

УДК 556.042

ОЦЕНКА ДИФфуЗНОГО СТОКА С УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ В БАССЕЙНЕ р. ВОЛГИ (НА ПРИМЕРЕ г. РОСТОВА)¹

© 2020 г. М. В. Болгов^а, Е. В. Завьялова^а, А. В. Зайцева^{а, *}, Н. В. Осипова^а

^аИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: yew-tree@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2020 г.

После доработки 13.04.2020 г.

Принята к публикации 16.04.2020 г.

Рассмотрены результаты исследования и моделирования процессов формирования стока и выноса загрязняющих веществ на примере малого города в бассейне р. Волги – г. Ростова (Ростова Велико-го). Проведена оценка диффузного стока с территории Ростова, а также его пространственное распределение по следующим компонентам: аммоний, общее железо, нефтепродукты, сульфаты, хлориды, взвешенные вещества, ХПК, БПК₅. Основные выводы и рекомендации основаны на результатах выполненных авторами экспериментальных работ и моделирования на основе комплекса SWMM (модель управления ливневым стоком), а также многолетних инженерных исследований городских условий в связи с подтоплением в рамках различных проектов.

Ключевые слова: урбанизированные территории, диффузное загрязнение, математическое моделирование.

DOI: 10.31857/S032105962005003X

ВВЕДЕНИЕ

Загрязняющие вещества (ЗВ), поступающие с диффузным стоком с застроенных (урбанизированных) территорий, составляют значительную часть общего количества загрязнений, поступающих в водные объекты, и оказывают тем самым негативное воздействие на водные экосистемы вплоть до их полной деградации.

В России гидрологические процессы на естественных водосборах изучены гораздо лучше, чем на урбанизированных территориях. Оценка потоков ЗВ на водосборах усложняется в городских условиях по причине кардинального изменения ландшафтов и большой неопределенности источников загрязнений.

Необходимо отметить, что процесс формирования диффузного стока с городских территорий на территории Российской Федерации изучался в основном с целью обоснования прикладных задач. В практике сбора и очистки дренажного (талого, ливневого) стока применяются инженерные методы, позволяющие оценивать расчетные характеристики поступления отдельных видов ЗВ при подготовке проектов строительства в городах. Известны результаты исследований структу-

ры и параметров расчетных зависимостей величин стока и смыва ЗВ от количества осадков на территории некоторых городов [3–5].

Сегодня задача расчета количества ЗВ, поступающих в водные объекты от диффузных источников в условиях урбанизации территорий, решается путем использования обобщенных показателей смыва загрязнений со стоком дождевых и талых вод. Используемые при этом коэффициенты и зависимости предназначены для проектирования очистных сооружений и, в целом, обоснованы на ограниченном материале наблюдений.

Основные исследования и разработки в России по проблеме диффузного стока относятся к 1970–1980-м гг., и их результаты, по современным меркам, требуют актуализации и применения современных подходов, учитывающих существующий уровень математического моделирования гидрологических процессов и имеющийся зарубежный опыт решения задач управления водными ресурсами урбанизированных территорий.

ОСНОВНЫЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ПРИ ОЦЕНКЕ ДИФфуЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Основная проблема диффузного стока связана со слабой изученностью процесса его формирования. Оценка выноса загрязнений от диффузных источников на селитебных территориях

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0147-2019-0003, государственная регистрация № АААА-А18-118022090105-5; тема 0126-2019-0038, № государственной регистрации АААА-А18-118062090035-1).

сильно осложняется отсутствием сколько-нибудь действенного мониторинга состояния водной среды в достаточно специфических условиях. Гидрометеорологическими (включая гидрохимические) наблюдениями охвачены в основном крупные и средние реки, в пределах бассейнов которых площади урбанизированных территорий могут составлять различную долю общей площади. Выявить вклад города в изменение количественных и качественных характеристик вод на основе существующих данных не всегда возможно.

Формирование снежного покрова в городах и в целом гидрологический режим урбанизированных территорий практически не изучается, при этом талые воды – основной фактор поступления загрязнений в водные объекты. Не способствует развитию методов оценки смыва ЗВ слабая сеть метеорологических пунктов наблюдений, оборудованных плювиографами.

Основная гидрологическая задача, возникающая при оценке диффузного стока с урбанизированных территорий, – это оценка условий формирования поверхностного или дренажного стока при наличии сильно нарушенных ландшафтов, непрерывно происходящих изменений инфраструктуры города, отсутствия систем ливневой канализации и прочих факторов, слабо поддающихся формализованному описанию. В отсутствие актуализированной топографической основы крупного масштаба приобретает важнейшее значение задача выделения (построения) гидрографической сети и определения соответствующих гидрографических характеристик.

Очевидно, что задача оценки диффузного стока сложна и разнообразна и в связи с этим должна решаться на основе методов математического моделирования. Сложность модели должна гарантировать учет основных факторов и при этом не упрощать происходящие процессы, а также не требовать чрезмерных затрат на ее идентификацию. Последнее, в частности, относится к блоку физико-химических механизмов, который, как правило, рассматривается в этих задачах в весьма упрощенном виде.

