

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ

УДК 504.03.711

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ  
(ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НА ПРИМЕРЕ Г. МОСКВЫ)

© 2018 г. И. В. Козлякова<sup>1</sup>, О. Н. Еремина<sup>1,\*</sup>, **О. К. Миронов<sup>1</sup>**

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

\*E-mail: sci-council@geoenv.ru

Поступила в редакцию 17.04.2018 г.

На основании результатов исследований по оценке риска экономического ущерба от воздействия экзогенных геологических опасностей в Москве, показано, что оценка должна проводиться отдельно как для всей территории города с существующей инфраструктурой, так и для объектов планируемого городского строительства. В основе картографирования риска в масштабе 1 : 100 000–1 : 50 000 лежит его качественная сравнительная оценка. Карты такого масштаба предназначены для использования на предпроектной стадии изысканий. Для существующей инфраструктуры основная цель картографирования геологического риска – выделение территорий, в пределах которых необходимо устанавливать специальные требования к составу и объему инженерных изысканий, а также вводить запреты и ограничения градостроительной деятельности. Для конкретных объектов перспективного строительства карты риска позволяют провести сравнение альтернативных вариантов проектных решений с позиций минимизации экономических потерь от геологических опасностей при строительстве и эксплуатации сооружения.

**Ключевые слова:** урбанизированные территории, оценка геологического риска, экзогенные геологические опасности, инженерно-геологическое картографирование, городское пространственное планирование

DOI: 10.1134/S0869780318050022

ВВЕДЕНИЕ

На урбанизированных территориях происходит интенсивное техногенное изменение геологической среды, активизируются природные и формируются новые природно-техногенные и техногенные геологические процессы. Из-за большой плотности населения, жилой, административной и промышленной застройки на таких территориях значительно возрастают опасность и риск проявления любых геологических процессов. Геологами-урбанистами, к которым можно отнести и специалистов в области инженерной геологии и геоэкологии, за последние десятилетия накоплен большой опыт оценки опасных геологических процессов в городах, основной метод изучения которых на ранних предпроектных стадиях изысканий – районирование и специальное картографирование территорий [13, 14, 20, 23]. В настоящее время общепризнано, что наиболее эффективным экономическим инструментом для обеспечения устойчивого развития городов является территориальное планирование, согласованное с картами природных опасностей, где указаны запреты или ограничения к освоению территорий того или иного назначения.

Важнейшая задача современных геологических исследований в городах – переход от оценки

и картографирования опасности геологических процессов к оценке и картографированию риска, что даст возможность получить наиболее адекватное представление о размерах возможного ущерба от проявлений геологических процессов на городской территории. Разработка методики и процедуры оценки рисков опасных геологических процессов представляет собой наиболее актуальную задачу. В нашей стране основы теории оценки природных рисков урбанизированных территорий развивались А.Л. Рагозиным, А.И. Шеко, Г.Л. Коффом, С.М. Мягковым, В.Н. Буровой, И.В. Чесноковой и другими учеными [1, 8, 10, 11, 24].

Практически все исследователи, как в России, так и за рубежом, для предварительной оценки геологического риска на территории городов идут по пути совмещения карт опасных природных процессов с картами уязвимости городской инфраструктуры. Однако эта задача на количественном уровне в силу неопределенностей геологической информации и сложности оценки уязвимости объектов городской инфраструктуры не решена еще нигде в мире. Несмотря на то, что проблеме геологического риска посвящено довольно много работ, в ней остается еще достаточно нерешенных вопросов [9, 13, 15, 16, 19, 21, 25].

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА В МОСКВЕ

Московский мегаполис представляется идеальным полигоном для разработки и совершенствования методологии оценки и картографирования геологического риска. Москва принадлежит к числу интенсивно развивающихся мегаполисов, в пределах которого строятся уникальные сооружения, здания повышенной ответственности, реализуются наиболее современные архитектурные проекты, применяются новейшие строительные технологии по освоению надземного и подземного пространства. Территория города характеризуется чрезвычайной сложностью инженерно-геологических условий и одновременно – очень хорошей изученностью. Комплексные инженерно-геологические и геоэкологические исследования г. Москвы в течение многих лет проводилась учеными разных поколений: Б.Н. Даньшиным, Е.М. Сергеевым, Г.А. Голодковской, В.И. Осиповым, В.М. Кутеповым, Г.Л. Коффом, Э.А. Лихачевой и др. [1, 2, 4, 12]. Будучи расположенной в пределах центральной части Русской платформы, территория г. Москвы, как известно, не испытывает серьезного воздействия опасных эндогенных процессов; однако экзогенные геологические процессы (ЭГП) оказывают существенное влияние на инженерно-геологические условия города [6, 7].

На территории города достаточно подробно изучены особенности распространения опасных ЭГП, основные из них – оползни, карстово-суффозионный процесс и подтопление [3, 5, 7, 17]. Развитию этих процессов способствуют такие особенности геологического строения территории, как наличие в геологическом разрезе мощной толщи растворимых карбонатных пород каменноугольного возраста, перекрытых песчано-глинистыми отложениями переменной мощности; наличие залегающих относительно близко к поверхности слабопроницаемых юрских глин и четвертичных ледниковых суглинков; присутствие нескольких генераций погребенных палеодолин р. Москвы и ее притоков.

**Оползни** развиваются в бортах речных долин и оврагов и захватывают либо только четвертичные песчано-глинистые отложения (поверхностные оползни), либо всю мезозой-кайнозойскую песчано-глинистую толщу (глубокие оползни).

