

## ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА В ГОРОДАХ СИБИРИ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОММУНАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

*Юрий Петрович Воронов*

Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 17, кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (913) 985-19-97, e-mail: corpus-cons@ngs.ru

В статье рассматривается одно из важных направлений инновационных технологий в городском хозяйстве – применение цифровых моделей рельефа при проектировании, развитии и эксплуатации коммунальных сетей. Пять направлений использования цифровой модели рассматриваются автором последовательно: 1) построение ЦМР, включая векторизацию растрового топографического плана, 2) выделение водосборных бассейнов и фаций, 3) построение контуров (гребней) по каждой фации, 4) двухуровневое моделирование поверхностных стоков и ливневой канализации, 5) решение практических задач определения зон заиливания и оптимизация уборки снега. Оригинальным принципом, предложенным в статье, является многовороночная модель поверхностных стоков, в которой каждая фация (локальный водосбор) заменяется эквивалентной наклоненной воронкой. Это существенно упрощает расчёты, а также позволяет сочетать математическое моделирование с физическим.

**Ключевые слова:** инновационные технологии, городское хозяйство, цифровая модель рельефа, поверхностные стоки, ливневая канализация, заиливание, оптимальная уборка снега

## DIGITAL TERRAIN MODELS IN SIBERIAN CITIES AND UTILITY NETWORKS DESIGN

*Yuri P. Voronov*

Institute of Economics and Industrial Engineering of SB RAS, 17, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (913)985-19-97, e-mail: corpus-cons@ngs.ru

The article considers one of the important directions of innovative technologies in the urban economy, application of digital terrain models in the design, development and operation of utility networks. The author considers the five tasks of using the digital model sequentially: 1) development of a digital terrain model, 2) allocation of watersheds and facies, 3) plotting contours (ridges) for all facies, 4) two-level modeling of surface runoff and storm sewer, 5) solving practical problems of determining silting zones and optimizing snow removal. The original principle proposed in the article is a multi-funnel model of surface runoff, in which each facies (local catchment) is replaced by an equivalent inclined funnel. This greatly simplifies the calculations, and also allows you to combine mathematical modeling with physical modeling.

**Keywords:** innovative technologies, municipal economy, digital terrain model, slope flows, storm sewer system, silting up, optimal snow removal

### *Введение*

Инновационные технологии проникают в организацию городского хозяйства по многим направлениям. Одно из них – учёт рельефа городской территории в организации городского хозяйства. При относительно плавном развитии го-

рода, рельеф в той или иной мере учитывался и ранее. При взрывном росте сибирских городов и последующей интеграции в единую среду посёлков при промышленных предприятиях и промзонах, рельеф городской территории при их развитии зачастую не учитывался совсем.

Вместе с тем, в последние годы активно развиваются методы цифрового моделирования рельефа [1]. Они разрабатываются с ориентацией на будущие применения. Благодаря ЦМР, информация о рельефе могла бы стать удобной для использования в расчетах, в проектировании и анализе функционирования коммунальных сетей. Но пока в действующих методических рекомендациях цифровые модели рельефа не используются [2].

Сибирский климат предъявляет более жесткие требования к учёту рельефа территории в городской черте. Тому есть следующие причины:

- снежные зимы делают обязательной и трудоёмкой уборку снега,
- весенний паводок в большей степени, чем в Европейской части РФ, нарушает нормальное функционирование городского хозяйства,
- глубина промерзания почвы в Сибири существенно больше в целом, и в зависимости от рельефа, в частности, что в результате приводит к подвижкам грунта,
- в Сибири существенно меньше развита ливневая канализация, которая охватывает не более 15% территории сибирских городов,
- при строительстве сначала отдельных посёлков и последующей их интеграции жилые дома, общественные и промышленные здания зачастую создают препятствия поверхностным стокам воды.

Все перечисленные проблемы сибирских городов для своего решения требуют учета рельефа, что выходит за рамки проектирования и эксплуатации коммунальных сетей, а становится более общей задачей улучшения городского хозяйства.

Цель настоящего исследования состоит в том, чтобы описать пути внедрения в практику городского хозяйства активного использования цифровых моделей рельефа, прежде всего, в проектирование, развитие, актуализацию и эксплуатацию коммунальных сетей.

