

УДК 602.4

Х. Наземи^а, В. Н. Азаров^а, Е. В. Сысоева^б

^а *Волгоградский государственный технический университет*

^б *Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА «ЗЕЛЕННЫХ» КРЫШАХ. ОБЗОР

Выполнен обзор исследований моделирования гидрологических процессов на «зеленых» крышах с учетом ретенции и детенции. Рассмотрены физически обоснованные модели (SWMM, Hydrus-1D и др.), методы машинного обучения и гибридные схемы, объединяющие уравнения переноса и данные наблюдений. Систематизированы входные параметры, области применения и ограничения подходов; выделены некоторые пробелы и возможные направления развития интегрированных воспроизводимых моделей для практических задач управления ливневыми водами.

Ключевые слова: «зеленые» крыши, SWMM, Hydrus-1D, машинное обучение, гибридное моделирование, ретенция, детенция.

Введение

«Зеленые» крыши широко рассматриваются как элемент систем устойчивого водоотведения (Sustainable Drainage Systems — SuDS) и технологий малоинтенсивного развития (Low Impact Development — LID). Термин LID в Австралии используется как WSUD («водочувствительное городское проектирование»); в Сиэтле как «экологическое проектирование участков», в Вашингтоне как «управление ливневыми стоками». Многочисленные исследования, выполненные в различных климатических условиях, показывают, что «зеленые» крыши способны существенно снижать объем поверхностного стока и уменьшать пиковые расходы воды [1—3]. Эти гидрологические эффекты обусловлены двумя основными механизмами: ретенцией, представляющей собой первоначальные потери, и детенцией, связанной с временным накоплением и задержкой стока [4, 5].

Ретенция в основном определяется испарением и эвапотранспирацией, приводящими к уменьшению влажности субстрата в сухие периоды [6—9]. Детенция отражает кратковременное хранение осадков перед выходом в виде стока, однако широко применяемые показатели (смещение пика, уменьшение пикового расхода) не позволяют формировать надежные прогностические модели для необорудованных объектов [10].

Субстрат «зеленой» крыши выполняет функции основного водоудерживающего и дренажного слоя и обычно состоит из легких минеральных материалов с небольшими добавками органических компонентов. Моделирование процессов детенции выполняется в рамках эмпирических или физически обоснованных подходов. Эмпирические модели резервуарного типа демонстрируют хорошее согласование с наблюдениями¹ [11], однако их

¹ *Vesuviano G. M. A Two-stage Runoff detention model for a green roof : PhD thesis. Sheffield : The University of Sheffield, 2014.*

параметры не имеют прямой связи с измеряемыми свойствами субстрата. Физически обоснованные модели, основанные на уравнении Ричардса, требуют детального определения кривой водоудерживания (Soil Water Retention Curve — SWRC) и функции гидравлической проводимости (Hydraulic Conductivity Function — HCF). Модель Дурнера обеспечивает точное описание SWRC [12—14]. Однако, как показали Liu и Fassman-Beck (2018), а также Peng и соавторы (2020), расчет HCF по модели Мюалема отличается недостаточной точностью. Это послужило стимулом для разработки лабораторных методов определения HCF.

Физически обоснованное моделирование дренажных слоев развито в меньшей степени. Дренажные материалы значительно различаются по структуре и характеристикам². В ряде коммерческих систем применяется вертикально ориентированный полиэфировый тканый слой, обеспечивающий дополнительную детенцию. Эмпирические модели резервуарного типа применены для пластиковых модульных систем [15], однако их параметры сильно зависят от конфигурации. Для полиэфировых детенционных слоев моделирование в научной литературе отсутствует.

Модель управления ливневыми водами SWMM представляет собой физически обоснованную платформу для моделирования процессов в системах SuDS/LID, включая «зеленые» крыши. Модель использует поэлементное представление слоев, описывая процессы ретенции и детенции [16]. При калибровке SWMM способна воспроизводить гидрологический отклик «зеленых» крыш [17—19], однако множество параметров по-прежнему требуют эмпирической настройки. Эффективность отдельных слоев в структуре детенции SWMM систематически не оценена, особенно для инновационных дренажных материалов.

