### ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УЛК 556.164

# ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА В СИСТЕМЕ ГОРОДСКОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ)

© 2022 г. Е. А. Карфидова<sup>1,\*</sup>, Г. И. Батрак<sup>1</sup>, А. П. Сизов<sup>2</sup>, М. Н. Комаревская<sup>1</sup>, С. Н. Полеволова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК),
Гороховский пер., 4, Москва, 105064 Россия

\*E-mail: e.karfidova@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.04.2022 г.
После доработки 05.05.2022 г.
Принята к публикации 16.05.2022 г.

В статье рассматривается формирование поверхностного стока в городской среде с учетом инженерно-геологических условий. Обоснована значимость учета поверхностного стока для городской системы природопользования. Реализован подход к выделению зон влияния поверхностного стока и оценки их влияния на городскую среду. Совместный анализ зон влияния поверхностного стока и Карты инженерно-геологического районирования территории города Москвы позволяет получить геоэкологические характеристики зон влияния и предложить метод оценки уязвимости объектов природопользования. Подробный анализ влияния поверхностного стока на элементы городской среды приведен на примере природных территорий и городских кладбищ. Зоны влияния поверхностного стока предлагается учитывать в разработке зон с особыми условиями использования территории в Едином государственном реестре недвижимости.

**Ключевые слова:** система городского природопользования, цифровая модель рельефа, модель поверхностного стока, зоны влияния поверхностного стока

**DOI:** 10.31857/S0869780922040026

### введение

В истории развития городов проблема поверхностного стока всегда занимала заметное место, что было обусловлено необходимостью решения комплекса задач: сбор воды, водоотведение, функционирование дренажных систем и городской канализации, очистка вод при их поступлении в поверхностные водоемы, соблюдение природоохранных, санитарно-гигиенических и строительных норм, инженерная защита территорий, обеспечение безопасности технических систем и жизнеобеспечения городского хозяйства. В исследованиях поверхностного стока на урбанизированных территориях, в первую очередь, рассматривается речная сеть в системе городского ландшафта, а также градостроительные методы сохранения природного комплекса и ландшафтное зонирование, так как решение этих вопросов формирует облик и климат города [4, 9, 14, 24]. Наиболее значимые исследования относятся к городам, образованным вблизи рек или в местах их слияния. На протяжении истории развития городов реки подвергаются значительным трансформациям. На них устраиваются запруды и строятся дамбы, часть рек засыпается или канализируется, русла изменяются, появляются каменные набережные; земная поверхность в большей степени становится "запечатанной" асфальтом, а объемы формируемого городского стока могут значительно превышать сток на той же площади природной территории [6, 10, 18].

Представление об особенностях формирования поверхностного стока в городских условиях вполне сложилось к середине XX в. Учет природных факторов и процессов (атмосферные осадки, испарение, фильтрация, задержание влаги растениями) и антропогенных факторов, связанных с технической составляющей (плотная застройка со множеством границ для движения воды; преобразование покрытия земли, ведущее к изменению коэффициента стока; водопроводящие коммуникации, нарушенный тепловой режим почвы и т.д.) содержится в государственных докладах, например, "О состоянии окружающей среды г. Москвы", а также в научных работах по гидрологии, климату и экологии городов [6, 15, 23].

Проведенный анализ исследований в рамках указанной проблемы показал, что наряду с развитием подходов к формированию безопасной среды обитания в городах, реализуемых в международных проектах [http://unhabitat.org/] и концепции SmartCity [3, 18, 21], а также решением задач обеспечения устойчивого развития города в системе территориального планирования [8, 16], значимость поверхностного стока в системе городского природопользования рассматривается необоснованно в меньшей степени. Доклады Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации и принятие национального плана мероприятий адаптации к изменениям климата [1, 5, 7] обусловливают особую актуальность разработки методов по оценке влияния поверхностного стока на окружающую среду города и возможного учета в системе городского природопользования. Система городского природопользования основывается на законах г. Москвы: системных<sup>1</sup>, законов сохранения природного комплекса<sup>2</sup> и законов, направленных на эффективное использование технических систем<sup>3</sup>. В дополнение правовым основам, службы городского хозяйства при выполнении своих функциональных обязанностей, как землепользователи, руководствуются нормативно-методическими документами и техническими нормами водоотвода, водосбора, функционирования дренажных систем и ливневой канализации. Над их деятельностью надзирают инспекции и специалисты Департамента природопользования и охраны окружающей среды г. Москвы<sup>4</sup>.

В решении проблем учета поверхностного стока в Москве необходимо использовать результаты геоэкологических исследований Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН) [2]. Комплект крупномасштабных геологических карт Москвы [11] широко используется в градостроительной деятельности, особенно востребована интегральная Карта инженерно-геологиче-

<sup>1</sup> "О комплексном природопользовании" от 2.03. 2005 г. № 9, "О защите населения и территорий города от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" от 05.11.1997 № 46 и "Об экологическом мониторинге" от 20.10.2004 № 65. ского районирования [2, 12], которую целесообразно использовать и для системы городского природопользования в настоящем исследовании. В развитие геоэкологических исследований на основе использования данных дистанционного зондирования (радарной съемки) была построена модель поверхностного стока территории Москвы [22], и введено понятие "зоны влияния поверхностного стока используется исторический подход к анализу развития эрозионной сети города и ее трансформациям за более чем 850-летнюю историю Москвы (на территории города расположено более 140 рек и 400 прудов, большая часть которых расположена на руслах рек).

Целью исследования является разработка методов выделения и анализа зоны влияния поверхностного стока на городскую среду на основе учета сложности инженерно-геологических условий, пространственного распределения опасных геологических процессов, в том числе и в случае, когда поверхностный сток может выступать катализатором их возможной активизации.

Формализация факторов риска негативного влияния поверхностного стока позволяет определить основные реципиенты риска и разработать адаптационные меры для применения землепользователями в хозяйственной и природоохранной деятельности. При этом используются новые геоинформационные технологии, базирующиеся на имеющихся городских информационных ресурсах и разработке новых информационных ресурсов на единой цифровой платформе города [13].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В состав исходной информации входят:

- 1. Энциклопедии и словари: Горная энциклопедия, Геологический словарь, География. Современная иллюстрированная энциклопедия. Разночтения в понятиях и терминах мультидисциплинарной проблемы вынуждают обратиться к энциклопедиям и выработать сводные понятия.
- 2. Картографические материалы о современных и исторических данных речной сети, регламентирующие документы о природном комплексе<sup>5</sup> и ландшафтном зонировании<sup>6</sup> территории Москвы.

