

УДК 519.685

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ МОСКОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ Р. СЕТУНИ)

© 2025 г. И.С. Денисова^{1, 2, *}, М.В. Болгов¹¹ Институт водных проблем РАН, Москва, Россия² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: ira.denisova@icloud.com

Поступила в редакцию 25.06.2024 г.

После доработки 11.02.2025 г.

Принята к публикации 29.03.2025 г.

Московская агломерация характеризуется высокой долей непроницаемых покрытий, объясняющей формирование специфического водного режима с большим количеством кратковременных паводков и быстрой реакцией водосбора на ливневые осадки. Для одного из крупнейших притоков Москвы-реки в черте столицы — бассейна р. Сетуни — с помощью модели SWMM воспроизведено формирование экстремальных паводков в 2020–2023 гг. Модель была откалибрована с учетом 30-минутных мониторинговых данных о расходах воды и 10-минутных интенсивностей осадков, полученных путем интерполяции в центр водосбора. Эффективность модели оценивалась с использованием относительной погрешности (R_E) и коэффициента детерминации (R^2). Результаты калибровки и проверки показали хорошую взаимосвязь между смоделированными и измеренными максимальными расходами воды ($R^2 = 0.77$, относительная погрешность — в диапазоне от 2 до 56%). Наиболее адекватные результаты были получены для паводков, пиковые расходы которых превышали $15 \text{ м}^3/\text{с}$.

Ключевые слова: урбанизированные территории, паводочный сток, Московская агломерация, SWMM, экстремальные осадки

DOI: 10.31857/S0869607125020051, EDN: KXUGLG

Введение

Исследование ливневого стока и смыва загрязняющих веществ с урбанизированных территорий является одной из важнейших задач гидрологии городов. Трансформация водосборов, приводящая к уменьшению времени добегания стока и сокращению продолжительности паводков, организация коллекторов ливневой канализации приводят к росту пиковых расходов на водотоках урбанизированных территорий [20] и затоплению прибрежных участков. Под паводками понимается фаза водного режима, которая может многократно повторяться в различные сезоны года и характеризуется интенсивным, кратковременным увеличением расходов и уровней воды за счет выпадения дождевых осадков или снеготаяния во время зимних оттепелей. С начала XXI века в городах, в частности в Московской агломерации (т.е. в Москве и в Московской области), произошло существенное изменение структуры осадков — был выявлен положительный тренд для интенсивности коротких ливней [5, 7, 10, 12, 25].

В условиях городской территории, характеризующейся специфическим гидрометеорологическим режимом и высокой плотностью населения, наблюдается тен-

денция к увеличению числа чрезвычайных ситуаций (ЧС), сопровождающихся значительными ущербами. Оценка рисков и обоснование систем предотвращения таких событий является сложной задачей, так как гидрологический мониторинг малых рек в пределах Москвы весьма ограничен. В этом контексте приобретает важное значение использование новых форм и способов получения исходной метеорологической информации, а также совершенствование научно-методического и информационно-аналитического аппарата прогнозирования ЧС [2].

Особенности формирования стока на урбанизированных территориях, в частности в Московской агломерации, изучены слабо. С 2019 г. в бассейне р. Сетуни функционирует система гидролого-геохимического мониторинга, осуществляемого географическим факультетом МГУ [10, 11, 22–24]. Проводимый мониторинг является уникальным многолетним экспериментом, так как данные на сети станций получены с помощью автоматизированных датчиков уровня воды с дискретностью записи 30 мин.

Целью настоящего исследования стала разработка моделей, позволяющих осуществлять прогноз опасных гидрологических событий в городских условиях. В работе решались следующие задачи: 1) выявление факторов формирования стока на урбанизированных территориях; 2) разработка методики получения информации об осадках при нехватке данных; 3) определение гидрологических характеристик, влияющих на оценку зон затопления застроенных территорий. В данной статье представлены результаты моделирования паводочного стока р. Сетуни путем реализации системы SWMM, проведена калибровка и проверка модели с использованием данных высокочастотного мониторинга. В дальнейшем результаты этого исследования позволят разработать более эффективные стратегии по снижению ущерба от ЧС на урбанизированных территориях Московской агломерации.

Материалы и методы

Бассейн 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 — реки Сетунька (в верховьях), Навершка и Раменка (в нижнем течении) [22]. Коммунальные и промышленные стоки, а также сброс неочищенных ливневых вод с улично-дорожной сети оказывают сильное влияние на термический и ледовый режим р. Сетуни — они повышают температуру воды на 2°–6°C, из-за чего не формируется ледяной покров даже при устойчивых низких температурах зимой; при этом мутность воды в 3 раза выше, чем в верховьях бассейна р. Москвы, по причине залповых сбросов из дренажно-коллекторной сети [8].

Около 30% от площади водосбора р. Сетуни составляют урбанизированные территории. Оценки характеристик были получены с использованием данных OpenStreetMap¹, представленных в векторном формате в системе координат WGS84

¹ <https://data.nextgis.com/ru/catalog/subdivisions/?country=RU>

(ESPG: 4326). В бассейне Сетуни присутствуют все виды ландшафтов, характерные для застроенных территорий города Москвы. Для анализа функциональных зон водосбора (рис. 1) использованы данные о землепользовании и типах земельного покрова — всего было выделено 4 категории: 1) промышленные зоны, 2) коммерческие зоны, 3) жилые зоны, 4) зеленые зоны. Помимо этого, были проанализированы доли водонепроницаемых поверхностей в бассейне.

Мониторинговые данные

Данные на сети станций были получены с помощью автоматизированных датчиков уровня воды НОВО U20L, Solinst Levelogger 5 Junior и Keller DCX-22-ECO с дискретностью записи 30 мин, начиная с 14 ноября 2019 г. Логгеры фиксируют суммарное давление воды и атмосферы. Для расчета уровня воды над логгером проводилась барометрическая компенсация (1) по данным ближайших метеостанций (для постов выше МКАД — метеостанция Внуково, ниже МКАД — Балчуг):

$$h = (P_{\text{logger}} - P_0) \cdot 0.0101972, \quad (1)$$

где h — уровень воды над логгером (м), P_{logger} — суммарное давление воды и атмосферы (гПа), P_0 — величина атмосферного давления (гПа).

В разные фазы водного режима эпизодически 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.

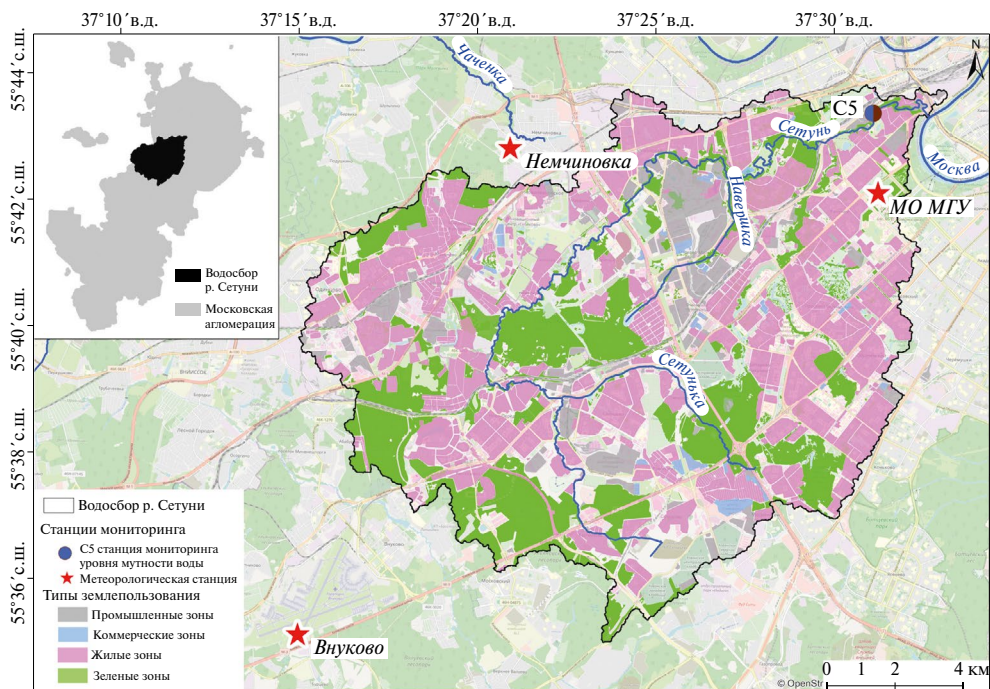


Рис. 1. Станции мониторинга в бассейне р. Сетуни и его функциональные зоны.