В статье последовательно рассмотрены пять задач, решение которых необходимо для такого внедрения:

- построение ЦМР по растровому топографическому плану,
- выделение водосборных бассейнов и локальных водосборов (фаций),
- моделирование поверхностных стоков
- моделирование совместного функционирования стоков по поверхности и через ливневую канализацию,

- сопутствующие задачи использования ЦМР: определение зон заиливания в трубах коммунальных сетей и оптимизация уборки снега.

### *Методы и материалы*

Исследование построено на материалах разработки ЦМР Томска и актуализации Схемы ливневой канализации города, а также опыта работы по актуализации коммунальных сетей в городах Сургуте, Норильске и ряде других городов Сибири. На разных этапах исследования используются разные математические методы.

При построении цифровой модели рельефа строится трехмерная триангуляционная сетка [3]. В настоящее время в силу многих обстоятельств крайне редко можно найти топографические планы российских городов в векторной форме. По этой причине приходится использовать распознавание чисел (высотных отметок), а также находить точки на растровом изображении, к которым эти высотные отметки относятся. Таким образом реализуется векторизация, преобразование растрового топографического плана в векторный.

При выделении по ЦМР водосборных бассейнов и локальных водосборов (фаций) используются специально разработанные методы анализа ЦМР, а также контуров (гребней) фаций. Они являются развитием уже известных методов [4].

При моделировании поверхностных стоков используются результаты решения двух предыдущих задач, а также разработанная автором многовороночная модель, в которой каждая фация заменена наклоненной воронкой. Такой подход представлен впервые, другие модели поверхностных стоков используют, например, скорости потоков по поверхности [5]. Разработаны также методы калибровки дождевых потоков как по их интенсивности, так и по возможностям быстро организовать (оптимизировать) отток [6].

Каждая фация имеет, кроме площади, ещё и оригинальные индивидуальные контуры. При моделировании водных потоков эти контуры можно исключить как не влияющие на результаты расчётов. На этом соображении основана замена каждой фации на наклоненную воронку, площадь верхнего уровня в которой равна площади фации (рис. 1).

Воронки могут стыковаться друг с другом, касаясь краями, через которые возможен перелив, или существовать обособленно, если перелив у них идет в водоём.

Физическое моделирование находит широкое применение при опытных исследованиях в области гидравлики. Моделирование основано на создании модели, имеющей ту же физическую природу, что и процессы, протекающие в природе. Достоинством этого метода является возможность изготовления модели в любом произвольном масштабе.

Физическое моделирование основано на создании модели, имеющей ту же физическую природу, что и процессы, протекающие в природе, но объекты физической модели описываются более простыми математическими средствами [7].

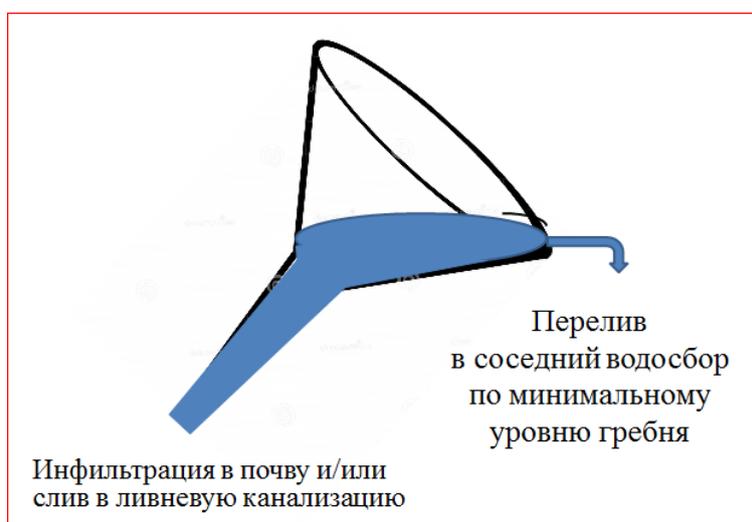


Рис. 1. Вороночная модель одного водосбора (фации)

Применительно к моделированию поверхностных стоков такое упрощение состоит в следующем. Каждая фация имеет, кроме площади, ещё и оригинальные индивидуальные контуры. При моделировании водных потоков эти контуры можно исключить как не влияющие на результаты расчётов.

