

## ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 504;502.64

### ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАТОПЛЕНИЯ ПРИРЕЧНЫХ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2025 г. В. Г. Заиканов<sup>1,\*</sup>, Т. Б. Минакова<sup>1</sup>, Е. В. Булдакова<sup>1</sup>, И. С. Сависько<sup>1</sup>

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

\*E-mail: v.zaikanov@mail.ru

Поступила в редакцию 02.10.2023 г.

После доработки 23.10.2023 г.

Принята в печать 05.02.2024 г.

В статье рассматривается подход к геоэкологической оценке последствий от затопления городских земель при проране плотины Пироговского водохранилища. Опираясь на результаты моделирования затопления, была реализована оценка ожидаемого (потенциального) ущерба геосистемам в черте г. Королев. Исходной информацией для оценки послужили данные моделирования: скорость течения, временной фактор, размеры затапливаемой площади и т.п., а также структура реципиентов в каждой из выделенных урбогеосистем. Полученные значения показали значимость возможного бедствия при реализации чрезвычайных ситуаций, что подтверждает обязательность подобной оценки при планировании городов с целью предупреждения негативных геоэкологических последствий.

**Ключевые слова:** моделирование затопления, урбогеосистема, геоэкологический ущерб, удельный и общий ущерб

DOI: 10.31857/S0869780925010032 EDN: DNKQLX

#### ВВЕДЕНИЕ

В России потенциальная угроза затопления существует более чем в 40 крупных городах и нескольких тысячах других населенных пунктов [7]. В XXI в. повторяемость высоких и катастрофических наводнений возросла в среднем на 15% по сравнению с последним десятилетием прошлого столетия. Резко увеличились затраты, к сожалению, главным образом, за счет компенсаций материальных потерь, а не на меры предупреждения.

Моделирование негативного воздействия наводнений является важным инструментом для планирования и управления рисками в городах. Оно позволяет оценить возможные последствия наводнений, определить наиболее уязвимые территории и своевременно разработать предупредительные меры. Моделирование может быть реализовано на гидродинамических моделях, которые учитывают динамику воды или на статистических моделях, основанных на данных о прошлых наводнениях. Также могут использоваться системы поддержки принятия решений, которые объединяют раз-

личные виды моделирования и анализа данных и помогают администрации и населению города подготовиться к возможным чрезвычайным ситуациям (ЧС) и минимизировать их последствия, а также оценить эффективность уже принятых мер.

При оценке последствий наводнения необходимо учитывать его взаимодействие с другими природными процессами: заболачивание, засоление, загрязнение почв и др. Затопление городской территории, как правило, сопровождается ухудшением качества почв и подземных вод. Вода воздействует на фундаменты зданий, вызывая их повреждение и разрушение, приводит к активизации коррозии металлических конструкций и электрических кабелей и т.п. Наводнение провоцирует гибель растений и животных, может также приводить к ухудшению продуктивности сельскохозяйственных и лесных угодий, негативно сказываться на качестве жизни горожан.

В зависимости от характера воздействия наводнения его последствия будут существенно различаться между собой. Несмотря на то, что при-

родные системы и их компоненты адаптированы к повторяющимся сезонным затоплениям, продолжительное воздействие процесса на неустойчивую урбогеосистему в итоге может закончиться ее разрушением. Городские объекты к подобному воздействию еще более чувствительны.

В настоящее время моделирование последствий катастрофических процессов является важным аспектом городского планирования и управления. Оно помогает определить потенциальные риски, связанные с подтоплением, затоплением и разработать стратегии по минимизации негативных последствий. Причина затопления территории может быть не только природного характера (например, сезонное наводнение), но и техногенного (например, авария на гидротехническом сооружении) [4, 5].

Целью исследования являлось определение потенциального геоэкологического ущерба геосистемам долины р. Клязьма в черте городского округа (ГО) Королёв в результате возможного прорыва плотины Пироговского водохранилища на основе данных моделирования.

### МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ ГОРОДСКОЙ ТЕРРИТОРИИ

В законе “Об охране окружающей природной среды” ущерб окружающей среде трактуется как загрязнение окружающей природной среды, порча, уничтожение, повреждение, нерациональное использование природных ресурсов, разрушение естественных экологических систем и др. Ущерб окружающей природной среде довольно часто используют, как синоним понятия “экологический ущерб”.