Fig. 1. Monitoring stations in the Setun River basin and its functional areas.

Первичная обработка данных

Уровни воды, измеренные с помощью логгера, были пересчитаны в расходы воды. За основу были взяты фактические измерения расходов воды, которые в дальнейшем позволили выявить взаимосвязь между уровнями (H , м) и расходами воды (Q , м³/с) по формуле

$$Q_{C5} = \begin{cases} 8.935 \cdot H^2 - 4.056 \cdot H, & \text{если } H < 1.07 \\ 15 \cdot H - 10.15, & \text{если } H > 1.07 \end{cases}, \quad (2)$$

где Q — расход воды (м³/с), H — уровень воды над 0 графика поста (м).

Для выявления грубых ошибок в данных проведена обработка рядов при помощи фильтра Савицкого—Голея [16, 20], реализованного в пакете *phenofit* языка программирования R. Фильтр Савицкого—Голея является алгоритмом обработки сигналов, который можно применить к набору цифровых точек данных с целью их сглаживания без искажения тенденции сигнала. Он основан на методе наименьших квадратов, позволяя аппроксимировать данные с помощью полинома. Основные параметры фильтра — ширина окна (определяет количество точек, используемых для сглаживания), порядок полинома (указывает степень полинома, который используется для аппроксимации данных в пределах заданного окна) и коэффициенты свертки (коэффициенты, рассчитываемые на основе уравнений наименьших квадратов).

Цель данного метода заключается в удалении выбросов и белого шума (краткосрочных и слабоинтенсивных колебаний). В данной методике использовались весовые коэффициенты, определяющие значимость конкретного значения 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). Сглаживание данных и удаление выбросов производилось исходя из соображения, что расходы воды не могут резко понижаться, а потом снова повышаться за определенную единицу времени. Необходимо было определить отрицательные пики, то есть найти граничные значения между естественным падением расхода и искусственным. Значениям, выходящим за данный диапазон, присваивались веса, равные 0.2. В случае, если встречалось 3 значения расхода с весом 0, это определялось как выброс, и их вес становился равным 0 (см. рис. 2, 3).

Наиболее репрезентативными для моделирования расходов воды являются данные, полученные в замыкающем створе С5, так как они характеризуются непрерывностью ряда и частым измерением фактических расходов воды в различные фазы водного режима, что обуславливает достоверность полученных данных и надежность зависимости $Q = f(H)$. В связи с этим моделирование и калибровка в настоящей статье были проведены с использованием расходов воды на данном гидропосте.

Метеорологические данные

Для характеристики осадков использованы данные об их интенсивности с дискретностью 10 мин, полученные с метеостанции МГУ им. М.В. Ломоносова (МО МГУ), оснащенной плювиографом. Для достоверного результата необходимы подробные сведения о пространственном распределении осадков, так как с использованием данных одной метеостанции невозможно воспроизвести неравномерность их выпадения. В статье была предложена альтернативная методика — использова-

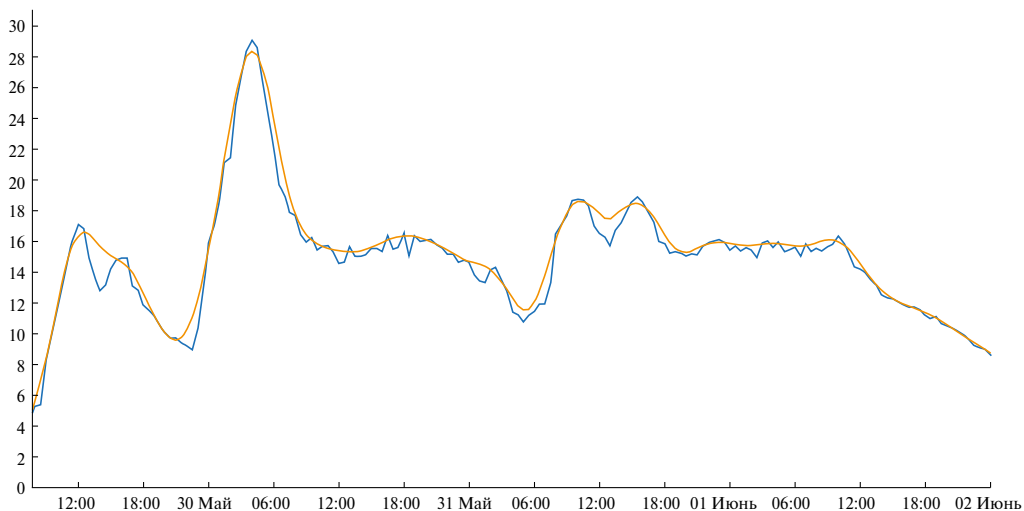


Рис. 2. Результат сглаживания гидрографа.

Fig. 2. Hydrograph smoothing result.

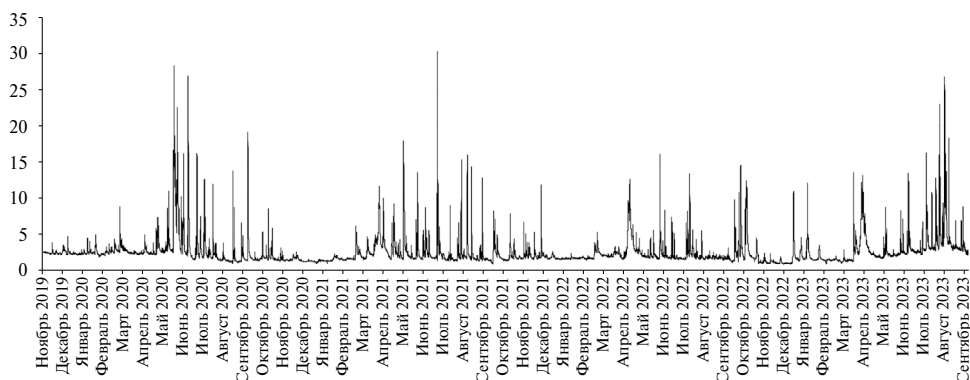


Рис. 3. Гидрограф р. Сетуни после применения фильтра Савицкого—Голея.

Fig. 3. Hydrograph of the Setun River after applying the Savitzky—Golay filter.

ние метода кригинга. Данные, полученные с ближайших метеостанций (МО МГУ, Внуково, Немчиновка), были интерполированы в центроид водосбора р. Сетуни методом “Универсального кригинга”² [10]. Полученные 3-часовые данные об осадках были приведены к данным плувиограмм, записанных на МО МГУ, с помощью переводного коэффициента (рис. 4, 5).

Моделирующая система SWMM

Формирование паводочного стока Сетуни воспроизводилось с использованием динамической модели формирования дождевого стока Storm Water Management Model (SWMM). Эта модель разработана для изучения работы систем ливневой

² <https://github.com/atsyplenkov/setun-meteo-kriging.git>

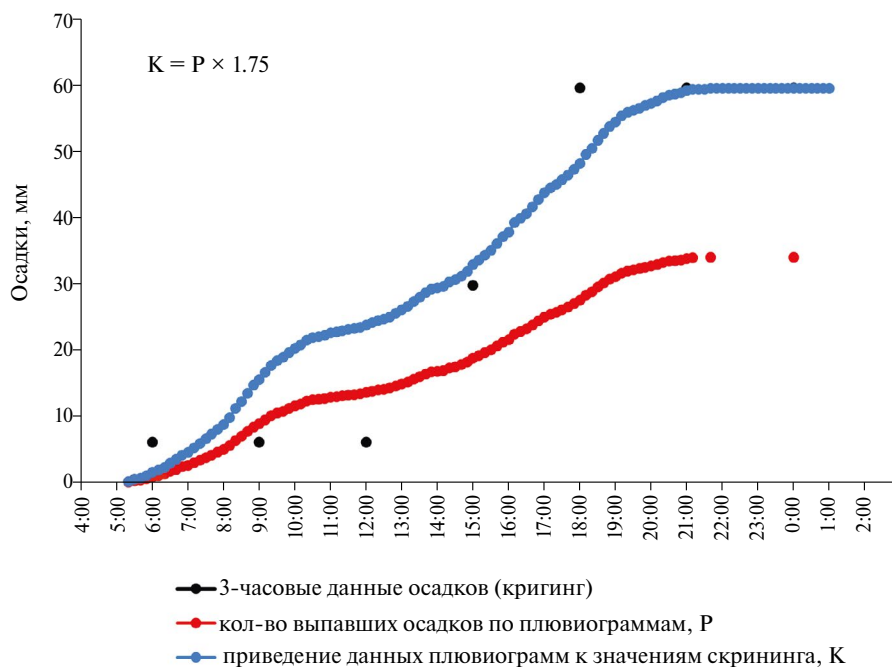


Рис. 4. Приведение данных плувиограмм, записанных на МО МГУ, к значениям кригинга за 08.05.2021 г.