Территория города относится к области открытого карста, подверженной воздействию карстово-суффозионных процессов. **Карстово-суффозионные процессы** развиваются на участках, где закарстованные и трещиноватые каменноугольные карбонатные породы залегают под четвертичными песками или отделены от них слабопроницаемыми слоями юрских и/или каменноугольных глин небольшой мощности. Здесь при

определенных условиях возможен суффозионный вынос песков в трещины и полости в известняках и образование на земной поверхности провалов и мутьдообразных оседаний.

Развитию **подтопления** способствуют слабопроницаемые глинисто-суглинистые горизонты, присутствующие в разрезе четвертичных и дочетвертичных отложений. Подтопленными считаются территории, где уровень грунтовых вод располагается на глубине 3 м и менее. Наиболее интенсивно процесс подтопления развивается в поймах рек и в районах, где близко от земной поверхности залегает слабопроницаемый слой моренных отложений или юрских глин [7].

Для территории мегаполиса ранее были составлены крупномасштабные карты оценочного районирования по отдельным процессам, а также карта районирования по сложности инженерно-геологических условий для всей территории города [5, 18, 22].

В Москве геологический риск оценивают при проектировании отдельных зданий и сооружений в соответствие с Рекомендациями по оценке геологического риска на территории г. Москвы [11] и требованием Федерального закона № 384-ФЗ (Технический регламент о безопасности зданий и сооружений, ст. 15, п. 6). В итоге получают величину вероятного ущерба от геологических опасностей за срок службы сооружения в денежном выражении или в процентах от его стоимости. Другой характеристикой риска служит снижение срока службы сооружения без капитального ремонта.

Картографирование риска применяется намного реже, чем картографирование опасностей. При этом главная проблема связана с трудностями в оценке уязвимости объекта риска, т.е. городской инфраструктуры и территории. Для Москвы известны, пожалуй, только две карты геологического риска. Первая составлена в масштабе 1 : 50 000 в 1996 г. в рамках программы “Безопасность Москвы” (авторы: В.И. Осипов, В.М. Кутепов, О.К. Миронов). Карта подробно описана в книге “Москва. Геология и город” [6, с. 382–390]. На карте выделены районы распространения пяти категорий риска от неопасной до чрезвычайно опасной. Категории выделяются в зависимости от распространения опасных процессов (оползни, карстово-суффозионный процесс и подтопление) или их сочетаний. Для каждой категории в легенде к карте даются рекомендации по использованию территории и снижению геологического риска. Городская инфраструктура на этой карте никак не оценена. Фактически картографировалась интегральная опасность, а не риск.

Вторая карта – карта геологического риска ущерба, составлена под руководством Г.Л. Коффа в масштабе 1 : 25000. Методология работы над



Рис. 1. Два подхода к оценке природного (геологического) риска на урбанизированной территории.

ней подробно изложена в монографии [1]. Авторы попытались тщательно проанализировать основные возможные причины аварий и деформаций зданий и сооружений жилищно-гражданского назначения и реализовать полученные оценки в виде карт. Итоговая карта геологического риска ущерба – это уже реальное пространственное отображение уровня геологического риска на территории города. Но эта карта, к сожалению, не нашла должного применения ни при инженерно-геологических изысканиях, ни при градостроительном планировании. Причина видимо в том, что она оказалась крайне перегруженной многочисленными кодами, баллами и прочей информацией в числовом выражении, за которой потерялся физический смысл выделенных районов. Карта оказалась недостаточно понятной ни геологам, ни проектировщикам, ни административным городским органам. Может быть, качественная оценка риска ущерба была бы более востребованной.

В своих исследованиях авторы рассматривают геологический риск как комплексную меру величины и вероятности ущерба, обусловленного экзогенными геологическими процессами. В таком понимании геологический риск на урбанизированной территории можно оценивать с двух позиций.

1. *Для всей территории города или ее части с существующей городской инфраструктурой* – геологический риск оценивается как интегральная

характеристика вероятного ущерба, обусловленного геологическими опасностями, а также степенью и характером техногенной нагруженности территории. В этом случае важнейшее значение приобретает комплексная оценка опасности экзогенных процессов по их воздействию на существующую инфраструктуру. Основная цель картографирования риска при этом – определение территорий, для которых необходимо устанавливать специальные требования к составу и объему инженерных изысканий, запреты и ограничения градостроительной деятельности.

2. *Для перспективного строительства при проектировании конкретного сооружения* – геологический риск оценивается как величина вероятного ущерба за срок его эксплуатации при использовании конкретных проектных решений и защитных мероприятий в условиях существующих геологических опасностей. Геологический риск в этом случае оценивается количественно в виде экономических потерь от геологических опасностей за срок службы сооружения в денежном выражении или в процентах от общей стоимости объекта. Карты риска в этом случае позволяют провести сравнение альтернативных вариантов проектных решений с позиций минимизации экономических потерь от геологических опасностей при строительстве и эксплуатации сооружения (рис. 1).



**Рис. 2.** Концептуальная модель картографической оценки геологического риска территории города с существующей наземной инфраструктурой.

Ниже рассмотрены методические особенности процедуры оценки и картографирования геологического риска в каждом из двух случаев.