Несмотря на прогресс, физически обоснованные модели, такие как SWMM, имеют структурные ограничения, требуют тщательной калибровки и характеризуются неопределенностью при описании нелинейных процессов детенции. Методы машинного обучения — Random Forest (RF) и искусственные нейронные сети (ANN) — демонстрируют высокую способность к моделированию сложных гидрологических зависимостей и могут дополнять процессные модели. Гибридные подходы SWMM и ML позволяют объединять физическую интерпретируемость и нелинейное обучение. В научной литературе отсутствуют систематические обзоры интеграции SWMM и ML для моделирования зеленых крыш.

Цель настоящего обзора — синтезировать существующие физически обоснованные, машинные и гибридные подходы к моделированию гидрологических процессов на зеленых крышах и сопоставить их применимость для прогностических задач. Для достижения цели решаются следующие задачи: 1) обобщить ключевые допущения и ограничения процессных моделей и параметризаций; 2) систематизировать применения ML-моделей к задачам ретенции/детенции и оценить их переносимость; 3) рассмотреть стратегии гибридизации SWMM и ML и определить перспективные направления развития моделей для практического применения.

² Там же.

Обзор литературы

Физически обоснованные модели, включая SWMM и схемы на основе уравнения Ричардса, широко применяются для моделирования гидрологии «зеленых» крыш. Peng и соавторы (2022) разработали двухэтапную модель ретенции для традиционных и усовершенствованных «зеленых» крыш, показав удовлетворительное воспроизведение стока для традиционных конструкций, но выявив ограничения для инновационных конфигураций [20]. Dong и соавторы (2023) сравнили модели водного баланса, SWMM и Hydrus-1D, и показали, что концептуальные модели просты, но менее детальны; Hydrus-1D обеспечивает более точное описание ненасыщенного влагопереноса, однако требует обширной параметризации; SWMM представляет собой компромиссное решение, но остается чувствительной к выбору параметров [21]. Bako и соавторы (2023) оценили модель управления стоками «зеленых» крыш EPA SWMM и уточнили уравнение дренажного потока (учет толщины пустот дренажного мата и корректировка показателя степени), а также определили коэффициент перколяции на основе данных ненасыщенной проводимости и влажности [22].

Для улучшения описания взаимодействия «почва — растительность» Iffland и соавторы (2021) интегрировали подход Penman — Monteith в связке со SWMM, что позволило повысить качество моделирования по критерию эффективности Kling — Gupta ($KGE = 0,88$ против $0,35$ для стандартного SWMM) [23]. В долгосрочных расчетах Johannessen и соавторы (2019) выявили ограниченную переносимость параметров: наборы, откалиброванные для более влажного климата, демонстрировали лучшие результаты при применении в более сухих условиях [24]. Weggemans и соавторы (2023) подчеркнули критическую роль калибровки (Nash — Sutcliffe efficiency, $NSE = 0,72$) и показали высокую чувствительность модели к пористости субстрата как ключевому гидравлическому параметру [25]. Turco и соавторы (2025) связали Hydrus-1D и SWMM для моделирования городской зеленой инфраструктуры и продемонстрировали существенное снижение объема стока и пиковых расходов как на уровне отдельного здания, так и на уровне города [26]. Wang и соавторы (2025) разработали суточную парсимоничную модель водного баланса для сине-зеленых крыш с функциями водоснабжения, и оценили снижение стока, надежность водоподачи и потребности в поливе на примере шести городов (1980—2013) [27].

Ряд исследований детализирует факторы неопределенности и переносимости параметров SWMM для «зеленых» крыш. Worthen и соавторы (2021) применили SWMM к крупномасштабной «зеленой» крыше в Сиракьюсе (штат Нью-Йорк) и показали влияние дождевого воздействия на чувствительность параметров, а также преимущества многособытийной калибровки [28]. Kuok и соавторы (2023) на примере экваториальных городских условий подтвердили, что «зеленые» крыши существенно снижают сток и концентрации загрязнителей, обеспечивая временное аккумулирование осадков [29]. Broekhuizen и соавторы (2021) сравнили четыре гидрологические модели (Urbis, SWMM, Hydrus-1D, MIKE SHE) на полноразмерных крышах в Лионе и Умео и выявили различия в точности и неопределенности, а также критическую зависимость результатов от площадки и периода калибровки [30]. Kim и соавторы (2023) оценили возможности SWMM для модели-

рования качества стока в Портленде (США): были отмечены ограничения при прогнозировании общего азота (TN) и общего фосфора (TP), однако модификации модели улучшили прогноз TP и подтвердили потенциал использования SWMM для оптимизации проектных решений «зеленых» крыш [31].