Fig. 4. Reduction of rain gauge chart data recorded at the MSU weather station to kriging values for 05.08.2021.

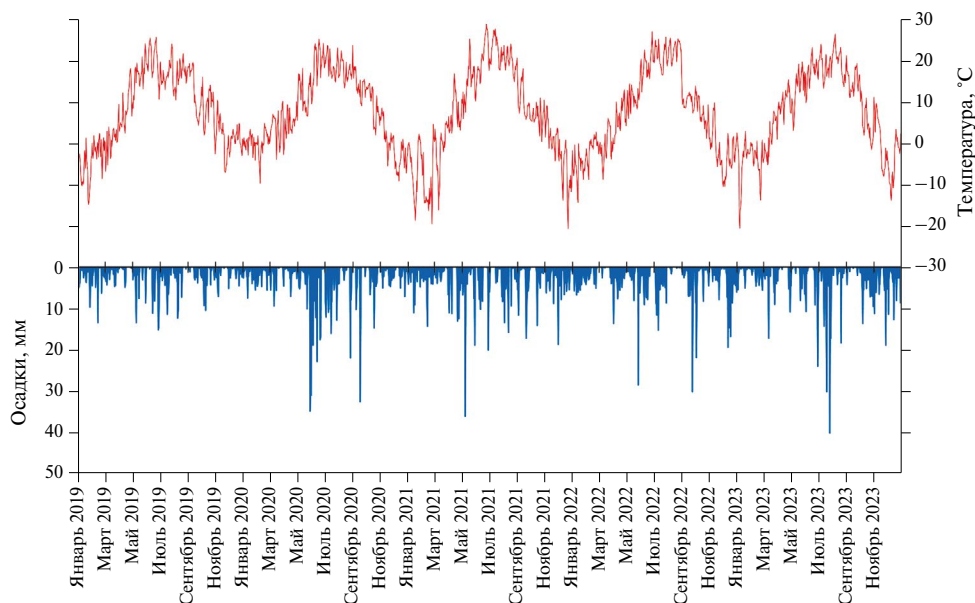


Рис. 5. Среднесуточная сумма осадков (левая ось) и температуры воздуха (правая ось), полученные с метеостанций МГУ, Немчиновка и Внуково методом кригинга, за 2019–2023 гг.

Fig. 5. Daily average sum of precipitation (left axis) and air temperature (right axis) obtained from the weather stations of MSU, Nemchinovka and Vnukovo using the kriging method, in 2019–2023.

канализации на застроенных территориях и предполагает разделение объекта исследования на элементарные водосборы, определение параметров, влияющих на потери в результате инфильтрации, склоновое задержание и склоновое добегание. SWMM широко применяется в инженерных расчетах по всему миру, однако в России ее использование ограничено [2, 3, 15, 17, 18].

SWMM подразделяется на два основных блока, которые позволяют моделировать большинство количественных и качественных характеристик гидрологического цикла на урбанизированной территории: первый блок производит расчет процесса формирования стока с территории каждого элементарного водосбора, второй — рассчитывает движение потока по русловой сети по системе уравнений Сен-Венана [2].

SWMM учитывает различные гидрологические процессы, которые приводят к образованию стока с городских территорий. К ним относятся изменяющиеся во времени осадки, испарение с водной поверхности, накопление и таяние снега, инфильтрация осадков в ненасыщенные слои почвы, просачивание воды в слои грунтовых вод, перетоки между грунтовыми водами и дренажной системой, улавливание и удержание осадков/стоков с помощью различных методов. Пользователю необходимо задать входные параметры для калибровки имитационной модели. Исследуемая территория может быть разделена на любое количество элементарных подводосборов, сток каждого из которых собирается в одной точке (узле). Размеры исследуемых территорий могут варьироваться от небольшой части одного участка до тысяч гектаров. SWMM использует данные об осадках с разной дискретностью и может быть реализован для отдельных событий или в непрерывном режиме на протяжении любого количества лет.

Первым шагом при моделировании являлась разбивка бассейна на элементарные водосборы и анализ цифровой модели рельефа (ЦМР), построенной с помощью информации со спутника *ALOS*, съемочной аппаратуры *PALSAR* с разрешением 12.5 м, в программном комплексе ArcGIS (см. рис. 6) [2]. С учетом характеристик исследуемой территории водосбор был разделен на 20 подбассейнов, что представляет собой достаточно детальную дискретизацию.

Далее производился расчет доли непроницаемой территории, для которой не происходит фильтрации воды в грунт. Для расчета непроницаемых территорий использовались данные о застройке на территории бассейна, а также площадные характеристики дорог. Ширина дороги определялась в зависимости от ее типа (внутриквартальная, межрайонная, автомагистраль и т.д.), после чего строились буферы, которые в результате суммировались с данными о застройке. Модель также была откалибрована с учетом информации о типах поверхности (см. рис. 1) и наличии прудов (см. рис. 6), полученных в результате обработки данных OpenStreetMap. В данном исследовании использовалась информация о наличии прудов в каждом элементарном водосборе, т.е. допускалось, что поверхностный сток перехватывается прудами, а затем поступает в речную сеть Сетунь.

В SWMM заложено несколько вариантов моделирования процессов инфильтрации в грунт. В настоящем исследовании был использован классический метод Хортонa [1]. Этот метод основан на эмпирических наблюдениях, показывающих, что инфильтрация снижается экспоненциально от начальной максимальной скорости до некоторой минимальной скорости в течение продолжительных дождей. Входные параметры, необходимые для этого метода, включают максимальную и минимальную скорость инфильтрации, коэффициент затухания, который опи-