#### КАРТА-СХЕМА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ТЕРРИТОРИИ г. МОСКВЫ

При картографировании геологического риска территории города с существующей наземной инфраструктурой в масштабе 1 : 50 000 риск рассматривается авторами как сравнительная интегральная качественная характеристика вероятного ущерба, обусловленного геологическими опасностями, а также степенью и характером техногенной нагруженности территории. Процедура картографирования риска включает основные этапы:

- оценка и картографирование экзогенных геологических процессов по степени их опасности;

- оценка и картографирование уязвимости городской среды для этих процессов (под городской средой понимается территория города с наземной инфраструктурой);

- выделение категорий риска посредством анализа воздействия опасных геологических процессов на элементы наземной инфраструктуры и территорию;

- составление карты риска посредством наложения интегральной карты опасности экзоген-

ных процессов и карты уязвимости городской среды (рис. 2).

Качественная сравнительная оценка и картографирование геологического риска выполняются на основе интегральной оценки опасности ЭГП, с одной стороны, и укрупненного функционального зонирования, с другой. Интегральная оценка опасности ЭГП сводится в этом случае к выявлению степени возможных негативных изменений городской среды и осложнения строительства и эксплуатации зданий и сооружений на участках развития отдельных видов процессов или их сочетаний и типизации территории по степени благоприятности. За основу при этой оценке взята “Карта геоэкологического состояния территории Москвы” масштаба 1 : 50 000, составленная в ИГЭ РАН под руководством В.М. Кутепова на основе комплексного учета степени опасности проявления трех основных ЭГП на территории города: оползневых и карстово-суффозионных процессов, подтопления [4]. Наиболее опасными процессами на территории города, обуславливающими ее геоэкологическое неблагополучие, являются оползни, прежде всего глубокие, а также карстово-суффозионные провалы и оседания. Эти процессы вызывают повреждение или разрушение зданий и могут иметь катастрофические последствия. Менее опасен для зданий и сооружений процесс подтопления. Однако, подтопление, являясь постоянно действующим фактором и имея значительную площадь распространения,

Природные и природно-техногенные процессы Геологическое состояние территории	Оползни	Карстово-суффозионные процессы	Карст	Подтопление
Благоприятное	Нет	Неопасная категория	Малоопасная категория	Отсутствует
Условно благоприятное			Опасная категория	
Условно неблагоприятное			Опасная или малоопасная категория	Постоянное
Неблагоприятное			Потенциально опасная категория	Периодическое
Весьма неблагоприятное			Опасная категория	
	Есть			

Рис. 3. Категории интегральной оценки геоэкологического состояния территории г. Москвы (от проявления опасных геологических процессов) масштаба 1 : 50 000.

наносит значительный экономический ущерб городскому хозяйству. В легенде к карте выделены 5 категорий интегральной оценки геоэкологического состояния территории г. Москвы в результате проявления опасных ЭГП: от благоприятной до весьма неблагоприятной (рис. 3).

Оценка уязвимости городской среды как объекта риска представляет собой наиболее сложный этап в оценке геологического риска. Неоднозначность и разнообразие подходов к такой оценке затрудняет количественную оценку риска в целом [8]. В качестве критерия уязвимости можно выбрать укрупненное функциональное зонирование территории г. Москвы, т.е. дифференциацию территории города на структурные зоны по характеру и типу ее использования, принятую в Генеральном плане города. Укрупненное функциональное зонирование территории Москвы включает 5 типов функциональных зон: транспортные, рекреационные, промышленные, общественные, жилые. Функциональное зонирование определяет плотность наземной капитальной застройки, которая увеличивается от рекреационных зон к транспортным, промышленным, общественным и наконец, к жилым, где она, как правило, максимальная. Такой подход дает ориентировочное представление об уязвимости отдельных частей города по отношению к проявлению опасных ЭГП.

Категории риска выделяются в зависимости от размеров возможного ущерба в результате развития отдельных видов процессов или их сочетаний (рис. 4). За основу выделения категорий риска взята, с одной стороны, плотность наземной капитальной застройки, а с другой – сила и характер воздействия ЭГП на городскую среду.

На основании взаимного наложения и анализа карты геоэкологического состояния (оценка опасных ЭГП), укрупненного функционального зонирования территории и выделенных категорий риска можно получить первоначальное представление об уровне геологического риска территории города (рис. 5, 6).

К зонам весьма высокого и высокого риска относятся территории распространения оползней и карстово-суффозионного процесса в пределах общественных и жилых зон города, где их проявления на поверхности могут приводить к деформациям и разрушению зданий и сооружений. К зонам малого риска можно отнести территории развития процесса подтопления в пределах рекреационных, промышленных и транспортных зон, где негативное воздействие подтопления на фундаменты сооружений не приводит к большому ущербу из-за низкой плотности капитальной застройки.

Характеристика уязвимости городской среды только на основании функционального зонирования, конечно, является неточной. Поэтому здесь можно говорить лишь о карте-схеме риска. Дальнейшая разработка процедуры анализа уязвимости должна включать оценку плотности, типа, возраста наземной капитальной застройки и характера воздействия опасных процессов на городскую среду.