В работе обсуждается подход к оценке диффузного стока с территории г. Ростова Великого (Ростова) Ярославской области, имеющего типичные для малых городов в бассейне р. Волги условия землепользования, состояние городской инфраструктуры и антропогенную нагрузку. Ростов расположен в юго-восточной части Ярославской области на расстоянии 58 км от областного центра – г. Ярославля. Население г. Ростова на 1 января 2018 г. составило 30969 тыс. человек, площадь городского поселения 32 км² [12]. Ростов расположен на берегу оз. Неро, определяющего гидрологические особенности территории города. В оз. Неро впадает р. Сара и еще приблизительно 20 небольших речек, вытекает одна река –

Векса (Которосль). Качество воды в оз. Неро определяется объемом ЗВ, содержащихся в водах рек, впадающих в озеро, а также степенью загрязнения/очистки поверхностного стока в озеро через систему ливневой канализации Ростова. С гидрологической точки зрения, негативные последствия урбанизации в Ростове проявляются в антропогенном заболачивании, капиллярном увлажнении и деформации грунтов, оснований и каменных конструкций зданий в процессе подтопления грунтовыми водами и другими негативными процессами.

Регион характеризуется хорошей гидрометеорологической изученностью, что вместе с результатами экспериментальных исследований условий формирования стока на застроенной территории позволило решить поставленные задачи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью оценки диффузного стока с территории г. Ростова проведены исследования качества воды в трех точках ливневой канализации (рис. 1), использовавшиеся для верификации расчетов смыва ЗВ. Помимо этого, рассмотрены факторы, влияющие на качество и режим поверхностного стока исследованных микроводосборов, в том числе и по материалам исследований прошлых лет [2–5], выполнены расчеты интенсивности водоотдачи при снеготаянии, а также проведен расчет стока и выноса ЗВ с использованием методов математического моделирования.

Точки отбора проб находились на устьевых участках дренажных систем непосредственно перед сбросом вод в оз. Неро. Отбор проб проводился в период интенсивного снеготаяния (март–апрель 2019 г.) по следующим показателям: ХПК, БПК₅, взвешенные вещества, Fe_{общ}, нефтепродукты, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻. Выбор указанных веществ проводился экспертным путем на основе литературных источников и анализа антропогенной нагрузки на территорию г. Ростова [1, 6, 8, 9, 11]. Следует отметить, что водосборы дренажных систем, сток которых измерялся в назначенных пунктах наблюдений, были репрезентативными по отношению к основным типам подстилающей поверхности на территории города.

Расчеты диффузного стока ЗВ на урбанизированных территориях основываются на расчетах трех составляющих: поступления воды на водосбор в результате снеготаяния, расчета поверхностного стока воды и смыва загрязнений.

Анализ интенсивности снеготаяния и расчет водоотдачи из снежного покрова проводился по данным м/с Ростов. Расчет проводился для двух характерных лет с минимальными (2015 г.) и максимальными (2013 г.) снеготаяниями к началу периода снеготаяния, а также за исследуемый 2019 г.

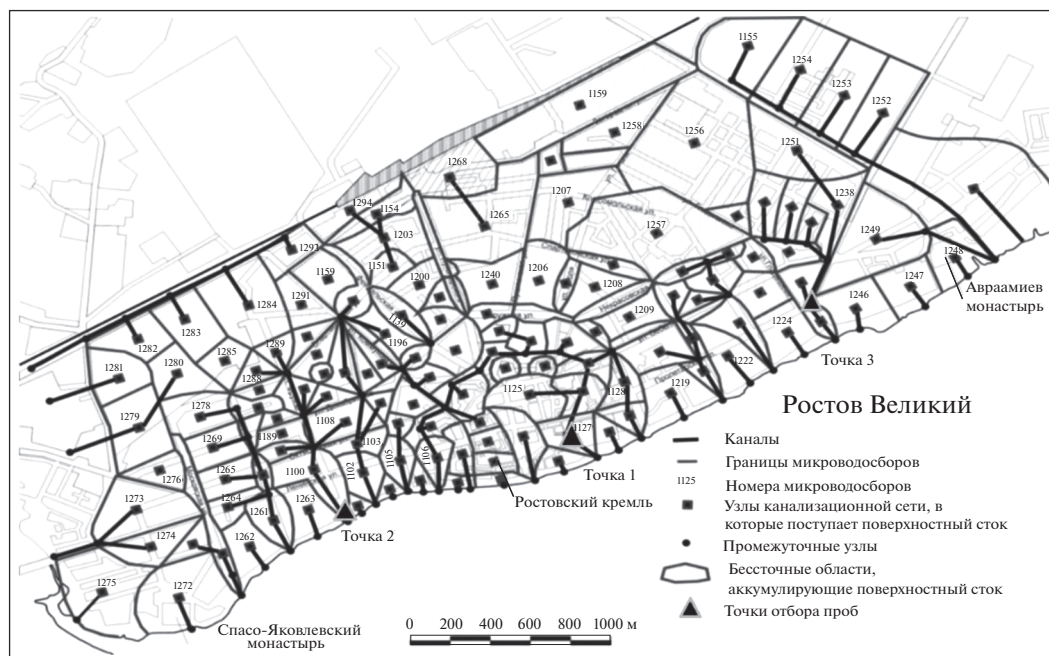


Рис. 1. Схема микроводосборов и точки отбора проб на территории г. Ростова [1–5].

