5 до 20 дней; максимально допустимое повышение базисной составляющей по сравнению с меженным значением (после спада половодья) составило 150%.

Массивы данных за период 2019–2024 гг. сравнивались с данными функционировавшего в 1979–1988 гг. гидрологического поста «Сложные эфиры», которые представляют собой ряд среднесуточных расходов воды с пропусками (полностью отсутствуют 1982 и 1986 гг. и несколько дат: 01.03.1981,

01.03.1985, 08.06.1985, 05.06.1988). Пост был расположен в непосредственной близости от поста С5 мониторинговой сети МГУ (рис. 1) на беспроточном участке. Для сравнения ряды данных 2019–2024 гг. приводились к суточным данным путем осреднения значений, полученных в 8:00 и 20:00 часов за каждый день периода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геопространственный анализ бассейна Сетуни показал существенные отличия типов землепользования в разных частях водосбора (табл. 2). Плотность жилых районов увеличивается вниз по течению – относительная доля жилых районов на всем водосборе составляет 29,1% на станции С5, тогда как на водосборе С1 ее значение составляет 14,8%. Это приводит к значительному увеличению доли непроницаемых зон – от 24,5% на станции С1 до 37,8% на станции С5.

В некоторых районах высока концентрация промышленных зон. Так, водосбор р. Навершки (С4) целиком расположен на территории промышленных зон Очаково, Южное Очаково, Северное Очаково со множеством заводов, фабрик, ТЭЦ и т. д. Более 23% площади водосбора Навершки занимают промышленные зоны, а для остальных бассейнов их значение колеблется от 5 до 7%. В среднем на анализируемых водосборах доля территорий, покрытых растительностью, составляет примерно 22–26% от общей площади, в бассейнах малых притоков Сетуни, расположенных в нижней части водосбора в пределах МКАД, она еще меньше (так, в бассейне Навершки, станция С4, она падает до 13%). В водосборах С3–С5 имеются природные заказники, но их площади незначительны.

Дождевые и оттепельные паводки, наблюдавшиеся на р. Сетуни в 2020–2023 гг. (табл. 3), имели в основном малую продолжительность – обычно только 1–2 часа. Максимальные годовые расходы воды в нижнем створе С5 в разные годы варьировали от 11,2 до 18,36 м³/с и всегда были приурочены к дождевым паводкам, при этом наибольшие значения наблюдались в 2020 и 2023 гг. при выпадении экстремальных дождевых осадков. Высота пиков была охарактеризована отношением измеренного максимального расхода к минимальному, максимальные значения которого во все годы наблюдались в створе С3 и достигали максимума здесь в 2021 г. (34,9). Снижение внутригодовой неравномерности стока при переходе от створа С3 к С5 определяется ростом водосбора и вкладом в водность притока р. Сетуни – р. Раменки, в наибольшей степени зарегулированной (именно здесь расположены основные пруды бассейна).

Таблица 2

Типы землепользования на водосборах р. Сетуни в 2024 г.

Тип землепользования	Общая площадь, км²	Доля общей площади бассейна Сетуни, %	Площадь, км² (%)*				
			C1	C2	C3	C4	C5
Природные заказники	5,7	3,0	0	0	1,3 (1,2)	0,004 (0,03)	5,7 (3,2)
Земли под застройку	1,3	0,7	0,2 (0,7)	0,4 (0,4)	0,5 (0,5)	0,5 (4,5)	1,2 (0,7)
Кладбища	3,4	1,8	1,1 (4,7)	1,2 (1,2)	1,7 (1,5)	0	2,6 (1,4)
Строительные площадки	6	3,2	0,9 (3,7)	3,3 (3,3)	3,5 (3,2)	0,4 (3,9)	5,7 (3,1)
Промышленные зоны	13,3	7,0	1,3 (5,6)	5,4 (5,4)	8 (7,1)	2,7 (23,8)	12,6 (7)
Свалки	0,6	0,3	0,5 (2)	0,6 (0,6)	0,6 (0,6)	0	0,6 (0,4)
Водоемы	0,01	0,01	0	0	0	0	0,01 (0,01)
Жилые зоны	55	29,5	3,5 (14,8)	24,8 (24,9)	28,4 (25,4)	1,7 (14,7)	52,3 (29,1)
Лесные массивы	44,2	23,3	6,3 (26,7)	25,3 (25,4)	26,9 (24)	1,5 (13,4)	40,5 (22,5)
Проницаемые покрытия, %	—	—	26,7	25,4	24	13,4	22,5
Непроницаемые покрытия, %	—	—	24,6	32,6	33,9	29,5	37,9

Примечание. * В скобках указан процент от площади водосбора.