Методы машинного обучения (ML) все чаще применяются для прогнозирования стока и оценки эффективности «зеленых» крыш. Abdalla и соавторы (2021) сравнили ANN, M5, LSTM и kNN на данных 16 экстенсивных зеленых крыш, получив $NSE > 0,5$, при этом были выявлены существенные различия в результатах между городами [32]. Lin и соавторы (2021) совместили ML и оптимизацию для снижения энергопотребления здания и улучшения теплового комфорта; высокий уровень прогностической точности был показан для комбинации BPNN и MOALO [33]. Frisk и Johansson (2024) использовали данные, сгенерированные SWMM, совместно с моделями NARX, что позволило повысить точность прогнозирования и снизить среднюю абсолютную ошибку (MAE) на 33...37 % по сравнению с использованием только SWMM [34]. Husting и соавторы (2024) построили модели Random Forest по данным вихревой ковариации (2015—2020) для «зеленой» крыши аэропорта Берлин-Бранденбург, чтобы прогнозировать многолетний NEE и оценить переносимость моделей [35].

ИИ-подходы и гибридные схемы активно развиваются в задачах управления городскими ливневыми водами. Abera (2025) выделил пять кластеров применения ИИ, включая прогноз паводков и оптимизацию дренажных систем [36]. Ramovha и соавторы (2024) показали, что качество входных данных и корректная калибровка являются определяющими факторами надежности ИИ-ориентированного управления ливневыми водами [37]. Cao (2025) разработал связку многокритериальной оптимизации и модели ливневого стока, обеспечив снижение пиковых расходов и повышение эффективности водоотведения на 15,7 % [38]. Chin и Lai (2025) продемонстрировали, что интеграция физически обоснованных моделей (SWAT, VIC, HEC-HMS, SWMM) с ML-алгоритмами (ANN, SVM, RF, LSTM, CNN) повышает точность прогнозов, учитывает нелинейные эффекты и способствует повышению устойчивости систем [39]. В совокупности эти исследования формируют методологическую основу и мотивацию для разработки гибридных подходов SWMM — ML применительно к гидрологии зеленых крыш, включая задачи моделирования инновационных дренажных слоев [39]. Yaseen (2023) выполнил обзор бенчмарк методов машинного обучения для моделирования гидрологических процессов, систематизировав обзорные работы и обозначив ограничения и перспективы дальнейших исследований [40].

Материалы и методы

Дизайн исследования: scoring review; отчетность выполнена в соответствии с PRISMA-ScR.

Цель настоящего обзора заключается в том, чтобы:

- систематизировать современное состояние исследований по моделированию процессов ретенции и детенции на «зеленых» крышах;
- оценить возможности, точность и ограничения физически обоснованных моделей (SWMM, Hydrus-1D и др.) при моделировании гидрологических процессов «зеленых» крыш;

- проанализировать эффективность алгоритмов машинного обучения (RF, ANN, LSTM, NARX и др.) для прогнозирования гидрологических параметров «зеленых» крыш;
- выявить существующие направления применения гибридных схем SWMM — ML и родственных подходов;
- определить основные научные пробелы, препятствующие развитию интегрированных методов моделирования «зеленых» крыш.

В более широкой области городской гидрологии ИИ-подходы применяются для задач прогнозирования уровней и расходов, раннего предупреждения и оптимизации управления водоотведением. Для «зеленых» крыш данное направление релевантно прежде всего как методологическая база: 1) построение суррогатных моделей; 2) коррекция ошибок физически обоснованных моделей; 3) поддержка калибровки и идентификации параметров.

