

ОЦЕНКА СТОКА НАНОСОВ С ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ[#]© 2024 г. В.А. Неходцев^{1,2,*}, Г.Д. Эмдин³¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия²Научный институт Вайцмана, Реховот, Израиль³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: nekhodtsev.v@gmail.com

Поступила в редакцию 30.04.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принята к публикации 13.10.2023 г.

В результате хозяйственного освоения на территории Москвы (в пределах кольцевой автодороги) за XVIII–XX вв. было засыпано чуть больше половины долин малых рек и десятки оврагов. Параллельно была сооружена сеть ливнестоков (подземных труб) со средней густотой 6.9 км/км². Доля водонепроницаемых поверхностей (крыши зданий, тротуары, автодороги и т.д.) возросла до 50%. Поверхностный сток с городских территорий вместе с грунтом, взвешенными и растворенными веществами стал реализовываться через ливнесточную сеть в русла сохранившихся рек, в пруды. В настоящей работе на основе полевых материалов авторов, полученных на модельном участке (бассейне заключенного в коллектор Калитниковского ручья) и статистических данных коммунальных организаций проведена оценка стока наносов и растворенных веществ с территории Москвы (внутри МКАД) через сеть “подземных рек” и ливнестоков. Установлено, что с учетом площади (880 км²), модуль твердого стока здесь составляет в среднем порядка 160–250 м³/км² в год (или 2.6–4 т/га в год) при доле водонепроницаемых поверхностей 50%. Показано, что даже в пределах плоских поверхностей (например, надпойменных террас) с амплитудами высот менее 6–7 м смыывается около 100 м³/км² грунта в год. Основные причины наблюдаемого явления — низкая культура благоустройства (некачественно закрепленные грунты, недостаточная очистка ливнесточных вод), массовое строительство и интенсификация эолового транзита в застроенных кварталах. Поступающие из ливнестоков разнородные частицы грунта и другие взвешенные вещества превышают транспортирующую способность сохранившихся рек, что приводит к аккумуляции наносов в руслах. Потенциал Москвы-реки по удалению возросшего стока наносов и загрязнителей к настоящему времени полностью исчерпан.

Ключевые слова: водосборные бассейны, город, опасные процессы, поверхностный сток, подземная река, рельеф, твердый сток

DOI: 10.31857/S2949178924010043, EDN: IRSJOG

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

Примерно с конца XIX в. велась активная засыпка оврагов и речных долин в Москве. К настоящему времени на территории города внутри Московской кольцевой автомобильной дороги (МКАД) из имевшихся 130–140 малых рек и ручьев, не считая мелких сухих оврагов, полностью или частично уцелели около 50 рек, т.е. меньше половины (Насимович, 1996).

Водотоки засыпанных долин и малых эрозионных форм в большинстве случаев заключали в подземные коллекторы (трубы) и включали в дренажно-ливневую систему города. При за-

ключении водотока под землю сначала сооружают коллектор, а затем, после перевода водотока в него, засыпают грунтом долину и коллектор. Параллельно под окрестными улицами сооружается ливнесточная канализация (отвод поверхностного стока), подключаемая к коллектору “подземной реки” (Воронов, Яковлев, 2006). Важно отметить, что поступление грунтовых вод в коллектор конструкционно обычно не предусмотрено. Полностью “подземная река” (без сохранившихся наземных участков) представляет собой весьма разветвленную древовидную сеть коллекторов с расширяющимся к устью поперечным сечением. Строго говоря, с точки зрения гидрологии, такое инженерное сооружение не является рекой, но концентрирует поверхностный сток с территории и некоторые промышленные отходы.

[#] Ссылка для цитирования: Неходцев В.А., Эмдин Г.Д. (2024). Оценка стока наносов с территории Москвы. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 1. С. 40–51. <https://doi.org/10.31857/S2949178924010043>; <https://elibrary.ru/IRSJOG>

Замена природной гидросети на систему дренажно-ливневых коллекторов в Москве привела к увеличению стока с территории внутри МКАД по крайней мере на 200%, а с учетом техногенных сбросов и утечек из коммуникаций — на 280% (Неходцев, 2021). Колоссальное увеличение поверхностного стока связано в первую очередь с концентрацией ливнестоками атмосферных осадков, выпадающих на водонепроницаемые поверхности (крыши, тротуары, дороги), доля которых в территории Москвы (внутри МКАД) составляет ровно 50% (Коронкевич и др., 2017, с. 82). В крупном городе с плотной застройкой техногенно-погребенные долины с закрытым “стоком” наносят значительный ущерб городскому хозяйству. Для районов, где развиты такие долины, характерна интенсификация ряда геолого-геоморфологических и эколого-геохимических процессов, что связано в первую очередь с увеличением объема грунтовых вод (Неходцев, 2021).

На городских пространствах, где отсутствует качественное закрепление рыхлых грунтов, а также вблизи строек ливневые осадки и весеннее снего-

таяние приводят к взрывному росту стока наносов в “подземных реках” и ливнестоках. Повсеместно распространены обширные шлейфы песчаных и гравийных отложений на асфальто-плиточном покрытии. Смыв частиц песчаной размерности по наклонным поверхностям дорожных покрытий происходит даже при неинтенсивном дожде (рис. 1). Активное строительство, особенности городского микроклимата (в первую очередь — интенсификация эолового транзита) дополнительно способствуют смыву грунта. Поэтому, несмотря на общее выполаживание территории при засыпке эрозионных форм, растет объем жидкого и твердого стока в главные городские водные артерии (прежде всего — в Москву, Язу и Сетунь) и пруды. В настоящей работе оценивается объем грунта и других взвешенных веществ, поступающих с территории Москвы через подземные водостоки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Публикации об устройстве коллекторов “подземных рек” и ливнестоков носят технический либо исторический характер; обобщающих работ в этой области сравнительно мало (Ивлев, 1954; Воронов, Яковлев, 2006). Обследование подземных ливнестоков показало, что в них содержится огромное количество твердого материала, поступающего с дневной поверхности и транспортирующегося по коллекторам процессами, аналогичными природным русловым (Неходцев, 2012; Геоморфология ..., 2017). В ливнесточных коммуникациях подавляющего большинства европейских городов (Берлин, Прага, Брюссель, Антверпен, Лодзь и т.д.) по нашим данным практически отсутствуют наносы, в отличие от аналогичных сооружений Москвы и Киева, что связано с проводимым закреплением открытых грунтов. Результаты изучения антропогенной трансформации флювиального рельефа и речных бассейнов малых рек Москвы изложены в монографии (Геоморфология ..., 2017). В ежегодно публикуемых Правительством Москвы докладах “О состоянии окружающей среды в городе Москве” (Доклад ..., 2009–2020) приводится количественная и качественная характеристика твердого и жидкого стока, загрязнителей.