Таблица 3

Описательные статистики водного режима р. Сетуни, основанные на высокочастотных данных

Тип землепользования	Общая площадь, км²	Доля общей площади бассейна Сетуни, %	Площадь, км² (%)*				
			C1	C2	C3	C4	C5
Природные заказники	5,7	3,0	0	0	1,3 (1,2)	0,004 (0,03)	5,7 (3,2)
Земли под застройку	1,3	0,7	0,2 (0,7)	0,4 (0,4)	0,5 (0,5)	0,5 (4,5)	1,2 (0,7)
Кладбища	3,4	1,8	1,1 (4,7)	1,2 (1,2)	1,7 (1,5)	0	2,6 (1,4)
Строительные площадки	6	3,2	0,9 (3,7)	3,3 (3,3)	3,5 (3,2)	0,4 (3,9)	5,7 (3,1)
Промышленные зоны	13,3	7,0	1,3 (5,6)	5,4 (5,4)	8 (7,1)	2,7 (23,8)	12,6 (7)
Свалки	0,6	0,3	0,5 (2)	0,6 (0,6)	0,6 (0,6)	0	0,6 (0,4)
Водоемы	0,01	0,01	0	0	0	0	0,01 (0,01)
Жилые зоны	55	29,5	3,5 (14,8)	24,8 (24,9)	28,4 (25,4)	1,7 (14,7)	52,3 (29,1)
Лесные массивы	44,2	23,3	6,3 (26,7)	25,3 (25,4)	26,9 (24)	1,5 (13,4)	40,5 (22,5)
Проницаемые покрытия, %	—	—	26,7	25,4	24	13,4	22,5
Непроницаемые покрытия, %	—	—	24,6	32,6	33,9	29,5	37,9

Примечание. * В скобках указан процент от площади водосбора.

Количество паводков в 2020–2023 гг. менялось на разных постах в разные годы от 19 до 40 в год, из них число оттепельных составляло от 4 до 18, дождевых – от 16 до 29 (табл. 3), т. е. количество дождевых паводков почти в 2–3 раза превышает количество оттепельных паводков. Число их в отдельные годы снижается вниз по течению р. Сетуни (например, от 29 до 22 между постами C3

и С5 в 2021 г.), в другие – увеличивается (в 2022 и 2023 гг. – от 17 до 23 и от 15 до 21 соответственно). Подобные изменения связаны с неравномерным выпадением осадков в пределах бассейна, что было подробно рассмотрено на примере режима выпадения осадков мая 2020 г. и июня 2021 г. с использованием радарных данных и модели COSMO [Чалов и др., 2023]. Высокий процент водонепроницаемых поверхностей в нижнем течении (до 40%) способствует ускорению поверхностного стока и резкому увеличению пиков дождевых паводков (отношение максимальных расходов воды к среднегодовым в замыкающем створе обычно почти в 1,5–2 раза выше, чем на вышерасположенных постах).

Расчленение гидрографов (рис. 2) показало, что ведущую роль в формировании годового стока Сетуни в настоящее время играет подземная составляющая, определяющая в среднем от 50 до 75% годового объема. Столь высокие ее значения объясняются сильной зарегулированностью стока и большим объемом поступления вод из различных городских систем (водоотведение, сточные воды, ливневая сеть), за счет утечек из водопроводных и канализационных систем, вследствие технического перераспределения воды (полив улиц, топление снега, мойки машин и др.). Другой чертой питания реки является боль-

шая роль летних дождевых паводков по сравнению с половодьем – во время прохождения половодья расходы воды ниже, чем в периоды дождевых паводков (табл. 4). Объем весеннего половодья менялся в разные годы на разных постах от 3,8 до 16,7% от годового стока, а объем дождевого стока – от 20 до 33,3%. В 2020 г. после практически отсутствующего весеннего половодья (3,8% от годового стока) за счет прохождения экстремальных паводков 29–31 мая доля дождевых паводков была максимальна (25% на нижнем посту С5). Если снижение доли половодья и увеличение роли дождевых паводков в целом характерно для бассейна Верхней Волги и Московского региона и объясняется климатическими причинами [Болгов и др., 2020], то количество дождевых и оттепельных паводков в Москве значительно выше региональных характеристик – на реках Верхней Волги в среднем отмечается только 7–10 паводков в год, из которых 6–8 дождевых [Горбаренко и др., 2021]. При этом необходимо отметить, что наблюдающееся размытие сезонной структуры гидрографа и неоднозначность выделения отдельных фаз водного режима определяют ограничения в применении модели GrWat для условий городских рек и необходимость уточнения для них самих методик расчленения гидрографа.

