

УДК 502/504:556.5

М. В. Болгов, доктор техн. наук,**Т. Ю. Голубаш**, канд. техн. наук

Контактная информация: тел. 8 (499) 135-04-67, e-mail: bolgovmv@mail.ru

Институт водных проблем РАН

РОЛЬ ВОДНОГО ФАКТОРА В ЭКОЛОГИИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ РОСТОВА ВЕЛИКОГО)*

Рассмотрены особенности формирования водного режима городских территорий, связанные с природными условиями, интенсивной антропогенной и градостроительной деятельностью. Особое внимание уделено вопросам формирования водного режима в зоне аэрации застроенных территорий с учетом экспериментально определенных гидрофизических характеристик урбаноземов (на примере территории города Ростова Великого).

The current work describes peculiarities of formation of urban water regime. It deals both with the environment and intensive anthropogenic and town-planning activities. Special attention is paid to the problems of water regime formation in the aeration zone of the built-up areas taking into account experimentally determined hydrophysical characteristics of urban soils (in the case of Rostov the Great City).

Экологическое состояние городских территорий, особенно в условиях зоны достаточного и избыточного увлажнения (северные города России), в наибольшей степени определяется водным режимом. Особенности формирования водного режима урбанизированных территорий связаны с природными условиями (климатическими, гидрометеорологическими, геоморфологическими, рельефными, геологическими) и интенсивной антропогенной и градостроительной деятельностью. Процесс урбанизации вызывает изменения естественного водного баланса обширных участков поверхности суши. При этом наряду с позитивными сторонами урбанизации, в частности улучшением качества жизни людей, в городах возникают неблагоприятные, а подчас катастрофические ситуации, вызываемые как природными, так и антропогенными причинами. Среди основных, наиболее опасных природно-антропогенных процессов следует назвать подтопление территории города грунтовыми водами, повышенное увлажнение почвогрунтов зоны аэрации, дефор-

мацию грунтов оснований при их замачивании, антропогенное заболачивание участков территории города и др. Основной причиной подъема уровня грунтовых вод при подтоплении в общем случае является нарушение режима поверхностного и подземного стоков и ранее существовавшего водного баланса городской территории.

Для разработки комплекса мероприятий по защите городских территорий от негативных гидрологических и гидрогеологических процессов требуется объективная оценка современного состояния природной среды и инфраструктуры города и прогноз развития опасных ситуаций.

Получение количественных оценок развития неблагоприятных процессов может быть осуществлено на основе моделирования гидрологического режима на урбанизированной территории. Однако это осложнено ограниченностью или отсутствием данных наблюдений за формированием водного режима и определяющими его факторами. В связи с этим авторами организован мониторинг и проводятся экспериментальные исследования по специальным программам на территории города Ростова Великого (бассейн

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 08-05-90417.

Верхней Волги), где отчетливо проявились все негативные аспекты урбанизации.

Ростов Великий расположен на берегу озера Неро в Ярославской области. Эта территория относится к Ростовской котловине, ограниченной с севера и запада аккумулятивной Углическо-Борисоглебской возвышенностью, а с юга и юго-востока — полосой грядово-холмистого рельефа. Наиболее углубленную часть котловины занимает озеро Неро, являющееся реликтовым озерным водоемом московской ледниковой эпохи. Ростов Великий расположен на северном берегу озера Неро, в юго-западной части котловины. Этот город — один из древнейших в России. За свою многовековую историю Ростов Великий пережил периоды и расцвета, и экономического спада. Историческая ценность ростовской земли уникальна, неповторима и бесценны памятники архитектуры и ландшафты.