 $<sup>^2</sup>$  "О защите зеленых насаждений" от 05.05.1999 № 17, "О городских почвах" от 04.07.2007 № 31, "Об особо охраняемых природных территориях" от 26.09.2001 № 48.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> "О мониторинге технического состояния жилых домов" от 07.04.2004 № 21, "Об охране и использовании недвижимых памятников истории и культуры" от 14.07.2000 № 26.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> "Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. М.: ОАО "НИИ ВОДГЕО", 89 с.; ГОСТ Р 22.1.12-2005 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2005.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Постановление Правительства Москвы от 26.10.2019 г. № 1577-ПП "Об объектах природного комплекса Центрального административного округа города Москвы". URL: https://docs.cntd.ru/document/563927789.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Постановление Правительства Москвы от 18.08.98 № 629 "О перспективном строительном и ландшафтном зонировании территории города Москвы". URL: https://docs.cntd.ru/document/8316365?marker (Утратило силу в связи с введением Градостроительного Кодекса города Москвы от 25 июня 2008 года № 28).

- 3. Цифровой картографический слой Единой картографической основы города в масштабе 1:10 000.
- 4. Карта инженерно-геологического районирования в составе комплекта крупномасштабных геологических карт территории Москвы (2010) в масштабе М 1:10 000 [2, 11, 12]. Разработанная таксономическая система имеет иерархическую структуру, включая на первом уровне структурно-геоморфологические мегамассивы с тенденцией: А – поднятия и Б – опускания; на втором уровне - 6 таксонов макромассивов: ледникового комплекса (таксоны I, II) и аллювиального комплекса, включающего надпойменные террасы (таксоны III, IV, V) и пойменные террасы (таксон VI) гидрографической сети на территории города. На карте отражены категория сложности инженерно-геологических условий и информация о распределении опасных геологических процессов (с кодами, им присвоенными).
- 5. Данные дистанционного зондирования международного исследовательского проекта по созданию цифровой модели высот на основе радиолокационной топографической миссии шаттла или Shuttle Radar Topography Mission SRTM90v.4.1 с геопортала CGIAR-CSI(URL-http://srtm.csi.cgiar.org/).
- 6. Сведения о субъектах (организациях) природопользования Москвы, работающих на природных территориях: а) природного комплекса города, в границах озелененных территорий: различные парки (городские, природно-исторические, усадебные, лесопарки, в том числе национальный парк), ландшафтные заказники, памятники природы и другие объекты; б) кладбища, средозащитный потенциал которых не уступает природным территориям<sup>7</sup>.
- 7. Сведения о субъектах (организациях) природопользования Москвы, работающих на территориях, занятых техническими системами, в том числе: здания (в первую очередь, многоквартирные жилые дома), объекты историко-культурного наследия, дороги, сооружения, дренажные системы и инженерные сооружения водосбора, водоотвода и канализации. В круг сведений о субъектах природопользования входят утверждающие положения и документы, регламентирующие содержание территории/технической системы в соответствии с функциональным назначением, градостроительным режимом и требованиями обеспечения безопасности.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводится на программном обеспечении геоинформационных систем Arc-GIS ESRI и Global Mapper, включая расчетно-аналитические модули трехмерного моделирования (3DAnalysis), пространственного анализа (Spatial Analysis) и гидрологических исследований (Hydromodeling) ESRI.

Исследования поверхностного стока на основе цифровой модели рельефа и постановка задач зависят от источника топографических данных, и, следовательно, в реализации задач выбирается соответствующий масштаб, в нашем случае масштаб М 1:25000, широко используемый в планах застройки и системе городского природопользования. К принципиальным особенностям постановки задач относится соответствие концепции открытых данных, когда используются и разрабатываются открытые данные, доступные для субъектов природопользования.

Исследование выполняется в несколько последовательных этапов. На начальном этапе по доступным источникам уточняется терминология, используемая в исследованиях поверхностного стока городской территории, с этой целью составляется сводная таблица понятий и терминов: сток, долина, овраг, ложбина, делли, тальвег, водоток, дрена и др.

- 1. При построении модели поверхностного стока на основе цифровой модели рельефа [22] рассчитываются ГРИДы (ГРИД разработанный ESRI GRID формат хранения растровых данных) с размером ячейки 50 м: ГРИДы аккумуляции поверхностного стока и локально замкнутых понижений или депрессии с глубиной более 0.5 м [19], а также расчетные линейные направленные водотоки с параметрами величины аккумуляции в начальной и конечной точках.
- 2. Рассчитанные зоны аккумуляции поверхностного стока связываются с эрозионными врезами рек, сопоставляются с данными об истории и техногенной трансформации рек (запруживание, закапывание и организация дренажных систем, принимающих поверхностные воды, а также канализация).

Выделение последовательности максимальных значений аккумуляции позволяет определять основные водотоки, которые по тальвегу спускаются от вершины эрозионного вреза к устью реки. В целом расчетные водотоки образуют сеть поверхностного стока на городской территории.

3. Особое внимание уделяется зонам депрессий. Депрессии подразделяются на открытые (в основном, совпадающие с водоемами и природными территориями) и "запечатанные" (покрытые асфальтом). По полигональным объектам зон депрессий рассчитываются показатели площади и средней глубины. Оценки распределения де-

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> СанПиН 2.1.2882-11 "Гигиенические требования к размещению, устройству и содержанию кладбищ, зданий и сооружений похоронного назначения". URL: https://rg.ru/2011/09/07/sanpin-dok.html

прессий определяются раздельно по берегам р. Москва с использованием технологии расчета расстояния между депрессиями. По контуру депрессий на основе цифровой модели рельефа через 50 м рассчитываются абсолютные высоты; особое внимание уделяется точке с минимальной высотой. Заметим, что в классической модели поверхностного стока зоны депрессий не учитываются в расчетах аккумуляции. Мы же предполагаем, что в некоторых случаях (при максимальных или длительных осадках) депрессии могут рассматриваться как дополнительный источник аккумуляции стока. В этом случае точка с минимальной высотой является началом водотока, связующего депрессию с сетью поверхностного стока.