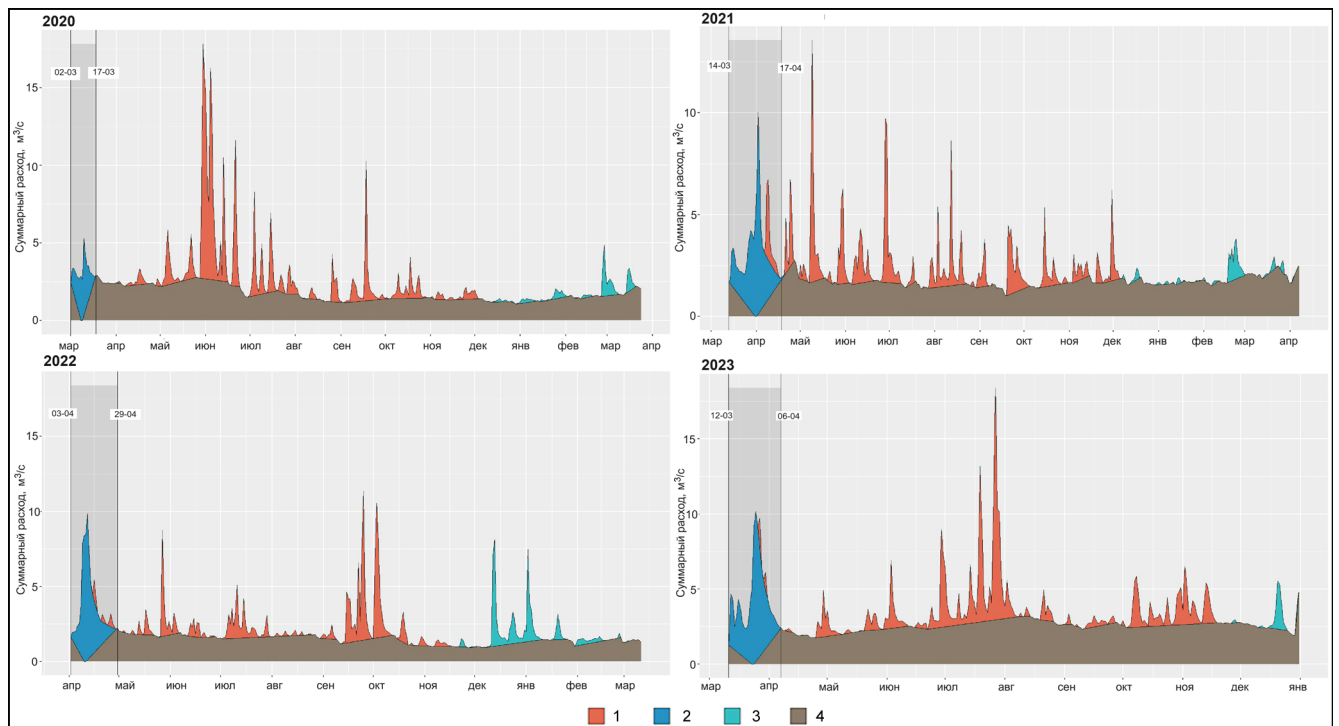


Рис. 2. Результаты расчленения гидрографа р. Сетуни у нижнего поста С5 в 2020–2023 гг. Доли стока: 1 – дождевого; 2 – половодного; 3 – оттепельного; 4 – подземного. Первая дата – начало весеннего половодья, вторая дата – окончание весеннего половодья

Fig. 2. Hydrograph separation of the Setun River for the S5 gauge station in 2020–2023:

1 – rain runoff; 2 – spring flood runoff; 3 – thaw runoff; 4 – underground runoff. The first date – beginning of the spring flood, the second date – the end of spring flood

Таблица 4

Источники питания р. Сетуни в 2020–2023 гг. (на основе модели GrWat)