Исследования, посвященные перераспределению поверхностного стока в связи с уничтожением гидросети, сравнительно немногочисленны (Геоморфология ..., 2017; Неходцев, 2021). Общие



Рис. 1. Песчано-глинистый шлейф на проезжей части во время обложного дождя — проявление активного твердого стока с городской территории. Фото В.А. Неходцева.

Fig. 1. Sand and clay on the roadway during light rain is an indicator of active solid runoff from the urban area. Photo by V.A. Nekhodtsev.

закономерности влияния урбанизации на сток рек, в том числе и Москвы, изложены в работах (Львович, 1986; Коронкевич, Мельник, 2015). В том числе установлено, что увеличение доли урбанизированной площади речного бассейна на 1% (с учетом дорог и сельских населенных пунктов) приводит приблизительно к такому же увеличению стока, а увеличение на 1% водонепроницаемых участков — к росту стока на 2–3% (Коронкевич, Мельник, 2017). Выявлена тенденция “увеличения годового стока, главным образом, за счет поверхностного стока со склонов в теплое время года (при снижении стока инфильтрационного происхождения)” (Коронкевич, Мельник, 2015, с. 141–142). Увеличение стока р. Москвы в начале XXI в. оценивается в 1.7 раза по сравнению с его нормой; при этом на долю антропо-

генных факторов приходится 75–80% изменения, а на долю климатических — 20–25% (Коронкевич, Мельник, 2017).

В одном из обследованных коллекторов 1908 г. постройки, проложенном вдоль Калитниковского пруда (Таганский р-н, ЦАО), была обнаружена крупная толща наносов. В 2005 г. (по сообщению пресс-службы ГУП “Мосводосток”) коллектор Калитниковского ручья был перегорожен бетонной плотиной высотой около 1.6 м (рис. 2) для проведения строительных работ; в январе 2011 г. перегородка была демонтирована. За это время за плотиной накопилась мощная песчано-глинистая толща с включением кирпичей и валунов, которая была нами обследована и зафиксирована. Такие отложения “подземных рек” и ливнестоков было предложено называть техноаллювием



Рис. 2. Техноаллювиальная толща в коллекторе Калитниковского ручья в 2011 г.: бетонная перегородка во время демонтажа (а); техноаллювиальная толща в 265 м выше плотины (мощность на всем протяжении практически идентичная) в месте сужения коллектора (б); после демонтажа перегородки ручей начал стремительно врезаться в наносы (в, г). Фото С.А. Корнева и В.А. Неходцева.

Fig. 2. Techno-alluvial deposits in the Kalitnikovskii Creek drain in 2011: dismantling of the concrete dam (a); techno-alluvial deposits 265 m above the dam at the point of narrowing of the collector (б); after dam dismantling the stream began to rapidly cut into sediments (в, г). Photos by S.A. Kornev and V.A. Nekhodtsev.

(Неходцев, 2012). На снимках (см. рис. 2, (а)) видно, что грунт не сравнялся по высоте с перегородкой и, следовательно, на протяжении 6 лет продолжал накапливаться вплоть до демонтажных работ.

Измерения проводились лазерным дальномером Bosch DLE 50 Professional (погрешность линейных измерений не превышает ± 1.5 мм). Производилась фотофиксация накопленной грунтовой толщи и динамики процессов на протяжении 2011–2016 гг.

Калитниковский ручей — приток “подземной реки” Хохловки длиной почти 2 км, протекает в основном в коллекторе с диаметром 2.13–2.4 м, в верховьях сужающегося до 1.5 м. Коллектор проходит от Мал. Калитниковской улицы вдоль Калитниковского пруда, под Октябрьским трамвайным депо, а в районе Скотопрогонной улицы соединяется с коллектором, в котором течет речка Хохловка. В районе Малого кольца Московской железной дороги Хохловка впадает в Нишенку — одну из крупнейших “подземных рек” Москвы, — устье которой расположено в 6 км к югу, около Перервинской плотины.

Мощность накопленной грунтовой толщи составляла почти на всем протяжении от 0.8 (в верхнем течении) до 1.2 м (в нижнем). На нижнем отрезке изучаемого коллектора в круглой трубе диаметром 2.13 м плотные наносы присутствовали с постоянной мощностью (1.1–1.2 м) на протяжении 261 м (см. рис. 2, (б, в)). Уклоны коллектора преимущественно одинаковые на всем протяжении: такая конструктивная особенность препятствует накоплению наносов (Неходцев, 2012). Выше по течению коллектор сужается до 1.5 м, а его уклон несколько возрастает: на этом отрезке наносы зафиксированы на протяжении 85 м, где их мощность равномерно уменьшается с 0.8 до 0 м. После врезания ручья в толщу наносов (см. рис. 2, (в, г)) удалось установить ее слоистое строение: в зависимости от скорости паводкового потока отлагался техноаллювий различного гранулометрического состава от глин до гравия. Мощность таких прослоев колебалась от 4–5 до 20–25 см.