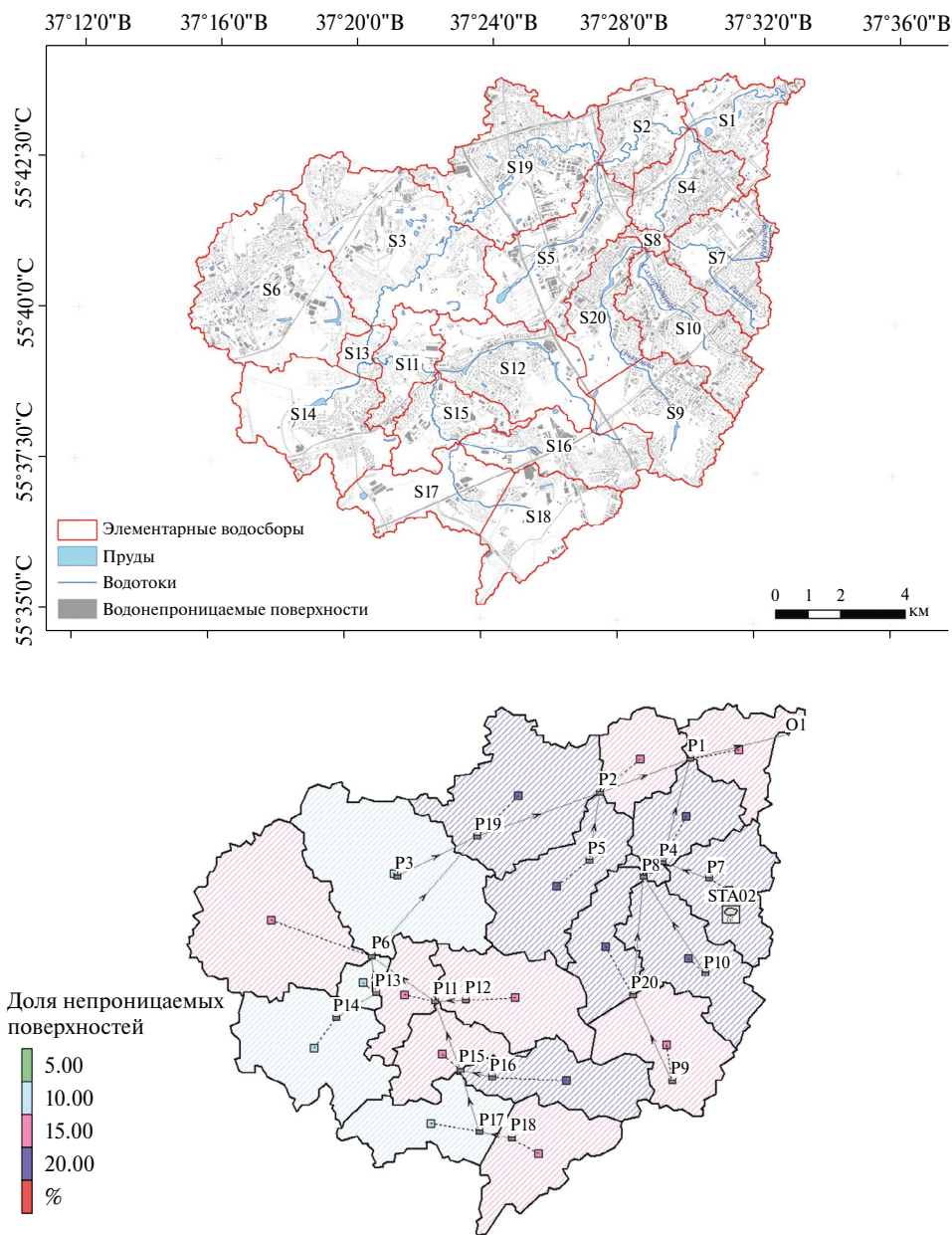


Рис. 6. Карта-схема бассейна р. Сетуни, использованная для моделирования затопления, построенная в ArcGIS (сверху) и в SWMM (снизу) (P1 – водоудерживающие емкости).

Fig. 6. Schematic map of the Setun River basin used for flood modeling, built in ArcGIS (top) and SWMM (bottom) (P1 – water retention tanks/storage units).

сывает, насколько быстро скорость уменьшается с течением времени, и время, необходимое полностью насыщенному почве для полного высыхания. В табл. 1 представлены калибровочные параметры, использованные для моделирования стока в бассейне р. Сетуни. Их выбор основывался на принципах, представленных в работе [19].

Сбор сведений о свойствах почв на территории Московской агломерации и подбор коэффициентов инфильтрации осуществлялись на основе Цифровой среднемасштабной Почвенной карты Московского региона³ и литературных источников [14].

Таблица 1. Параметры калибровки гидрологического и гидравлического модуля SWMM

Table 1. Calibration parameters for SWMM hydrology and hydraulic module

№	Название	Значение	Диапазон используемых значений
1	% Imperv	Доля непроницаемых покрытий (%)	7–19
2	Max. Infil. Rate	Максимальная скорость инфильтрации по кривой Хортон (мм/час)	25.4–42.3
3	Min. Infil. Rate	Минимальная скорость инфильтрации по кривой Хортон (мм/час)	3.3–30
4	Decay Constant	Константа затухания скорости инфильтрации для кривой Хортон (1/час)	5
5	Drying Time	Время в днях, необходимое для полного высыхания полностью насыщенной почвы	14
6	N-imp	Коэффициент Маннинга для непроницаемых поверхностей	0.011
7	N-perv	Коэффициент Маннинга для проницаемых поверхностей	0.3
8	Conduit Roughness	Коэффициент Маннинга для трубопроводов	0.01–0.03

Моделирование паводочного стока р. Сетуни выполнялось для 16 паводков, параметры которых представлены в табл. 2. Для характеристики стока во время паводков были рассчитаны объем стока, слой стока, максимальный расход и модуль стока, а также продолжительность паводка. Затем были проанализированы стокообразующие осадки — рассчитан слой осадков за дождь, продолжительность, интенсивность за дождь и максимальная интенсивность за 30 минут.

На основе анализа чувствительности параметров модели были определены наиболее значимые параметры, такие как доля непроницаемых поверхностей и наличие водоудерживающих емкостей (прудов), после чего были откалиброваны менее значимые параметры, например учет предшествующего состояния влажности водосборного бассейна (период между дождями). Калибровка модели осуществлялась путем подбора параметров: модель калибровалась до тех пор, пока смоделированные и фактически измеренные расходы не стали идентичными.

Статистические операции

Результаты моделирования оценивались с использованием статистических критериев относительной погрешности максимальных расходов (R_E) и коэффициента детерминации (R^2), рассчитываемых по формулам (3)–(4) соответственно:

$$R_E = \frac{|Q_{\max}^{\text{факт}} - Q_{\max}^{\text{модел}}|}{Q_{\max}^{\text{факт}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

³ <https://soil-db.ru/map/moscow-region>

Таблица 2. Основные характеристики анализируемых паводков**Table 2.** Main characteristics of the analyzed floods

№	Дата	Продолжительность паводка, ч	Максимальный измеренный расход $Q_{\max}$, м ³ /с	Слой осадков, мм	Метеоданные
1	20.06.2020	10.5	26.9	33.8	МО МГУ
2	08.05.2021	20	18.4	59.5	Кригинг
3	28.05.2021	5	6.2	2.7	МО МГУ
4	27.06.2021	6	11.1	12.8	МО МГУ
5	28.06.2021	12.5	30.8	43.4	МО МГУ
6	01.07.2021	6.5	6.5	5.4	Кригинг
7	17.07.2021	7	9.9	4.7	Кригинг
8	30.07.2021	9	7.4	6.3	Кригинг
9	03.08.2021	9	16.8	19.4	МО МГУ
10	12.08.2021	12.5	16.4	43.8	Кригинг
11	18.08.2021	12	15.6	18.6	Кригинг
12	03.09.2021	9	13.9	11.7	МО МГУ
13	20.09.2021	12	8.5	29.5	Кригинг
14	15.10.2021	12.5	7.9	25.9	Кригинг
15	22.09.2022	18.5	10.7	12.3	Кригинг
16	27.07.2023	34.5	26.8	64.6	Кригинг

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{\text{факт}} - Q_t^{\text{сред.факт}})(Q_t^{\text{модел}} - Q_t^{\text{сред.модел}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{\text{факт}} - Q_t^{\text{сред.факт}})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{\text{модел}} - Q_t^{\text{сред.модел}})^2}} \right)^2, \quad (4)$$

где $Q_t^{\text{факт}}$ — фактически измеренный расход в момент времени t ; $Q_t^{\text{модел}}$ — смоделированный расход в момент времени t ; $Q_t^{\text{сред.факт}}$ — средний фактически измеренный расход в момент времени t ; $Q_t^{\text{сред.модел}}$ — средний смоделированный расход в момент времени t ; $Q_{\max}^{\text{факт}}$, $Q_{\max}^{\text{модел}}$ — пиковый фактически измеренный и смоделированный расход; t — время, n — общее количество временных шагов.

R_E — это процент погрешности (отношение абсолютной погрешности и фактических значений), который показывает надежность прогнозируемого значения. По критериям количественной оценки калибровка модели может считаться хорошей, если среднее значение R_E находится в пределах 30%, и удовлетворительной, когда средний R_E находится в пределах 60% [13].

R^2 показывает, насколько хорошо наблюдаемые значения воспроизводятся моделированием как доля от общего изменения результатов, объясненных моделированием [17]. Проверка значимости осуществлялась с помощью теста Манна—Кендалла при уровне значимости p -value 5%. Если уровень значимости p -value был >0.05 , то нулевая гипотеза принималась. Полученные коэффициенты детерминации R^2 интерпретировались следующим образом: $0.01 \leq R^2 \leq 0.09$ — теоретически недостаточно подтвержденная связь, $0.09 \leq R^2 \leq 0.49$ — средняя (умеренная) связь, $0.49 \leq R^2 \leq 1$ — достаточно сильная связь [4].

Результаты и обсуждение

Для оценки влияния метеорологических факторов на объем стока в тестовом режиме были смоделированы два сценария — с использованием данных одной метеостанции МО МГУ и с привлечением данных кригинга (интерполяции данных в центр водосбора с нескольких метеостанций). Использование данных об осадках с одной метеостанции показало низкую эффективность и значимое занижение смоделированных расходов воды в замыкающем створе (см. рис. 7).