Экологический ущерб — все негативные последствия, вызванные загрязнением окружающей среды, утратой и истощением природных ресурсов, разрушением экосистем, создающие реальную угрозу здоровью человека, растительному и животному миру, материальным ценностям. Однако часто при оценке экологического ущерба не учитываются последствия геоэкологических процессов, связанных с затоплением территории, таких как смыв почв, обрушение берегов, подтопление территории и др.

В настоящее время существует значительное количество нормативно-правовых и методических разработок, регламентирующих порядок определения размера ущерба и убытков, причиняемых компонентам природной среды. Проанализированные разработки в основном базируются на различных методах, реализуемых без учета принципа необходимости оценки ущерба отдельным компонентам природной среды по единой методологии. В результате этого ущерб, наносимый одному

и тому же компоненту природной среды, по различным методикам будет отличаться.

Согласно Гражданскому кодексу РФ<sup>1</sup> и ФЗ “Об охране окружающей среды”, величина ущерба определяется в соответствии с утвержденными в установленном порядке таксами и методиками исчисления размера ущерба, а при их отсутствии — по фактическим затратам на восстановление нарушенного состояния окружающей природной среды с учетом нанесенных убытков, в том числе, упущенной выгоды.

Исходя из логики статьи 15 Гражданского кодекса, экологический ущерб может включать такие элементы убытков, как:

- расходы, связанные с восстановлением нарушенного состояния природной среды;
- стоимость утраченных или поврежденных природных ресурсов;
- упущенная выгода или неполученные доходы.

Кроме упущенной выгоды (потерянных доходов), отдельной категорией в составе ущерба может рассматриваться часть расходов на превентивные мероприятия, т.е. на меры по предотвращению ущерба.

Для оценки ущерба используются различные методы. В настоящее время в основном известны примеры и методики оценки ущербов от наводнений применительно только к объектам экономики. Чаще всего ущерб от наводнения определяется функцией от плотности населения и максимального уровня воды. Однако анализ многочисленных данных показал, что такая оценка ущерба в денежном выражении может быть лишь весьма приближительной, так как при высокой плотности населения значения ущерба будут завышены, при низкой (даже при наличии дорогостоящих инженерных сооружений) — занижены [1, 3].

Общий ущерб ( $V_{ym}$ ) определяется суммированием реального (имущественного) ущерба, наносимого материальным объектам:

$$V_{ym} = \sum_i^m S_{im} k_{im} C_{im} + \sum_j^m N_{jm} k_{jm} C_{jm} + \sum_q^m L_{qm} k_{qm} C_{qm}$$

где  $S_{im}$  — площадь реципиентов  $i$ -го вида в пределах  $m$ -й урбогеосистемы,  $N_{jm}$  — количество материальных объектов (реципиентов)  $j$ -го вида,  $L_{qm}$  — длина линейных объектов (реципиентов)  $q$ -го вида,  $k_{im}$ ,  $k_{jm}$ ,  $k_{qm}$  — коэффициенты разрушения реципиентов  $i$ -го,  $j$ -го,  $q$ -го вида соответственно;  $C_{im}$ ,  $C_{jm}$ ,

<sup>1</sup> Гражданский кодекс Российской Федерации (часть первая) от 30.11.1994 N 51-ФЗ (ред. от 24.07.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.10.2023). [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_5142/4734407fbf4d5eec5306840f8b75b994e5d57090/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5142/4734407fbf4d5eec5306840f8b75b994e5d57090/)

$C_{qm}$  — кадастровая стоимость реципиентов: единицы площади реципиента  $i$ -го вида, единичного материального объекта  $j$ -го вида, единицы длины реципиента  $q$ -го вида.

К сожалению, при такой оценке не учитываются негативные последствия, причиняемые геосистемам. В общую величину ущерба должны войти расходы на ликвидацию последствий затопления территории: разборка завалов, обрушившихся строений; восстановление водоснабжения, электроснабжения, теплоснабжения; единовременная выплата населению и др. [5]. Для выявления территориальной дифференциации последствий затопления рассчитывается удельный ущерб для каждой геосистемы:

$$V_{um}^{уд} = (B_{um} + kB_{um}) / S_m,$$

где  $k$  — коэффициент ликвидации последствий аварии (20% от суммарного ущерба),  $S_m$  — площадь  $m$ -й урбогеосистемы.