Предлагаемый подход лучше, чем уже известные, которые базируются на экспериментальных измерениях и прогнозных расчётах дождей разной степени интенсивности, равно как и на прогнозировании максимально интенсивных дождей (ливней) [8]. В обзоре таких подходов к моделированию [9] отсутствует принцип, на котором основаны расчёты по отечественным официальным методикам и распространённые в исследованиях и оригинальных проектах, а именно – ориентироваться на максимально интенсивный дождь, прошедший над данным городом за всю историю метеонаблюдений.

При моделировании совместного функционирования поверхностных стоков и ливневой канализации используется также разработанная автором двухслойная сеточная модель, в которой один слой представляет собой поверхностные стоки, а второй – систему труб и лотков ливневой канализации (рис. 2).

По данной модели может быть оптимизирована система ливневой канализации, которая учитывала бы поверхностные стоки с тем, чтобы они и потоки по ливневой канализации работали согласованно [10]. Существуют разные подходы обеспечения такого согласованного функционирования [11]. Как правило, такие мероприятия включаются в проекты актуализации или развития коммунальных сетей.

Определение зон заиливания состоит в выделении прохождения труб ливневой (или бытовой) канализации через фации, когда труба идёт сначала низ, а затем вверх по склону фации [12]. Смысл выделения зон заиливания двойной: либо эти участки нужно чаще подвергать очистке от осадочных накоплений, либо проектировать в зонах заиливания отстойники, в которых будут накапливаться осадки [13].

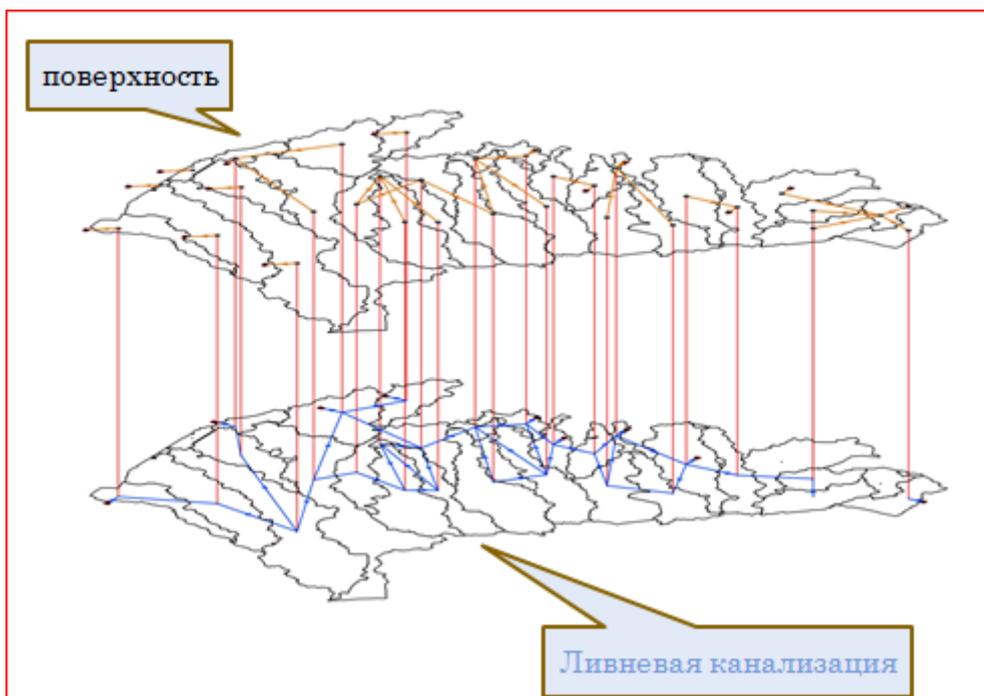


Рис. 2. Пример двухуровневой модели (третий бассейн территории Томска)

При решении задачи оптимальной уборки снега используется стандартное решение задачи оптимального набора (задачи о рюкзаке), для определения зон заиливания – программный пакет Zulu 2.0. Возможно использовать и те методы, в которых уборка снега сочетается с его плавлением.