Калибровка и проверка гидрологических параметров дали хорошие результаты для паводков, максимальные расходы которых превышали $15 \text{ м}^3/\text{с}$ (см. рис. 8). Однако в некоторых случаях ход смоделированных расходов неудовлетворительно повторяет ход измеренных. Такой тренд может быть обусловлен

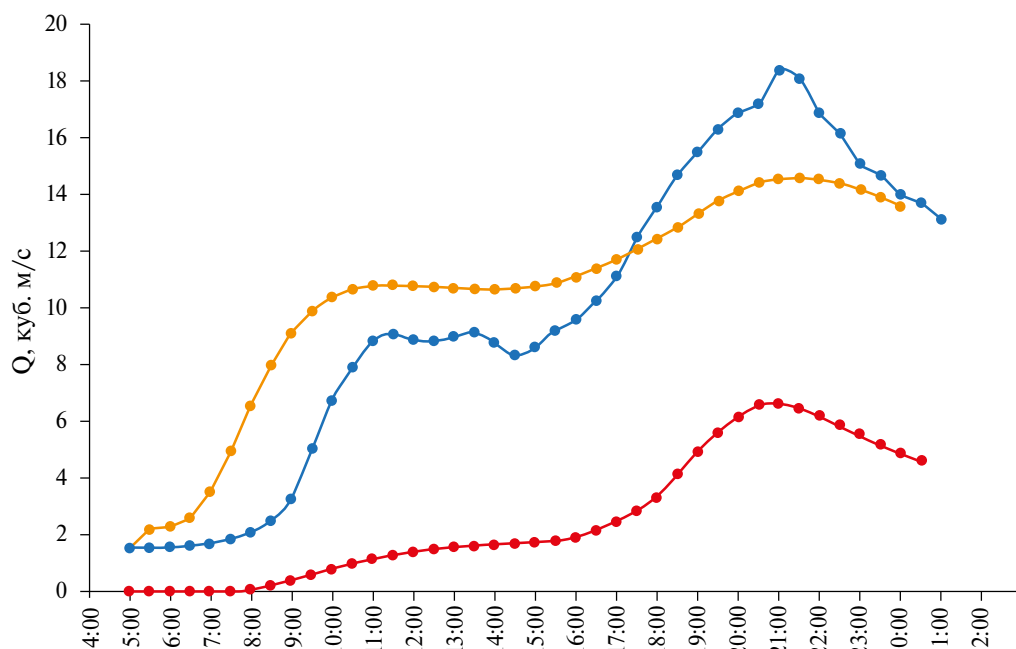


Рис. 7. Сравнение фактических и смоделированных в SWMM расходов воды за 08.05.2021 г. (синяя линия — измеренные расходы, красная линия — смоделированные по данным МО МГУ, оранжевая линия — смоделированные с использованием данных кригинга).

Fig. 7. Comparison of actual and SWMM-modeled water flows for 05.08.2021 (blue line — measured flows, red line — modeled by Moscow State University, orange line — modeled using kriging data).

низкой точностью пространственного распределения интенсивности осадков, так как на территории водосбора наблюдается существенная неравномерность их выпадения и метод кригинга не может гарантировать абсолютную достоверность результата.

Характерное время добегания ливней для бассейна Сетуни составляет 6–8 ч, что связано с наличием на территории большого количества водонепроницаемых поверхностей, уменьшающих инфильтрацию в почву и обеспечивающих быстрый приток осадков в речную сеть. Калибровка модели при учете урбанизированности территории, т.е. доли водонепроницаемых поверхностей, обусловила резкий рост расхода воды, после которого наблюдается достаточно резкий спад.

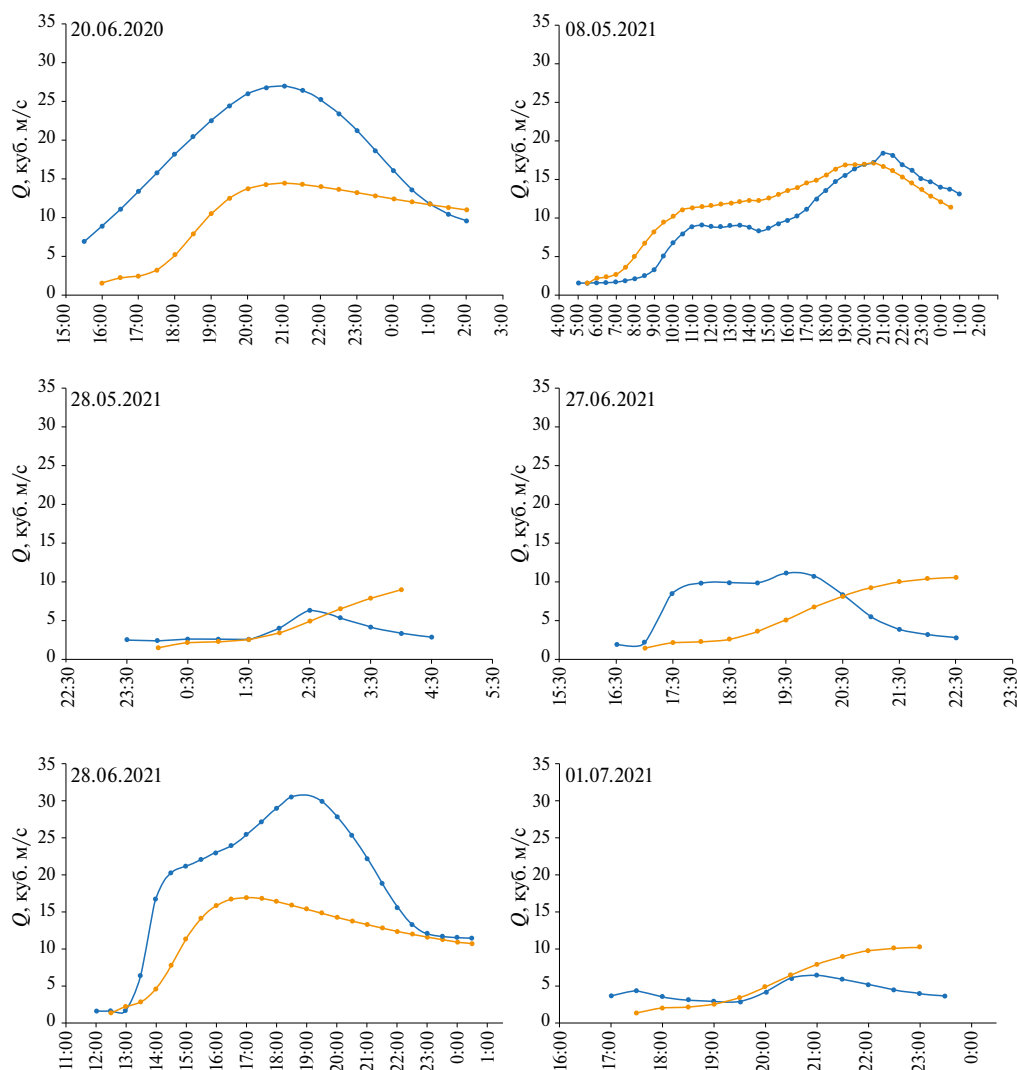


Рис. 8. Измеренные (синяя линия) и смоделированные (оранжевая линия) расходы воды.

Fig. 8. Measured (blue line) and modeled (orange line) water flows.