Подсчет объема наносов был выполнен Г.Д. Эмдиным в приложении WolframAlpha. Коллектор представляет собой простую геометрическую фигуру — цилиндр (рис. 3). Объем накопившегося

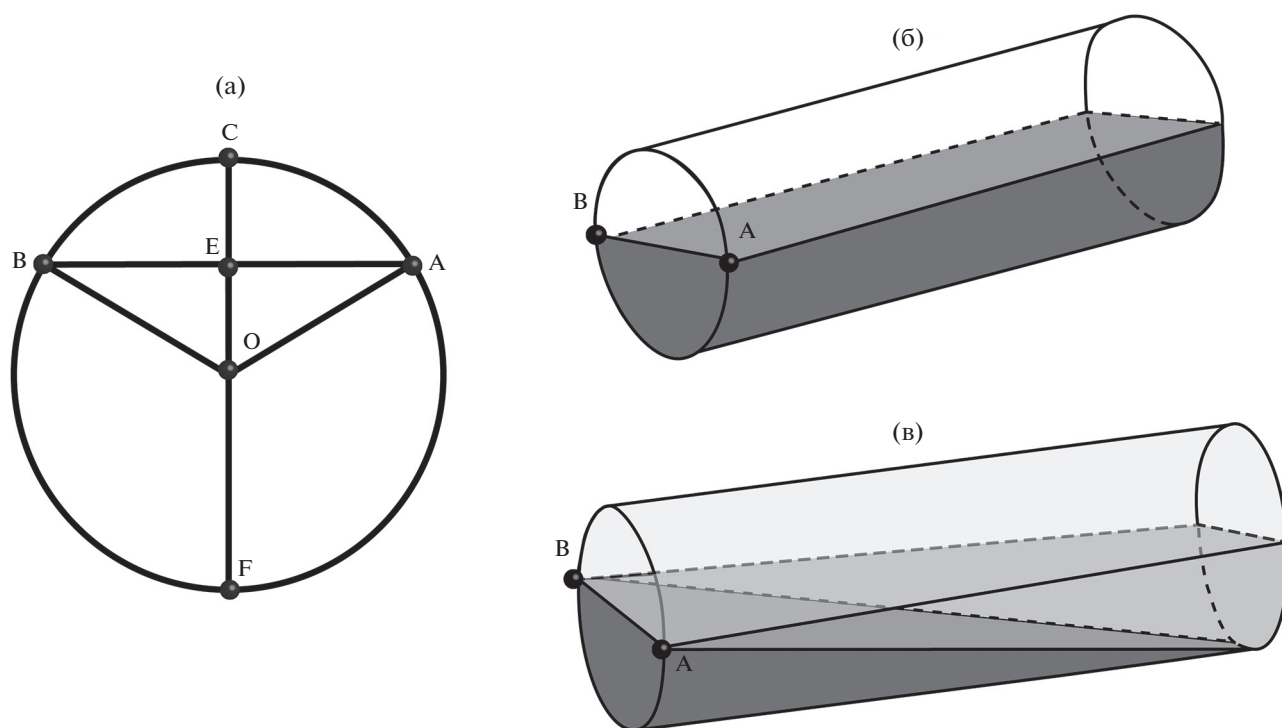


Рис. 3. Схема подсчета объема техноаллювиальной толщи в коллекторе Калитниковского ручья: поперечное сечение частично заполненного коллектора (а); субгоризонтальный участок коллектора диаметром 2.13 м (б); участок слабонаклонной трубы диаметром 1.5 м (в). Составлено авторами.

Fig. 3. Scheme for calculating the volume of techno-alluvial deposits in the collector of Kalitnikovskii Creek: a cross section of a partially filled pipe (a); a subhorizontal section of the pipe with 2.13 m diameter (б); a section of a slightly inclined pipe with 1.5 m diameter (в). Compiled by the authors.

осадка, таким образом, может быть рассчитан как произведение длины и площади сегмента круга, ограниченного хордой (поверхностью техноаллювия). При этом, учитывая почти идеальную выдержанность техноаллювиальной толщи, нет необходимости построения более сложной интегральной функции.

Для начала найдем площадь сегмента круга, ограниченного хордой (BA), делящей диаметр (D) в отношении p :

$$\frac{FE}{D} = p.$$

Чтобы найти площадь сегмента BAF надо знать внешний $\angle BOA$:

$$\cos(\angle BOE) = \frac{OE}{OB} = \frac{D(p - 1/2)}{D/2} = 2p - 1,$$

$$\angle BOA = 2\arccos(2p - 1).$$

Внешний

$$\angle BOA = 2\pi - 2\arccos(2p - 1) = 2\arccos(1 - 2p).$$

Таким образом, площадь поперечного сечения техноаллювиальной площади находим по формуле (1):

$$S_{BAF} = \frac{D^2}{8}(2\arccos(1 - 2p) - \sin(2\arccos(1 - 2p))). \quad (1)$$

Объем (V) выдержанной по мощности толщи техноаллювия, накопившегося на нижнем отрезке (L) субгоризонтальной трубы находим по формуле (2):

$$V_1 = L_1 \cdot \frac{D_1^2}{8}(2\arccos(1 - 2p_1) - \sin(2\arccos(1 - 2p_1))), \quad (2)$$

для которых измеренные значения:

$$L_1 = 260.7 \text{ м}, D_1 = 2.13 \text{ м}, p_1 = \frac{9}{17}.$$

Объем техноаллювия в нижнем участке коллектора, таким образом, составил 499 м³.

Рассчитаем объем наносов для верхнего участка коллектора, который проложен с заметным уклоном. Для этого представим, что труба лежит горизонтально, а наносы в ней на всем протяжении выдержаны по мощности (как и в предыдущем случае) и составляют 0.8 м. В таком случае используем формулу (2), а затем разделим получившееся значение на 2 (см. рис. 3, (в)), чтобы узнать объем наносов в реальной трубе:

$$V_2 = \frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot \frac{D_2^2}{8}(2\arccos(1 - 2p_2) - \sin(2\arccos(1 - 2p_2))),$$

для которых измеренные значения:

$$L_2 = 85 \text{ м}, D_2 = 1.5 \text{ м}, p_2 = \frac{0.8}{1.5}.$$

Объем наносов на верхнем участке коллектора составил 40.7 м³. Суммарный объем техноаллювиальной толщи в коллекторе Калитниковского ручья составляет ~540 м³.