Город расположен в низшей точке обширной депрессии с весьма малыми уклонами земной поверхности. Значимым градостроительным элементом древнего Ростова были улицы, которые обычно следовали осям водоразделов и тальвегов или были расположены параллельно им и редко пересекали элементы рельефа. Этим достигались мягкие уклоны, с чем связана организация системы средневековых городских гидротехнических сооружений — водостоков. 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 обуславливали развитие процесса подтопления, а хозяйственная деятельность (неудовлетворительное состояние гидрографической сети, ветхое состояние

систем водоснабжения и канализации, повышение отметок дорожного полотна и пр.) только усилила его проявление. Городские дороги заметно превышают отметки прилегающих к ним участков, что препятствует поверхностному стоку и превращает территорию города в бессточные понижения, в которых накапливаются атмосферные осадки, подпитывающие подземные воды и вызывающие повышение уровня грунтовых вод, формирование верховодок, заболачивание территории. Приоритетная задача города в таких природно-климатических условиях — сохранить памятники архитектуры и археологии.

Формирование водного режима на застроенных территориях характеризуется большой динамичностью и неопределенностью взаимодействия природной и антропогенной систем, которые обусловлены, с одной стороны, колебаниями климатических факторов, а с другой стороны, характером и степенью застройки, случайностью возникновения утечек и аварий на водонесущих коммуникациях и пр. Управление такими процессами требует знания условий формирования поверхностного стока, водного режима зоны аэрации и инфильтрационного питания подземных вод.

Моделирование поверхностного стока на застроенной территории города Ростова Великого осуществлено на основе разработанной авторами гидравлической схемы города с использованием программного комплекса SWMM (модель управления ливневым стоком) [1, 2]. Модель содержит расчет стока с элементарных водосборов по заданным параметрам потерь для различной степени застройки и его трансформацию по системам труб и каналов ливневой канализации, включая естественные участки русел. Выполнены модельные расчеты для условий, соответствующих различным случаям снеготаяния или выпадения дождевых осадков. Величина стока, полученная в результате моделирования, показывает, что доля стекающих в озеро осадков 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 [1].

Водный режим зоны аэрации в условиях города зависит от инфильтрации поверхностного стока через проницаемые покрытия, наличия культурного слоя, размещения и состояния водонесущих коммуникаций, образования антропогенных верховодок.

Таким образом, существенная трансформация естественного водного режима приводит к формированию нового антропогенного водного режима почвогрунтов зоны аэрации городских территорий с повышенной влажностью, образованию нисходящих потоков, к повышению уровня грунтовых вод и образованию верховодки на слабопроницаемых прослоях. При этом подтопление на тех или иных участках города определяется как глубиной залегания грунтовых вод, так и переувлажненностью почвогрунтов. Зоны повышенного увлажнения бывают приурочены к местам концентрирования осадков, разнообразных утечек и других источников повышенного увлажнения. Негативные последствия подтопления связаны не только с высоким стоянием грунтовых вод, но также с высоким постоянным переувлажнением, с высокой влажностью почвы, близкой к водовместимости. Поэтому важно оценить не только уровень грунтовых вод, но и степень переувлажнения почв в той или иной части города. Одна из основных причин переувлажнения — неудовлетворительная организация поверхностного стока.

Под влиянием хозяйственной деятельности существенным изменениям подвергается и сам почвенный покров. На городских территориях образуется новый почвенный покров со специфическими гидрофизическими характеристиками (урбаноземы). Однако данные

экспериментальных определений гидрофизических характеристик на городских территориях, к сожалению, отсутствуют.

Влагоперенос в городских почвогрунтах на основе оригинальных экспериментальных определений их гидрофизических свойств — одна из главных задач, которую поставили перед собой авторы статьи [3, 4]. Наибольшее внимание было уделено территориям, на которых расположены самые ценные памятники русского зодчества. Для сравнения почвенные разрезы были заложены и на других характерных участках города: в городском парке, сквере в центре города, частном жилом секторе и пригороде Ростова Великого. Всего заложили 10 почвенных разрезов, глубина которых составляла примерно 1,5 м, а при более близком залегании грунтовых вод — до зоны полного насыщения. Для каждого разреза была определена послойная плотность, влажность, коэффициент фильтрации — основная гидрофизическая характеристика почвогрунтов (зависимость капиллярно-сорбционного давления почвенной влаги от влажности почвы), а также определен гранулометрический состав. Коэффициент фильтрации найден методом трубок с постоянным водным напором, разработанным на факультете почвоведения МГУ [5]. В процессе исследований установлена существенная неоднородность гидрофизических характеристик как по глубине почвенных разрезов, так и по территории города. Плотность почв на разрезах в черте города изменяется скачкообразно, что свидетельствует о значительной слоистости сложения почвогрунтов.