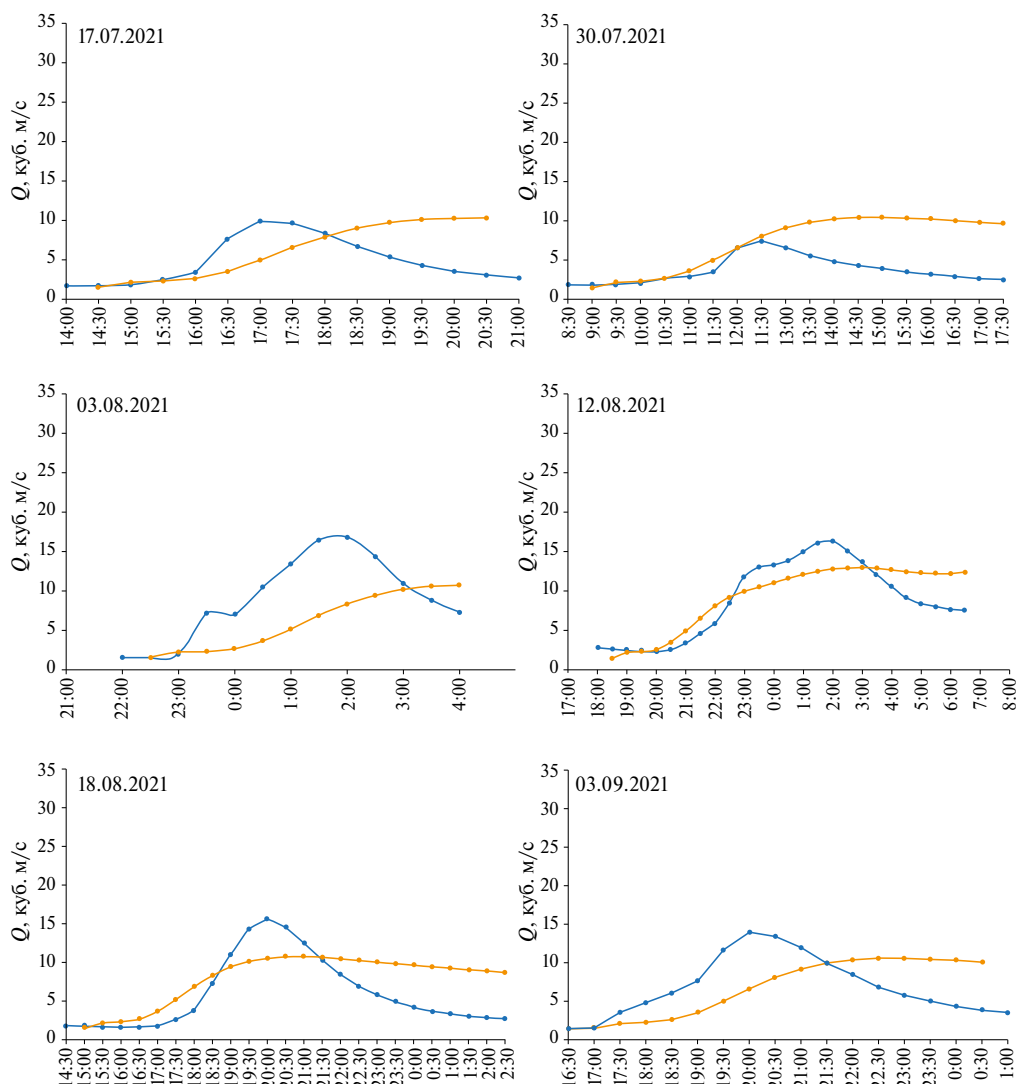


Рис. 8. Продолжение.

Fig. 8. Continuation.

В табл. 3 представлены результаты статистической проверки моделирования. В качестве предикторов оценивалось два критерия — относительная погрешность R_E и коэффициент детерминации R^2 . Для большинства событий полученная относительная погрешность показала хороший или удовлетворительный результат моделирования — значения R_E находятся в диапазоне от 2 до 56%; лишь для паводка, прошедшего 01.07.2021 г., ее значение достигло 60%. Для него также характерен неудовлетворительный результат на основе полученного коэффициента детерминации R^2 , что может быть связано с относительно низким пиковым расходом воды ($6.5 \text{ м}^3/\text{с}$) и небольшим количеством стокообразующих осадков (5.4 мм), не позволяющих корректно смоделировать экстремальное гидрологическое событие. Модель показала хорошие прогнозы во время

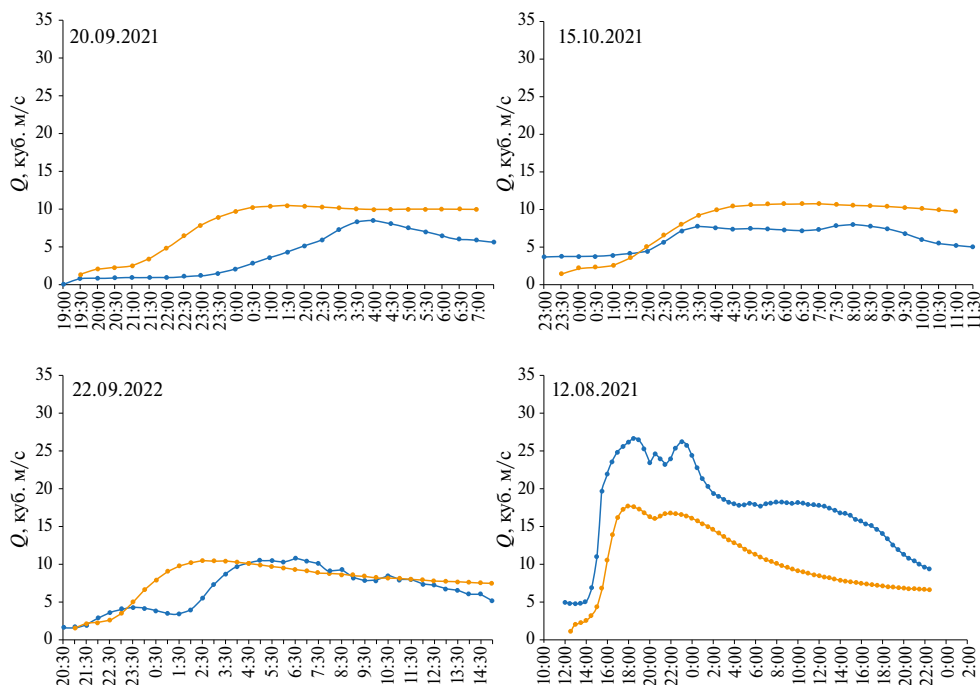


Рис. 8. Окончание.

Fig. 8. Ending.

прохождения экстремальных паводков. В ходе анализа также была выявлена сильная связь между измеренными с помощью логгера и смоделированными пиковыми расходами за каждый паводок ($R^2 = 0.77$), погрешность при этом составила 30% (см. рис. 9).

Атмосферные осадки могут охватывать разные по площади территории и выпадать с различной продолжительностью и интенсивностью в зависимости от своего генезиса. В исследовании возник вопрос о репрезентативности данных осадкомерных наблюдений, получаемых на одной станции (МО МГУ) по отношению ко всей территории водосбора р. Сетуни. Очевидно, что измерения в одном пункте с существенной погрешностью характеризуют значения искомой величины на прилегающей территории. Для сумм осадков за малые периоды (менее суток) погрешность определения слоя осадков очень высока — в том случае, когда имеется один осадкомер на площадь от 100 до 500 км², погрешность может варьироваться от 42 до 70% [6]. Так как для большинства рассмотренных событий относительная погрешность расчетов максимального расхода изменялась от 2 до 56%, полученные результаты могут быть охарактеризованы как имеющие высокую точность.

Настоящее исследование является уникальным для г. Москвы, так как подобных оценок ранее не проводилось. Более того, большинство моделей используют суточные шаги по времени, тогда как характерное время добегания в период ливней для бассейна Сетуни составляет всего 6–8 ч. Уточнение результатов моделирования может быть достигнуто с привлечением данных высокочастотного мониторинга, что в дальнейшем будет способствовать улучшению качества прогнозирования затоплений в городских районах.

Таблица 3. Результаты статистического анализа фактически измеренных и смоделированных расходов воды (зеленая заливка — модель считается хорошей, голубая — удовлетворительной, красная — неудовлетворительной)

Table 3. Results of statistical analysis of actually measured and modeled water flows (green fill — the model is considered good, blue — satisfactory, red — unsatisfactory)

№	Дата	Максимальный расход $Q_{\max}$, м ³ /с		R_E	R^2
		Фактический	Смоделированный		
1	20.06.2020	26.9	14.4	46%	0.39
2	08.05.2021	18.4	14.6	21%	0.87*
3	28.05.2021	6.2	9.7	56%	0.1*
4	27.06.2021	11.1	10.6	5%	0.22
5	28.06.2021	30.8	16.9	45%	0.71
6	01.07.2021	6.5	10.4	60%	0.36*
7	17.07.2021	9.9	10.4	5%	0.05
8	30.07.2021	7.4	10.4	41%	0.18
9	03.08.2021	16.8	10.7	36%	0.28
10	12.08.2021	16.4	12.98	21%	0.71
11	18.08.2021	15.6	10.7	31%	0.45
12	03.09.2021	13.9	10.5	24%	0.05
13	20.09.2021	8.5	10.5	24%	0.63
14	15.10.2021	7.9	10.7	35%	0.81*
15	22.09.2022	10.7	10.5	2%	0.45
16	27.07.2023	26.8	19.4	28%	0.86

Примечание. * — $p\text{-value} > 0.05$.