Характеристика		2020	2021			2022		2023	
		C5	C2	C3	C5	C3	C5	C3	C5
Дата начала половодья		02.03	15.03	14.03	14.03	03.04	03.04	12.03	12.03
Дата конца половодья		17.03	12.04	14.04	17.04	21.04	29.04	08.04	06.04
Средний расход за водохозяйственный год, м³/с		2,45	1,09	1,04	2,34	1,23	2,19	1,11	3,39
Максимальный расход за водохозяйственный год, м³/с		17,84	4,85	7,32	13,56	5,35	11,35	5,51	18,4
Средний расход подземной составляющей стока за водохозяйственный год, м³/с		1,68	0,71	0,56	1,6	0,63	1,39	0,7	2,35
Объем годового стока, км³		0,008	0,003	0,003	0,008	0,004	0,006	0,003	0,0089
Объем подземного стока	км³	0,006	0,002	0,002	0,005	0,002	0,004	0,002	0,006
	% от годового	75,0	66,7	66,7	62,5	50,0	66,7	66,7	67,4
Объем половодья без подземной составляющей	км³	0,0003	0,0003	0,0007	0,0005	0,0003	0,0007	0,0004	0,0008
	% от годового	3,8	10,0	16,7	6,3	7,5	11,7	13,3	9,0
Объем дождевого стока без подземной составляющей	км³	0,002	0,0007	0,001	0,0016	0,001	0,0012	0,0007	0,002
	% от годового	25,0	23,3	33,3	20,0	25,0	20,0	23,3	22,5
Объем оттепельного стока без подземной составляющей	км³	0,0002	0,000006	0,00006	0,00015	0,0002	0,00047	0,00002	0,0001
	% от годового	2,5	0,2	2,0	1,9	5	7,8	0,7	1,1
Максимальный расход дождевых паводков, м³/с		15,13	3,85	6,45	11,87	4,17	9,92	4,65	15,45
Максимальный расход оттепельных паводков, м³/с		3,26	0,29	0,93	1,95	3,17	7,08	0,85	3,2

Сравнение осредненных суточных гидрографов современного периода за 2020–2023 гг. по посту C5 с наблюдениями 1979–1988 гг. на посту «Сложные эфиры» показало меньший на 11,8% средний годовой расход воды ($Q_{ср}$, м³/с) р. Сетуни на этапе современных наблюдений (2,55 против 2,85 м³/с) (рис. 3). Учитывая короткий период наблюдений, подобные отличия следует уточнять по мере накопления рядов данных. Более достоверными представляются данные об изменениях распределения внутригодового стока. Наблюдается снижение расходов воды в половодье, меженных расходов летом и базисного осенне-зимнего стока. Снижение весеннего половодья может происходить за счет зимних оттепелей и вывоза снега на снегоплавильные пункты, активно практикуемого в столице, и, как было сказано выше, соответствует региональным тенденциями изменения стока и, следовательно, частично объясняется климатическими изменениями [Горбаренко и др., 2021]. Повторяемость высоких паводков выросла примерно в 7–10 раз, стандартное отклонение суточных расходов воды для всего ряда данных за период 1979–1988 гг. равно

1,45 м³/с, а для ряда за 2019–2024 гг. – 1,67 м³/с (рост на 15,1%). Причиной роста повторяемости паводков является тренд на усиление вариабельности интенсивных осадков, отмечающийся в Московском регионе с 1966 по 2021 г. [Чалов и др., 2023]. С 1997 по 2020 г. происходил рост показателей экстремальности осадков и увеличение их интенсивности на 10–15% [Ярынич и др., 2023]. Увеличению количества паводков способствует также снижение водопроницаемости поверхности за счет роста застройки. С использованием снимка Landsat за 1985 г. нами было установлено, что к 2024 г. (см. табл. 2) по сравнению с полученными оценками, площадь селитебных территорий выросла приблизительно на 30 км² (16% площади водосбора). Этому способствует изменение режима ООПТ в пределах бассейна Сетуни [Крюков, Голубева, 2021], основными чертами которого является возведение крупных объектов транспортной инфраструктуры, инженерных, социальных и административных объектов, увеличение плотности дорожной и тропиной сети и фрагментация ядер охраняемых территорий. В конечном счете все это приводит

к снижению инфильтрации на водосборе, меньшей регулирующей роли естественных покрытий и снижению времени добегания в русловую сеть, которая при прохождении экстремальных ливней

2020 и 2021 гг. для бассейна Сетуни оценивалась в 6–8 часов, в то время как для рек-аналогов Московского региона при аналогичных событиях составляла около 15 часов [Chalov et al., 2023].