Выявлен вариативный характер влагопроводящих свойств почв на территории города: от водоупора до провальной водопроницаемости. Столь большие различия по водопроницаемости почв указывают на наличие участков с повышенной фильтрацией, которые быстро фильтруют воду и пополняют грунтовые воды. Участки с низкой водопроницаемостью способствуют формированию и концентриро-

ванию поверхностного стока.

Ввиду существенной слоистости почвогрунтов также различны и кривые водоудерживающей способности. Они отражают структурно-минеральные особенности почвогрунтов культурного слоя и характеризуют энергию связи той или иной категории влаги в данном грунте. Установлен значительный диапазон изменения почвенно-гидрологических констант (влажность завядания, пористость, наименьшая влагоемкость) для отдельных разрезов и отдельных слоев. Так, например, влажность завядания изменяется от 1 до 20 %, наименьшая влагоемкость — от 6 до 40 %, полная — от 40 до 60%.

Результаты гранулометрического анализа показали, что почвы города обладают облегченным гранулометрическим составом — в основном это супеси и опесчаненные суглинки. С глубиной увеличивается процентное содержание илистой фракции. Таким образом, почвы Ростова Великого, по классификации М. Н. Строгановой, можно отнести к урбаноземам — «почвам антропогенно-глубоко-физически преобразованным». Это почвы различной мощности и слоистости, развивающиеся на антропогенных отложениях. В Ростове Великом мощность культурного слоя достигает 5 м.

Для расчета влагопереноса в почвогрунтах на отдельных участках используют компьютерную имитационную модель HYDRUS в одномерной постановке [7]. Зависимость объемной влажности от давления почвенной влаги описывают уравнением

$$S_e = [1 + (\alpha P)^n]^{-m}$$

где P — капиллярно-сорбционный потенциал; $m = 1 - (1/n)$; α, λ, n — параметры аппроксимации экспериментальных данных основной гидрофизической характеристики;

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r},$$

где S_e — степень насыщения почвы ($0 \leq S_e \leq 1$); θ_s — влажность насыщенной почвы; θ_r — минимальная влажность почвы.

Коэффициент влагопроводности определяют по модели Ван Генухтена—

Муалема [8]:

$$K_{вл} = K_\phi \sqrt{S_e} \left(1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right)^2;$$

$$0 < m < 1,$$

где K_ϕ — коэффициент фильтрации.

Начальные условия задают в виде послойных исходных значений влажности (или давления влаги), а также в виде условия поступления и оттока влаги на верхней (осадки, поливы, испарение) и нижней границах рассматриваемой толщи почвогрунтов.

По экспериментальным данным осуществлена параметризация кривых водоудерживания (основная гидротехническая характеристика). Определены параметры с использованием экспериментальных данных: а) по гранулометрическому составу для отдельных слоев почв на разрезах; б) по международному почвенному каталогу. Сравнение показало, что полученные на основе экспериментальных данных параметры основной гидротехнической характеристики значительно различаются между собой как по гранулометрическому составу для одинаковых слоев почвы, так и по международному почвенному каталогу, в котором отражены базовые свойства природных почв. Это объясняется существенными отличиями городских почв от природных.