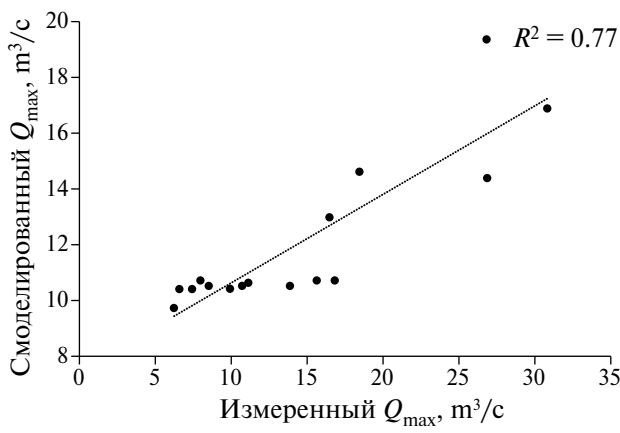


Рис. 9. Связь между измеренными и смоделированными максимальными расходами воды.

Fig. 9. Relationship between actual measured and modeled water discharges.

Заключение

Активное развитие городской среды обуславливает риск затоплений и подтоплений территории Московской агломерации во время выпадения экстремальных осадков. Большое количество водонепроницаемых поверхностей препятствуют инфильтрации дождевой воды в почву, что приводит к сильному увеличению объема поверхностного стока на водосборе.

Для исследования формирования и моделирования паводочного стока на территории Московской агломерации успешно реализована система SWMM. Схема бассейна р. Сетуни была актуализирована с использованием дополнительных параметров, учитывающих особенности типов землепользования и наличие прудов, перехватывающих сток.

В статье продемонстрировано, что для более достоверного результата необходимы данные о пространственном распределении осадков, так как с использованием данных одной метеостанции невозможно воспроизвести неравномерность их выпадения на территории всего водосборного бассейна.

Была предложена новая методика получения информации об интенсивности осадков при нехватке данных — интерполяция 3-часовых метеорологических характеристик в центр водосбора и приведение их к 10-минутным интенсивностям. Была выявлена высокая эффективность использования метода кригинга. Результаты калибровки и верификации продемонстрировали значительную корреляцию между смоделированными и измеренными максимальными расходами воды ($R^2 = 0.77$, относительная погрешность варьировалась от 2 до 56%). Наилучшие результаты были получены для паводков, где пиковые расходы превышали $15 \text{ м}^3/\text{с}$.

В дальнейшем планируется калибровка модели для расчета смыва загрязняющих веществ с территории водосбора. SWMM также позволит проводить сценарный анализ для оценки потенциальной эффективности различных мер по снижению поступления загрязняющих веществ с поверхностным стоком в условиях Московской агломерации.

Благодарности

Развитие мониторинговой сети и натурные исследования в бассейне р. Сетуни выполнено в рамках проекта РНФ 19-77-30004-П. Концепция исследования подготовлена в рамках программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”. Математическое моделирование стока выполнено в рамках темы № FMWZ-2022-0001 государственного задания ИВП РАН.

Список литературы

1. Бефани Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 184 с.
2. Болгов М.В., Арефьева Е.В., Завьялова Е.В. Вопросы моделирования и прогнозирования затопления городских территорий на основе использования специальных программных комплексов и данных дистанционных измерений метеорологических характеристик // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2020. №. 3 (46). С. 19–29.
3. Болгов М.В., Зайцева А.В., Завьялова Е.В. Оценка диффузного стока с территории г. Ростов на основе методов математического моделирования // Сб. докл. международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова “Четвертые Виноградовские Чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению” / Под ред. О.М. Макарьевой, А.А. Землянковой. СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 41–47.

4. Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Статистический анализ в гидрологических прогнозах. М.: Гидрометцентр России, 2018. 160 с.
5. Брусова 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.
6. Гандин Л.С., Каган. Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 359 с.
7. Климат Москвы (Особенности климата большого города) / Под ред. А.А. Дмитриева, Н.П. Бессонова. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 320 с.
8. Соколов Д., Чалов С., Терешина М., Ерина О., Шинкарева Г. Особенности гидрологического режима урбанизированной реки Сетуни // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: тр. VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 27–30 мая 2021 года. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021. Т. 834. С. 180–185.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012024>
9. Стулов Е.А. Влияние города Москвы на усиление летних осадков // Метеорология и гидрология. 1993, Вып. 11. С. 34–41.
10. Терский П., Цыпленков А., Морейдо В., Самохин М., Соколов Д. Восстановление рядов стока воды малоизученной городской реки Сетунь (г. Москва) на основе данных натурных наблюдений и гидрологического моделирования // Материалы международного симпозиума “Инженерная экология — 2023”, Москва, 05–07 декабря 2023 г. / Под ред. Ф.А. Мкртчяна. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2023. С. 142–146.
11. Цыпленков А.С., Черницова О.В., Кошелева Н.Е., Чалов С.Р. ГИС-моделирование баланса наносов и загрязняющих веществ в бассейне Р. Сетунь (Москва) // Инженерная экология — 2021: Доклады международного симпозиума, Москва, 1–3 декабря 2021 г. / Под ред. Ф.А. Мкртчяна. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2021. С. 172–176.
12. Ярынич Ю.И., Варенцов М.И., Платонов В.С., Степаненко В.М., Чернокульский А.В., Давлетшин С.Г., Дронова Е.А. Влияние московского мегаполиса на осадки теплового периода в зависимости от крупномасштабных атмосферных условий // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 5. С. 550–560.
13. Chow M.F., Yusop Z., Toriman M.E. Modelling runoff quantity and quality in tropical urban catchments using Storm Water Management Model // International Journal of Environmental Science and Technology. 2012. V. 9. № 4. P. 737–748.
<https://doi.org/10.1007/s13762-012-0092-0>
14. Gerasimova M.I., Chernitsova O.V., Vasil’chuk J.Y., Kosheleva N.E. GIS mapping of the soil cover of an urbanized territory: drainage basin of the Setun river in the west of Moscow (Russian Federation) // Geography, Environment, Sustainability. 2024. V. 17. № 2. P. 131–138.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3136>
15. Hung C.L.J., James L.A., Carbone G.J., Williams J.M. Impacts of combined land-use and climate change on streamflow in two nested catchments in the Southeastern United States // Ecological Engineering. 2020. V. 143. 105665.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105665>
16. Kong D., McVicar T.R., Xiao M., Zhang Y., Peña-Arancibia J.L., Filippa G., Xie Y., Gu X. *phenofit*: An R package for extracting vegetation phenology from time series remote sensing // Methods in Ecology and Evolution. 2022. V. 13. № 7. P. 1508–1527.
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13870>

17. Li C., Liu M., Hu Y., Gong J., Xu Y. Modeling the quality and quantity of runoff in a highly urbanized catchment using storm water management model // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016. V. 25. № 4. P. 1573–1581.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/60721>
18. Rhugwasanye C., Agarwal S., Chappidi H.R., Kottapalli R.L. Bujumbura urban flood simulation based on SWMM model // *AIP Conference Proceedings*. 2023. V. 2707. 040013.
<https://doi.org/10.1063/5.0143108>
19. Rossman L., Simon M. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2. Cincinnati: Center for Environmental Solutions and Emergency Response, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 2022. 424 p.
20. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // *Analytical Chemistry*. 1964. V. 36. № 8. P. 1627–1639.
<https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
21. Skougaard Kaspersen P., Høegh Ravn N., Arnbjerg-Nielsen K., Madsen H., Drews M. Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017. V. 21. № 8. P. 4131–4147.
<https://doi.org/10.5194/hess-21-4131-2017>
22. Sokolov D., Chalov S., Tereshina M., Erina O., Shinkareva G. Hydrological regime of the urban Setun River // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 834. 012024.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012024>
23. Sokolov D.I., Erina O.N., Tereshina M.A., Puklakov V.V. Impact of Mozhaysk Dam on the Moscow River Sediment Transport // *Geography, Environment, Sustainability*. 2020. V. 13. № 4. P. 24–31.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-150>
24. Tereshina M., Erina O., Sokolov D., Efimova L., Kasimov N. Nutrient dynamics along the Moskva River under heavy pollution and limited self-purification capacity // *E3S Web of Conferences*. 2020. V. 163. 05014.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305014>
25. Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia // *Atmosphere*. 2018. V. 9. № 2. 50.
<https://doi.org/10.3390/atmos9020050>

Experimental Research and Modeling of Rain Floods in Urbanized Territories of the Moscow Region (on the Example of the Setun River)

I.S. Denisova^{1, 2, *}, M.V. Bolgov¹

¹ Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*E-mail: ira.denisova@icloud.com

Received 25.06.2024

Revised 11.02.2025

Accepted 29.03.2025

The Moscow agglomeration has a high proportion of impermeable surfaces, which leads to a specific water regime characterized by frequent short-term floods due to the rapid response of the catchment area to precipitation. For one of the largest tributaries of the Moskva River in the capital, the Setun River, the SWMM model was able to reproduce the passage of extreme flood events in 2020–2023. The model was calibrated using 30-minute monitoring data on water discharge and 10-minute precipitation rates obtained by interpolating to the center of the catchment. The performance of the model was assessed using relative error (R_E) and coefficient of determination (R^2). The calibration and verification results showed a good correlation between the modeled and measured maximum water discharges ($R^2 = 0.77$) with relative errors ranging from 2 to 56%. The most accurate results were obtained for flood events with peak flow rates exceeding 15 m³/s.