- 4. Аккумуляция поверхностного стока распределяется на городской территории неравномерно; необходимость выявить зоны со значениями большей аккумуляции обусловливает расчет суммарной аккумуляции стока на единицу площади [19, с. 138]. Суммарные аккумуляции (SumFlace) рассчитываются по методу ближайшего соседства на площади  $1 \text{ км}^2$  (в радиусе 564 м). По этим значениям рассчитываются изолинии с пороговым значением площади существенного водосбора, в данном случае эмпирически заданным значением — 10000 ячеек; изолинии являются границами зоны влияния поверхностного стока. Пороговое значение суммарной аккумуляции поверхностного стока на территории Москвы принято как SumFlacc  $\geq 25$  км<sup>2</sup>, и расчетные изолинии конвертируются в зоны влияния поверхностного стока. Заметим, что последние ограничивают эрозионные врезы и связываются с историческим протеканием рек, название зоны связывается с названиями существующих или исторических рек.
- 5. Существенным в постановке задач анализа зон влияния поверхностного стока (ЗВПС) является расчет типовых морфометрических характеристик эрозионных врезов<sup>8</sup> (распределение абсолютных высот рельефа, гипсометрический индекс и глубина эрозионного вреза). В части анализа модели поверхностного стока определяются: оценки распределения аккумуляции стока и депрессий, а также графики роста аккумуляции по тальвегу и расчет коэффициента увеличения аккумуляции стока с учетом стока от депрессий.
- 6. Добавление ЗВПС к Карте инженерно-геологического районирования позволяет осуществить их совместное рассмотрение и наполнить содержание ЗВПС свойствами инженерно-геологических массивов. На совместной карте выделя-

ются категории сложности инженерно-геологических условий (ИГУ) и инженерно-геологические массивы с опасными процессами. Немаловажно использование иерархической системы районирования, позволяющей выделить таксоны по структурно-геодинамическому признаку. Особое внимание уделяется мегамассивам с тенденциями поднятия (А) и опускания (Б).

7. Анализ ЗВПС производится по основным компонентам инженерно-геологического районирования, включая распределение категории сложности инженерно-геологических условий и опасных геологических процессов. Для ЗВПС рассчитывается таксономическая формула геоэкологической опасности.

Таксономическая формула оценки геоэкологической опасности разработана в следующем виде [20]:

где K1 > K2 > K3 — процент площади (целой части), занятой негативными геологическими процессами НП1, НП2, НП3... в порядке убывания. Коды опасных процессов приводятся в квадратных скобках, а коды процессов, занимающих площадь <1%, — в фигурных скобках. При этом используются коды процессов, принятые в Карте инженерно-геологического районирования территории Москвы [2].

8. Оценка уязвимости объектов природопользования (V) от совместного воздействия факторов поверхностного стока и ИГУ осуществляется по формуле:

$$V = F(A, C, H, GW, L), \tag{1}$$

где A — величина аккумуляции поверхностного стока (м²), C — категория сложности ИГУ, H — вид опасного геологического процесса, GW — уровень грунтовых вод (м), L — вид землепользования, определяющий коэффициент стока Кс [15].

Граничные значения показателей для оценки уязвимости объектов природопользования приводятся в табл. 1.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пример сводной таблицы основополагающих понятий в рамках исследования поверхностного стока приводится в табл. 2.

Результат построения цифровой модели рельефа, расчета и анализа зон депрессий с ЗВПС на территории города представлен на рис. 1.

Распределение абсолютных высот в ЗВПС левых и правых притоков р. Москва представлены на рис. 2. Стандартное отклонение абсолютной высоты у правых притоков — 20.04 м, у левых — 12.50 м.

Исследование эрозионных врезов право- и левобережныж притоков р. Москва показало, что

<sup>8</sup> Geomormophometry – некоммерческая, неправительственная ассоциация исследователей и экспертов, открытая для свободного обмена знаниями и взглядами на различные аспекты работы с цифровой моделью рельефа. URL: http://geomorphometry.org.

Таблица 1. Граничные значения показателей для оценки уязвимости объектов природопользования в ЗВПС

	Метод оценки	Ед. изм.	Значение показателя		
Наименование показателя			мини- мальное	среднее	макси- мальное
A — величина аккумуляции поверхностного стока	Расчетно-аналитический	м <sup>2</sup>			
С – категория сложности	По данным инженерно-гео-	_	низкая	средняя	высокая
инженерно-геологических условий	логического районирования				
H — вид опасного геологиче-	По данным инженерно-гео-	_	Нет опасных	Например,	Напри-
ского процесса	логического районирования		процессов	1 — подтопление	мер, [1, 3]*
<i>GW</i> – уровень грунтовых вод	Данные мониторинга/ литературные данные [14]	М	1-3	3–5	Более 5
L — вид землепользования с коэффициентом стока	Данные мониторинга/ литературные данные [15]	_	0.2	0.5	Более 0.8

<sup>\*</sup>Коды высокой категории сложности при сочетании двух опасных процессов (подтопление и карст-суффозия).

Таблица 2. Пример сводной таблицы понятия "долина"

$\Pi$ онятие $^*$	Раскрытие понятия через пояснения и термины
ДОЛИНА — отрицательная форма рельефа; узкое по сравнению со своей длиной и в большей части извилистое углубление в земной поверхности. Долины образуются размывающей деятельностью проточных вод (эрозией). Разновидности:  ЛОЖБИНА — общее название для вытянутых денудационных форм с пологими, мягкими склонами.  ДЕЛЛИ — ложбины стока, плоскодонные, с зачаточными руслами, чаще безрусловые, линейно вытянутые, иногда разветвляющиеся, служащие для стока дождевых и талых вод (плоскостного смыва).  ОВРАГ — крутосклонная долина, часто сильно разветвленная, созданная деятельностью временного, редко небольшого постоянного потока на возвышенно-равнинных пространствах, особенно в области развития легко размывающихся рыхлых пород.	Различают Д. главные и боковые. В поперечном сечении Д. различают: дно и в его пределах русло—наиболее низкую часть дна, по которой течет постоянно или временно вода, и пойму—часть дна, заливаемую в половодье; склоны, иногда террасированные подошву склона—место соприкосновения склонов и дна, бровку—место, где склон сочленяется с поверхностью другого генезиса или возраста.

<sup>\*</sup>Геологический словарь: в 2-х т. / Под ред. К.Н. Паффенгольца и др. М.: Недра, 1978. https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\_geolog/17955.