Расчет водоотдачи из снежного покрова проводился по методу А.Г. Ковзеля [7, 10], основанного на рассчитанных методом теплового баланса (неприведенных) значениях суточной интенсивности снеготаяния и на графоаналитическом способе учета в условиях неравномерности распределения снеготаяния по площади водосбора. Для расчета необходимы значения коэффициента вариации запасов воды в снеге по площади водосбора и начальное значение коэффициента водоудерживающей способности снега.

Для характеристики распределения снеготаяния по площади использовалась кривая обеспеченности снеготаяния, которая, в свою очередь, характеризовалась основным параметром — коэффициентом вариации по площади.

Расчет водоотдачи воды из снега проводился на основе расчета обеспеченности запасов воды в снеге по площади [7].

Для определения интенсивности снеготаяния использовался упрощенный метод Е.Г. Попова, в основу которого положены формулы П.П. Кузьмина, позволяющие рассчитывать интенсивность снеготаяния не только за сутки, но и за более короткие интервалы времени, что дало возможность получить ее внутрисуточный ход [7, 10].

Для расчета стока и выноса ЗВ с поверхности исследуемого водосбора использована моделирующая система SWMM, предназначенная для исследования работы систем ливневой канализации на застроенных территориях [13]. Модель водосбора, созданная на основе данной системы,

предполагает разделение изучаемой территории на элементарные водосборы, определение (заданное) параметров, определяющих потери стока на инфильтрацию и склоновое задержание, и добегание по поверхности (склоновое добегание). В данном случае каждый из элементарных водосборов (рис. 1) представлен в виде двух склонов, смыкающихся в тальвеге.

Модель формирования поверхностного стока на застроенной территории включала в себя расчет стока с элементарных водосборов по заданным параметрам потерь с учетом различной степени застройки и его трансформацию по системам естественных русел и каналов ливневой канализации.

Выходом модели были расходы воды в заданных точках системы. Для калибровки модели поверхностного стока г. Ростова использовались расходы воды, измеренные в точке 3 (Пролетарская, 82) за период с 28 марта по 10 апреля. Полученные в результате модельных расчетов значения стока соответствуют наблюдаемым величинам (рис. 2).

Для описания смыва ЗВ с территории города использовалось следующее экспоненциальное соотношение [13]:

$$W = K_w q^{N_w} m_B, \quad (1)$$

где W — смываемое количество вещества, мг/ч; K_w — коэффициент смыва, 1/мм; q — интенсивность стока с водосбора, мм/ч; N_w — экспонента смыва;

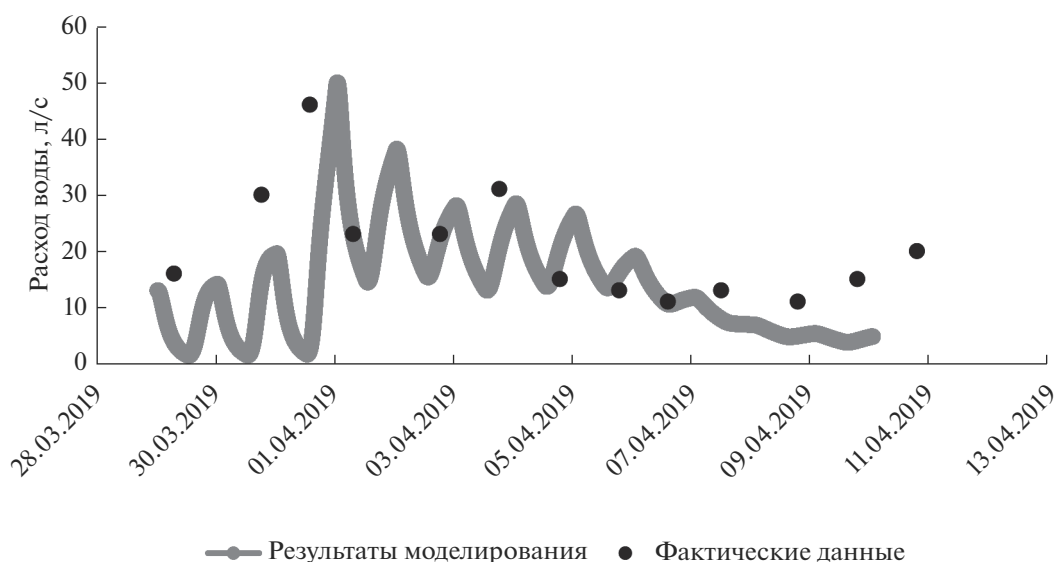


Рис. 2. Сравнение смоделированных и измеренных расходов воды в точке 3 (Пролетарская, 82).

m_B — количество накопленного на поверхности ЗВ, мг.