Нами была составлена схема водосбора и ливне-стоков (рис. 4). Для определения площади водосборной поверхности, с которой поверхностный сток концентрировался в коллектор Калитниковского ручья, были сопоставлены рельеф местности и подробная схема коллекторной сети ГУП "Мосводосток" с отмеченными расстояниями, диаметрами труб и указанием местоположения ливнесточных решеток. Таким образом, было установлено, что 540 м³ грунта было смыто в ливне-стоки с площади 0.912 км² за 6 лет. Погрешность измерений и, соответственно, полученных значений нами оценивается не более чем $\pm 2\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, для модельного участка в бассейне заключенного в коллектор Калитниковского ручья были определены величины стока наносов — 590 м³/км² за 6 лет, или, в среднем, ~98 м³/км² в год.

Зеркало копаного Калитниковского пруда и дно коллектора Калитниковского ручья расположены на абсолютной отметке 130 м. Наивысшие отметки в южной и северной частях водосбора едва достигают 140 м. Исследуемая местность находится на третьей надпойменной террасе Москвы-реки, рельеф которой характеризуется некрутыми задернованными склонами. Позднеплейстоценовые и голоценовые эрозионные врезы на этой поверхности при ее хозяйственном освоении нивелированы подсыпкой грунта на 2–4 м (Геологический ..., 2010). Таким образом, если не учитывать склоны непосредственно вдоль копаного пруда, амплитуда высот изученной территории, базисом эрозии которой принимаются ливнесточные решетки, не превышает 5–6 м.

По открытым данным OpenStreetMap и спутниковым снимкам 2006–2011 гг. (Яндекс и Google Maps) с помощью ГИС нами была измерена площадная структура землепользования изучаемого водосбора, с которого был смыт грунт в коллектор Калитниковского ручья (табл. 1). К водонепроницаемым поверхностям отнесены здания, основные

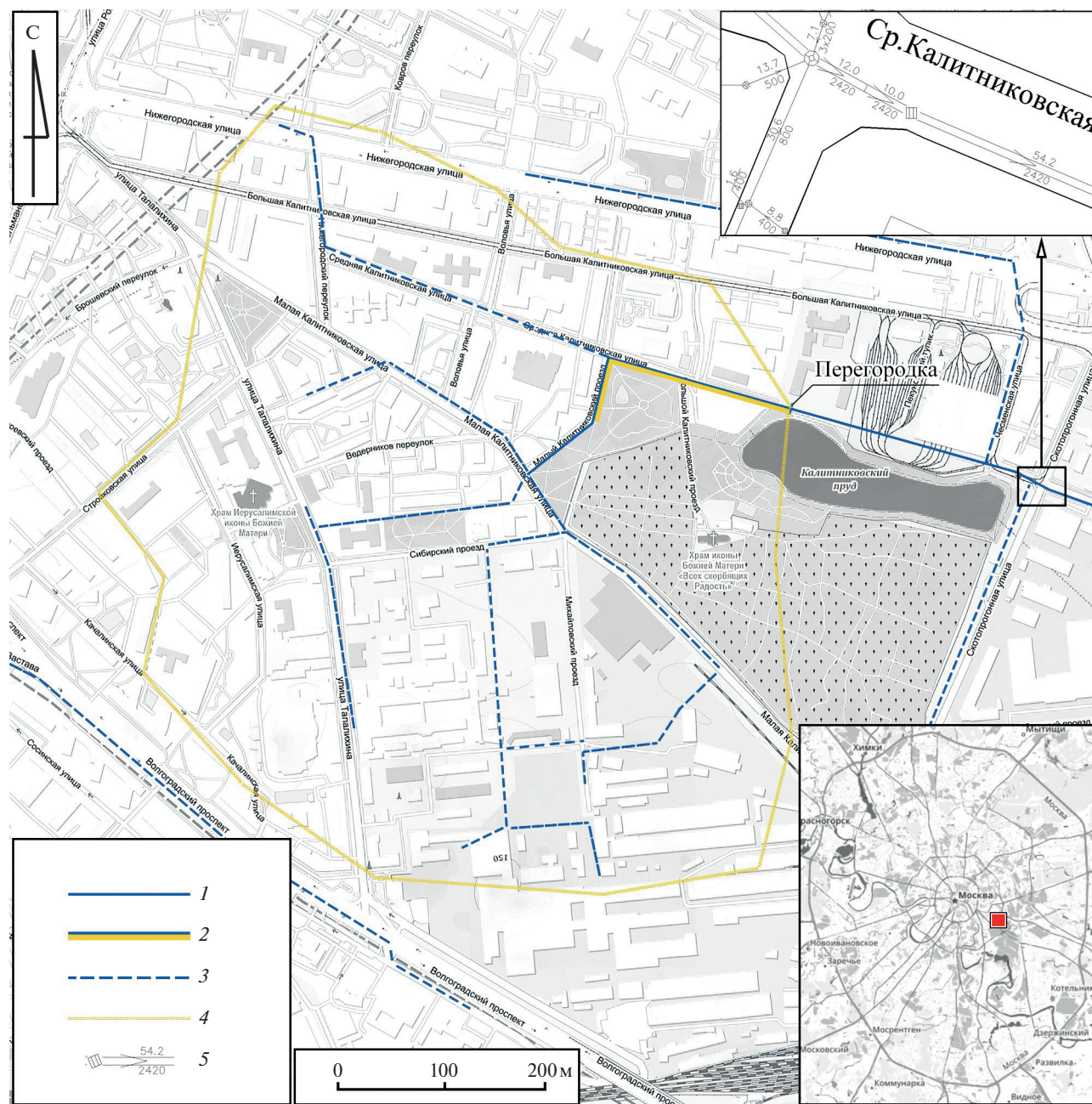


Рис. 4. Схема водосбора фрагмента Калитниковского ручья. 1 — основная нитка коллектора диаметром 1.5–2.4 м; 2 — участок коллектора с накопленной техноаллювиальной толщей; 3 — второстепенные ливнестоки-притоки; 4 — граница водосборной поверхности; 5 — фрагмент исходной схемы ливнесточной сети ГУП «Мосводосток» с указанием расстояний между люками и ливнесточными решетками (сверху; в метрах) и диаметром труб (снизу; в миллиметрах). Составлено В.А. Неходцевым.