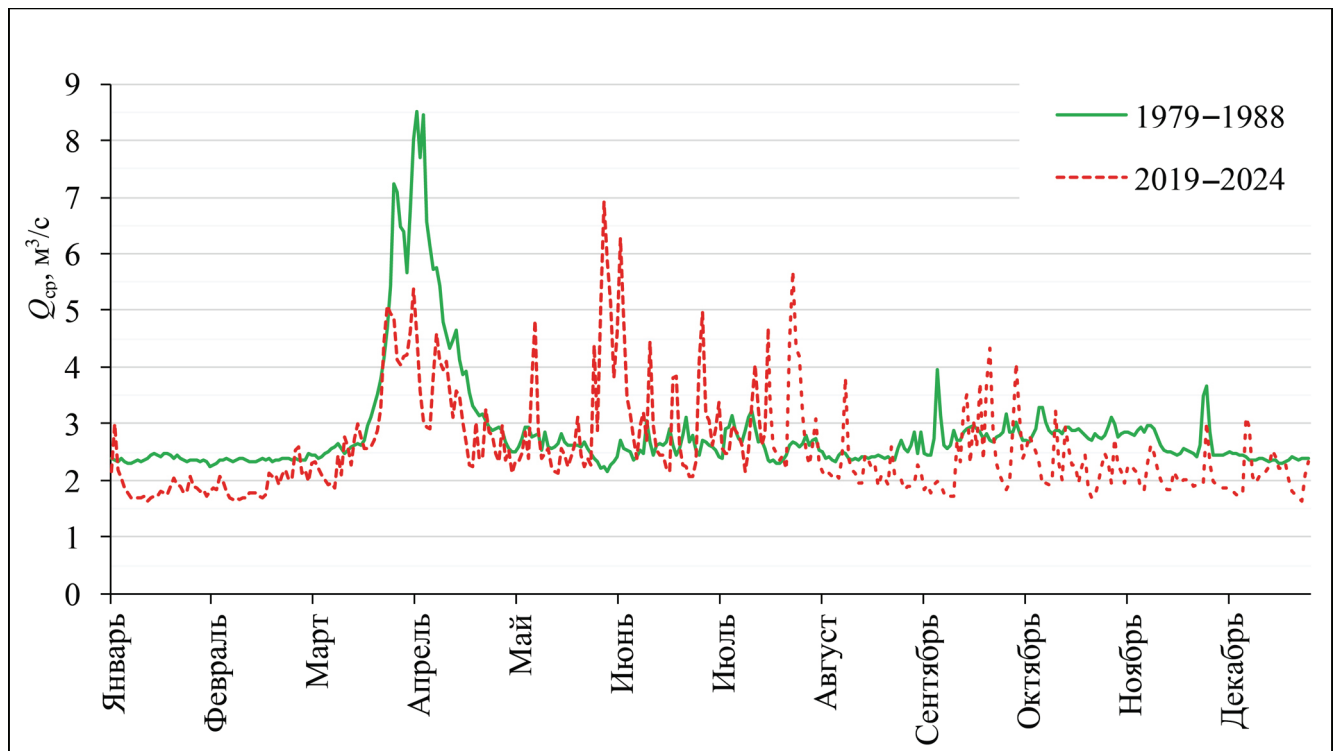


Рис. 3. Осредненные суточные гидрографы р. Сетуни за 1979–1988 гг. по г. п. «Сложные эфиры» и посту С5 сети наблюдений МГУ за 2019–2023 гг.

Fig. 3. Mean daily flow hydrographs of the Setun River for 1979–1988 at the Slozhnye Efiry gauge and the C5 MSU gauging network for 2019–2023

ВЫВОДЫ

Обработка данных мониторинга, подкрепленная геопространственным анализом, позволила оценить современные (2019–2024 гг.) особенности формирования стока р. Сетуни, полностью расположенной в пределах Московской агломерации.

1. Водосбор реки, протекающей от пригорода к центру города, существенно меняется по характеристикам землепользования – в два раза увеличивается вниз по течению относительная площадь жилых массивов. Доля водонепроницаемых поверхностей колеблется от 24,5% в верхних частях водосбора до 37,8% на всем водосборе. При этом указанные изменения не имеют однозначной связи с характеристиками речного стока, что, вероятно, может объясняться значительной ролью промышленных и коммунальных сточных вод и вод ливневой канализации, а также пространственной неравномерностью дождей осадков.

2. В питании малой городской реки определяющую роль играет подземная составляющая стока, которая включает в себя как грунтовые воды, так

и воды антропогенного генезиса. Вклад весеннего половодья в годовой сток изменялся в разные годы наблюдений (2020–2023 гг.) от 3,8 до 16,7% от годового стока, а объем дождевого стока – от 20 до 33,3%. За счет снижения времени добегания, значительной роли различных антропогенных воздействий на речной сток происходит размытие сезонной структуры гидрографа. На трансформацию стока оказывают влияние как общие климатические тенденции, так и специфика формирования стока в условиях городской среды, в частности приводящая к прохождению большого количества оттепелей и дождевых паводков, в несколько раз превышающих региональные значения.