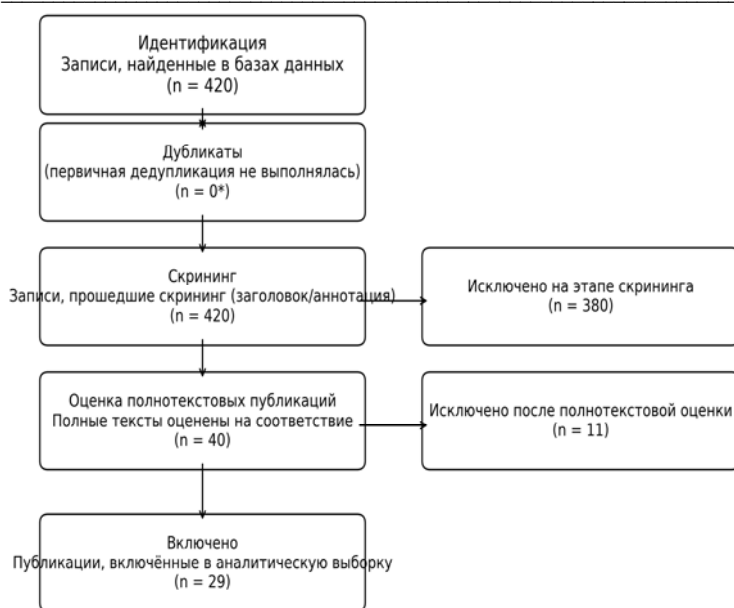
В обзор включены публикации, удовлетворяющие следующим условиям:

- объектом исследования являются «зеленые» крыши (или близкие конструкции кровельного озеленения);
- представлено количественное моделирование гидрологических процессов (ретенция/детенция, сток, влагосодержание, водный баланс и др.) с использованием физически обоснованных моделей (в том числе SWMM-модуль «зеленой» крыши, HydruS-1D и аналоги), методов машинного обучения либо их гибридных комбинаций;
- описаны входные и выходные переменные, исходные данные и критерии оценки качества модели (например, NSE, KGE, RMSE, MAE или сопоставимые метрики).

Исключались работы, в которых отсутствует моделирование (описательные материалы без методического вклада) либо отсутствует научная экспертиза (нерецензируемые отчеты, популярные публикации). Также исключались материалы, посвященные другим природоподобным решениям без прямой связи с моделированием «зеленых» крыш.

Процесс отбора публикаций представлен на диаграмме PRISMA (рис.). Для каждой включенной работы извлекались и систематизировались ключевые характеристики: тип «зеленой» крыши и ее конструктивных слоев (субстрат, дренаж), климатические условия и местоположение, тип исходных данных (событийные или непрерывные ряды, объем наблюдений), модельный подход (физически обоснованный, машинное обучение или гибридный), используемые алгоритмы и модули, стратегия калибровки и валидации, применяемые метрики, а также основные результаты и выявленные ограничения. Для структурирования результатов включенные публикации были классифицированы по четырем тематическим группам:

- 1) физически обоснованные модели «зеленых» крыш (включая модуль зеленой крыши SWMM и аналогичные подходы);
- 2) модели машинного обучения для прогнозирования гидрологических параметров «зеленых» крыш;
- 3) гибридные схемы SWMM — ML и родственные подходы;
- 4) исследования в области искусственного интеллекта в городской гидрологии и управлении водными ресурсами, релевантные разработке гибридных модельных схем.



* Примечание: первичная дедупликация не выполнялась; возможные дубликаты исключались на этапах скрининга/полнотекстовой оценки.

Диаграмма PRISMA процесса отбора публикаций

Результаты

Исследования охватывают различные климатические условия и конструкции зеленых крыш; в качестве целевых выходов чаще всего рассматриваются объем/пик стока, задержка стока и влагосодержание.

Физически обоснованные модели обеспечивают интерпретируемое описание процессов инфильтрации, накопления влаги и дренажа. При тщательной калибровке параметры SWMM и моделей на базе уравнения Ричардса обеспечивают приемлемую точность, однако результаты чувствительны к параметризации субстрата, дренажного слоя и испарения-транспирации, а переносимость параметров между объектами ограничена.

ML-подходы (ANN, RF, LSTM, NARX и др.) демонстрируют высокую точность в задачах прогнозирования гидрологических выходов при наличии репрезентативных данных. Ограничениями являются зависимость от объема/качества данных и снижение интерпретируемости по сравнению с физическими моделями.

Гибридные схемы SWMM — ML позволяют сочетать физическую интерпретируемость с повышением точности (например, коррекция ошибок физической модели или построение суррогатных аппроксимаций). Однако число работ остается ограниченным, а единые протоколы интеграции и валидации пока не сформированы.