Keywords: urbanized areas, flood runoff, Moscow agglomeration, SWMM, extreme precipitation

References

1. Befani N.F. Prognozirovaniye dozhdevykh pavodkov na osnove territorial'no obshhih zavisimostej. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 184 s.
2. Bolgov M.V., Aref'eva E.V., Zav'yalova E.V. Voprosy' modelirovaniya i prognozirovaniya zatopleniya gorodskikh territorij na osnove ispol'zovaniya special'ny'x programmny'x kompleksov i danny'x distancionny'x izmerenij meteorologicheskikh xarakteristik // Nauchny'e i obrazovatel'ny'e problemy' grazhdanskoj zashchity'. 2020. № 3 (46). S. 19–29.
3. Bolgov M.V., Zajceva A.V., Zav'yalova E.V. Ocenka diffuznogo stoka s territorii g. Rostov na osnove metodov matematicheskogo modelirovaniya // Sb. dokl. mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii pamjati vydajushhegosja russkogo uchenogo Jurija Borisovicha Vinogradova "Chetverty'e Vinogradovskie Chteniya. Gidrologiya: ot poznaniya k mirovozzreniyu" / Pod red. O.M. Makar'evoj, A.A. Zemljanskoj. SPb.: Izd-vo VVM, 2020. S. 41–47.
4. Borshh S.V., Xristoforov A.V., Yumina N.M. Statisticheskij analiz v gidrologicheskikh prognozax. M.: Gidrometcentr Rossii, 2018. 160 s.
5. Brusova N.E., Kuznecova I.N., Naxaev M.I. Osobennosti rezhima osadkov v Moskovskom regione v 2008–2017 gg. // Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy'. 2019. № 1. S. 127–172.
6. Gandin L.S., Kagan. R.L. Statisticheskie metody' interpretacii meteorologicheskikh danny'x. L.: Gidrometeoizdat, 1976. 359 s.
7. Klimat Moskvy' (Osobennosti klimata bol'shogo goroda) / Pod red. A.A. Dmitrieva, N.P. Bessonova. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 320 s.
8. Sokolov D., Chalov S., Tereshina M., Erina O., Shinkareva G. Osobennosti gidrologicheskogo rezhima urbanizirovannoj reki Setun' // Sovremennyy'e problemy' vodoxranilishh i ix vodosbornov: tr. VIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodny'm uchastiem, Perm',

27–30 maya 2021 goda. Perm': Permskij gosudarstvenny'j nacional'ny'j issledovatel'skij universitet, 2021. T. 834. S. 180–185.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012024>

9. Stulov E.A. Vliyanie goroda Moskvyy' na usilenie letnix osadkov // *Meteorologiya i gidrologiya*. 1993. Vyp. 11. S. 34–41.

10. Terskij P., Cy'plenkov A., Morejdo V., Samoxin M., Sokolov D. Vosstanovlenie ryadov stoka vody' maloizuchennoj gorodskoj reki Setun' (g. Moskva) na osnove danny'x naturny'x nablyudenij i gidrologicheskogo modelirovaniya // *Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma "Inzhenernaya jekologija — 2023"*, Moskva, 05–07 dekabrya 2023 g. / Pod red. F.A. Mkrtchjana. M.: RNTORES im. A.S. Popova, 2023. S. 142–146.

11. Cy'plenkov A.S., Cherniczova O.V., Kosheleva N.E., Chalov S.R. GIS-modelirovanie balansa nanosov i zagryaznyayushhix veshhestv v bassejne R. Setun' (Moskva) // *Inzhenernaya e'kologiya — 2021: Doklady' mezhdunarodnogo simpoziuma*, Moskva, 1–3 dekabrya 2021 g. / Pod red. F.A. Mkrtchjana. M.: RNTORJeS im. A.S. Popova, 2021. S. 172–176.

12. Yary'nich YU.I., Varenczov M.I., Platonov V.S., Stepanenko V.M., Chernokul'skij A.V., Davletshin S.G., Dronova E.A. Vliyanie moskovskogo megapolisa na osadki teplogo perioda v zavisimosti ot krupnomasshtabny'x atmosferyny'x uslovij // *Vodnye resursy*. 2023. T. 50. № 5. S. 550–560.

13. Chow M.F., Yusop Z., Toriman M.E. Modelling runoff quantity and quality in tropical urban catchments using Storm Water Management Model // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2012. V. 9. № 4. P. 737–748.

<https://doi.org/10.1007/s13762-012-0092-0>

14. Gerasimova M.I., Chernitsova O.V., Vasil'chuk J.Y., Kosheleva N.E. GIS mapping of the soil cover of an urbanized territory: drainage basin of the Setun river in the west of Moscow (Russian Federation) // *Geography, Environment, Sustainability*. 2024. V. 17. № 2. P. 131–138.

<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3136>

15. Hung C.L.J., James L.A., Carbone G.J., Williams J.M. Impacts of combined land-use and climate change on streamflow in two nested catchments in the Southeastern United States // *Ecological Engineering*. 2020. V. 143. 105665.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105665>

16. Kong D., McVicar T.R., Xiao M., Zhang Y., Peña-Arancibia J.L., Filippa G., Xie Y., Gu X. *phenofit*: An R package for extracting vegetation phenology from time series remote sensing // *Methods in Ecology and Evolution*. 2022. V. 13. № 7. P. 1508–1527.

<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13870>

17. Li C., Liu M., Hu Y., Gong J., Xu Y. Modeling the quality and quantity of runoff in a highly urbanized catchment using storm water management model // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016. V. 25. № 4. P. 1573–1581.

<https://doi.org/10.15244/pjoes/60721>

18. Rhugwasanye C., Agarwal S., Chappidi H.R., Kottapalli R.L. Bujumbura urban flood simulation based on SWMM model // *AIP Conference Proceedings*. 2023. V. 2707. 040013.

<https://doi.org/10.1063/5.0143108>

19. Rossman L., Simon M. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2. Cincinnati: Center for Environmental Solutions and Emergency Response, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 2022. 424 p.

20. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // *Analytical Chemistry*. 1964. V. 36. № 8. P. 1627–1639.

<https://doi.org/10.1021/ac60214a047>

21. Skougaard Kaspersen P., Høegh Ravn N., Arnbjerg-Nielsen K., Madsen H., Drews M. Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017. V. 21. № 8. P. 4131–4147.

<https://doi.org/10.5194/hess-21-4131-2017>

22. Sokolov D., Chalov S., Tereshina M., Erina O., Shinkareva G. Hydrological regime of the urban Setun River // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 834. 012024.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012024>

23. Sokolov D.I., Erina O.N., Tereshina M.A., Puklakov V.V. Impact Of Mozhaysk Dam On The Moscow River Sediment Transport // *Geography, Environment, Sustainability*. 2020. V. 13. № 4. P. 24–31.

<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-150>

24. Tereshina M., Erina O., Sokolov D., Efimova L., Kasimov N. Nutrient dynamics along the Moskva River under heavy pollution and limited self-purification capacity // *E3S Web of Conferences*. 2020. V. 163. 05014.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305014>

25. Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia // *Atmosphere*. 2018. V. 9. № 2. 50.

<https://doi.org/10.3390/atmos9020050>