их относительный гипсометрический индекс HI изменяется в пределах от 0.3 до 0.7, средние значения, одинаковые для ложбин левых и правых притоков — 0.48, стандартное отклонение 0.07. Глубины эрозионных врезов имеют разброс значений по левым притокам 5-33 м при максимальной абсолютной высоте от 140 до 183 м; по правым притокам — 12-43 м при максимальной абсолютной высоте от 178 до 245 м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕПРЕССИЙ И ЗВПС НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА

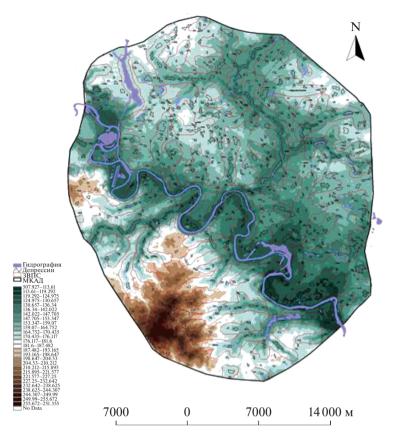
Мода распределения расстояний между депрессиями на территории составляет 301 м для

ЗВПС и 1291 м для депрессий вне ЗВПС, т.е. депрессии внутри ЗВПС встречаются чаще в 4 раза, чем за их пределами.

Сумма площадей депрессий на левобережье р. Москва —  $36.2 \text{ км}^2$ , а на правобережье —  $26.2 \text{ км}^2$ , т.е. на левобережье в 1.5 больше депрессий, чем на правобережье.

Характерное распределение относительной частоты суммарной аккумуляции поверхностного стока на площади  $1~{\rm km}^2$  в  $3{\rm B\Pi C}$  и вне их относится к логнормальному закону распределения, и для сравнения оценок используется мода распределения.

Распределение относительной частоты суммарной величины аккумуляции поверхностного

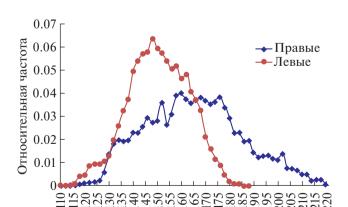


**Рис. 1.** Цифровая модель рельефа с зонами влияния поверхностного стока и депрессиями на территории Москвы внутри МКАД.

стока на площади  $1 \text{ км}^2$  вне  $3B\Pi C$  представлено на рис. 3.

В ЗВПС суммарная величина аккумуляции стоков в 5.5 раза больше, чем вне этих зон. В пределах мегамассива Б располагаются левые притоки р. Москва, в целом их площадь зон влияния в 4 раза больше, чем в мегамассиве A (рис. 4).

Важнейшей характеристикой эрозионного вреза является рост кумулятивной аккумуляции



**Рис. 2.** Графики распределения абсолютных высот в ЗВПС левых и правых притоков р. Москва.

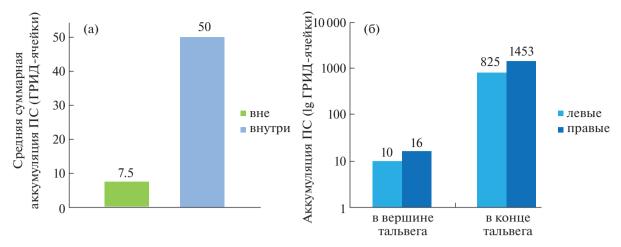
Абсолютная высота, м

стока по тальвегу. Для сравнения были выбраны эрозионные врезы наиболее протяженных рек по левобережью — р. Лихоборка, по правобережью — р. Городня. Диаграмма аккумуляции стока по тальвегам указанных рек представлена на рис. 5.

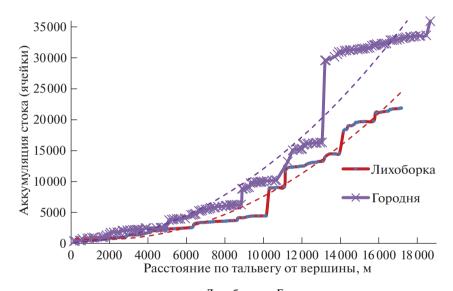
Можно заметить, что в начале тальвега рост аккумуляции стока меньше, чем в среднем по всей длине тальвега, средние коэффициенты ро-



**Рис. 3.** Распределение относительной частоты суммарной величины аккумуляции поверхностного стока на площади 1 км<sup>2</sup> вне ЗВПС. Мода распределения — 3000 ячеек.



**Рис. 4.** Диаграммы сравнения аккумуляции поверхностного стока: a- по моде распределения суммарной аккумуляции на площади  $1 \text{ км}^2$  вне и внутри 3 ВПС; 6- в зоне максимальной аккумуляции поверхностного стока в начале (вершине) и в конце тальвега эрозионных врезов по левым и правым притокам р. Москва.



**Рис. 5.** Диаграмма аккумуляции стока по долинам рек Лихоборка и Городня от начала до конца тальвега. Пунктиром показаны расчетные линии тренда роста аккумуляции стока (полиномы второй степени) с коэффициентом детерминации R > 0.95.

ста аккумуляции по *правым* притокам составляют 1.5-1.7 (в начале) и 1.89 (в среднем по тальвегу), а по *левым* притокам 0.9-1.0 (в начале) и 1.25 (в среднем по тальвегу), т.е. рост аккумуляции по правым притокам в 1.44 раза больше, чем по левым.

Результатом наложения ЗВПС на базовую Карту инженерно-геологического районирования является комплексная карта распределения ЗВПС по элементам инженерно-геологического районирования (рис. 6).

Геоэкологическая характеристика ЗВПС определяется в результате анализа категории сложности ИГУ и сочетания вида опасных процессов в их пределах. Результаты анализа распределения видов опасных процессов в ЗВПС приводятся на рис. 7.

Следует обратить внимание, что в ЗВПС левых притоков среди опасных процессов преобладает процесс подтопления, причем по площади его доля в 1.5 раза больше, чем в ЗВПС правых притоков. Спектр опасных процессов ЗВПС имеет гидрогеологическую природу (подтопление, подтопление + карст-суффозия, карст-суффозия).

Перечень геоэкологических показателей основных зон влияния поверхностного стока приволится в табл. 3.

Анализ комплекса таксономических формул ЗВПС показывает, что в пределах мегамассива Б преобладают ЗВПС с высокой категорией сложности инженерно-геологических условий, а в пределах мегамассива А — со средней.