Негативные последствия наводнения (или затопления) будут зависеть не только от его интенсивности и объема воды, но и от изменения состояния реципиентов в соответствии с их устойчивостью к негативному воздействию [2]. В каждой урбогеосистеме в пределах затопленной ее части устанавливается структура реципиентов, учитывается их качественное состояние. Расчеты экономического ущерба усложняются, если в зону затопления попадают экологически опасные объекты. В таком случае необходимо учитывать инфильтрацию жидкости и сорбцию загрязнителя почвой и подпочвенными слоями грунта для оценки загрязнения и вторичного загрязнения почвы, грунтовых и поверхностных вод.

#### ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА ГЕОСИСТЕМАМ ДОЛИНЫ Р. КЛЯЗЬМА В ЧЕРТЕ ГО КОРОЛЁВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЗАТОПЛЕНИЯ

Оценка последствий негативного воздействия затопления городской территории проводилась с целью научного обоснования защитных мероприятий в случае проявления ЧС на р. Клязьма в соответствующем разделе разрабатываемого ЦНИИПрградом Генплана г. Королев.

В своих исследованиях кроме учета перечисленных выше факторов авторы делали акцент на оценке ущерба, вызванного нарушением состояния природных компонентов: загрязнение территории, речной воды, сокращение площади суши из-за обрушения подмытого берега и др. Другой методической особенностью оценки геоэкологических последствий затопления городской территории стал выбор урбогеосистемы в качестве операционной единицы природных систем [3].

Величина ущерба при разрушении защитной дамбы водохранилища во время паводков будет определяться размерами затопляемой площади, временем затопления, структурой землепользования, степенью разрушения и ценностью объектов в ее пределах, а также воздействием этого процесса на прилегающие территории. Большую роль в данной оценке играет временной фактор — динамика уровня и продолжительность затопления территории и ликвидации негативных последствий.

Для расчета ущербов необходимо было установить границы территории, подверженной возможному затоплению. Оценка последствий базировалась на компьютерной модели максимальных уровней затопления долины р. Клязьма в черте ГО Королев, включая озеро Рыбного хозяйства, разработанная для расчетов параметров волны прорыва и зон затопления при разрушении напорного фронта Пироговского гидроузла, выполненная в 2007 г. ООО НПП Аквариус (рис. 1, 2). Расчет параметров волны прорыва проводился на основе численного решения двумерных уравнений Сен-Венана на треугольно-четырёхугольных сетках нерегулярной структуры с учетом реальной топографии долины реки, полученной с карт от М 1 : 10 000 до М 1 : 200 000 с применением ГИС-технологий. Расчет развития прорыва в грунтовой плотине производился по методике А.М. Прудовского [6].

В районе г. Королев максимальные уровни затопления (согласно данным модели ООО НПП Аквариус) составят от 144 до 150 м, уменьшаясь вниз по течению реки, а максимальные глубины затопления поймы достигнут 7–8 м. Максимальные скорости течения достигнут наибольших значений в районе гидроузла до 10 м/с, по долине реки до 1.5 м/с, в створах мостов до 4–5 м/с; расчетное время добегаания фронта волны до г. Королев 2 ч, пика волны — 5 ч, продолжительность затопления поймы более 2 суток.