Для расчета массы вещества, накопленного на поверхности водосбора, применялась следующая формула [14]:

$$B = B_{\max}(1 - e^{-K_B t}), \quad (2)$$

где B — накопление вещества, мг; B_{\max} — максимально возможное накопление ЗВ, мг; K_B — константа скорости накопления, 1/сут; t — время накопления, сут.

Калибровка блока качества воды модели SWMM проводилась за счет подбора четырех параметров: B_{\max} , K_B , K_W и N_w . В силу ограниченности данных наблюдений качество калибровки оценивалась визуально с помощью графиков, на которых были совмещены рассчитанные и измеренные концентрации ЗВ.

Откалиброванная модель стока воды с территории города позволила рассчитать сток ЗВ с последующей целью моделирования эффективности разных видов очистки. Расчет проводился по восьми показателям: БПК₅, ХПК, общему железу, аммоний-иону, сульфатам, хлоридам, нефтепродуктам и взвешенным веществам. Для калибровки использовались результаты гидрохимических анализов проб, отобранных в марте–апреле 2019 г. в устьевых точках (рис. 3). Для репрезентативности результатов моделирования калибровка проводилась на основе результатов анализов проб, отобранных в точке 3 (ул. Пролетарская, 82). Данные, полученные в остальных точках, использовались в качестве независимого материала для верификации модели.

В результате моделирования получены данные о стоке воды в узлах и каналах дренажной сети, об

объемах поверхностного стока с каждого водосбора как в определенный момент времени, так и за весь период моделирования. В итоге расчета диффузного стока получены ряды концентраций и объемов стока ЗВ в узлах и каналах сети, а также рассчитан смыв веществ с каждого элементарного водосбора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных исследований выявлено, что на качество поверхностного стока с застроенной территории г. Ростова оказывает влияние множество причин: изношенные сети ливневой и хозяйственно-бытовой канализации, объекты транспортной инфраструктуры и промышленность. Анализ качества вод, поступающих из ливневой канализации г. Ростова в оз. Неро, выполненный в 2019 г., выявил превышение содержания органических (в том числе легкоокисляемых) веществ, измеряемых с помощью показателей ХПК и БПК₅, а также общего железа по нормативам для рыбохозяйственных водоемов. Ионы аммония также превышали значения ПДК по всем точкам наблюдений. Это связано с тем, что канализация в центральной части города не организована в единую сеть, на отдельных участках ливневая канализация соединена с хозяйственно-бытовой канализацией. Также это связано с наличием на территории г. Ростова значительного количества огородов. Повышенное содержание общего железа может быть объяснено наличием большого количества кустарных производств финифти. Превышение ПДК по нефтепродуктам может быть связано с загрязнением стока с территории города от автомобилей и заправок. Содержание хлоридов и сульфатов не превышало норматив-

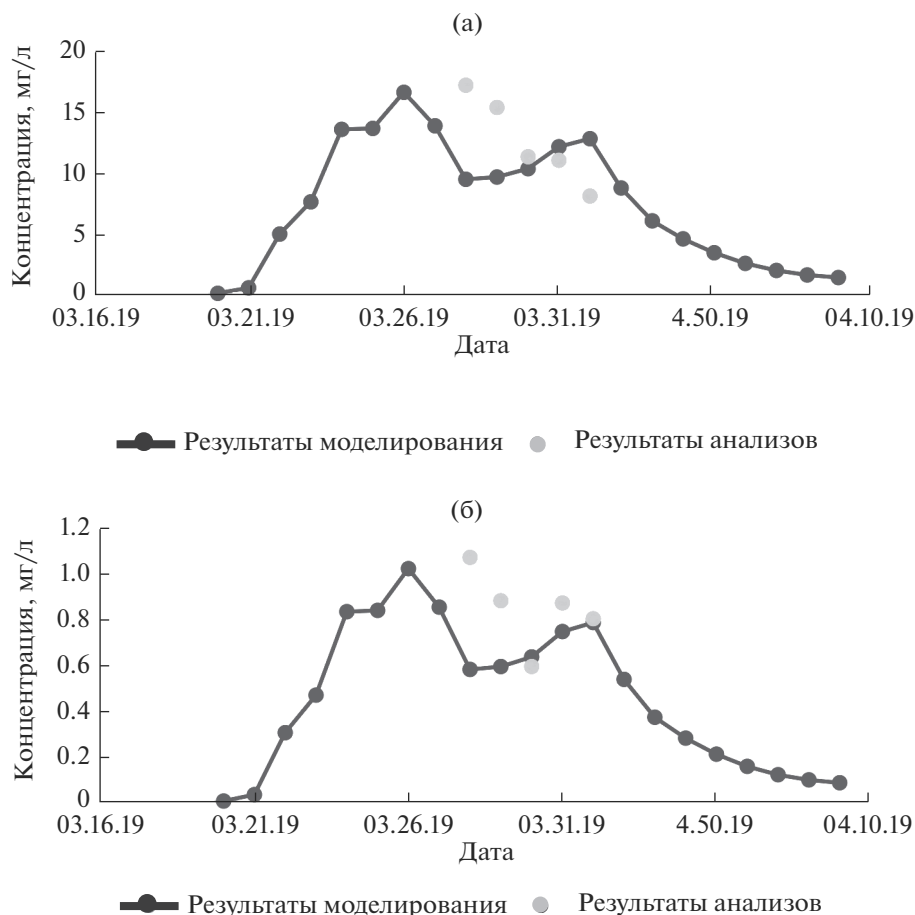


Рис. 3. Сравнение смоделированных и измеренных поллютографов в точке 3 (Пролетарская, 82) по БПК₅ (а) и общему железу (б).