### КАРТА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ТЕРРИТОРИИ Г. МОСКВЫ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ТОННЕЛЕЙ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

Геологический риск как качественная или количественная мера геологической опасности или

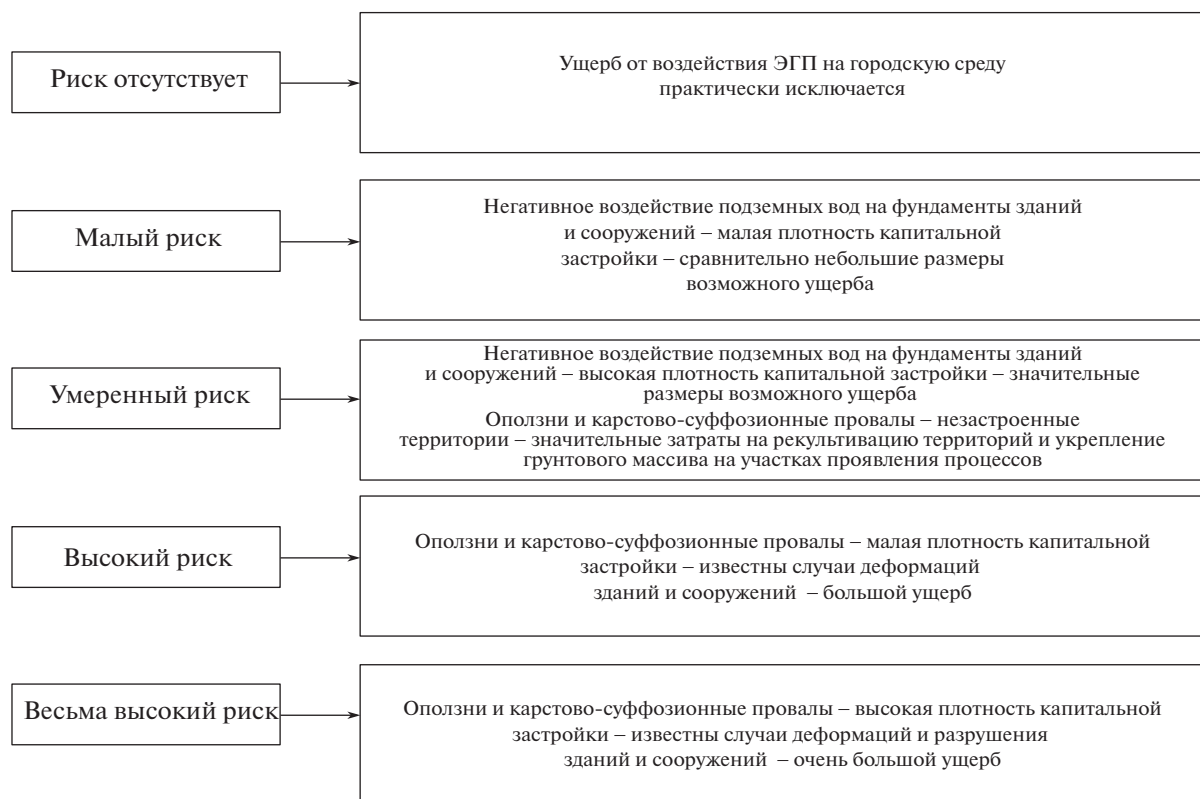


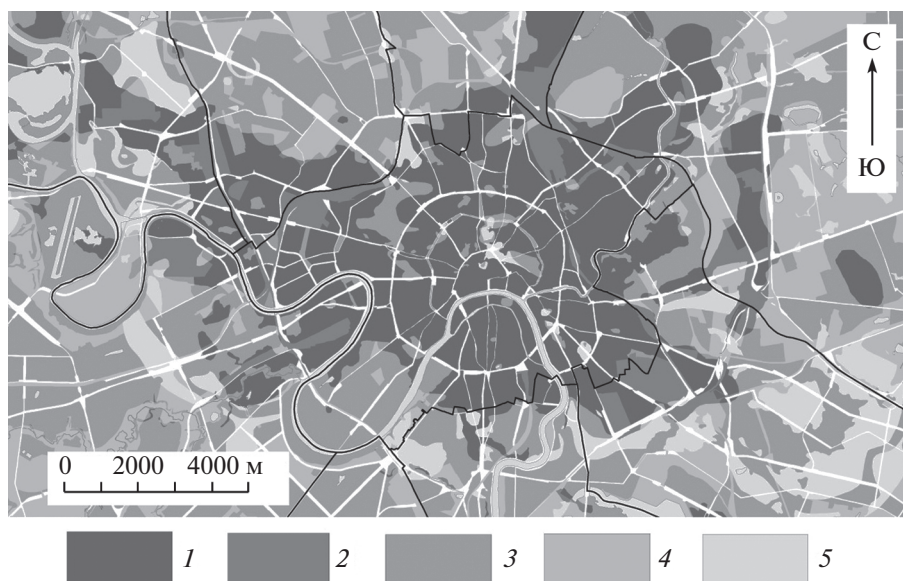
Рис. 4. Содержание категорий риска на карте-схеме геологического риска г. Москвы.

	Функциональные зоны	Рекреационные	Промышленные, транспортные	Общественные, жилые
Геозкологическое состояние (оценка ЭГП)				
благоприятное	риск отсутствует			
условно благоприятное	малый риск		умеренный риск	
условно неблагоприятное				
неблагоприятное	умеренный риск	высокий риск	весьма высокий риск	
весьма неблагоприятное				

Рис. 5. Легенда карты-схемы геологического риска г. Москвы (1 : 50 000).

совокупности опасностей, установленная для определенного объекта в виде возможных абсолютных или относительных экономических потерь (ущерба) – это функция величины воздействия опасностей и уязвимости сооружения [8, 10].