Для обобщения и сопоставления ключевых особенностей различных модельных подходов к моделированию гидрологических процессов на зеленых крышах сформирована табл.

Сравнительный анализ модельных подходов

Подход	Преимущества	Ограничения	Когда применять
SWMM	Физическая интерпретация; инженерный стандарт	Требует калибровки; ограниченная переносимость	Инженерные расчеты, сценарный анализ
Hydrus-1D / уравнение Ричардса	Детальное моделирование потоков и влагопереноса	Сложная параметризация; высокие требования к данным	Исследования на уровне слоя/кровли
ML (ANN, RF, LSTM, NARX)	Высокая точность; моделирование нелинейностей	Зависимость от данных; ограниченная интерпретируемость	Краткосрочный прогноз, коррекция ошибок
Гибрид SWMM — ML	Интерпретируемость и точность	Мало исследований; отсутствие стандартов	Модели нового поколения

Обсуждение

Сопоставление подходов показывает, что физические модели предпочтительны для инженерной интерпретации и сценарного анализа, тогда как ML эффективен для прогнозирования и уменьшения ошибок при достаточном объеме данных. Наиболее перспективным направлением является развитие воспроизводимых гибридных схем.

Физические модели точны при калибровке, но чувствительны к параметрам и данным о материалах.

ML-модели обеспечивают высокую точность, но требуют данных и ограничено интерпретируемы.

SWMM остается инженерным стандартом, но модуль «зеленой» крыши требует развития параметризации.

Гибридные модели SWMM — ML — наиболее перспективное направление для практических приложений.

Нехватка исследований, интегрирующих SWMM и ML именно для «зеленых» крыш (а не для уровня водосбора в целом).

Ограниченность данных о гидравлических свойствах инновационных субстратов и дренажных слоев.

Отсутствие единых протоколов гибридизации, калибровки и валидации (в том числе для событийных и непрерывных рядов).

Недостаточная переносимость параметров между климатами и конструкциями; ограниченная оценка устойчивости к экстремальным осадкам.

Упрощенное представление испарения-транспирации и динамики дренажа; дефицит многоуровневых (слой — крыша — водосбор) схем.

Заключение

Проведенный обзор показал, что физически обоснованные модели (SWMM, Hydrus-1D / уравнение Ричардса) и ML-алгоритмы решают взаимодополняющие задачи моделирования гидрологии «зеленых» крыш. Наиболее перспективным направлением является развитие воспроизводимых гибридных схем SWMM — ML.