Fig. 4. The scheme of the catchment of the fragment of the Kalitnikovskii Creek. 1 — the main pipe with 1.5–2.4 m diameter; 2 — a section of the pipe with accumulated techno-alluvial deposits; 3 — small storm drains tributaries; 4 — the boundary of the drainage basin; 5 — a fragment of the original scheme of the storm drains network SUE “Mosvodostok” indicating the distances between the hatches and the drainage gratings (above; in meters) and the diameter of the pipes (bottom; in millimeters). Compiled by V.A. Nekhodtsev.

Таблица 1. Структура землепользования изученного водосбора (см. рис. 4)**Table 1.** Land use structure of the studied drainage basin (fig. 4)

Характер землепользования	Площадь, км ²	% от площади
Парки, скверы, кладбище	0.146	16.0
Дворы и дворовые проезды	0.19	20.9
Производственные территории	0.324	35.5
Все здания вне промышленных территорий	0.072	7.9
Основные уличные проезды с тротуарами, парковки	0.175	19.2
Водная поверхность (пруд)	0.005	0.5
Вся территория	0.912	100

уличные проезды с тротуарами, автомобильные парковки, а также плотно застроенные производственные территории с практически сплошным асфальто-бетонным покрытием: Мясокомбинат, многофункциональный комплекс “Михайловский”, ЗАО “Клипмаш”, автотехцентр “Ауди”, Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, Московский государственный университет пищевых производств и др. Дворы и дворовые проезды (кроме переулков) нами рассмотрены как поверхности с открытым грунтом, наравне с парками, скверами и территорией Калитниковского кладбища. Суммарная доля непроницаемых поверхностей исследованного водосбора составляет, таким образом, около 60%.

Таблица 2. Параметры измеренного твердого стока, реализуемого с территории Москвы через ливнесточную сеть. По данным ГУП “Мосводосток” и “Мосводоканал” (Доклад ..., 2009; 2010; 2012; 2013; 2014; 2015; Расписание погоды)**Table 2.** Parameters of the sediment transport realized from the territory of Moscow through the storm drains. According to SUE “Mosvodostok” and “Mosvodokanal” (Kul’bachevskii, 2009; 2010; 2012; 2013; 2014; 2015; Weather schedule)

Параметры	Годы				
	2008	2009	2010	2011	2012
Осадки (метеостанция Балчуг), мм/год	700	583	567	546	744
Сток наносов, тыс. т	215	—	193	179	225
Сток наносов, тыс. м ³ (при плотности 1.6 т/м ³)	165	—	148	138	173
Сброс загрязняющих веществ с Курьяновских очистных сооружений, тыс. т	246	238	203	214	242

Реальный объем денудации с модельного водосбора, разумеется, несколько больше, поскольку нами не учтены взвешенные наносы, особенно транспортируемые ливневыми паводками. В соответствии с рельефом и застройкой измеренный объем стока наносов можно считать не превышающими средние значения для территории Москвы, которая характеризуется значительными амплитудами высот (от 30 до 60 м и более) и преобладанием склоновых поверхностей.

Полученные для модельного полигона значения постараемся сопоставить с опубликованными в статистических докладах ГУП “Мосводосток” данными (табл. 2) для территории Москвы внутри МКАД (880 км²). Организация ответственна за состояние большинства водных объектов города (реки, пруды, озера) и эксплуатацию водосточной сети, в которую поверхностные воды поступают с 75% площади города и сбрасываются в водные объекты через 230 крупных (диаметр более 0.4 м) и 1300 мелких водовыпусков (Доклад ..., 2010; 2012). Общая протяженность водосточной сети, эксплуатируемой ГУП “Мосводосток”, превышает 6200 км, а ее средняя густота в пределах МКАД — 6.9 км/км². Объем поверхностного стока территории составляет порядка 530–580 млн м³/год, из которых различные предприятия и организации сбрасывают 170–180 млн м³/год, а на долю собственно атмосферных осадков приходится около 380–410 млн м³/год (Доклад ..., 2009; 2010; 2012; 2015). Объем неорганизованного стока, поступающего в водные объекты по рельефу местности, минуя ливнесточную сеть, составляет еще порядка 80–250 млн м³/год (Доклад ..., 2013; 2015). Отметим очевидную связь количества выпавших осадков и объема твердого стока (см. табл. 2).

Для механической очистки поверхностного стока в устьях наиболее крупных ливнесточных коллекторов (“подземных рек”) построены: пруды-отстойники, песколовки, сооружения камерного типа, щитовые ограждения, сооружения глубокой очистки с фильтровальными насосными станциями и др. Общее количество таких очистных сооружений на балансе ГУП “Мосводосток” 162 шт. (Доклад ..., 2020, с. 116). В докладах “О состоянии окружающей среды в городе Москве” отмечается в целом низкая эффективность очистных сооружений и невозможность их реконструкции в условиях сложившейся плотной городской застройки. Из накопителей в устьях малых рек изымается лишь от 5 до 40 тыс. м³ грунта (Доклад ..., 2010; 2012; 2018; 2019; 2020), тогда как основная часть

наносов и взвешенных веществ попадает в принимающие реки и водоемы. Ежегодно ГУП “Мосводосток” проводит очистку прудов и рек города от ила и донных отложений в объемах от 1200 до 5700 тыс. м³ (Доклад ..., 2018; 2019; 2020).

Так, в результате долговременного хозяйственного освоения “на городском участке р. Москвы аккумулировалось до 25 млн м³ отложений различной степени загрязненности” (Богомолова, Курочкина, 2010, с. 402). В XX в. периодически проводилась промывка русла реки путем пропуска больших объемов паводковых или сбросовых вод; с 1998 г. проводится только механизированное удаление донных наносов (Щеголькова и др., 2016). Многолетние исследования фракционного состава смываемого грунта показывают, что от 50 до 65% приходится на песчаные фракции; 8.5% — на гальку, щебень и гравий; 26.5% — на пылеватые и глинистые частицы (Туралина, 2010, с. 20).