Сравнительный анализ риска ущерба для конкретного сооружения при его строительстве и эксплуатации можно проводить на основании оценки воздействия геологических опасностей на сооружение для различных типов инженерно-



**Рис. 6.** Фрагмент карты–схемы геологического риска г. Москвы (1 : 50 000). Категории риска: 1 – весьма высокий, 2 – высокий, 3 – умеренный, 4 – малый, 5 – риск отсутствует.

геологических условий территории, поскольку уязвимость сооружения для геологических опасностей в этом случае величина постоянная. Показателем риска служит качественная характеристика возможного ущерба от геологических опасностей в пределах распространения территорий с определенным типом инженерно-геологических условий.

Была составлена “Карта геологического риска для перспективного строительства открытым способом тоннелей мелкого заложения (глубина 20 м) в Москве” в масштабе 1 : 100 000. Процедура оценки и картографирования риска включает следующие этапы:

- на основе трехмерной модели геологической среды определяется геологическое строение и гидрогеологические условия в подошве и стенках тоннеля для конкретного уровня его заложения;
- проводится типизация инженерно-геологических условий и анализ воздействия геологических опасностей на сооружение для каждого типа инженерно-геологических условий;
- выявляются возможные ущербы в период строительства и эксплуатации;
- выделяются и обосновываются сравнительные качественные категории риска;
- составляется карта риска.

Карта составлена для территории Москвы в пределах МКАД, для которой создана трехмерная модель геологической среды, позволяющая анализировать геологическое строение территории на любом заданном уровне до глубины 100 м от поверхности. Выделено 7 типов инженерно-гео-

логических условий, в зависимости от строения подошвы и стенок тоннеля (табл. 1).

В основу типизации положены грунтовые условия, выделенные в три основные группы:

- пески с прослоями и линзами супесей и суглинков мезо-кайнозойского возраста (четвертичные, меловые и юрские); породы преимущественно водонасыщенные; подземные воды напорно-безнапорные;
- глины юрского возраста слабопроницаемые;
- терригенно-карбонатные породы каменноугольного возраста, представленные известняками, доломитами, мергелями и глинами, неравномерно обводненные, включающие напорные водоносные горизонты.

Оценка возможных ущербов проводилась на основании анализа воздействия на строительные конструкции таких опасностей, как прорыв подземных вод и плавунных песков в котлован, суффозия, карстово-суффозионные процессы. Предполагалось, что строительство будет вестись открытым способом с использованием защитных ограждающих конструкций. В результате выделено и обосновано четыре категории риска: весьма высокий, высокий, умеренный и малый. Весьма высокий геологический риск характерен для строительства и эксплуатации тоннелей в водонасыщенных песчаных грунтах, что подтверждается многими негативными примерами из практики строительства тоннелей мелкого заложения в Москве. Малый риск характерен для тоннелей, заложенных в слабопроницаемых юрских глинах (табл. 2, рис. 7).

**Таблица 1.** Легенда карты геологического риска для строительства и эксплуатации тоннелей мелкого заложения (глубина 20 м) в Москве

Грунты в подошве тоннеля	Грунты в стенках тоннеля		
	Пески с прослоями и линзами супесей и суглинков мезозой-кайнозойского возраста. Породы преимущественно водонасыщенные. Подземные воды напорно-безнапорные	Глины юрского возраста слабо проницаемые	Терригенно-карбонатные породы каменноугольного возраста. Известняки, доломиты, мергели, глины. Неравномерно обводненные, включающие напорные водоносные горизонты
Пески с прослоями и линзами супесей и суглинков мезозой-кайнозойского возраста. Породы преимущественно водонасыщенные. Подземные воды напорно-безнапорные	Весьма высокий риск	Умеренный риск	
Глины юрского возраста слабо-проницаемые	Высокий риск	Малый риск	
Терригенно-карбонатные породы каменноугольного возраста. Известняки, доломиты, мергели, глины. Неравномерно обводненные, включающие напорные водоносные горизонты	Высокий риск	Умеренный риск	Умеренный риск

Такие карты могут быть составлены для различных уровней заложения тоннеля, что позволит на стадии обоснования инвестиций сравнить альтернативные варианты проекта с точки зрения их безопасности и экономической эффективности.

Задача дальнейших исследований – разработка технологии и научное обоснование составления интегральной карты геологического риска для перспективного подземного строительства, основной целью которой является выявление зон геологического риска, в пределах которых на любом уровне заложения подземного сооружения ущербы могут быть значительными, и требуются специальные рекомендации и защитные мероприятия. Такая карта может быть составлена путем взаимного наложения и анализа карт риска для двух или трех основных уровней освоения подземного пространства. Трехмерная модель геологической среды Москвы позволяет получить фактическую информацию, необходимую для решения этой задачи.

