



## ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМ РЕЖИМОМ ТЕРРИТОРИИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ИСТОРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РОСТОВА ВЕЛИКОГО

*М. В. БОЛГОВ, Т. Ю. ГОЛУБАШ, Е. В. ЛАЗАРЕВА – Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия.*

*Ж. РИВАР – Университет г. Лаваль, Канада.*

Рассматриваются: важнейшая инженерная проблема одного из древнейших городов России – Ростова Великого – развитие процессов подтопления исторической части города, угрожающее существованию культурных и исторических памятников, и пути решения этой проблемы на основе управления водным режимом территории с использованием математического моделирования для выработки рекомендаций по инженерной защите исторической части города.

### ВВЕДЕНИЕ

Город Ростов Великий – один из древнейших исторических и культурных памятников России. Он возник в конце IX в. Первое упоминание в летописи относится к 862 г. За свою многовековую историю Ростов Великий пережил периоды расцвета и экономического спада. В средние века город занимал значительную территорию. Ростов Великий расположен на берегу оз. Неро в низшей точке обширной депрессии с весьма малыми уклонами земной поверхности. Важным градостроительным элементом древнего Ростова были улицы, которые обычно следовали осям водоразделов и тальвегов или шли параллельно им и редко пересекали элементы рельефа. Этим объясняются мягкие уклоны, с чем связана организация системы средневековых городских гидротехнических сооружений – водостоков. Расположение улиц параллельно берегу озера способствовало формированию застойного режима поверхностного стока. Интенсивное хозяйственное освоение территории привело к уменьшению расчлененности рельефа, нарушению стока поверхностных вод, ликвидации естественных дрен.

Климатические (избыточная увлажненность), гидрологические (затрудненность поверхностного стока), гидрогеологические (близкий уровень залегания грунтовых вод) и геоморфологические (весьма слабая естественная дренированность) особенности территории изначально способствовали развитию процесса подтопления, а хозяйственная деятельность только усилила проявление этих опасных явлений.

В настоящее время к наиболее опасным процессам в городе следует отнести подтопление грунтовыми водами; капиллярное увлажнение и морозное пучение грунтов оснований; антропогенное заболачивание участков исторической части города; периодическое затопление в период весеннего половодья прибрежной полосы водами оз. Неро.

В последние годы эти процессы принимают угрожающий характер как для отдельных памятников, так и для всей исторической части города.

Водный баланс застроенной части территории Ростова Великого непрерывно изменяется вследствие развития города: увеличения площадей застроенных территорий, роста водопотребления в жилищно-коммунальном секторе, увеличения площади коммуникаций и степени их износа и т. д. В результате воздей-

ствия техногенных и природных факторов наблюдается рост влажности почвогрунтов, лежащих в основаниях фундаментов. Однако эта проблема не может быть решена путем резкого снижения уровня грунтовых вод, поскольку многие фундаменты старых зданий усилены деревянными сваями, которые будут гнить при осушении. Поэтому основные рекомендации состоят в использовании «мягких» методов регулирования влажности грунтов, в основном путем модернизации городской ливневой дренажной сети, а при необходимости и путем устройства локальных дренажных систем двустороннего регулирования влажности почвогрунтов. При этом особое внимание следует обратить на качество грунтовых вод, которые могут оказаться агрессивными по отношению к защищаемым конструкциям. Решение этой задачи требует тщательного анализа изменений водного режима территории города.

При проектировании защитных мероприятий требуются объективная оценка современного состояния природной среды и прогноз развития опасных процессов. Эти задачи могут быть решены путем создания и верификации математических моделей гидрологических процессов на урбанизированных территориях с их последующим использованием для выработки и проверки проектных решений по дренажу, вертикальной планировке и т. п.