Помимо техноаллювия через ливнесточную сеть реализуются и взвешенные наносы, объем которых перманентно контролирует ГУП “Мосводосток”: в Старой Москве сформирована сеть из почти 30 контрольных створов, лабораторный анализ для которых проводится не реже раза в квартал. Для ливнесточной сети количественно оценить этот показатель значительно проще, чем твердый сток. С 2008 по 2017 г. объемы выносимых взвешенных веществ колебались в диапазоне от 47 до 124 тыс. т с тенденцией к снижению. Основными загрязнителями являются хлориды, сульфаты, биохимически разрушающиеся вещества (по БПК-5) и нефтепродукты, составляющие в сумме более 95% взвешенных веществ (Доклад ..., 2009; 2010; 2012; 2013; 2014; 2015; 2017; 2018; 2019; 2020). Так, суммарный показатель взвешенных веществ в Москва-реке возрастает с ~300 мг/дм³ на входе в город до 500 мг/дм³ на выходе из него (Богомолова, Курочкина, 2010). Заметим, что и минерализация атмосферных осадков в Москве варьирует год от года в широком диапазоне от 20–50 до 360 мг/дм³ с тенденцией к снижению (Еремина, 2019).

Столь высокая транспортирующая способность ливнесточной сети объясняется особенностями ее проектирования: наиболее крупные коллекторы сооружались преимущественно с одинаковым уклоном на всем протяжении. Транспорту наносов в малых коллекторах способствует форма их поперечного профиля — круглая или овоидальная (яйцеобразная), — что повышает скорость водного потока в безнапорных условиях (Неходцев, 2012).

К этому можно добавить, что транспортирующая способность паводков в “подземных реках” сопоставима с горными реками (Геоморфология городских..., 2017).

Таким образом, через ливнесточную сеть, концентрирующую поверхностный сток с 75% территории Москвы внутри МКАД, ежегодно выносятся от 230 до 350 тыс. т грунта и взвешенных веществ. С учетом площади (880 км²), модуль твердого стока здесь составляет в среднем порядка 160–250 м³/км² в год (или 2.6–4 т/га в год), что соответствует слою денудации 0.16–0.25 мм/год. В Старой Москве доля водонепроницаемых (без открытого грунта) поверхностей составляет 50%. В целом, измеренные для Калитниковского ручья объемы стока наносов следует признать близкими к минимальным ввиду плоского характера рельефа и отсутствия крупных строек в течение изученных годов. Очевидно, что при прочих равных модуль твердого стока будет возрастать в первую очередь при увеличении доли склоновых поверхностей, при наличии крупных строек и незадернованного грунта. Оценить влияние доли водонепроницаемых поверхностей на параметры твердого стока в настоящее время затруднительно. Заметим, что приведенные в настоящей работе расчеты существенно уточнили сделанные нами прежде выводы об объемах смыва грунта: прежние качественные оценки оказались занижены примерно в 2 раза (Неходцев, 2021).

В контексте настоящего анализа уместно упомянуть также объем сбросов с Курьяновских очистных сооружений (КОС), расположенных на юго-востоке города, напротив парка “Коломенское”. Здесь в Москва-реку сбрасываются очищенные сточные воды: бытовая (квартирная) канализация, различные промышленные стоки и расплавленный снег. Объем твердого стока, поступающего с очистных сооружений, немногим превышает таковой для ливнесточной канализации (см. табл. 2) при почти втрое превышающих объемах жидкого стока: 800–950 млн м³/год (Доклад ..., 2010; 2012). Общий жидкий сток с территории Москвы в описанные годы колебался в пределах 1200–1500 млн м³, в которые помимо анализированного выше ливневого стока входят сбросы КОС и других спецводопользователей. Суммарный объем грунта и других взвешенных веществ, поступающего через ливнесточную сеть, со склонов и с КОС (территория в пределах МКАД), таким образом, составляет порядка 300–400 тыс. м³ в год.

Столь колоссальное поступление наносов через подземные ливнеотстоки способствует активному заилению русел принимающих рек и водоемов. Например, в Яузе напротив водовыпусков “подземных рек” Хапиловки и Рыбинки измеренная нами в 2011 г. глубина составила всего 0.4–0.5 м, тогда как выше и ниже по течению — более 2 м. Сотрудники коммунальных служб вынуждены ежегодно проводить дноуглубительные работы — открытые водотоки не в состоянии быстро удалять возросшие объемы загрязнений вне замкнутых “русел” с (квази)напорным течением.

Из-за специфичного и объемного поступления материала с улиц подземные водостоки становятся яркими примерами коллекторов загрязняющих веществ. При этом количество загрязнителей в них оказывается феноменально высоким, особенно в центральных частях города. В устьях подземных рек Москвы фиксируется превышение нормативов культурно-бытового водопользования отдельных загрязнителей от 2–4 до 10–15 раз (нефтепродукты, железо, марганец, цинк) (Доклад ..., 2009; 2010; 2015; 2018). В настоящее время потенциал самоочищения Москва-реки в пределах города полностью исчерпан, диагностируется активное вторичное загрязнение донными наносами речных вод ниже по течению (Богомоллова, Курочкина, 2010; Щеголькова и др., 2016).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные нами расчеты носят ориентировочный характер из-за неполноты статистических данных по годам и в целом методологически сложной процедуры подсчета смыва грунта с крайне дифференцированных урбанизированных пространств. Увеличение поверхностного стока на фоне слаборазвитой культуры закрепления открытых грунтов и активного строительства привело к тому, что средний объем твердого вещества, поступающего непосредственно с территории Москвы (внутри МКАД) в реки и водоемы, достиг 160–250 м³/км² в год. При этом даже в пределах плоских поверхностей с амплитудами высот до 6–7 м, каким является исследованный бассейн Калитниковского ручья, смыывается порядка 100 м³/км² грунта в год. Полученные результаты однозначно подтверждают высокую степень среднегодовой токсической нагрузки на экосистемы рек и водоемов города. Урбанизация ландшафтов является одним из важных факторов изменения