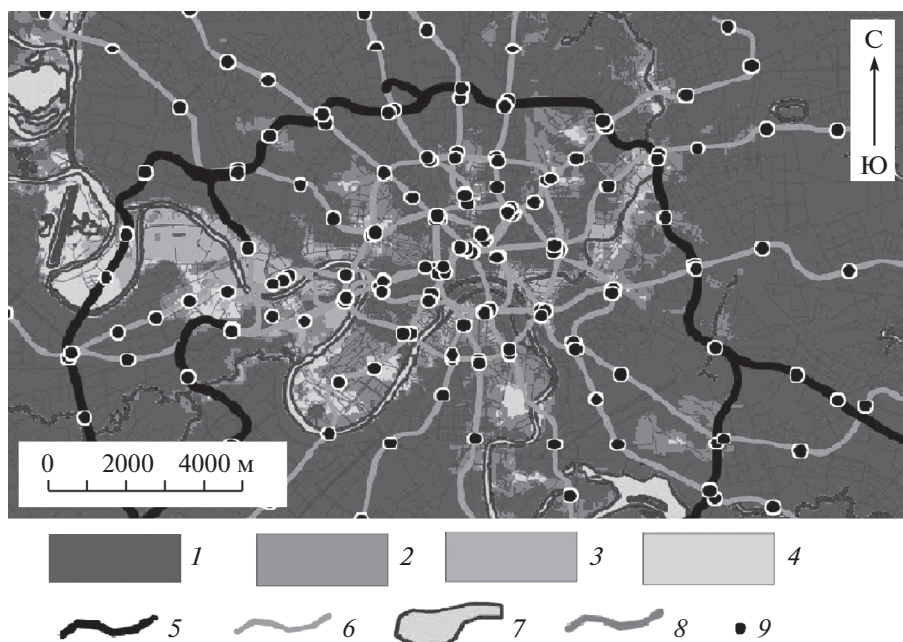
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка риска экономического ущерба от воздействия экзогенных геологических процессов в городах должна проводиться отдельно для существующей инфраструктуры и для планируемого строительства. При картографировании в обоих случаях может даваться качественная сравнительная оценка геологического риска. Для существующей инфраструктуры зоны повышенного риска – это участки развития опасных процессов в пределах районов с высокой плотностью капитальной застройки. Для перспективного строительства риск оценивается для конкретного сооружения или типа сооружений с определенной глубиной его заложения или заложения его фундамента. В этом случае к зонам повышенного риска надо относить территории, где при использовании данных проектных решений можно ожидать большие экономические потери от проявлений геологических опасностей при строительстве и эксплуатации сооружения.



**Таблица 2.** Содержание категорий риска для строительства и эксплуатации тоннелей мелкого заложения (уровень 20 м) в Москве

Категории риска	Инженерно-геологические условия	Возможные проявления геологических опасностей	Экономические потери из-за проявлений геологических опасностей в период строительства и эксплуатации
Малый	В стенках и подошве тоннеля слабопроницаемые глины	При использовании ограждающих конструкций, негативные проявления геологических процессов практически исключаются	При надлежащем соблюдении строительных технологий ущерб от проявлений геологических опасностей практически исключен
Умеренный	В стенках и подошве тоннеля известняки, содержащие напорные воды. В подошве тоннеля известняки, содержащие напорные воды, в стенках слабопроницаемые глины (или известняки и глины). В подошве тоннеля пески водонасыщенные (воды напорные), в стенках слабопроницаемые глины	При аварийном нарушении ограждающих противодиффузионных конструкций при проходке тоннеля возможны прорывы подземных вод в тоннель	Дополнительные затраты на ликвидацию последствий аварий и ремонт ограждающих конструкций в период строительства
Высокий	В подошве тоннеля известняки, в стенках пески (или известняки и пески). Породы водонасыщенные. Воды напорные и безнапорные. В подошве тоннеля известняки, в стенках глины и пески. Известняки и пески содержат напорно-безнапорные подземные воды. В подошве тоннеля слабопроницаемые глины, в стенках пески водонасыщенные (или глины и пески)	При аварийном нарушении ограждающих противодиффузионных конструкций при проходке тоннеля возможны прорывы подземных вод в тоннель. В стенках тоннеля возможен прорыв водонасыщенных песков или песчано-глинистого заполнителя закарстованных зон в известняках	Экономические потери могут быть связаны с оседаниями и провалами земной поверхности над зонами разуплотнения вблизи тоннеля, протечками воды из-за дефектов ограждающих конструкций. Дополнительные затраты на ликвидацию последствий аварий и ремонт ограждающих конструкций в период строительства и эксплуатации
Весьма высокий	В подошве тоннеля пески водонасыщенные. В стенках пески водонасыщенные (или пески и глины). Воды напорно-безнапорные	При аварийном нарушении ограждающих противодиффузионных конструкций при проходке тоннеля возможен прорыв подземных вод и водонасыщенных песков в тоннель, как в подошве, так и в его стенках и формирование зон разуплотнения в грунтовом массиве в окрестностях тоннеля	Экономические потери могут быть связаны с оседаниями и провалами земной поверхности над зонами разуплотнения вблизи тоннеля, протечками воды из-за дефектов ограждающих конструкций. Нельзя исключить деформации обделки тоннеля над зонами разуплотнения под его днищем. Дополнительные затраты на ликвидацию последствий аварий и ремонт ограждающих конструкций в период строительства и эксплуатации



**Рис. 7.** Фрагмент «Карты геологического риска территории г. Москвы для перспективного строительства тоннелей мелкого заложения (глубина 20 м) масштаба 1 : 100 000. Категории риска: 1 – весьма высокий, 2 – высокий, 3 – умеренный, 4 – малый. Прочие знаки: линии метрополитена: 5 – строящиеся; 6 – действующие; 7 – водохранилища и озера; 8 – русла рек; 9 – станции метрополитена.