ные значения во всех точках отбора проб. Содержание взвешенных веществ не сравнилось с нормативным в связи с тем, что ПДК для взвешенных веществ зависит от фонового содержания и категории объекта.

Для расчета стока и выноса ЗВ с территории г. Ростова с помощью модели SWMM были приняты величины водоотдачи из снежного покрова, рассчитанные с использованием данных наблюдений на м/с Ростов.

Характерные годы с максимальными и минимальными снегозапасами, согласно которым 2015 г. можно отнести к маловодному году, а 2013 г. — к многоводному, были выбраны на основе анализа гидрологического режима р. Сары.

В 2019 г. установление устойчивой положительной температуры воздуха наблюдалось с 18.03.2019, эта дата принята в расчетах за начало периода снеготаяния. Согласно данным снегомерных съемок, полный сход снега по рейке произошел 4 апреля, 11 апреля снег полностью сошел повсеместно. Высота снежного покрова к началу снеготаяния составляла 32 см. За весь период сне-

готания на водосборе выпало 24.2 мм твердых и смешанных осадков и 1 мм жидких.

В 2015 г. устойчивые положительные значения температуры воздуха установились с 1 марта, высота снежного покрова к началу снеготаяния составила всего 18 см, снег сошел полностью к 15 марта. Период снеготаяния составил 15 дней, за этот период осадки выпадали всего один раз в жидком виде и составили 3 мм.

2013 г. значительно отличается от 2015 и 2019 гг. по своим характеристикам: устойчивые положительные значения температуры воздуха наблюдались со 2 апреля, период снеготаяния длился месяц, снеготаяние завершилось 30 апреля, высота снежного покрова к началу снеготаяния составляла 73 см. За период снеготаяния на м/с Ростов зафиксировано выпадение жидких осадков в количестве 7.2 мм.

При расчете суммарной водоотдачи учитывались данные о жидких осадках, выпавших на водосбор в период снеготаяния.

На рис. 4 представлены графики суточного хода водоотдачи из снежного покрова, рассчитанные отдельно для дневных (7–19 ч) и ночных ча-