параметров речного стока, как жидкого, так и стока наносов и взвешенных веществ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность за помощь в сборе и обработке фактического материала Г.И. Виноградову, Д.Ю. Давыдову, С.А. Корневу, И.С. Подосинникову и пресс-службе ГУП “Мосводосток”. Исследование проведено в рамках темы госзадания “Эволюция природной среды в кайнозое, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования” (ЦИТИС 121040100323-5) на кафедре геоморфологии и палеогеографии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и при поддержке Русского географического общества (проект 23/2022-Р “Рельеф Новой Москвы: ресурсы и риски природопользования”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богомоллова Т.Г., Курочкина В.А. (2010). Загрязнение речных русел на урбанизированных территориях и инженерные мероприятия по улучшению их экологического состояния. *Вестн. МГСУ*. Т. 2. № 4. С. 399–404.
- Воронов Ю.В., Яковлев С.В. (2006). Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов. 704 с.
- Геологический атлас Москвы (в 10 томах с пояснительной запиской). Масштаб 1:10 000 (2010). ГУП Мосгоргеотрест.
- Геоморфология городских территорий: конструктивные идеи. (2017). Под ред. Э.А. Лихачёвой. М.: Медиа-ПРЕСС. 176 с.
- Доклад о состоянии окружающей среды в Москве в 2008 году. (2009). М.: Типография ООО “Формула Цвета”. 209 с.
- Доклад о состоянии окружающей среды в Москве в 2010 году. (2010). М. 135 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/63261220/> (дата обращения: 22.06.2022)
- Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2011 году. (2012). Под общ. ред. А.О. Кульбачевского. М.: Спецкнига. 150 с.
- Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2012 году. (2013). Правительство Москвы, Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы. Под общ. ред. А.О. Кульбачевского. М.: Спецкнига. 178 с.
- Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2013 году. (2014). Правительство Москвы, Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы. Под общ. ред. А.О. Кульбачевского. М.: “ЛАРК ЛТД”. 222 с.

- Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2014 году. (2015). Под ред. А.О. Кульбачевского. М.: ДПиООС, НИА-Природа. 384 с.
- Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2016 году. (2017). Под ред. А.О. Кульбачевского. М.: ДПиООС, НИИПИ ИГСП. 363 с.
- Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2017 году. (2018). Под ред. А.О. Кульбачевского. М.: ДПиООС. 358 с.
- Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2018 году. (2019). Под ред. А.О. Кульбачевского. М.: ДПиООС; НИИПИ ИГСП: ООО "Студия Арроу". 247 с.
- Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2019 году. (2020). Под ред. А.О. Кульбачевского. М.: ДПиООС. 222 с.
- Еремина И.Д. (2019). Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений. *Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География*. № 3. С. 3–10.
- Ивлев А.П. (1954). Под улицами города. М.: Изд-во Мин. коммун. хоз-ва РСФСР. 48 с.
- Коронкевич Н.И., Бибилова Т.С., Долгов С.В. и др. (2017). Гидрологические последствия хозяйственной деятельности на водосборах. В сб.: *Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения*. Новочеркасск: Лик. С. 78–84.
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С. (2015). Трансформация стока под влиянием ландшафтных изменений в бассейне реки Москвы и на территории города Москвы. *Водные ресурсы*. Т. 42. № 2. С. 133–143. <https://doi.org/10.7868/S0321059615020066>
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С. (2017). Изменение стока реки Москвы в результате антропогенных воздействий. *Водные ресурсы*. Т. 44. № 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.7868/S0321059617010072>.
- Львович М.И. (1986). Вода и жизнь: Водные ресурсы, их преобразование и охрана. М.: Мысль. 254 с.
- Насимович Ю.А. (1996). Аннотированный список названий рек, ручьёв и оврагов Москвы. М.: ВНИИ охраны природы Минприроды РФ. 114 с.
- Неходцев В.А. (2012). Эрозионно-русловые процессы и субрельеф подземных (коллекторных) водотоков. В сб.: *Спелеология и спелестология: мат-лы конференции*. № 3. С. 231–236.
- Неходцев В.А. (2021). Последствия техногенного погребения рек в городах (на примере Москвы). *Известия РАН. Серия географическая*. № 2. С. 238–247. <https://doi.org/10.31857/S2587556621020126>
- Расписание погоды. [Электронный ресурс.] URL: <https://gr5.ru/> (дата обращения: 24.05.2022)
- Туралина Т.С. (2010). Разработка системы переработки грунта песчано-илистого, образующегося в ГУП "Мосводосток", с получением товарных фракций песка. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. № 11 (35). С. 20–24.
- Щеголькова Н.М., Веницианов Е.В., Звезденкова Г.А. и др. (2016). Многолетняя динамика процессов самоочищения как интегральный показатель для выбора управляющих воздействий (на примере реки Москвы). *Водное хозяйство России*. № 4. С. 103–117. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2016-4-7>

SOLID RUNOFF ASSESSMENT OF MOSCOW TERRITORY¹

V. A. Nekhodtsev^{a,b,#} and G. D. Emdin^c

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

^bWeizmann Institute of Science, Rehovot, Israel

^cITMO University, Saint Petersburg, Russia

[#]E-mail: nekhodtsev.v@gmail.com

Over half of the existing river valleys and gullies on the territory of Moscow (within the Moscow Ring Road) for the XVIII–XX centuries were buried because of land development. Along with this, a network of storm-water drains (underground pipes) was built with an average density of 6.9 km/km². Now the impermeable surfaces (roofs of buildings, sidewalks, roads etc.) cover 50% of total Moscow territory. Surface runoff, including soil, suspended and dissolve loads now enters remaining streams and ponds through storm-water network. It has been estimated, that on average the annual solid runoff from the surface area of 880 km² is about 160–250 m³/km² (or 2.6–4 ton/ha per year). About 100 m³/km² of sediment per year is being washed off from flat surfaces (e.g. fluvial terraces) with amplitudes of less than 6–7 m. The reason of increase sedimentation and dissolved substances in runoff is a poor maintained storm-water network, extensive urban development, and intensification of aeolian transit from construction sites. The total quantity of particulate matter (suspended or bedload) coming from the storm-water drains lead to an explosive increase in sediment runoff exceeding the transporting capacity of the preserved rivers. The potential of the Moskva River to remove the increased runoff of sediments and pollutants has now been completely exhausted.