3. Основными чертами современного стока р. Сетуни по сравнению со второй половиной XX в. является двукратное снижение объемов и расходов весеннего половодья за счет зимних оттепелей и, вероятно, за счет вывоза снега; увеличение интенсивности и частоты коротких дождевых осадков и их вклада в годовой сток.

Благодарности. Развитие мониторинговой сети и натурные исследования в бассейне р. Сетуни выполнены в рамках проекта РНФ 19-77-30004-П. Анализ источников формирования стока выполнен в рамках проекта Министерства высшего образования и науки (075-15-2024-614).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болгов М.В., Филиппова И.А., Харламов М.А. Современные изменения гидрологического режима и водообеспечение Московского региона // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 8. С. 29–36.
- Бруслова Н.Е., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Особенности режима осадков в Московском регионе в 2008–2017 гг. // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019. № 1. С. 127–172.
- Власов Д.В., Кукушкина О.В., Кошелева Н.Е. и др. Уровни и факторы накопления металлов и металлоидов в придорожных почвах, дорожной пыли и их фракции PM10 в Западном округе Москвы // *Почвоведение*. 2022. № 5. С. 538–555.
- Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне верхней Волги под влиянием климатических изменений // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 4. С. 6–28. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-1.
- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Поповичева О.Б. и др. Загрязнение Московского мегаполиса: мониторинг химического состава микрочастиц в системе атмосфера – снег – дорожная пыль – почвы – поверхностные воды // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 5. С. 5–19.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г. и др. Оценка антропогенных воздействий на водные ресурсы России // *Вестник РАН*. 2019. Т. 89. № 6. С. 603–614.
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Трансформация стока под влиянием ландшафтных изменений в бассейне реки Москвы и на территории города Москвы // *Водные ресурсы*. 2015. Т. 42. № 2. С. 133–143. DOI: 10.7868/S0321059615020066.
- Крюков В.А., Голубева Е.И. Оценка изменений природоохранных режимов городской ООПТ в ГИС-среде // *ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: материалы Международной конф.* 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 323–334. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-323-334.
- Рец Е.П., Киреева М.Б., Самсонов Т.Е. и др. Алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа по методу Б.И. Куделина GrWat: проблемы и перспективы // *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49. № 1. С. 27–42. DOI: 10.31857/S032105962201014X.
- Стулов Е.А. Влияние города Москвы на усиление летних осадков // *Метеорология и гидрология*. 1993. № 11. С. 34–41.
- Цыпленков А.С., Черницова О.В., Кошелева Н.Е. и др. ГИС-моделирование баланса наносов и загрязняющих веществ в бассейне р. Сетунь (Москва). Инженерная экология – 2021 (Москва, 1–3 дек. 2021 г.): доклады Международного симпозиума. М., 2021. С. 172–176.
- Чалов С.Р., Платонов В.С., Морейдо В.М. и др. Реакция водного стока малой городской реки на экстремальные дождевые осадки на территории Москвы в 2020 и 2021 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 2. С. 69–79. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-2-69-79.
- Чижова Ю.Н., Рец Е.П., Тебенькова Н.А. и др. Двухкомпонентное расчленение гидрографа реки Протвы // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2021. № 6. С. 62–76.
- Ярынич Ю.И., Варенцов М.И., Платонов В.С. и др. Влияние московского мегаполиса на осадки теплого периода в зависимости от крупномасштабных атмосферных условий // *Водные ресурсы*. 2023. Т. 50. № 5. С. 550–560. DOI: 10.31857/S0321059623600151.
- Chalov S.R., Platonov V.S., Erina O.N. et al. Rainstorms impacts water, sediment and trace elements loads in an urbanized catchment within Moscow city: case study of summer 2020 and 2021, *Theoretical and applied climatology*, 2023, vol. 151, p. 871–889, DOI: 10.1007/s00704-022-04298-9.
- Kong D., McVicar T.R., Xiao M. et al. Phenofit: An R package for extracting vegetation phenology from time series remote sensing, *Methods Ecol. Evol.*, 2022, vol. 13, no. 7, p. 1508–1527, DOI: 10.1111/2041-210X.13870.
- Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, *Anal. Chem.*, 1964, vol. 36, no. 8, p. 1627–1639.
- Sokolov D.I., Erina O.N., Tereshina M.A. et al. Impact of Mozhaysk Dam on the Moscow river sediment transport, *Geogr. Environ. Sustain.*, 2020, vol. 13, no. 4, p. 24–31, DOI: 10.24057/2071-9388-2019-150.
- Tereshina M.A., Erina O.N., Sokolov D.I. et al. Nutrient dynamics along the Moskva River under heavy pollution and limited self-purification capacity, *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 163, p. 05014.
- Varentsov M.I., Wouters H., Platonov V.S. et al. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia, *Atmosphere (Basel)*, 2018, vol. 9, no. 2, p. 50, DOI: 10.3390/atmos9020050.
- Электронные источники**
OpenStreetMap, URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения 11.02.2024).
Samsonov T. GrWat: River Hydrograph Separation and Analysis. R package version 0.0.4.9000, URL: <https://tsamsonov.github.io/grwat/>, <https://github.com/tsamsonov/grwat> (дата обращения 11.02.2024).