**Рис. 6.** Комплексная карта распределения ЗВПС по элементам инженерно-геологического районирования. 1 – зоны влияния поверхностного стока, 2, 3, 4 – категории сложности инженерно-геологических условий [2].

### АНАЛИЗ ОТНОШЕНИЙ ЗВПС К ПРИРОДНЫМ ТЕРРИТОРИЯМ И КЛАДБИЩАМ

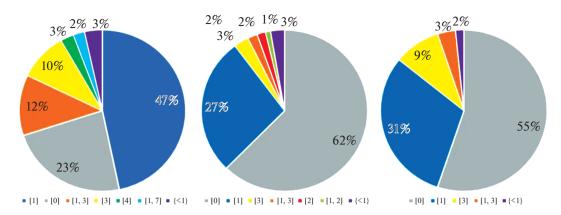
Анализ ЗВПС по основным объектам природопользования, которым необходимо представление о влиянии поверхностного стока и инженерно-геологическом районировании на территории города, осуществлялся по природным территориям и кладбищам. Основные задачи в ЗВПС этих объектов природопользования — мероприятия по водоотводу, наблюдение за состоянием дренажных систем и очистка территории от мусора для того, чтобы не допустить заболачивания и снижения средозащитного потенциала территории.

Анализ по отношению к ЗВПС кладбищ, как объектов с высокими экологическими и социальными рисками при затоплении, показал: 67% площади кладбищ находятся в ЗВПС. К высокой категории сложности инженерно-геологических условий с сочетанием распространения процессов подтопления и карст-суффозии на площади более 80% относятся кладбища: Богородское, Медведковское, Введенское, Раевское, Преображенское.

При рассмотрении расположения ЗВПС вдоль тальвега эрозионного вреза или кумулятивной аккумуляции поверхностного стока основное внимание должно сосредоточиться на оценках уязвимости технических систем водостока и канализации.

Дополнительными показателями уязвимости являются износ оборудования и наличие средств мониторинга объема поверхностного стока, особенно необходимое при экстремальных осадках (максимально разовых и длительных). В зарубежном опыте [3, 17—21] необходимо отметить широкое использование средств такого мониторинга в городских условиях; например, в работе [23] описывается успешный опыт использования средств мониторинга в кварталах городской планировки Германии. В Российской Федерации эти вопросы решаются в специальной информационной системе с использованием картографических материалов

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> ФЗ "О водоснабжении и водоотведении" от 28.01.2022 г. № 5 и ФЗ "О государственной информационной системе жилищно-коммунального хозяйства" (в редакции Распоряжения Правительства Российской Федерации от 18.10.2018 г. № 2253-р).



**Рис. 7.** Распределение опасных процессов в ЗВПС. В диаграммах используется удельный вес площадей опасных процессов внутри МКАД (слева-направо): левых притоков, правых притоков, на территории внутри МКАД вне ЗВПС. В квадратных скобках указаны коды опасных процессов, принятые в Карте инженерно-геологического районирования: 1 — подтопление, 2 — неглубокие оползни, 3 — потенциальная карст-суффозия, 4 — карст-суффозия, 5 — глубокие оползни, 6 — техногенные и 7 — слабые грунты, 0 — нет процессов.

детальной планировки города. Для субъектов природопользования принципиально важно наличие связи/электронного взаимодействия с этой информационной системой.

Примеры геоэкологической ситуации в зонах влияния поверхностного стока с учетом оценки инженерно-геологических условий приводятся на рис. 8.

Таблица 3. Примеры геоэкологических показателей ЗВПС на территории Москвы в пределах МКАД

<b>Гаолица 5.</b> Примеры геоэкологических показателей <b>3</b> 611С на территории москвы в пределах м <b>к</b> Ад							
Реки	Максимальное значение аккумуляции, ГРИД ячейки	Среднее значение роста аккумуляции, ГРИД ячейки/м)*	Коэффициент увеличения максимальной аккумуляции над средним значением аккумуляции**	Таксономические формулы опасности			
ЗВПС на территории мегамассива А (поднятия), правые притоки р. Москва							
Городня	36334	1.90	1453	63 [0] 35 [1] 1 [2] 1 { [6] [1, 2]}			
Сетунь	26544	2.36	1062	49 [1] 37 [0] 3 [1, 6] 3 [1, 2] 2 [1, 3] 2 [6] 2 [2]1 [1, 3, 6] 1 { [2, 6] [3] [3, 6] [2, 5]}			
Раменка	17 135	2.15	685	68 [0] 24 [1] 5 [2] 3 { [2, 6] [6] [1, 6] [1, 2]}			
Чертановка	12665	1.05	507	73 [0] 24 [1] 2 [1, 2] 2 { [2] [6]}			
Котловка	7399	0.86	296	85 [0] 9 [1] 3 [6] 1 [1, 2] 1 { [1, 6]}			
ЗВПС на территории мегамассива В (опускания), левые притоки р. Москва							
Лихоборка	20867	1.19	835	42 [1] 32 [0] 22 [1, 3] 4 [3] 1 { [6] [1, 6]}			
Нищенка	14049	0.88	562	36 [1, 3] 25 [3] 23 [1] 8 [0] 6 [3, 6] 2 [1, 3, 6] 1 { [6] [1, 3, 7]}			
Серебрянка	11 386	1.13	455	50 [1] 23 [0] 12 [1, 3] 11 [1, 7] 4 [3] 1 { [1, 3, 7] [1, 6]}			
Сосенка	10025	0.80	401	78 [1] 11 [0] 4 [3] 4 [1, 3] 3 [1, 7] 2{ [1, 6] [1, 3, 7] [1, 6, 7] [7]}			
Таракановка	9243	0.68	370	32 [1]26[0] 22 [4]13 [3] 2 [4, 6] 2 [1, 4, 6]1 [1, 3] 1 { [1, 4] [1, 3, 6] [6] [3, 7]}			

<sup>\*</sup>Среднее значение роста аккумуляции (ГРИД ячейки/м) — отношение суммарного прироста аккумуляции по тальвегу к длине водотока; \*\*Коэффициент увеличения максимальной аккумуляции над средним значением аккумуляции — отношение максимальной аккумуляции к средней величине аккумуляции в пределах ЗВПС. В таксономической формуле в квадратных скобках приводятся коды опасных процессов, в фигурных скобках — коды процессов, распространенных на менее 1% от общей площади.