Нужно убирать снег в первую очередь там, где выше вероятность перетока снеговой воды из данной фации в другие и в последнюю очередь – там, где из данной фации есть слив в реку или водоем [14].

### *Результаты*

Наиболее полно изложенная выше система пяти задач была реализована при актуализации Схемы ливневой канализации Томска. В составе исходной информации был представлен топографический план городской территории. Была составлена программа распознавания чисел (цифр) и точек, к которым эти числа относятся.

Анализ ЦМР показал, что городская территория Томска разделена на пять водосборных бассейнов, которые, в свою очередь разделяются на 194 локальных водосбора (фации). Деление территории города на водосборные бассейны показано на рис. 3.

Из 194 водосборов на территории города, только 76 имеют выходы на ливневую канализацию (39%). Из остальных 118 водосборов вода вынуждена вытекать по поверхности. Число поверхностных перетоков из одной фации в другую 190. Это означает, что число фаций и число перетоков между ними примерно равны.

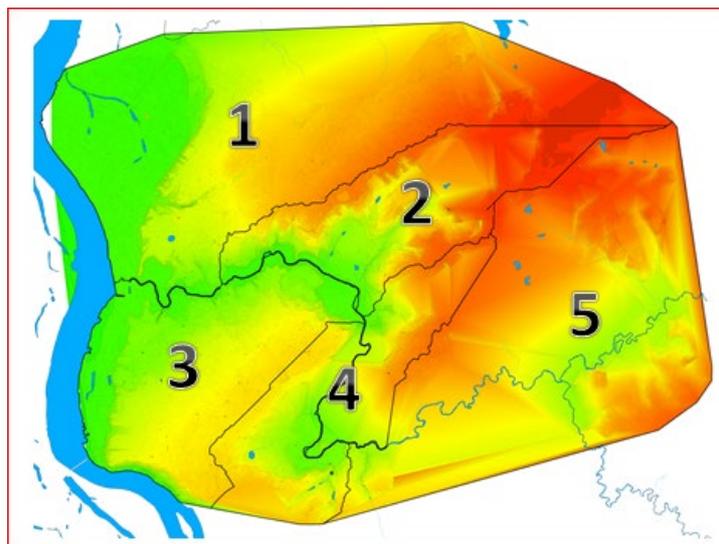


Рис. 3. Пять водосборных бассейнов городской территории г. Томска

По каждому водосбору был построен круговой профиль рельефа (профиль хребта). Пример развертки гребня приведен на рис. 4.

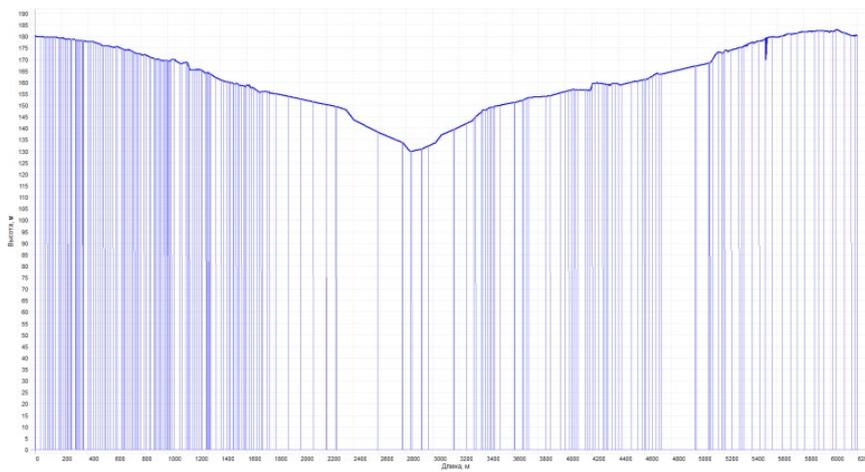


Рис. 4. Развертка границ (гребня) фации (пример)

По каждому из 194 водосборов были рассчитаны также объемы (до начала перелива) и коэффициенты инфильтрации, с учетом которых вычислены времена наполнения водосборов при разных интенсивностях осадков. Рассчитаны были также объемы стоков при максимально интенсивных дождях (ливнях) [15].