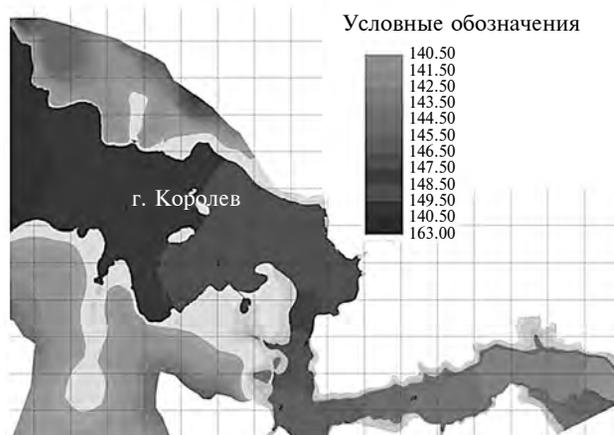
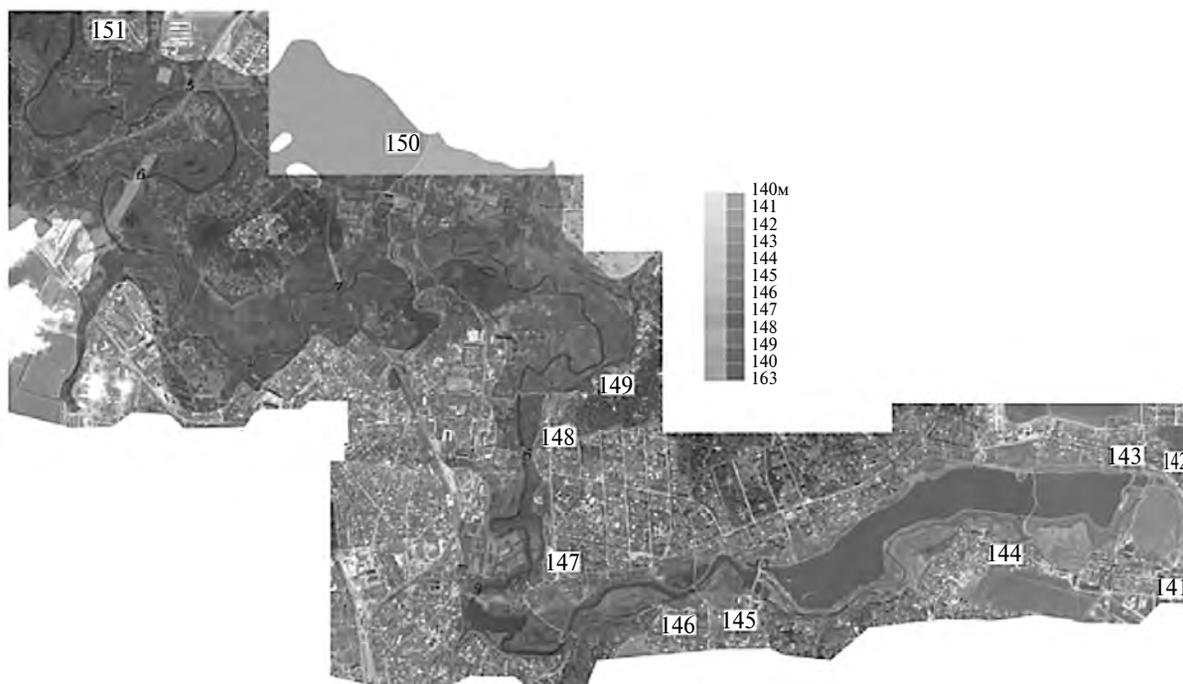


Рис. 1. Результат моделирования максимальных уровней затопления (шаг координатной сетки 500 м).



**Рис. 2.** Максимальные уровни возможного затопления (по результатам моделирования) на серии космических снимков.

Конкретные количественные характеристики переменных состояния природных систем (урбогеосистем) можно установить методом математического моделирования, которое в геоэкологических исследованиях является одним из инструментов, позволяющих изучать различные процессы с учетом разных факторов, вводя различные параметры, или исключая их. Для последующих расчетов были выбраны показатели: площадь затопления и продолжительность стояния воды.

Расчеты потенциального ущерба проводились для самого неблагоприятного варианта — образование прорана в плотине при нормальном подпорном уровне водохранилища без разрушения мостовых переходов. В этом случае за счет предмостового подпора площади, уровни и глубины затопления

нижнего бьефа должны быть максимальными. При этом скорости воды в отверстиях мостовых переходов при больших расходах быстро достигнут критических значений — 3 м/с и более и, следовательно, высока вероятность разрушения не только моста, но и береговых частей пойм и террас реки. Именно для таких участков характерны разрушение берега, изменение русла, переформирование рельефа, размыв почв, гибель растений и др., как следствие, деформация и разрушение строений.

В пределах затопляемой территории, общей площадью более 260 га (около 70% на правом берегу Клязьмы), преобладают пойменные земли (более 60%). В зону затопления попадают в основном индивидуальная застройка, пойменные луга и частные огороды (рис. 3).