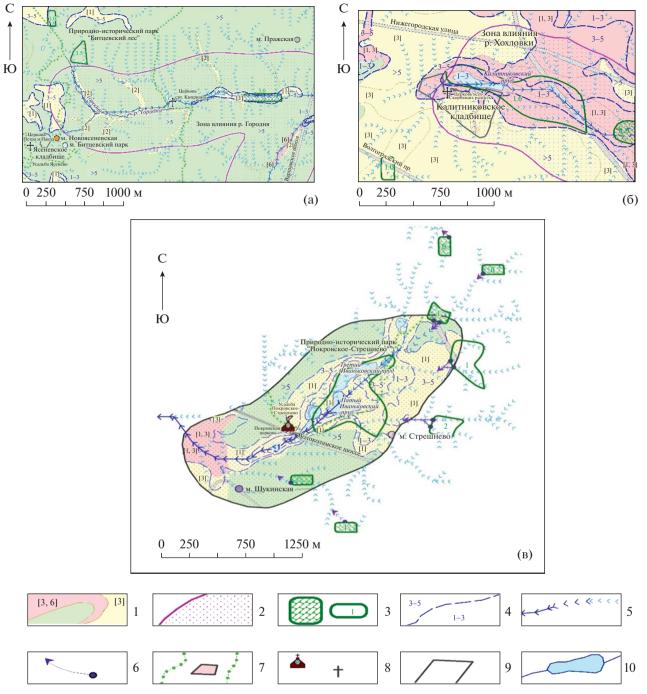


Рис. 8. Примеры геоэкологических ситуаций в зонах влияния поверхностного стока: а − 3ВПС р. Городня, б − 3ВПС р. Хохловка и в − 3ВПС р. Чернушки. 1 − Карта инженерно-геологического районирования с выделением категории сложности инженерно-геологических условий: зеленый цвет − низкая, желтый − средняя, сиреневый − высокая; 2 − зона влияния поверхностного стока; 3 − зоны депрессий: с заливкой − запечатанные, без заливки − открытые территории, цифры в центре − средняя глубина понижения; 4 − границы распространения грунтовых вод с различной глубиной залегания (м); 5 − линии расчетных водотоков с направлением движения: незначительные по величине аккумуляции < 400, значительные водотоки с величиной аккумуляции > 400 ячеек; 6 − точки выхода из депрессий; 7 − границы историко-культурных парков, усадьба; 8 − объекты историко-культурного значения (церкви); 9 − кладбища; 10 − гидрографическая сеть.

На карте-схеме (а) (см. рис. 8) рассматривается геоэкологическая ситуация с низкой категорией сложности ИГУ и отсутствием распространения опасных процессов в зоне влияния поверхност-

ного стока р. Городня на территории мегамассива А. Западная часть зоны относится к одному из самых крупных природно-исторических парков (Битцевский лесопарк) на территории Москвы; в восточной части зоны по выходу стока из депрессии (со средней глубиной грунтовых вод 3 м) — средняя категория сложности ИГУ.

На карте-схеме (б) (см. рис. 8) представлена геоэкологическая ситуация с высокой категорией сложности ИГУ и распространением процессов подтопления и сочетания процессов подтопления с карстово-суффозионным процессом в зоне влияния поверхностного стока р. Хохловка на территории мегамассива Б. На территории зоны влияния находится историческое Калитниковское кладбище, к северу от кладбища – Калитниковский пруд, окруженный значительной по площади зоной депрессии со средней глубиной 1.6 м. На глубине эрозионного вреза реки глубина грунтовых вод 1-3 м, на территории кладбища при длительных атмосферных осадках необходимы частые обследования и готовность к организации работ по водоотводу, особое внимание следует уделять состоянию фундамента церкви (объекта историко-культурного наследия).

На карте-схеме (в) (см. рис. 8) представлен метод учета депрессий в сети поверхностного стока; геоэкологическая ситуация средней категории сложности ИГУ, в конце тальвега в зоне сочетания процесса подтопления с карстово-суффозионным процессом высокая категория сложности ИГУ на территории мегамассива Б с тенденцией опускания; с учетом зон депрессий коэффициент увеличения кумулятивной аккумуляции составляет существенное значение 1.3. В этом случае, так же как на схеме (б), в эрозионном врезе грунтовые воды находятся на глубине 1-3 м. На территории природно-исторического парка при длительных атмосферных осадках необходимы частые обследования дренажной системы, готовность к работам по водоотводу, особенное внимание следует уделять к состоянию фундаментов усадьбы и церкви — объектов историко-культурного наследия.

### выводы

Предлагаемые методы выделения и анализа зон влияния поверхностного стока позволяют определить взаимосвязи поверхностного стока и экзогенных геологических процессов на территории города и оценить уязвимость объектов природопользования.

Сравнение мегамассивов А (поднятия) и Б (опускания) позволяет отметить, что проявление экзогенных процессов и депрессий в большей степени присуще мегамассиву Б; это различие проявляется сильнее в ЗВПС. Таксономическая формула опасности ЗВПС дает представление о сложности инженерно-геологических условий и распределении видов опасных геологических процессов.

В зонах кумулятивной аккумуляции поверхностного стока при высокой категории сложности инженерно-геологических условий и наличии

опасных процессов (подтопление и карст-суффозия, подтопление и слабые грунты и пр.), при неглубоком уровне грунтовых вод (до 1 м) уязвимость объектов природопользования максимальна.

Рассмотренные примеры карт-схем оценки геоэкологической ситуации с позиции влияния поверхностного стока и оценки уязвимости объектов природопользования позволяют подойти к разработке необходимых первоочередных адаптационных мер по режиму функционирования городской инфраструктуры в зонах с особыми условиями использования территории.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Алексеев Г.В. и др. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации Росгидромет. URL: http://downloads.igce.ru/publications/OD\_2\_2014/v2014/htm/1.htm
- 2. Антипов А.В., Майоров С.Г., Осипов В.И., Галицкая И.В., Кутепов В.М. и др. Инновационный проект по крупномасштабному специализированному геологическому картографированию территории г. Москвы // Инженерные изыскания для строительства: практика и опыт Мосгоргеотреста / Под ред. А.В. Антипова, В.И. Осипова. М.: ООО "Проспект", 2012. С. 154—180.
- 3. *Бегич Я.Э., Шерстобитова П.А.* Концепция Smart-City как стратегия управления городской инфраструктурой // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 8. С. 27.
- 4. Бегич Я.Э., Шерстобитова П.А., Морина Е.А., Макаров А.И. Методы управления источниками поверхностного стока в странах Европы и возможность их применения в Санкт-Петербурге // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 2 (65). С. 59—76. https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2018/2(65)/4\_Begich\_65.pdf
- 5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. http://www.meteorf.ru/upload/pdf\_download/doklad\_klimat2020.pdf
- 6. Зверев В.П., Казеннов С.М. Влияние урбанизации на гидрогеологические условия территорий // Геоэкология. 2003. № 2. С. 130—138.
- 7. Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 84—103. https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-1-84-103
- 8. *Карфидова Е.А.*, *Сизов А.П.* Оценка изученности условий городской территории для инженерногеологического картографирования // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2008. № 1. С. 65—72.
- 9. *Куприянов В.В.* Гидрология урбанизированных территорий // Некоторые вопросы современной научной и практической гидрологии. Ч. 1. М.: Изд. МГУ, 1981. С. 79–87.
- 10. *Мануйлов М.Б., Московкин В.М.* Влияние поверхностного стока (дождевых и талых вод) на экологическую и техногенную ситуацию в городах // Во-