Воронки, собранные в кластер, представляют собой фактически единую фацию. В примере, показанном на рис. 5, промежуточным водосбором является фация № 105, в которую при интенсивном дожде будет сливаться вода из пяти соседних с ней фаций. Как показано на рис. 6, сочетания переливом между соседними фациями могут быть самые разнообразные.

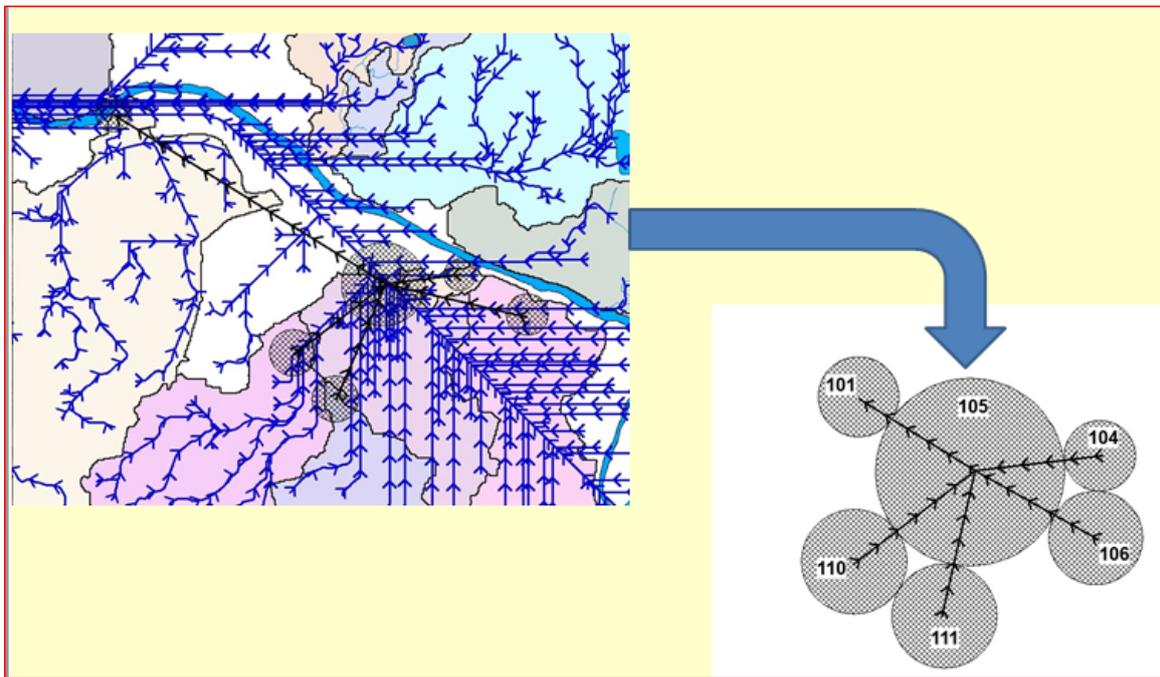


Рис. 5. Кластер из шести воронок, представляющих фации

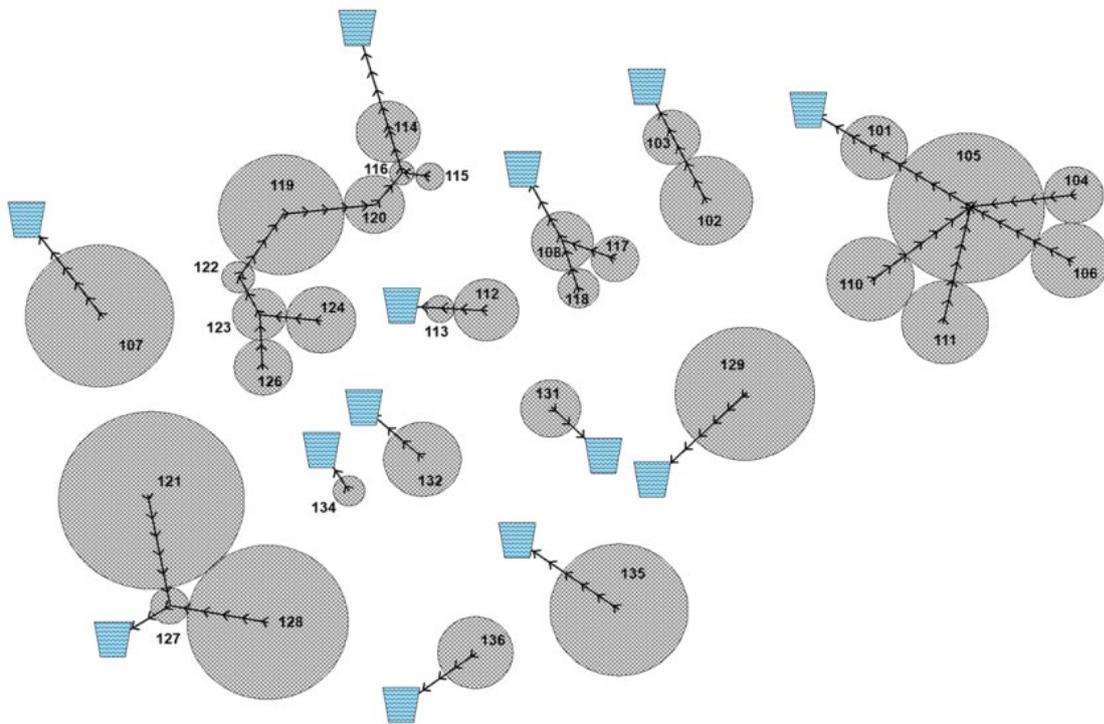


Рис. 6. Пример многих воронок одного бассейна (третий бассейн территории Томска)

В принципе, в расчётах по системе воронок можно использовать уже известные методы [16]. Но следует отметить, что при использовании многовороночной модели появляется возможность построения не только математического, но и физического моделирования.

Всего в Томске было выявлено пять зон заиливания, которые относятся, в первую очередь, к ливневой канализации, но накопление осадков в трубах может коснуться и других коммунальных сетей, которые проходят через зону заиливания, прежде всего, канализационных и тепловых.

Что касается оптимизации уборки снега, то город находился в стадии применения снегоплавильных станций. По этой причине, вместо решения оптимальной задачи, пришлось работать по парным сравнениям соседних фаций: в какой из них, в первую очередь, по сравнению с другой нужно убирать снег или устанавливать снегоплавильную станцию. Вместе с тем, в мире известны методы оптимизации уборки и плавления снега как по критериям минимизации маршрутов [17], так и по более комплексным критериям минимума времени и затрат [18].