Перспективы дальнейших исследований: 1) стандартизация протоколов гибридизации и валидации; 2) расширение данных о материалах и ЕТ; 3) оценка устойчивости к экстремальным осадкам и изменению климата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fassman-Beck E., Voyde E., Simcock R., Hong Y. S. Living roofs in 3 locations: does configuration affect runoff mitigation? // *Journal of Hydrology*. 2013. Vol. 490. Pp. 11—20.
2. Stovin V., Vesuviano G., Kasmin H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions // *Journal of Hydrology*. 2012. Vol. 414-415. Pp. 148—161.
3. Villarreal E. L., Bengtsson L. Response of a Sedum green-roof to individual rain events // *Ecological Engineering*. 2005. Vol. 25(1). Pp. 1—7.
4. Kasmin H., Stovin V. R., Hathway E. A. Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs // *Water Science & Technology*. 2010. Vol. 62(4). P. 898.
5. Voyde E., Fassman E., Simcock R. Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand // *Journal of Hydrology*. 2010. Vol. 394(3-4). Pp. 384—395.
6. Fassman E., Simcock R. Moisture measurements as performance criteria for extensive living roof substrates // *Journal of Environmental Engineering*. 2012. Vol. 138(8). Pp. 841—851.
7. Poë S., Stovin V., Berretta C. Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration // *Journal of Hydrology*. 2015. Vol. 523. Pp. 356—367.
8. Stovin V., Poë S., Berretta C. A modelling study of long term green roof retention performance // *Journal of Environmental Management*. 2013. Vol. 131. Pp. 206—215.
9. Voyde E., Fassman E., Simcock R., Wells J. Quantifying evapotranspiration rates for New Zealand green roofs // *Journal of Hydrologic Engineering*. 2010. Vol. 15(6). Pp. 395—403.
10. Stovin V., Vesuviano G., De-Ville S. Defining green roof detention performance // *Urban Water Journal*. 2017. Vol. 14(6). Pp. 574—588.
11. Yio M. H. N., Stovin V., Werdin J., Vesuviano G. Experimental analysis of green roof substrate detention characteristics // *Water Science & Technology*. 2013. Vol. 68(7). Pp. 1477—1486.
12. Liu R., Fassman-Beck E. Pore structure and unsaturated hydraulic conductivity of engineered media for living roofs and bioretention based on water retention data // *Journal of Hydrologic Engineering*. 2018. Vol. 23(3). Art. no. 04017065.
13. Peng Z., Smith C., Stovin V. Internal fluctuations in green roof substrate moisture content during storm events: monitored data and model simulations // *Journal of Hydrology*. 2019. Vol. 573. Pp. 872—884.
14. Peng Z., Smith C., Stovin V. The importance of unsaturated hydraulic conductivity measurements for green roof detention modelling // *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 590. Art. no. 125273.
15. Vesuviano G., Stovin V. A generic hydrological model for a green roof drainage layer // *Water Science & Technology*. 2013. Vol. 68(4). P. 769.
16. Rossman L. A., Huber W. C. Storm Water Management Model (SWMM) reference manual. Volume III : Water Quality. Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency, 2016. 235 p.
17. Burszta-Adamiak E., Mrowiec M. Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM // *Water Science & Technology*. 2013. Vol. 68(1). P. 36.
18. Palla A., Gnecco I. Hydrologic modeling of low impact development systems at the urban catchment scale // *Journal of Hydrology*. 2015. Vol. 528. Pp. 361—368.
19. Peng Z., Stovin V. Independent validation of the SWMM green roof module // *Journal of Hydrologic Engineering*. 2017. Vol. 22(9). Art. no. 04017037.
20. Peng Z., Garner B., Stovin V. Two green roof detention models applied in two green roof systems // *Journal of Hydrologic Engineering*. 2022. Vol. 27(2). Art. no. 04021049.
21. Modeling the hydrological benefits of green roof systems: applications and future needs / Z. Dong, D. J. Bain, K. A. Gray, M. Akcakaya, C. Ng // *Environmental Science: Water Research & Technology*. 2023. Vol. 9(12). Pp. 3120—3135.
22. Bako K., Kazezyilmaz-Alhan C. M. An improvement in drainage flow equation of EPA SWMM green roof module // *Water Science & Technology*. 2023. Vol. 87(9). Pp. 2172—2183.
23. Robust vegetation parameterization for green roofs in the EPA stormwater management model (SWMM) / R. Iffland, K. Förster, D. Westerholt, M. H. Pesci, G. Lösken // *Hydrology*. 2021. Vol. 8(1). Art. no. 12.