- да и экология: проблемы и решения. 2016. № 2 (66). C. 35—47.
- 11. *Миронов О.К.* Геоинформационные технологии для составления крупномасштабных геологических карт территории Москвы // Геоэкология. 2011. № 3. С. 198—214.
- 12. *Миронов О.К.* Концепция базы знаний в фондах геологической информации // Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87. № 1. С. 78—84. https://doi.org/10.7868/S0869587316110086
- Пространственные данные: потребности экономики в условиях цифровизации / [Кол. авт.: Е.Б. Белогурова, В.Е. Воробьев, О.Г. Гвоздев и др.]. URL: https://www.hse.ru/data/2020/02/13/1573567778/dokladl.pdf (in Russian)
- 14. *Тетиор А.Н.* Городская экология. М.: Академия, 2006. Т. 3. 336 с.
- 15. Янин Е.П. Общие условия и основные факторы формирования водного стока в городских ландшафтах // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2006. № 9. С. 73–111. http://www.nparso.ru/images/docs/OS14.pdf
- 16. Bachurina S.S., Belyaev V.L., Karfidova E.A. Geoecological Aspects of the Development of a Regional Model of Spatial Planning: Case Study of Moscow // Water Resources. 2017. V. 44. № 7. P. 971–979. https://doi.org/10.1134/S0097807817070028
- Chris Z., Cashman A., et al. Urban Flood Management, 2010, Taylor & Francis Group. https://doi.org/10.1201/9781439894330
- 18. *Jha A.K., Bloch R., Lamond J. et al.* Cities and flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. The World Bank, GFDRR, 2012.

- 19. *Karfidova E., Batrak G.* The research of surface runoff in engineering-geological zoning // Natural Hazards and Risk Research in Russia. V. Svalova (Ed.). Springer book.
  - https://doi.org/10.1007/978-3-319-91833-4\_9
- 20. Karfidova E., Komarevskaya M., Kravchenko I., Polevodova S. Approaches to formali-zation of Assessment of territory Engineering geological complicity for purposes of sustainable urban Development // J. of Urban and Environmental Engineering (JUEE), 2020. V. 14. № 1. P. 132–143.
  - https://doi.org/10.4090/juee.2020.v14n1.132143
- 21. Martinez-Graña A., Goy J.L., Zazo C., Yenes M. Engineering Geology Maps for Planning and Management of Natural Parks: "Las Batuecas-Sierra de Francia" and "Quilamas" (Central Spanish System, Salamanca, Spain) // Geosciences. 2013. № 3. P. 46—62. https://doi.org/10.3390/geosciences3010046
- 22. Osipov V., Karfidova E., Batrak G. The Drain Net Modeling On The Base Terrestrial And Radar Data. Comparative Analysis // 5th Annual Int. Conf. on Geological and Earth Sciences (GEOS 2016). https://doi.org/10.5176/2251-3353 GEOS16.35
- 23. Riechel M., Matzinger A., Matthias P. et al. Sustainable Urban Drainage Systems in Established City Developments: Modelling the Potential for CSO Reduction and River Impact Mitigation // Journal of Environmental Management 2020 274:111207. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111207
- 24. *Tsihrintzis V.A.*, *Hamid R*. Modeling and management of urban stormwater runoff quality a review // Water Resources Management. 1997. V. 11. N. 2. P. 136–164. https://doi.org/10.1023/A:1007903817943

# INFLUENCE OF SURFACE RUNOFF ZONES IN THE SYSTEM OF URBAN NATURE MANAGEMENT (BY THE EXAMPLE OF THE MOSCOW CITY)

E. A. Karfidova<sup>a,#</sup>, G. I. Batrak<sup>a</sup>, A. P. Sizov<sup>b</sup>, M. N. Komarevskaya<sup>a</sup>, and S. N. Polevodova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia
 <sup>b</sup> Moscow State University for Geodesy and Cartography, Gorokhovskii per., 4, Moscow, 105064 Russia
 <sup>#</sup>E-mail: e.karfidova@yandex.ru

The paper considers surface runoff formation in urban environment taking into account engineering geological conditions. The significance of attention to surface runoff formation in urban nature management system is substantiated and the approach to identifying the zones of surface runoff influence on the urban environment is implemented. The joint analysis of surface runoff influence zones and engineering geological zoning maps of the Moscow city territory permits the authors to obtain geoecological characteristics of the influence zones and to propose a method for assessing vulnerability of nature management objects. The detailed analysis of the surface runoff impact is given on the example of natural areas and urban cemeteries. It is proposed to take into account the surface runoff influence zones upon the development of zones with special use conditions in the state real estate cadastre.