### *Обсуждение*

Проведённая на Томске актуализация Схемы ливневой канализации была первым применением предлагаемой в статье методики. Поскольку разработка или актуализация ливневой канализации – сложный проект, требуется подробное разъяснение предлагаемого подхода, его достоинств и преимуществ по сравнению с уже существующими [19].

Применительно к общей задаче совершенствования систем ливневой и бытовой канализации рассмотренные выше пять задач являются лишь частью такого совершенствования, модернизации и развития [20].

На основе использования цифровой модели рельефа возможно проводить эксперименты как на модели, так и полевые, то есть на реальной ливневой канализации. Опыт проведения таких экспериментов уже существует [21].

### *Заключение*

Работы по согласованию цифровых моделей рельефа и ведения городского хозяйства, в первую очередь, разработки проектов, актуализации и эксплуатации коммунальных сетей находятся в самом начале. Их распространение на другие города Сибири существенно повысит качество жизни населения. Желательно объединять усилия коллективов, которые решают проблемы проектирования и эксплуатации коммунальных сетей как по линии их модернизации [22], так и в ходе разработки принципиально новых комплексных решений [23].

## Благодарности

Выражаю благодарность всем, кто принимал участие в работах по актуализации Схемы ливневой канализации Томска, и, в особенности, Георгию Александровичу Ромашову за выдержку и настойчивость.