Поступила в редакцию 27.08.2024

После доработки 23.10.2024

Принята к публикации 26.11.2024

RUNOFF FORMATION IN THE SMALL URBAN SETUN RIVER (MOSCOW)

I.S. Denisova¹, O.D. Loshkov², M.A. Samokhin³, S.R. Chalov⁴¹⁻⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology¹ Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences¹ Ph.D. Student; Engineer; ira.denisova@icloud.com² Student; ollo107@mail.ru³ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: gidromiha@mail.ru³ Professor, D.Sc. in Geography; srchalov@geogr.msu.ru

The growth of the Moscow metropolis has led to profound changes in the hydrological processes of rivers located within the city limits. Based on 2019–2024 monitoring data for a network of stations on the Setun River, the river runoff formation in the context of urbanization was evaluated. The increase in impervious surface areas (from 25% to almost 40%) and the influence of industrial and municipal wastewater have led to the formation of specific water regime characterized by predominance of summer floods over the high water period, their large number (up to 29 events per year) and rather short basin lag time. Using the GrWat model, it was found that a twofold increase in residential areas and impervious surfaces downstream the river did not significantly affect the balance of river flow sources. The emerging water regime is characterized by an indistinct seasonal structure of the hydrograph and the transformation of the ground component of runoff into a technogenically transformed one, characterized by a greater volume of runoff compared to natural conditions. In different years and at different stations, it determines from 50 to 75% of the annual runoff, while the spring floods account for 3,8 to 16,7% and the rain runoff for 20 to 33%. Compared to the second half of the 20th century, an increase of over 15% in the residential areas (by 30 km²), as well as winter thaws, including those caused by regional climate change, determined a twofold decrease in water volume during spring floods, and almost tenfold increase in frequency of rainfall flood events. All this leads to frequent floods in river valleys and damage to city infrastructure, which makes the monitoring results very important for the city's economy.

Keywords: urban hydrology, urban territories, GrWat, floods, extreme rainfall

Acknowledgements. Monitoring network development and field studies in the Setun River basin were financially supported by the Russian Science Foundation (project 19-77-30004). The analysis of the sources of flow formation was performed within the framework of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under the Agreement 075-15-2024-614.

REFERENCES

- Bolgov M.V., Filippova I.A., Kharlamov M.A. Sovremennyye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima i vodoobespecheniya Moskovskogo regiona [Modern changes in hydrological regime and water supply in the Moscow region], *Meteorologiya i gidrologiya*, 2020, no. 8, p. 29–36. (In Russian)
- Brusova N.E., Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I. Osobennosti rezhima osadkov v Moskovskom regione v 2008–2017 gg. [Precipitation regime features in the Moscow region in 2008–2017], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2019, no. 1, p. 127–172. (In Russian)
- Chalov S.R., Platonov V.S., Erina O.N. et al. Rainstorms impacts water, sediment and trace elements loads in an urbanized catchment within Moscow city: case study of summer 2020 and 2021, *Theoretical and Applied Climatology*, 2023, vol. 151, p. 871–889, DOI: 10.1007/s00704-022-04298-9.
- Chalov S.R., Platonov V.S., Moreido V.M. et al. Reaktsiya vodnogo stoka maloi gorodskoi reki na ekstremal'nye dozhdevye osadki na territorii Moskvy v 2020 i 2021 gg. [Small urban river runoff response to 2020 and 2021 extreme rainfalls within the territory of Moscow], *Meteorologiya i gidrologiya*, 2023, no. 2, p. 69–79, DOI: 10.52002/0130-2906-2023-2-69-79. (In Russian)
- Chizhova Yu.N., Rets E.P., Teben'kova N.A. et al. Dvukhkompontnoe raschlenenie gidrografa reki Protvy [Two-component separation of the Protva River hydrograph], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 6, p. 62–76. (In Russian)
- Gorbarenko A.V., Varentsova N.A., Kireyeva M.B. Transformatsiya stoka vesennego polovod'ya i pavodkov v bassejne Verkhney Volgi pod vliyaniem klimaticheskikh izmeneniy [Transformation of the spring highwater and flood runoff in the Upper Volga basin under the climate change impact], *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*, 2021, no. 4, p. 6–28, DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-1. (In Russian)
- Kasimov N.S., Kosheleva N.Ye., Popovicheva O.B. et al. Zagryazneniye Moskovskogo megapolisa: monitoring khimicheskogo sostava mikrochastits v sisteme atmosfera – sneg – dorozhnaya pyl' – pochvy – poverkhnostnyye vody [Moscow megacity pollution: monitoring of chemical composition of microparticles in the atmosphere-snow-road dust-soil-surface water system], *Meteorologiya i gidrologiya*, 2023, no. 5, p. 5–19. (In Russian)
- Kong D., McVicar T.R., Xiao M. et al. Phenofit: An R package for extracting vegetation phenology from time series remote sensing, *Methods Ecol. Evol.*, 2022, vol. 13, no. 7, p. 1508–1527, DOI: 10.1111/2041-210X.13870.

- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G. et al. Otsenka antropogennykh vozdествii na vodnye resursy Rossii [An assessment of the anthropogenic impact on water resources in Russia], *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2019, vol. 89, no. 6, p. 603–614. (In Russian)
- Koronkevich N.I., Mel'nik K.S. Runoff transformation under the effect of landscape changes in the Moskva River Basin and in the territory of Moscow city, *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 2, p. 159–169, DOI: 10.1134/S0097807815020062.
- Kryukov V.A., Golubeva Ye.I. [Assessment of urban protected areas regulations changes using GIS software], *InterKarto. InterGIS. Geoinformatsionnoye obespecheniye ustojchivogo razvitiya territorii* [Geoinformation support of sustainable development of territories], *Materialy Mezhdunar. Konf*, 2021, vol. 27, no. 3, p. 323–334, DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-323-334. (In Russian)
- Rets E.P., Kireeva M.B., Samsonov T.E. et al. Algorithm Gr-Wat for Automated Hydrograph Separation by B.I. Kudelin's Method: Problems and Perspectives, *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 1, p. 23–37, DOI: 10.1134/S0097807822010146.
- Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, *Anal. Chem.*, 1964, vol. 36, no. 8, p. 1627–1639.
- Sokolov D.I., Erina O.N., Tereshina M.A., Puklakov V.V. Impact of Mozhaysk Dam on the Moscow river sediment transport, *Geogr. Environ. Sustain*, 2020, vol. 13, no. 4, p. 24–31, DOI: 10.24057/2071-9388-2019-150.
- Stulov E.A. Vliyanie goroda Moskvy na usilenie letnikh osadkov [Effect of the city of Moscow on the increasing summer precipitation], *Meteorologiya i gidrologiya*, 1993, no. 11, p. 34–41. (In Russian)
- Tereshina M.A., Erina O.N., Sokolov D.I. et al. Nutrient dynamics along the Moskva River under heavy pollution and limited self-purification capacity, *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 163, p. 05014.
- Tsyplenkov A.S., Chernitsova O.V., Kosheleva N.E., Chalov S.R. [GIS-based modeling of sediment and pollutants balance in the Setun River basin (Moscow)], *Inzhenernaya ekologiya – 2021* [Engineering Ecology – 2021], *Doklady mezhdunarodnogo simpoziuma*, Moscow, 2021, p. 172–176. (In Russian)
- Varentsov M.I., Wouters H., Platonov V.S., Konstantinov P.P. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia, *Atmosphere (Basel)*, 2018, vol. 9, no. 2, p. 50, DOI: 10.3390/atmos9020050.
- Vlasov D.V., Kukushkina O.V., Kosheleva N.Ye., Kasimov N.S. Levels and Factors of the Accumulation of Metals and Metalloids in Roadside Soils, Road Dust and Their PM₁₀ Fraction in the Western Okrug of Moscow, *Eurasian Soil Science*, 2022, no. 5, p. 556–572.
- Yarynich Yu.I., Varentsov M.I., Platonov V.S. et al. The effect of Moscow megapolis on warm season precipitation depending on large-scale atmospheric conditions, *Water Resources*, 2023, vol. 50, no. 5, p. 699–708.

Received 27.08.2024

Revised 23.10.2024

Accepted 26.11.2024