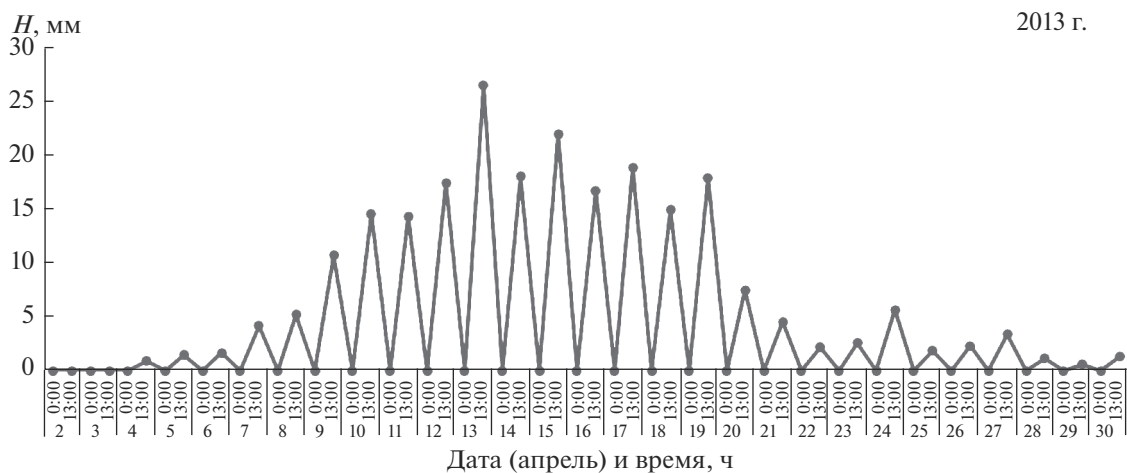
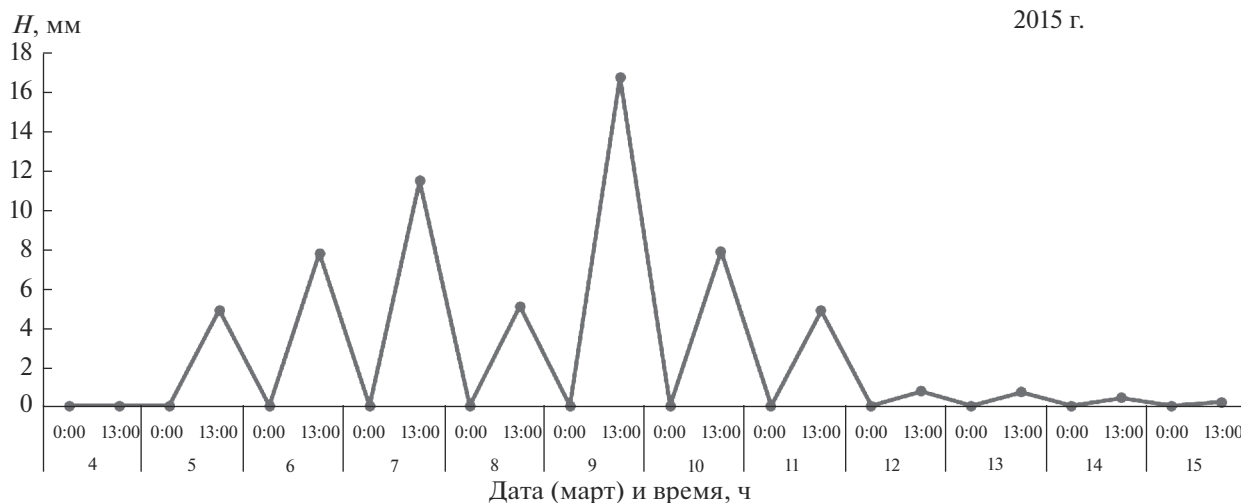
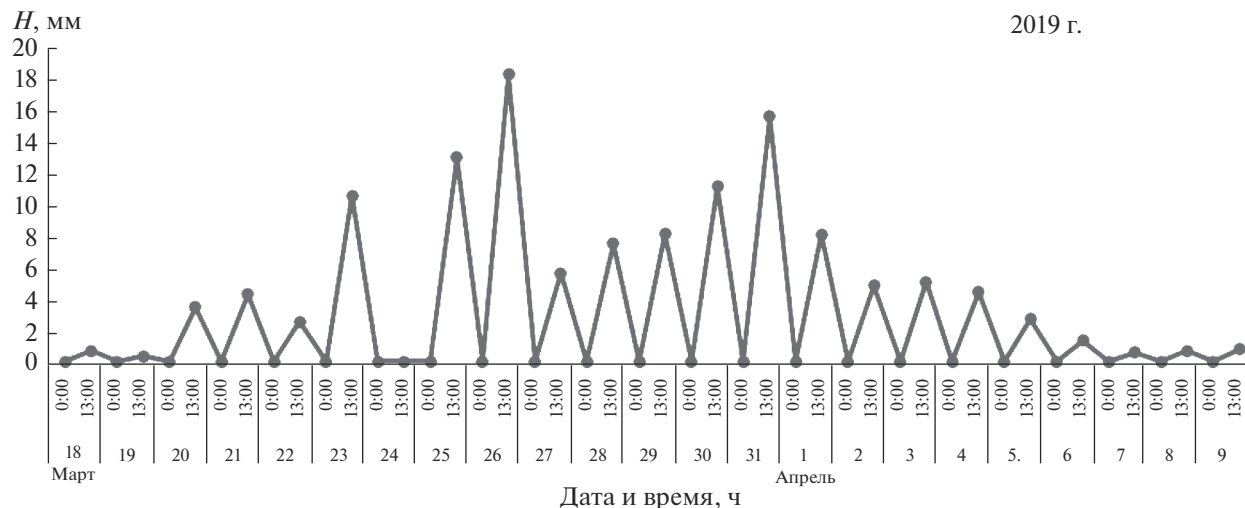


Рис. 4. Графики суточного хода водоотдачи по м/с Ростов за различные по водности годы.