Keywords: city, drainage basin, hazardous processes, relief, solid runoff, underground river, urban runoff

¹ For citation: Nekhodtsev V.A., Emdin G.D. (2024). Solid runoff assessment of Moscow territory. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 1. P. 40–51. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178924010043>; <https://elibrary.ru/IRSJOG>

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful of D.Yu. Davydov, S.A. Kornev, I.S. Podosinnikov, G.I. Vinogradov and the press service of the State Unitary Enterprise “Mosvodostok” for the assistance in collecting and processing the material. The work was carried out under the State Research Task № 121040100323-5 “Evolution of the natural environment in the Cenozoic, relief dynamics, geomorphological hazards and risks of nature management” in the Department of geomorphology and paleogeography (Lomonosov Moscow State University) and under the Russian Geographical Society (project № 23/2022-P “Relief of New Moscow: resources and risks of land use”).

REFERENCES

- Bogomolova T.G., Kurochkina V.A. (2010). Pollution of urbanized rivers and engineering conception for reclamation and improvement of river ecology. *Vestnik MGSU*. № 4–2. P. 399–404. (in Russ.)
- Eremina I.D. (2019). Chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and the trends of its long-term changes. *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. № 3. P. 3–10. (in Russ.)
- Geologicheskii atlas Moskvyy m-ba 1:10 000 (v 10 tomakh s poyasnitel'noi zapiskoi) (Geological Atlas of Moscow scale 1:10 000 (1–10 Vol. with explanatory note). (2010). Moscow: SOE Mosgorgeotrest (Publ.). (in Russ.)
- Ivlev A.P. (1954). Pod ulitsami goroda (Under the City's Streets). Moscow: Public utilities government of RSFSR (Publ.). 48 p. (in Russ.)
- Koronkevich N.I., Bibikova T.S., Dolgov S.V. et al. (2017). Hydrological effects of industry in catchment area. In: *Vodnye resursy: novye vyzovy i puti resheniya*. Novocherkassk: Lik (Publ.). P. 78–84. (in Russ.)
- Koronkevich N.I., Melnik K.S. (2015). Runoff transformation under the effect of landscape changes in the Moskva R. Basin and in the territory of Moscow City. *Water Resources*. Vol. 42. P. 159–169. (in Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0097807815020062>
- Koronkevich N.I., Melnik K.S. (2017). Changes in Moskva R. runoff under anthropogenic impacts. *Water Resources*. Vol. 44. P. 1–11. (in Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0321059617010072>.
- Kul'bachevskii A.O. (Ed.). (2009). Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2009 godu (Report about situation of the Moscow environment in 2009). Moscow: Formula Tsveta (Publ.). 209 p. (in Russ.)
- Kul'bachevskii A.O. (Ed.). (2010). Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2010 godu (Report about situation of the Moscow environment in 2010). Moscow. 135 p. [Electronic data]. Access way: <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/63261220/> (access date: 22.06.2022) (in Russ.).
- Kul'bachevskii A.O. (Ed.). (2012). Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2011 godu (Report about situation of the Moscow environment in 2011). Moscow: Spetskniga (Publ.). 150 p. (in Russ.)
- Kul'bachevskii A.O. (Ed.). (2013). Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2012 godu (Report about situation of the Moscow environment in 2012). Moscow: Spetskniga (Publ.). 178 p. (in Russ.)
- Kul'bachevskii A.O. (Ed.). (2014). Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2013 godu (Report about situation of the Moscow environment in 2013). Moscow: LARK LTD (Publ.). 222 p. (in Russ.)
- Kul'bachevskii A.O. (Ed.). (2015). Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2014 godu (Report about situation of the Moscow environment in 2014). Moscow: DPiOOS, NIA-Priroda (Publ.). 384 p. (in Russ.)
- Kul'bachevskii A.O. (Ed.). (2017). Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2016 godu (Report about situation of the Moscow environment in 2016). Moscow: DPiOOS, NIPI IGSP (Publ.). 363 p. (in Russ.)
- Kul'bachevskii A.O. (Ed.). (2018). Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2017 godu (Report about situation of the Moscow environment in 2017). Moscow: DPiOOS (Publ.). 358 p. (in Russ.)
- Kul'bachevskii A.O. (Ed.). (2019). Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2018 godu (Report about situation of the Moscow environment in 2018). Moscow: DPiOOS, NIPI IGSP: Studio Arrou (Publ.). 247 p. (in Russ.)
- Kul'bachevskii A.O. (Ed.). (2020). Doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2019 godu (Report about situation of the Moscow environment in 2019). Moscow: DPiOOS (Publ.). 222 p. (in Russ.)
- Likhacheva E.A. (Ed.). (2017). Geomorfologiya gorodskikh territorii: konstruktivnye idei (Urban Geomorphology: Constructive Ideas). Moscow: Media-Press (Publ.). 176 p. (in Russ.)
- L'vovich M.I. (1986). Voda i zhizn': vodnye resursy, ikh preobrazovanie i okhrana (Water and life: Water resources, their transformation and protection). Moscow: Mysl' (Publ.). 254 p. (in Russ.)
- Nasimovich Yu.A. (1996). Annotirovannyi spisok nazvanii rek, ruch'ev i ovragov Moskvyy (Annotated List of Moscow's Rivers, Streams and Ravines Names). Moscow: VINITI RAN (Publ.). 114 p. (in Russ.)
- Nekhodtsev V.A. (2021). Consequences of Man-Made Burial of Rivers in Cities (Case of Moscow). *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. № 2. P. 238–247. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556621020126>
- Nekhodtsev V.A. (2012). The erosion and channel processes and subrelief of the underground water courses. In: *Speleologiya i speleotologiya: sbornik materialov konferentsii*. № 3. P. 231–236. (in Russ.)
- Shchegolkova N.M., Venitsianov E.V., Rybka K.Yu. et al. (2016). Long-term dynamics of self-cleaning processes as an integral indicator for the selection of control actions (in case of the Moscow River). *Vodnoe khozyaistvo Rossii*. № 4. P. 103–117. (in Russ.)

- Turalina T.S. (2010). Development of a system for processing sandy-silty soil formed in the SUE “Mosvodostok”, with the production of commercial sand fractions. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. № 11 (35). P. 20–24. (in Russ.)
- Voronov Yu.V., Yakovlev S.V. (2006). *Vodootvedenie i ochistka stochnykh vod* (Wastewater disposal and treatment). Moscow: Assotsiatsii stroitelnykh vuzov (Publ.). 704 p. (in Russ.)
- Weather schedule. [Electronic data]. Access way: <https://rp5.ru/> (access date: 24.05.2022)