Историческая территория Ростова Великого представляет собой объект особой ценности, поэтому рекомендации по борьбе с опасными процессами было решено проверить путем создания совместной модели формирования поверхностного стока и гео-фильтрации. В рамках модели формирования поверхностных вод предполагается оценить долю осадков, аккумулирующихся в микродепрессиях и замкнутых (бессточных) понижениях рельефа (включая пруды) и инфильтрующихся в почву, и далее путем оценки испарения с поверхности суши определить инфильтрационное питание подземных вод.

В данной статье основное внимание уделено проблеме создания модели поверхностного стока (и верификации ее отдельных блоков), позволяющей учесть все особенности

городской инфраструктуры и пригодной для решения проектных задач.

## 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

Расчет гидрологического режима поверхностных водных объектов города осуществлен с использованием модели управления ливневым стоком и данных экспериментальных исследований, проведенных на территории Ростова Великого в 2001–2002 гг. Они включали стандартные наблюдения на метеостанции, снегомерные съемки на семи различных участках городской территории, двухсрочные наблюдения за уровнем воды на двух водомерных постах и измерения расходов воды в двух створах р. Пига (правой и левой частях р. Пига перед впадением в оз. Неро), окаймляющей в виде крепостного рва историческую часть Ростова Великого. Кроме того, проводились наблюдения за уровнем воды в озере Неро. Частично результаты исследований и модельных расчетов рассмотрены в работе [1].

Особенностью формирования водного режима урбанизированной территории является дополнительное питание за счет утечек из водонесущих коммуникаций, сброса поверхностного стока с помощью дренажной сети, аккумуляции стока в замкнутых депрессиях и т. п. На первом этапе основное внимание уделялось идентификации дренажной сети (выделению микроводосборов, тяготеющих к элементам гидрографической сети), выяснению структуры сети ливневой канализации путем полевых обследований и анализа крупномасштабного картографического материала. В ходе выполнения комплекса полевых и камеральных работ получена расчетная гидравлическая схема исторической части Ростова Великого.

Для расчета гидрологического режима поверхностных водных объектов на урбанизированной территории использован программный комплекс SWMM (модель управления ливневым стоком) [3]. Данный комплекс включает несколько блоков, реализующих в том числе и процессы смыва с поверхности городских территорий, но на данном этапе применены только два из них.

Первый блок реализует алгоритм решения уравнения Сен-Венана для системы открытых и закрытых (напорных и безнапорных) водоводов и водотоков.

Второй блок (гидрологический) рассчитывает сток с микроводосборов, при этом на уровне модели с сосредоточенными параметрами учитываются основные элементы процесса стока: инфильтрация, поверхностное задержание и испарение.

Первый блок представляет собой Фортран-программу, предназначенную для численного решения системы уравнений, описывающих движение воды в системе открытых (безнапорных) и закрытых водотоков и водоводов. Этот блок получает входной гидрограф в специальных узлах через интерфейсный файл из гидрологического блока и/или путем непосредственного ввода пользователем. Модель выполняет динамический расчет (решение) потока ливневых вод по всей дренажной системе – с верхних точек до точек выхода (принимаяющей водной системы). Программа моделирует древовидные или замкнутые сети, безнапорные и напорные потоки, обратные течения, переброску потоков с помощью плотин, водоводов и насосных станций, управляемых и неуправляемых емкостей. Возможен учет различных форм поперечных сечений труб: круглые, прямоугольные, подковообразные, в форме яйца или корзины. Каналы могут быть трапецеидальными, параболическими или задаваться в виде естественных русел произвольной формы.

Выходом модели являются профили водной поверхности и расходы воды в заданных точках системы.

Первый шаг при решении задачи моделирования гидрологического режима заключается в калибровке модели с использованием наблюдений 2001 г., когда 29 июня выпало 55 мм осадков примерно за один час. В тот период основная труба, соединяющая р. Пига с оз. Неро, была частично забита наносами и мусором. Используя имеющуюся плювиограмму дождя, с помощью математической модели можно воспроизвести наблюдаемый ход колебания уровня воды в предположении, что основной водовод заблокирован примерно на одну треть. Рассчитанный гидрограф (рис. 1) показывает на приемлемое соответ-

ствие рассчитанных и наблюдаемых максимальных уровней воды, что свидетельствует о работоспособности модели.