	Общая площадь зоны затопления	Площади на пойме	Площади на террасе
Индивидуальная застройка	29.6%	17.3%	51.2%
Сельскохозяйственные угодья	28.6%	44.9%	
Индивидуальные огороды	12.4%	19.5%	
Промплощадки, гаражи	11.4%	14.2%	6.4%
Леса	9.3%	1.6%	22.8%
Многоэтажная застройка	6.9%	0.9%	17.4%
Рекреационные территории	1%	1.6%	
Дачно-садовые объединения	0.8%		2.2%

**Рис. 3.** Использование земель в зоне потенциального затопления (%).

В результате комплекса камеральных и полевых работ с привлечением результатов моделирования была создана карта ландшафтного районирования территории в пределах г. Королев, подверженной затоплению. Основой послужили космические снимки и топографические карты масштаба 1 : 10 000. Выполненное предварительное дешифрирование корректировалось и уточнялось в процессе полевого обследования территории. В результате было выделено 34 урбогеосистемы, относящиеся к трем типам: 1) аквальная — русло; 2) субаквальные — поймы; 3) супераквальные — террасы.

Для каждой урбогеосистемы на следующем этапе рассчитаны величины общего и удельного ущербов. Оценка геоэкологического ущерба (нарушение/уничтожение компонентов урбогеосистем) осуществлялась отдельно для пойменных и террасовых геосистем правого и левого берега р. Клязьма.

Таким образом, в расчетах учитывались ожидаемые изменения состояния или полные потери отдельных природных компонентов:

- потеря площадей под сельскохозяйственными угодьями, гибель леса в результате обрушения берегов;
- потеря гумусового слоя на приусадебных участках и огородах индивидуальной застройки, на участках озеленения многоэтажной застройки и промплощадок;
- потеря урожая текущего года на приусадебных землях, в дачных и садоводческих объединениях граждан;
- загрязнение пойменных земель и русла р. Клязьма бытовым и производственным мусором, смываемой почвой и т.п.

Русло реки находится под воздействием не только притока загрязняющих веществ верхов течения реки. В черте города многие стационарные источники загрязнения размещаются в пойме на контакте с руслом (промплощадки, гаражи, несанкционированные свалки, отстойники, земли сельскохозяйственного назначения и др.). По мере снижения уровня и уменьшения скорости течения воды значительная часть загрязняющих веществ будет осажаться на поверхности поймы и мелководьях русла. На пойме будет потерян гумусовый слой с сельскохозяйственных угодий и частных огородов, произойдет обрушение берегов, безвозвратные потери связаны с подмывом и разрушением берегов. Террасы на меньшей площади и в меньшей степени подвержены негативному воздействию затопления.

За базовую расчетную величину принималась кадастровая стоимость земель г. Королев применительно к площадям различного вида использования, утвержденная распоряжением Министерства экологии и природопользования Московской обл.

от 30 ноября 2005 г. N204-PM. В отдельных случаях учитывались затраты на создание (воспроизводство) природных компонентов, например, восстановление элементов озеленения в пределах микрорайонов многоэтажной застройки, промплощадок и санитарно-защитных зон. В расчетах учитывался временной фактор, инфляция и приведение величин затрат к единому моменту времени.

Для анализа территориальной дифференциации геоэкологических последствий затопления рассчитывались показатели удельного ущерба для каждой урбогеосистемы. На основе полученных значений удалось выделить урбогеосистемы, относящиеся к различным типам, но имеющие сходные показатели удельного ущерба.

Как правило, удельные значения геоэкологического ущерба на пойме выше почти в 3 раза, чем в целом по зоне затопления. Однако в отдельных урбогеосистемах, особенно с индивидуальной застройкой и стационарными источниками загрязнения эта величина на террасе может оказаться больше, чем на пойме (рис. 4). Максимальные значения удельного ущерба характерны для индивидуальной застройки, как на террасе, так и на пойме, а также для подмываемых (обрушаемых) берегов.

В итоге территориальная дифференциация результатов расчетов определялась видом использования территорий, относимых к пойменным или террасовым природным системам, их кадастровой оценкой, размерами и степенью негативного изменения их состояния в результате затопления.