24. *Johannessen B. G., Hamouz V., Gagne A. S., Muthanna T. M.* The transferability of SWMM model parameters between green roofs with similar build-up // *Journal of Hydrology*. 2019. Vol. 569. Pp. 816—828.
25. Modeling the hydraulic performance of pilot green roofs using the storm water management model: how important is calibration? / J. Weggemans, M. L. Santos, F. Ferreira, G. D. Moreno, J. S. Matos // *Sustainability*. 2023. Vol. 15(19). Art. no. 14421.
26. *Turco M., Brusco A. C., Brunetti G., Piro P.* Coupling Hydrus-1D and Epa Swmm to assess the multiscale hydrological benefits of a green infrastructure // *Water Resources Management*. 2025. Vol. 39(15). Pp. 8249—8265.
27. Parsimonious modeling of the hydrological performance of blue-green roofs in the integrated water supply and irrigation management / J. Wang et al. // *Water Resources Research*. 2025. Vol. 61(7). e2025WR039940.
28. *Worthen L., Kelleher C., Davidson C.* Investigating model performance and parameter sensitivity for runoff simulation across multiple events for a large green roof // *Hydrological Processes*. 2021. Vol. 35(10). e14387.
29. Green roof performance for stormwater management in equatorial urban areas using Storm Water Management Model (SWMM) / K. K. Kuok, P. C. Chiu, M. Y. Chin, M. R. Rahman, M. K. Bakri // *Journal of Water Resource and Protection*. 2023. Vol. 15(12). Pp. 706—720.
30. Performance comparison of green roof hydrological models for full-scale field sites / I. Broekhuizen et al. // *Journal of Hydrology X*. 2021. Vol. 12. Art. no. 100093.
31. Improving water quality modelling for green roof runoff using Storm Water Management Model / H. Kim, S. Hong, A. G. Limos, Z. W. Geem, J. Yoon // *Urban Climate*. 2023. Vol. 52. Art. no. 101717.
32. Evaluating different machine learning methods to simulate runoff from extensive green roofs / E. M. H. Abdalla et al. // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2021. Vol. 25(11). Pp. 5917—5935.
33. Design optimization of a passive building with green roof through machine learning and group intelligent algorithm / Y. Lin, L. Zhao, X. Liu, W. Yang, X. Hao, L. Tian // *Buildings*. 2021. Vol. 11(5). Art. no. 192.
34. *Frisk F., Johansson O.* Comparative evaluation of water level forecasting using IoT sensor data: hydrodynamic model SWMM vs. machine learning models based on NARX framework // *Water*. 2024. Vol. 16(19). Art. no. 2776.
35. *Husting T., Schröder B., Weber S.* Predicting multi-annual green roof net ecosystem exchange using machine learning // *Building and Environment*. 2024. Vol. 263. Art. no. 111878.
36. *Abera L.* The growing role of artificial intelligence in tomorrow's urban hydrological infrastructure. Institute for Homeland Security, 2025.
37. *Ramovha N., Chadyiwa M., Ntuli F., Sithole T.* The potential of stormwater management strategies and artificial intelligence modeling tools to improve water quality: a review // *Water Resources Management*. 2024. Vol. 38(10). Pp. 3527—3560.
38. *Cao X.* Optimization design of urban rainwater and flood drainage system based on SWMM // *Nonlinear Engineering*. 2025. Vol. 14(1). Art. no. 20250146.
39. *Chin R. J., Lai S. H.* Integration of hydrological models and machine learning techniques for water resources management // *Journal of Civil Engineering*. 2025. Vol. 16(1). Pp. 1—5.
40. *Yaseen Z. M.* A new benchmark on machine learning methodologies for hydrological processes modelling: a comprehensive review for limitations and future research directions // *Knowledge-Based Engineering and Sciences*. 2023. Vol. 4(3). Pp. 65—103.

© Наземи Х., Азаров В. Н., Сысоева Е. В., 2026

Поступила в редакцию
20.05.2026

Ссылка для цитирования:

Наземи Х., Азаров В. Н., Сысоева Е. В. Моделирование гидрологических процессов на «зеленых» крышах. Обзор // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 3(104). С. 124—133. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_124.

Об авторах:

Назери Хаси — аспирант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; hnz72@gmail.com

Азаров Валерий Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; azarovpubl@mail.ru

Сысоева Елена Владимировна — канд. техн. наук, доц., доц. каф. архитектурно-строительного проектирования и физики среды, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; SysoevaEV@mgsu.ru

Hasti Nazemi^a, Valerii N. Azarov^a, Elena V. Sysoeva^b

^a *Volgograd State Technical University*

^b *National Research Moscow State University of Civil Engineering*

**MODELING HYDROLOGICAL PROCESSES ON GREEN ROOFS:
A REVIEW OF APPROACHES**

This scoping review synthesizes research on modeling hydrological processes of green roofs with emphasis on retention and detention. We summarize physically based models (SWMM, Hydrus-1D, etc.), machine-learning approaches, and hybrid schemes that couple process equations with observations. Key inputs, applicability limits, and typical uncertainties are compared, and gaps are highlighted to guide reproducible, scalable integrated models for stormwater management. Recommendations for future research and benchmarking are provided.

Key words: green roofs, SWMM, Hydrus-1D, machine learning, hybrid modeling, retention, detention.

For citation:

Nazemi H., Azarov V. N., Sysoeva E. V. [Modeling hydrological processes on green roofs: a review of approaches]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 3, pp. 124—133. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_124.

About authors:

Hasti Nazemi — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; hdnzm84@gmail.com

Valerii N. Azarov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; azarovpubl@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0944-0232

Elena V. Sysoeva — Candidate of Engineering Sciences, Docent, National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). 26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SysoevaEV@mgsu.ru