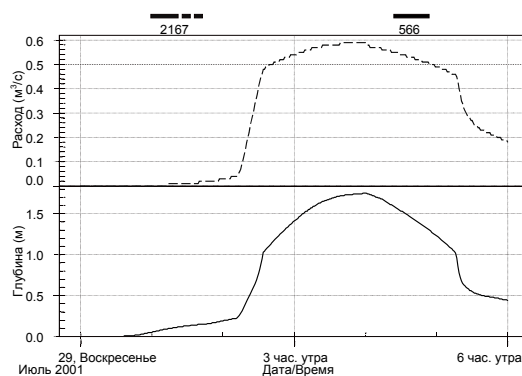


Рис. 1. Результаты моделирования дождевого паводочного стока с урбанизированной территории (ливень 29 июня 2001 г.) для р. Пига (верхний график – расход воды, нижний – глубина потока)

Для исследования баланса поверхностного стока выполнены модельные расчеты для условий, соответствующих различным случаям снеготаяния или выпадения дождевых осадков. Исследовались следующие случаи:

- снеготаяние;
- короткие дожди теплого периода продолжительностью до 1 ч;
- дожди большой продолжительности (до 24 ч).

Условия снеготаяния задавались исходя из среднего запаса воды в снежном покрове 87 мм, распределенного на 15 дней с интенсивностью от 2 до 12 мм/ч. Максимальная интенсивность (12 мм/ч) имеет место в течение нескольких часов при выпадении дождевых осадков на снежный покров. В остальную часть периода интенсивность снеготаяния составляет 2...3 мм/ч. Для весеннего периода параметры уравнения инфильтрации были немного уменьшены для учета мерзлого состояния почв.

Для анализа дождевого стока использовались ливни различной повторяемости.

Величины стока, полученные в результате моделирования, показывают, что доля осадков, стекающих в озеро в условиях современного состояния территории, довольно низка (до 15 %). При хороших условиях

дренирования эта величина должна быть порядка 30 %. Для областей с большой долей непроницаемых покрытий сток может составлять от 40 до 50 % осадков.

Из полученных результатов очевидно, что возможно увеличение стока и, соответственно, уменьшение объема инфильтрационного питания грунтовых вод, например, путем дренирования замкнутых (бессточных) областей. Другой путь уменьшения объема инфильтрации – улучшение существующей дренажной сети.

Сегодня сложно дать детальные рекомендации по всем кварталам исторической части города, поскольку в модели использованы характеристики труб и каналов, определенные по имеющейся топографической основе. Кроме того, часть труб и каналов блокирована полностью или частично отложениями, включая бытовой мусор. В этом случае требуется производство специальных технических изысканий.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЛАГООБМЕНА

Важнейшей гидрологической (гидрофизической) характеристикой почв и грунтов является их влагосодержание (или влажность). В настоящее время программой метеорологических наблюдений на метеостанции г. Ростов Великий измерения влажности почвогрунтов на урбанизированной территории не предусмотрены, поэтому основным методом задания приближенных характеристик влажности является водобалансовый расчет на основе существующих представлений о механизме влагопереноса, включая массоэнергообмен с приземным слоем атмосферы и грунтовыми водами. Для оценки возможности его использования в конце 2001 и 2002 гг. были организованы наблюдения за влажностью почвы в трех точках исторической части города: у собора Исидора Блаженного, в сквере в центре города и на территории Монастырского сада Кремля.

Почвы в местах взятия проб характеризуются слоистым строением и большим разнообразием.