Общий экономический ущерб от прорана плотины Пироговского водохранилища и затопления части городской территории значительно превышает полученную величину за счет существенных материальных (разрушение и деформация зданий и сооружений, компенсации убытков собственников, владельцев или пользователей природных объектов) и моральных потерь. Основные результаты оценки общего геоэкологического ущерба представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Доля урбогеосистем в одном диапазоне величин геоэкологического ущерба в результате затопления

Доля урбогеосистем в одном диапазоне величин ущерба, %	Геоэкологический ущерб, тыс. руб.
15	до 20
18	20–200
9	500–1000
41	1000–10000
15	более 10000

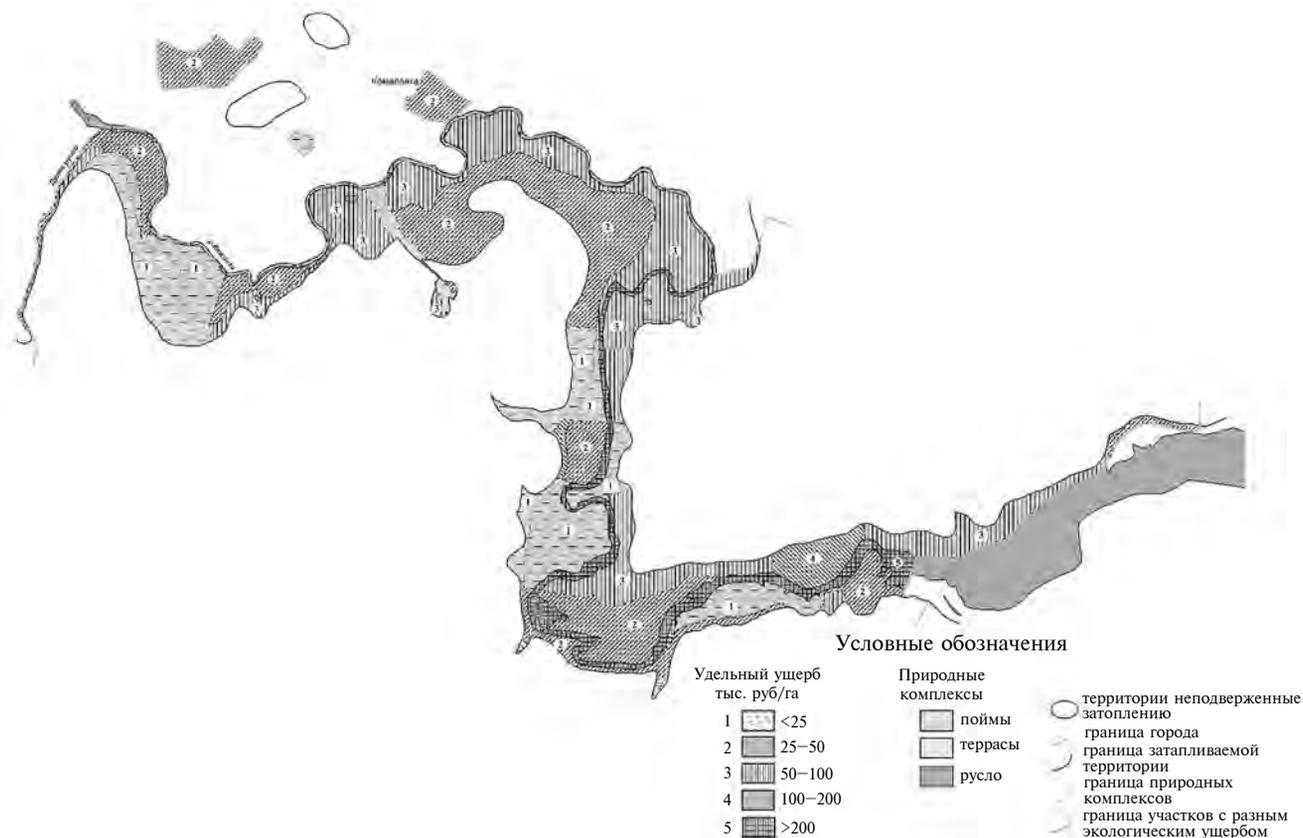


Рис. 4. Оценка урбогеосистем по показателю удельного ущерба.