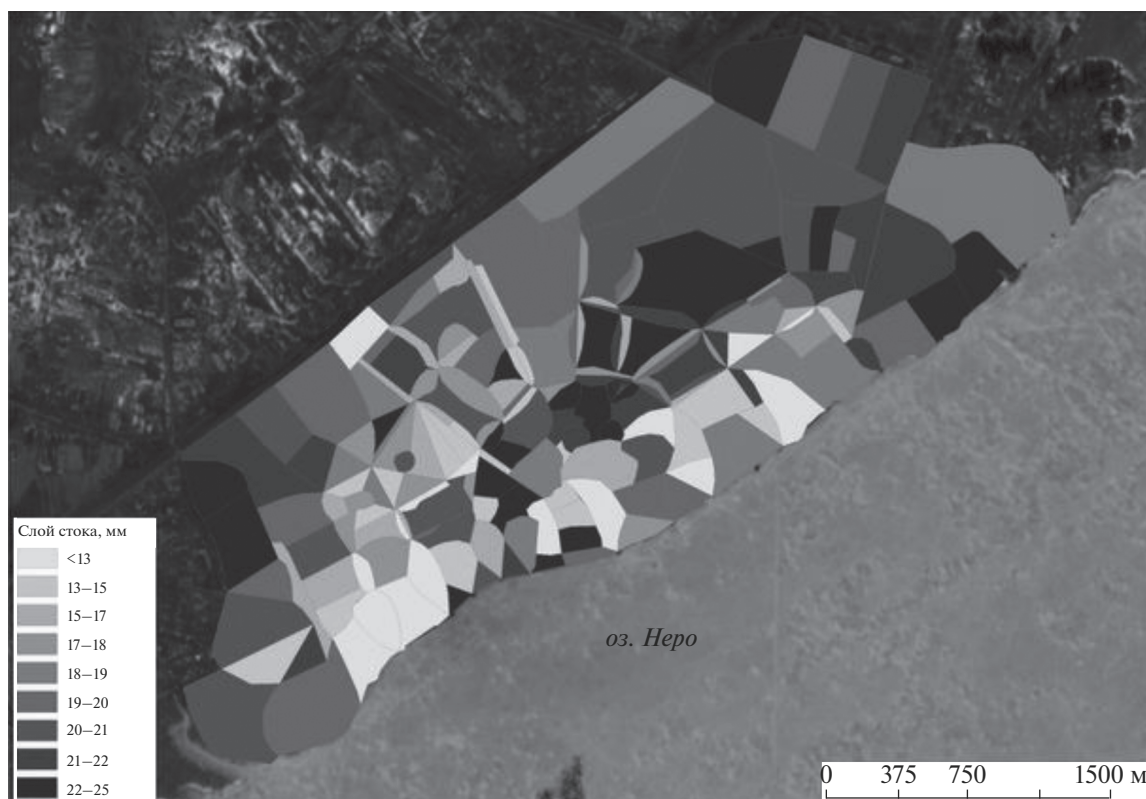


Рис. 5. Пространственное распределение слоя стока весеннего половодья по территории г. Ростова в 2019 г.



Рис. 6. Пространственное распределение БПК₅ по территории г. Ростова за период половодья 2019 г.

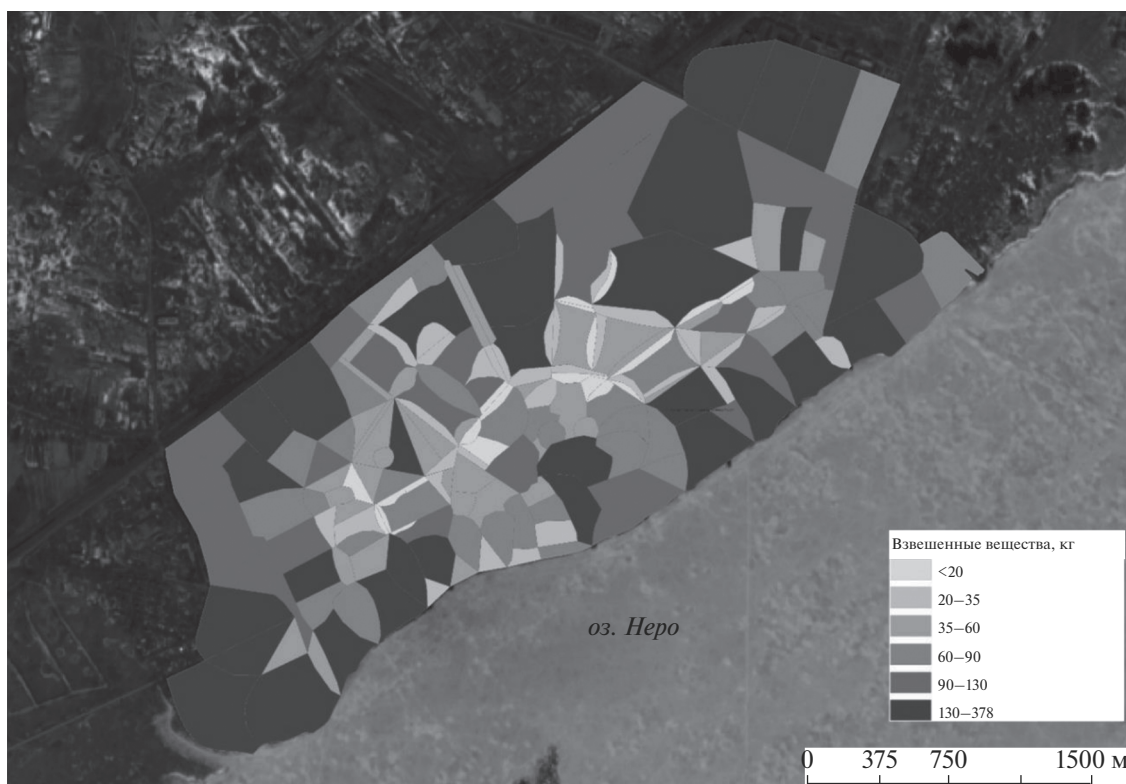


Рис. 7. Пространственное распределение взвешенных веществ по территории г. Ростова за период половодья 2019 г.

сов за 2019, 2013, 2015 гг., на основе них проведен расчет поверхностного стока с территории Ростова в период снеготаяния. В ночные часы водоотдачи не было. Пространственное распределение слоя стока весеннего половодья представлено на рис. 5.