Для оценки возможности задания приближенных характеристик влажности почво-

грунтов на урбанизированной территории использован водно-балансовый расчет, в котором основные определяемые элементы – суммарное испарение и характеристики влагообмена в зоне аэрации. Они рассчитаны за 2001 и 2002 гг. в декадном разрезе в соответствии с [1, 2]. На рис. 2 приведено сравнение расчетных продуктивных влагозапасов в слое 0...100 см и измеренных в трех точках города. Расчеты проведены для травяного растительного покрова. Как видно из рисунка, совпадение между измеренными и расчетными влагозапасами достаточно хорошее, хотя в отдельных случаях расхождения могут быть значительными. Расчетная кривая имеет более сглаженный вид, так как при расчете используются суммы осадков за декадные отрезки времени. Поэтому увеличение влажности под влиянием, например, ливневого дождя, которое может наблюдаться при измерениях, при расчете сглаживается. Следует отметить, что при измерении влажности не определялись водно-физические свойства почв. Они принимались по данным агрометеостанции, где почвы отличаются от почв урбанизированной территории, на которой имеется значительный культурный слой, хотя в обоих случаях почвы супесчаные. При сравнении рассчитанных продуктивных влагозапасов с измеренными в 2001 г. на агрометеостанции с экспериментально определенными водно-физическими характеристиками совпадение хорошее, средняя ошибка составляет 3%, лишь в одном случае – 15%.

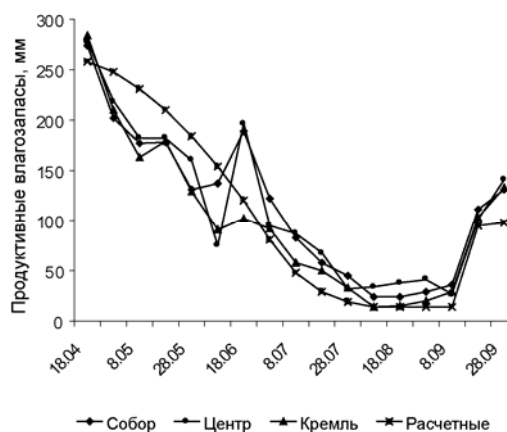


Рис. 2. Сравнение расчетных продуктивных влагозапасов в слое 0...100 см и измеренных в трех точках города в 2002 г.

Как показывают результаты расчетов, полученные характеристики тепловлагопереноса с известной степенью приближения могут быть использованы для оценки динамики влажности почвы в условиях урбанизированной территории. Однако экспериментальные исследования должны быть продолжены для устранения некоторых недостатков при проведении измерений.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование водного режима Ростова Великого, как и других урбанизированных территорий, обладает рядом специфических особенностей, связанных с хозяйственной деятельностью: преобразование поверхности города, создание нового антропогенного ландшафта, коллекторно-дренажных систем и т. п. Это приводит к коренному преобразованию водного баланса территории города по сравнению с естественным ландшафтом. При этом под влиянием урбанизации изменяются лишь условия формирования гидрологического режима, а лежащие в его основе процессы остаются неизменными. Поэтому использование традиционных методов моделирования поверхностного стока с включением элементов хозяйственной деятельности (дренажно-

канализационные системы, учет наличия непроницаемых поверхностей и т. п.) создает надежную основу для оценки существующих и проектируемых гидрологических условий. Результаты моделирования поверхностного стока с территории Ростова Великого служат информационной базой при проектировании защитных сооружений.

#### Список литературы

1. Болгов М. В., Голубаиш Т. Ю., Лазарева Е. В. Экспериментальное исследование и моделирование гидрологического режима урбанизированной территории (на примере исторической части г. Ростова Великого) // Экологические проблемы озера Неро и городских водных объектов. РФ и Совет Европы / Канадское агентство международного развития. Пилотный проект «Возрождение Ростова Великого». Ростов Великий: ИВП РАН, 2002. С. 112–129.
2. Будаговский А. И., Голубаиш Т. Ю. Влияние водного фактора на продукционный процесс растительного покрова // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 2. С. 133–143.
3. Wayne C. Huber, Robert E. Dickinson. Storm water management model. User's manual. Version 4. Athens, Georgia, 1992. 502 p.