При оценке и картографировании геологического риска на урбанизированных территориях наиболее сложная задача – оценка уязвимости инфраструктуры и территории. В данном исследовании показана качественная сравнительная оценка уязвимости на основании укрупненного функционального зонирования, при которой используется общая характеристика территории города и наземной инфраструктуры, объединенная понятием «городская среда». Необходимо понимать, что если мы даем качественную и достаточно приблизительную оценку геологических опасностей, то как бы детально и даже количественно не была охарактеризована инфраструктура, оценка риска будет также приблизительной. Для масштаба 1 : 50 000 вполне достаточно характеризовать уязвимость городской среды на основании качественного анализа плотности, возраста, функционального назначения, архитектурной и исторической ценности зданий и сооружений.

Проведенные исследования по оценке и картографированию геологического риска в Москве показывают насколько разнообразным может быть применение инструмента риск-анализа в инженерной геологии урбанизированных территорий. Для территории города результатом такого анализа чаще всего будет зонирование территории по уровню риска. Уровень геологического риска трудно оценить количественно, тем более для всей территории города. Но качественная сравнительная оценка тоже очень важна. Она

позволит выделять участки города, где необходимо вводить ограничение на использование территории из-за высокого уровня риска ущерба для существующей инфраструктуры или сравнивать альтернативные варианты протяженных транспортных проектов (например, метро) для того, чтобы избежать значительных экономических потерь из-за геологических опасностей.

Исследования выполнены частично при поддержке гранта РНФ, частично – в ходе выполнения госзадания по бюджетной теме (№ гос. регистрации 01201355205).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геоэкология Москвы: методология и методы оценки состояния городской среды / Отв. ред. Г.Л. Кофф, Э.А. Лихачева, Д.А. Тимофеев. М.: Медиа-пресс, 2006. 200 с.
2. Голодковская Г.А., Лебедева Н.И. Инженерно-геологическое районирование территории Москвы // Инженерная геология. 1984. № 3. С. 87–102.
3. Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожневникова И.А., Козлякова И.В. Карта дочетвертичных отложений как основа крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // Геоэкология. 2011. № 5. С. 399–410.
4. Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожневникова И.А., Козлякова И.В. Опасные геологические процессы и геоэкологическое состояние территории г. Москвы // Эколого-геологические проблемы урбанизированных территорий: матер.

- Второй Всерос. науч.-практ. конф., 26–27 ноября 2009, г. Екатеринбург 2009. С. 194–196.
5. *Кутепов В.М., Козлякова И.В., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожевникова И.А.* Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // *Геоэкология*. 2011. № 3. С. 215–226.
  6. Москва. Геология и город/ Под ред. В.И. Осипова, О.П. Медведева. М.: Московские учебники и картолитология, 1997. 399 с.
  7. *Осипов В.И.* Геологические условия градостроительного развития г. Москвы. М.: ЗАО “Мир”, 2008. 36 с.
  8. *Осипов В.И., Бурова В.Н., Карфидова Е.А.* Методические основы оценки уязвимости объектов капитального строительства урбанизированных территорий от опасных геологических процессов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2016. № 6. С. 32–36.
  9. *Осипов В.И., Еремина О.Н., Козлякова И.В.* Оценка экзогенных опасностей и геологического риска на урбанизированных территориях (обзор зарубежного опыта) // *Геоэкология*. 2017. № 3. С. 3–16.
  10. Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Крук, 2003. 320 с.
  11. Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы / Под ред. А.Л. Рагозина / Москомархитектура, ГУ ГО ЧС г. Москвы. М.: Изд-во ГУП НИИАЦ, 2002. 59 с.
  12. *Сергеев Е.М.* Геологический фундамент Москвы // *Город, природа, человек*. М.: Мысль, 1982. С. 109–142.
  13. *Clayton C.R.I.* Urban site investigation // In: *Engineering Geology for Tomorrow's Cities*. Culshaw, M.G., Reeves, H.J. et al., Eds., Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2009, 22. P. 125–141.
  14. *Culshaw M.G., Price S.J.* The 2010 Hans Cloos Lecture. The contribution of urban geology to the development, regeneration and conservation of cities // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2011. V. 70. № 3. P. 333–376.
  15. *Kalsnes B., Nadim F., Lacasse S.* Managing geological risk // In: *Geologically active*, Williams et al. (eds.). Proc. of the 11th IAEG Congress, Auckland, New Zealand, 5–10 September 2010, Taylor & Francis group, London, 2010. P. 111–126.
  16. *Knill J.* Core values: the first Hans-Cloos lecture // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2003. V. 62. № 1. P. 1–34.
  17. *Kozlyakova I., Eremina O., Anisimova N., Kozhevnikova I.* Study of geology and Carboniferous roof topography upon engineering geological mapping of Moscow territory. In: *Developments in Engineering Geology*. Eggers, M.J., Griffiths, J.S., Parry, S., Culshaw, M.G. (eds.). Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2016. V. 27. P. 45–53. [http://doi.org/doi 10.1144/EGSP27.410.1144/EG-SP27.4](http://doi.org/doi%2010.1144/EGSP27.410.1144/EG-SP27.4)
  18. *Kozlyakova I.V., Mironov O.K., Eremina O.N.* Engineering Geological Zoning of Moscow by the conditions for subsurface construction // In: *Proc. 12th IAEG Congress*, Turin, Italy. Springer, 2015. V. 5. P. 923–926.
  19. *Marchiori-Faria D.G., Ferreira C.J. et al.* Hazard mapping as part of civil defence preventive and contingency actions: a case study from Diadema, Brazil // *Engineering Geology for Tomorrow's Cities*, Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2009, CD-rom, paper no. 154.
  20. *Marker B.R.* Geology of megacities and urban areas // In: *Engineering Geology for Tomorrow's Cities*. Culshaw, M.G., Reeves, H.J. et al., Eds., Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2009, 22. P. 33–48.
  21. *Mora S.* Disasters should not be protagonists of Disaster Risk // In: *Geologically active*, Williams et al. (eds.). Proc. of the 11th IAEG Congress, Auckland, New Zealand, 5–10 September 2010, Taylor & Francis group, London, 2010. P. 89–110.
  22. *Osipov V.I.* Large-scale thematic geological mapping of Moscow area // *Engineering Geology for Society and Territory*. G. Lollino (eds.). Springer International Publishing Switzerland, 2014. V. 5. P. 11–16.
  23. *Pereyra F.X., Rimoldi H.* Geological and environmental aspects of the development of megacities: the case of Buenos Aires metropolitan area (AMBA), Argentina // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2003. V. 62. № 4. P. 431–435.
  24. *Ragozin A.L., Yolkin V.A.* Geological risks, formation and assessment in urbanized areas in Russia // In: *Engineering Geology for Tomorrow's Cities*. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2009, CD-rom, paper no. 282.
  25. *Zhang F., Yang Q., Jia X., Liu J., Wang B.* Land-use optimization by geological hazard assessment in Nanjing City, China // In: *Engineering Geology for Tomorrow's Cities*. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2009, CD-rom, paper no. 324.