Расчеты водного режима почвогрунтов были проведены с использованием экспериментальных данных. Для проверки адекватности модели расчетные эпюры влажности сравнили с измеренными на этом же участке в 2004–2005 гг. По программе специальных исследований наблюдения за влажностью почвы проводились в трех точках города весовым методом. Совпадение измеренной и рассчитанной эпюр влажности достаточно хорошее. Расхождения в метровом слое находятся в диапазоне 3...5 %, в отдельных случаях — 10...12 %. Кроме того, исходя из характера кривых основной гидротехнической характеристики и описаний разрезов, были проведены расчеты с усредненными параметрами по горизон-

там. Результаты, за некоторым исключением, получились вполне удовлетворительными. Моделирование водного режима городских почв по параметрам природных почв из международного почвенного каталога, исходя из экспериментальных данных о гранулометрическом составе, оказалось неудачным, а моделирование влагопереноса для почв в пригороде Ростова Великого (зональные почвогрунты) — достаточно успешным, хотя в начале расчетного периода (от начала мая до конца июня) расчетная влажность была ниже измеренной примерно на 5 % (в конце августа совпадение стало хорошим).

Проведены расчеты водного режима зоны аэрации за теплый период 2001–2005 гг. для территорий в районах экспериментальных разрезов. Исследования были проведены в годы различной увлажненности: засушливый 2002 г. и влажный 2003 г. (сумма осадков за период май – октябрь составила соответственно 215 и 588 мм). Как показали результаты моделирования влагопереноса в почвогрунтах зоны аэрации, влажность городских почв осталась весьма высокой в течение всего теплого периода. Практически (за исключением поверхностного слоя) она не опускалась ниже значений наименьшей влагоемкости, а в большинстве случаев превысила ее. Основные изменения влажности происходили в слое 0...50...60 см. Давление почвенной влаги в полуметровом слое практически не опускалось ниже 200...250 см вод. ст., а к концу теплого периода (на 1 ноября) в засушливом 2002 г. и влажном 2003 г. оно не превысило 100 см вод. ст. Это свидетельствует о постоянном переувлажнении почвогрунтов и наличии скрытого подтопления.

Ключевые слова: Ростов Великий, экология городских территорий, урбанизирован-

ные территории, урбаноземы, гидрофизические характеристики, зона аэрации, поверхностный сток.

Список литературы

1. **Болгов, М. В.** Моделирование режима поверхностных вод исторической части Ростова Великого [Текст] / М. В. Болгов, Т. Ю. Голубаш, Е. В. Лазарева, Ж. Ривар // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. — 2003. — № 6. — С. 508–518.
2. **Wayne, C. Huber.** Storm water management model [Text] / C. Huber Wayne, Robert E. Dickinson // User's manual. — Version 4. — Athens, Georgia, 1992. — 502 p.
3. **Болгов, М. В.** Экспериментальные исследования гидрофизических характеристик почвогрунтов на урбанизированных территориях [Текст] / М. В. Болгов, Т. Ю. Голубаш // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов : материалы научной конференции. — Иркутск, 2005. — С. 346–348.
4. **Болгов, М. В.** Оценка неоднородности гидрофизических характеристик почвогрунтов по экспериментальным данным для моделирования водного режима в районах расположения памятников православной культуры г. Ростова Великого [Текст] / М. В. Болгов, Т. Ю. Голубаш, Е. В. Шеин, С. А. Смерников // Природные условия строительства и сохранения храмов Православной Руси : тезисы докл. 3-го Международного научно-практического симпозиума. — Сергиев Посад, 2006. — С. 39–41.
5. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв [Текст] : метод. руководство ; под ред. Е. В. Шеина. — М. : Изд-во МГУ, 2001. — 200 с.
6. **Van Genuchten, M. Th.** A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [Text] / M. Th. Van Genuchten. — Soil Sci. Soc. Am. J., 1980. — Vol. 44. — P. 892–898.
7. **Mualem, Y.** A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media / Y. Mualem. — Water Resour. Res. — 1976. — № 12. — P. 513–522.