**Keywords:** system of urban nature management, digital elevation model, surface runoff model, zones of surface runoff influence, zones with special conditions for the territory use

### **REFERENCES**

1. Alekseev, G.V. et al. Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. URL: http://downloads.igce.ru/publications/OD 2 2014/v2014/htm/1.htm (in Russian)

- Antipov, A.V., Mayorov, S.G., Osipov, V.I., Galitskaya, I.V., Kutepov, V.M. et al. *Innovatsionnyi proekt po krupno-masshtabnomu spetsializirovannomu geologicheskomu kartografirovaniyu territorii g. Moskvy* [Innovative project on large-scale specialized geological mapping of the territory of Moscow]. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva: praktika i opyt Mosgorgeotresta* [Engineering surveys for construction: practice and experience of Mosgorgeotrest]. A.V. Antipov, V.I. Osipov (Eds.), Moscow, OOO "Prospect" Publ., 2012, pp. 154–180. (in Russian)
- 3. Begich, Ya.E., Sherstobitova, P.A. Kontseptsiya Smart-City kak strategiya upravleniya gorodskoi infrastrukturoi [The concept of SmartCity as a strategy for managing urban infrastructure]. Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii, 2017, no. 8, pp. 27. (in Russian)
- 4. Begich, Ya. E., Sherstobitova, P.A., Morina, E.A., Makarov, A.I. *Metody upravleniya istochnikami poverkhnostnogo stoka v stranakh Evropy i vozmozhnost' ikh primeneniya v Sankt-Peterburge* [Methods of managing surface runoff sources in European countries and the possibility of their application in St. Petersburg]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii*, 2018, no. 2(65), pp. 59–76. (in Russian)
- 5. Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god [Report on climate features in the territory of the Russian Federation]. URL: http://www.meteorf.ru/upload/pdf\_download/doklad\_klimat2020.pdf (in Russian)
- Zverev, V.P., Kazennov, S.M. Vliyanie urbanizatsii na gidrogeologicheskie usloviya territorii [The impact of urbanization on the hydrogeological conditions of territories]. Geoekologiya, 2003, no. 2, pp.130–138. (in Russian)
- Zolina, O.G., Bulygina, O.N. Sovremennaya klimaticheskaya izmenchivost' harakteristik ekstremal'nykh osadkov v Rossii [Modern climatic variability of extreme precipitation characteristics in Russia]. Fundamental'nya i prikladnaya klimatologiya, 2016, no. 1, pp. 84–103. Doi: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103 (in Russian)
- 8. Karfidova, E.A., Sizov, A.P. Otsenka izuchennosti uslovii gorodskoi territorii dlya inzhenerno-geologicheskogo kartografirovaniya [Evaluation study of the conditions of the urban area for engineering and geological mapping]. Ispol'zovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii, 2008, no. 1, pp. 65–72. (in Russian)
- Kupriyanov, V.V. Gidrologiya urbanizirovannykh territorii [Hydrology of urbanized territories]. Nekotorye voprosy sovremennoi nauchnoi i prakticheskoi gidrologii. Ch.1 [Some issues of modern scientific and practical hydrology. Part 1]. Moscow, MGU Publ., 1981, pp. 79–87. (in Russian)
- 10. Manuylov, M.B., Moskovkin, V.M. Vliyanie poverkhnostnogo stoka (dozhdevykh i talykh vod) na ekologicheskuyu i tekhnogennuyu situatsiyu v gorodakh [The influence of surface runoff (rain and melt water) on the
  ecological and technogenic situation in cities]. Voda i
  ekologiya: problemy i resheniya, 2016, no. 2(66), pp. 35—
  47. (in Russian)
- 11. Mironov, O.K. Geoinformatsionnye tekhnologii dlya sostavleniya krupnomasshtabnykh geologicheskikh kart territorii Moskvy [Geoinformation technologies for compiling large-scale geological maps for the territory

- of Moscow]. *Geoekologiya*, 2011, no. 3, pp. 198–214. (in Russian)
- 12. Mironov, O.K. Kontseptsiya bazy znanii v fondakh geologicheskoi informatsii [The concept of the knowledge base in the funds of geological information]. Vestnik Rossiiskoi akademii nauk, 2017, vol. 87, no. 1, pp. 78–84. (in Russian)
- Prostranstvennye dannye: potrebnosti ekonomiki v usloviyakh tsifrovizatsii [Spatial data: the needs of the economy in the context of digitalization]. E.B. Belogurova, V.E. Vorob'ev, O.G. Gvozdev et al. URL: https://www.hse.ru/data/2020/02/13/1573567778/doklad1.pdf (in Russian)
- Tetior, A.N. Gorodskaya ekologiya [Urban ecology]. Moscow, Academy Publ., 2006, vol. 3, 336 p. (in Russian)
- 15. Yanin, E.P. Obshchie usloviya i osnovnye faktory formirovaniya vodnogo stoka v gorodskikh landshaftakh [General conditions and main factors for the formation of water runoff in urban landscapes]. Problems of the environment and natural resources, 2006, no. 9, pp. 73–111. URL: http://www.nparso.ru/images/docs/OS14.pdf (in Russian)
- Bachurina, S.S., Belyaev, V.L., Karfidova, E.A. Geoecological aspects of the development of regional model of spatial planning: case study of Moscow. *Water Resources*, 2017, vol. 44, no. 7, pp. 971–979.
- 17. Chris, Z., Cashman, A., et al. Urban flood management, 2010, Taylor & Francis Group. URL: https://doi.org/10.1201/9781439894330
- 18. Jha, A.K., Bloch, R., Lamond, J. et al. Cities and flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. The World Bank, GFDRR, 2012.
- Karfidova, E., Batrak, G. The research of surface runoff in engineering-geological zoning. In: Natural Hazards and Risk Research in Russia. V. Svalova, Ed., Springer book: 86943020. http://doi.org/10.1007/978-3-319-91833-4
- Karfidova, E., Komarevskaya, M., Kravchenko, I., Polevodova, S. Approaches to formali-zation of assessment of territory engineering geological complicity for purposes of sustainable urban development. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 132–143. http://doi.org/10.4090/juee.2020.v14n1.132143
- 21. Martínez-Graña, A., Goy, J.L, Zazo, C. and Yenes, M. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: "Las Batuecas-Sierra de Francia" and "Quilamas" (Central Spanish System, Salamanca, Spain). *Geosciences*, 2013, no. 3, pp. 46–62. http://doi.org/10.3390/geosciences3010046
- 22. Osipov, V., Karfidova, E., Batrak, G. The Drain net modeling on the base of terrestrial and radar data. Comparative analysis. 5th Annual International Conference on Geological and Earth Sciences (GEOS 2016). http://doi.org/10.5176/2251-3353\_GEOS16.35
- Riechel, M., Matzinger, A., Matthias, P. et al. Sustainable urban drainage systems in established city developments: modelling the potential for CSO reduction and river impact mitigation. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 274, no. 111207. http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.
- 24. Tsihrintzis, V.A., Hamid, R. Modeling and management of urban storm water runoff quality a review. *Water Resources Management*, 1997, vol. 11, no. 2, pp. 136–164.