Расчет поступления ЗВ с территории г. Ростова за период половодья 2019 г. показал следующий суммарный сток, т: SO_4^{2-} – 22, Cl^- – 15.8, взвешенных веществ – 14.4, ХПК – 9.9, БПК₅ – 2.6, NH_4^+ – 0.8, $\text{Fe}_{\text{общ}}$ – 0.2, нефтепродуктов – 0.05. В этом случае почти все загрязнения смываются с 70% стока. Пространственное распределение ряда ЗВ (БПК₅, взвешенные вещества, нефтепродукты) на территории г. Ростова продемонстрировано на рис. 6–8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для застроенной территории г. Ростова характерны сложные инженерные условия вследствие недостаточной развитости системы инфраструктурных объектов – систем водоснабжения, водотведения и ливневой канализации. Результаты выполненного исследования показали, что с застроенной территории в водные объекты может поступать значительное количество ЗВ.

На примере территории г. Ростова показано, что процессы смыва и трансформации диффузного стока характеризуются большой неопределенностью, связанной как со сложными механизмами формирования водного стока, так и с многообразием форм диффузных источников.

Задача оценки поступления загрязнений от диффузных источников на застроенных территориях по причине сложности и разнообразия условий должна решаться на основе методов математического моделирования. При этом основной предмет обсуждения – сложность модели, гарантирующая, с одной стороны, учет основных факторов, а с другой – не упрощающая основные процессы и не требующая больших затрат на ее идентификацию.

Для расчета стока воды и выноса ЗВ с территории г. Ростова рекомендовано использовать моделирующую систему SWMM, предназначенную для исследования работы систем ливневой канализации на застроенных территориях. Объединение моделей стока и смыва ЗВ с территории г. Ростова позволило рассчитать количество каждого поступающего ЗВ с диффузным стоком.

Для оценки и прогноза диффузного стока необходимо сочетание экспериментальных работ и математического моделирования гидрологических и гидрохимических процессов на приемле-



Рис. 8. Пространственное распределение нефтепродуктов по территории г. Ростова за период половодья 2019 г.

мом уровне воспроизведения основных механизмов переноса.

Проведение экспериментальных работ, направленных на изучение формирования как водного стока, так и стока (выноса) ЗВ, необходимо в связи с наличием на урбанизированной территории сильно нарушенных ландшафтов, непрерывно происходящих изменений инфраструктуры города, отсутствия систем ливневой канализации и прочих факторов, слабо поддающихся формализованному описанию и пространственному обобщению.

Авторы статьи выражают благодарность Е.А. Коробкиной, И.А. Филипповой и М.А. Харламову (ИВП РАН) за помощь в полевых работах, обобщении данных и выполнении расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барымова Н.А., Чернышев Е.П. Состав поверхностного стока с городской территории и качество речных вод // Взаимодействие хозяйства и природы в городских и промышленных геосистемах. М., 1982. С. 31–45.
2. Болгов М.В., Голубаш Т.Ю. Роль водного фактора в экологии городских территорий (на примере Ростова Великого) // Природообустройство. 2008. № 5. С. 20–24.
3. Болгов М.В., Голубаш Т.Ю. Экспериментальные исследования водно-физических свойств городских почв Ростова Великого // Изв. РАН. Сер. геогр. 2009. № 3. С. 107–117.
4. Болгов М.В., Голубаш Т.Ю., Волгин С.А. Водный режим урбанизированных почв и грунтов зоны аэрации г. Ростова великого на основе экспериментальных данных // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 5. С. 531–542.
5. Болгов М.В., Голубаш Т.Ю., Лазарева Е.В., Ривар Ж. Моделирование режима поверхностных вод исторической части Ростова Великого // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2003. № 6. С. 508–518.
6. Красногорская Н.Н., Мусина С.А., Бреднева Т.О. Анализ загрязненности и методов очистки ливневого стока урбанизированной территории // Безопасность жизнедеятельности. М.: Новые технологии, 2015. № 11. С. 3–10.
7. Кузьмин П.П. Формирование снежного покрова и методы определения снеготпасов. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 170 с.
8. Пициль А.О. Оценка выноса загрязняющих веществ от неточечных источников на городских территориях // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2013. № 9. С. 141–144.
9. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и опре-

- делению условий выпуска его в водные объекты. М.: НИИВОДГЕО, 2006. 55 с.
10. Самохин А.А., Соловьева Н.Н., Догановский А.М. Практикум по гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 296 с.
 11. Скакальский Б.Г. Влияние урбанизации на качество речных вод // Тр. ГГИ. 2003. С. 134–135.
 12. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям. М., 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://gks.ru/compendium/document/13282> (дата обращения 24.04.2019)
 13. Lewis A. Rossman, Wayne C. Huber. Storm Water Management Model Reference Manual. V. 1. Hydrol. 2016. 233 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://nepis.epa.gov/Exec/ZipURL.cgi?Dockey=P100NYRA.txt>. (дата обращения 20.01.2020)
 14. Lewis A. Rossman, Wayne C. Huber. Storm Water Management Model Reference Manual. V. III. Water Quality. 2016. 161 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://nepis.epa.gov/Exec/ZipURL.cgi?Dockey=P100P2NY.txt> (дата обращения 16.01.2020)