Таким образом, более чем для половины выделенных урбогеосистем характерны значения максимального геоэкологического ущерба в результате затопления, что дает основание для проведения мероприятий по защите наиболее уязвимых территории, а также позволят своевременно разработать и реализовать предупредительные меры для выделенных урбогеосистем. В результате расчетов ожидаемый общий геоэкологический ущерб от затопления городских земель при проране плотины Пироговского водохранилища превысил бы 150 млн руб. (в ценах 2005 г.)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненной оценки геоэкологического ущерба на основе моделирования ЧС и природного районирования территории показали размеры ожидаемого бедствия. Полученные результаты обуславливают необходимость разработки защитных мероприятий и их дальнейшую реализацию при планировании города в целях повышения безопасности городского пространства. Предложенный подход к оценке ущерба с учетом геоэкологической составляющей обеспечивает более точное представление о последствиях проявления негативного события, учет которого повысит эффективность управления городской средой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арефьева О.Н., Бельчиков В.А., Борц С.В. и др.* Методы прогноза возможного ущерба от наводнений (на примере Московской области) // Природные опасности России. Гидрометеорологические опасности. М.: Изд-во "Крук", 2001. С. 51–57.
2. *Булдакова Е.В., Заиканов В.Г., Минакова Т.Б.* Оценка уязвимости территорий для опасных природных процессов (на примере наводнения) // Геоэкология. 2015. №5. С.434–440.
3. *Булдакова Е.В., Минакова Т.Б.* Принципы и критерии выделения урбогеосистем при геоэкологической оценке регионов // Геоэкология. 2013. №4. С. 376–384.
4. *Малик Л.К.* Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. М: Наука, 2005. 354 с.
5. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений предприятий топливно-энергетического комплекса. Утв. Приказом МЧС России и Минэнерго России от 29 декабря 2003 №776/508. М.: 2004
6. *Прудовский А.М.* Образование прорана при прорыве земляной плотины // Безопасность энергетических сооружений. М.: НИИЭС, 1998. Вып. 2–3. С. 67–79.
7. *Семенов В.А., Кориунов А.А.* Наводнения на реках России в конце XX и начале XXI столетий // Вопросы географии и геоэкологии. 2006. Вып. 5. С. 6–12.

## MODELING-BASED GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE CONSEQUENCES OF FLOODING URBAN AREAS IN RIVER ZONES

V. G. Zaikanov<sup>a, #</sup>, T. B. Minakova<sup>a</sup>, E. V. Buldakova<sup>a</sup>, I. S. Savisko<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,  
Ulansky per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: v.zaikanov@mail.ru*

The article discusses an approach to the geoenvironmental assessment of the consequences of flooding urban area upon the Pirogov reservoir dam break. Based on the modeling of flooding, the expected specific damage to geosystems of Korolev city was assessed. The input modeling data included the flow velocity, the time factor, the size of the flooded area, etc., as well as the structure of recipients in each of the selected urban geosystems. The values obtained showed the significance of possible disaster in emergency situations, which confirms the necessity of such an assessment when planning cities in order to prevent undesirable geoenvironmental consequences.

**Keywords:** *flood modeling, urban geosystem, geoecological damage, specific damage*

### REFERENCES

1. Aref'eva, O.N., Bel'chikov, V.A., Borshch, S.V. et al. [Methods of forecasting possible damage from floods (on the example of the Moscow region)]. In: [Natural hazards of Russia. Hydrometeorological hazards]. Moscow, Kruk Publ., 2001, pp. 51–57. (in Russian)
2. Buldakova, E.V., Zaikanov, V.G., Minakova, T.B. [Assessment of vulnerability of territories to hazardous natural processes (by the example of flooding)]. *Geoekologiya*, 2015, no. 5, pp. 434–440. (in Russian)
3. Buldakova, E.V., Minakova, T.B. [Principles and criteria for the allocation of urban geosystems in the geoecological assessment of regions]. *Geoekologiya*, 2013, no. 4, pp. 376–384. (in Russian)
4. Malik, L.K. [Risk factors for damage to hydraulic structures. Safety issues]. Moscow, Nauka Publ., 2005, 354 p. (in Russian)
5. [Methodology for determining the amount of damage that may be caused to life, human health and property of individuals and legal entities as a result of accidents at hydraulic structures of fuel and energy complex enterprises. Approved. by Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia and the Ministry of Energy of Russia dated December 29, 2000, no. 776/508]. Moscow, 2004. (in Russian)
6. Prudovskii, A.M. [Formation of a channel during the breakthrough of an earthen dam]. In: [Safety of power structures]. Moscow, NIIES Publ., 1998, iss. 2–3, pp. 67–79. (in Russian)
7. Semenov, V.A., Korshunov, A.A. [Floods on the rivers of Russia in the late XX and early XXI centuries]. *Voprosy geografii i geoekologii*, 2006, iss. 5, pp. 6–12. (in Russian)