Исследование подготовлено по плану НИР ИЭОПП СО РАН, проект «Инструменты, технологии и результаты анализа, моделирования и прогнозирования пространственного развития социально-экономической системы России и её отдельных территорий», № 0260-2021-007.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wilson J.P., Gallant J.C. Terrain Analysis: Principles and Applications. New York: Wiley. 2007. – P. 1–27.
2. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. – М. – 2015.
3. Хромых В.В., Хромых О.В. Цифровые модели рельефа. Томск. Изд-во ТМЛ-Пресс. – 2007.
4. Sandoval S., Vezzaro L., Bertrand-Krajewski J. L. (2018). Revisiting conceptual stormwater quality models by reconstructing virtual state variables. *Water Science Technology*. – Vol.78. – P. 655–663.
5. Leitão J. P., Peña-Haro S., Lüthi B., Scheidegger A., de Vitry, M. M. Urban overland runoff velocity measurement with consumergrade surveillance cameras and surface structure image velocimetry // *Journal of Hydrology*. – 2018. – № 565. – P. 791–804 1.
6. Liu Y., Pender G. Automatic calibration of a rapid flood spreading model using multiobjective optimisations. *Computer Science. Soft Computing*. – 2013. – Vol. 17. – P. 713–724.
7. Akan A.O., Houghtalen R. J. (2003). *Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: engineering applications and computer modelling*. John Wiley & Sons.
8. Иванов В. Г., Калачко А. А. Математическое моделирование дождей малой интенсивности для расчета ливневой канализации // *Proceedings of Petersburg Transport University*. – 2015. – № 3. – С. 138–146.
9. Elliott, A.H.; Trowsdale, S.A. (2007). A Review of Models for Low Impact Urban Stormwater Drainage. *Environmental Model. Software*, Vol. 22. – P. 394–405.
10. Рябцев Ю.Н., Вержевская Л.В., Рауэн Т.В., Цыганова М.В., Никишин В.В., Багаев А.В. Поиск оптимального расположения проектируемых выпусков городской канализации в севастопольской бухте с помощью численного моделирования и геоинформационного анализа. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. – 2021. – № 1. – С. 111–128.
11. Чупин В.Р., Мелехов Е.С., Нгуен Т.А. Оптимизация параметров систем ливневой канализации // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. – № 1 (6). – 2014. – С. 73–80.
12. Yan H., Kouyi G. L., Gonzalez-Merchan C., Becouze-Lareure C., Christel S., Barraud S, Bertrand J-L. Krajewski P. Computational fluid dynamics modelling of flow and particulate contaminants sedimentation in an urban stormwater detention and settling basin. *Environmental Science. Pollution Researches International*. – 2014. – Vol. 21. – № 8. – P. 5347–5356.
13. Heal K.V., Hepburn D.A., Lunn R.J. Sediment management in sustainable urban drainage system ponds. *Water Science & Technology*. – 2006. – Vol. 53. – No10. – P. 219–227.

14. Manakov A., Abramov A., Ilinykh A., Aksenov V. (2018). Optimization of work performance of snow removal work trains on the basis of linear programming. MATEC Web Conf. Vol. 239. Siberian Transport Forum – TransSiberia. Article Number 04001.
15. VanDrie R., Simon M. (2008) «First Pass» Methodology of Citywide Flood Inundation Mapping. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh. P. 1–8.
16. Палагин Е.Д., Быкова П.Г., Шувалов М.В. и др. К расчету схем регулирования поверхностного стока (в порядке обсуждения) // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 12. – С. 73–80.
17. Kinable J., van Hoesel W-J, Smith S.F. (2016). Optimization Models for a Real-World Snow Plow Routing Problem. Springer International Publishing
18. Liu G., Ge Y., Qiu T. Z., Soleymani H. R. (2016). Optimization of snow plowing cost and time in an urban environment: A case study for the City of Edmonton // Canadian Journal of Civil Engineering. – № 11. June.
19. Воробьева В.С., Астратова Г.В. Анализ систем ливневой и бытовой канализации: технические, организационные и экономические аспекты // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». – 2018. – № 3.
20. Djordjević S. et al. (2013). Experimental and numerical investigation of interactions between above and below ground drainage systems. Water Science Technology. – Vol. 67. – P. 535–542.
21. Abbas, O., Abou Rjeily Y., Sadek M., Shahrour I. (2017). A large-scale experimentation of the smart sewage system // Water Environment Journal. – № 31. – С. 515–521.
22. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И., Мойса А.В. Совершенствование системы ливневой канализации города // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2017. – № 2 (40). – С. 14–20.
23. Пупырев Е.И. Комплексные решения в системах ливневой канализации // Вестник МГСУ. – 2014. – Том 13, Выпуск 5 (116). – С. 651–659.

© Ю. П. Воронов, 2021