## GEOLOGICAL RISK IN URBAN AREAS (ASSESSMENT AND MAPPING BY THE EXAMPLE OF MOSCOW)

I. V. Kozliakova<sup>a</sup>, O. N. Eremina<sup>a,#</sup>, and O. K. Mironov<sup>a</sup>

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

<sup>#</sup>*E-mail: sci-council@geoenv.ru*

The paper scrutinizes the approaches to geological risk assessment in urban areas. On the basis of assessing risk of economic losses produced by the impact of exogenous geological hazards in Moscow, it is proved that such an assessment should be performed separately for the entire city territory with already existing urban infrastructure and for the planned objects of urban engineering construction. The developed mapping procedures to a scale (1 : 100000–1 : 50000) are based on the qualitative comparative assessment of geological risk to be applied at the early stage of engineering geological survey. It is shown that for the city territory with the existing urban infrastructure, the main aim of mapping geological risk is distinguishing of areas that require special requirements to the engineering survey as well as imposing certain land-use constraints. For the particular objects of urban construction, the risk maps permit comparing the alternative variants of project solutions from the viewpoint of minimizing economic losses from geological hazards upon the construction and operation of buildings and engineering structures.

**Key words:** urban areas, geological risk assessment, exogenous geological hazards, engineering geological mapping, urban spatial planning

## REFERENCES

- Golodkovskaya, G.A., Lebedeva N.I. Engineering geological zoning of Moscow. *Inzhenernaya geologiya*, 1984, no. 3, pp. 87–102. (in Russian)
- Koff, G.L., Likhacheva, E.A., Timofeev, D.A. *Geoekologiya Moskvy: metodologiya i metody otsenki sostoyaniya gorodskoi sredy*. [Moscow geoecology: methods and procedure of urban environment assessment], Moscow, Media-Press, 2006, 200 p. (in Russian).
- Kutepov, V.M., Anisimova, N.G., Eremina, O.N., Kozhevnikova, I.A. and Kozlyakova, I.V. The map of pre-Quaternary deposits as a base for large-scale geological mapping of Moscow territory. *Geoekologiya*, 2011, no. 5, pp. 399–411. (in Russian)
- Kutepov, V.M., Anisimova, N.G., Eremina, O.N., Kozlyakova, I.V., and Kozhevnikova, I.A. *Opasnye geologicheskie protsessy i geoekologicheskoe sostoyanie territorii g. Moskvy* [Hazardous geological processes and geoecological conditions in Moscow]. *Materialy Vtoroi Vseross. Nauchno-prakticheskoi konferentsii "Ekologo-geologicheskie problemy urbanizirovannykh territorii"* 26–27 noyabrya 2009 g., Yekaterinburg [Proc. Second Sci.-Practical Conference on Ecological and Geological Problems in Urbanized Areas, November 26–27, 2009, Yekaterinburg] Yekaterinburg, 2009, pp. 194–196. (in Russian)
- Kutepov, V.M., Kozlyakova, I.V., Anisimova, N.G., Eremina, O.N., and Kozhevnikova, I.A. Assessment of karst and karst-suffosion hazard in the project of large-scale geological mapping in Moscow. *Geoekologiya*, 2011, no. 3, pp. 215–226. (in Russian)
- Moskva. *Geologiya i gorod* [Moscow. Geology and the City]. Osipov, V.I. and Medvedev, O.P., Eds., Moscow, Moskovskie uchebniki i kartolitografiya Publ., 1997, 399 p. (in Russian)
- Osipov, V.I. *Geologicheskie usloviya gradostroitel'nogo razvitiya Moskvy* [Geological conditions of Moscow urban development]. ZAO Mir, Moscow, 2008, 36 p. (in Russian)
- Osipov, V.I., Burova, V.N., Karfidova, E.A. Methodological principles of geohazard vulnerability evaluation of capital construction assets in urbanized areas. *Soil mechanics and foundation engineering*, 2017, vol. 53, issue 6, pp 420–425.
- Osipov, V.I., Eremina, O.N., Kozlyakova, I.V. Assessment of exogenous geohazards and geological risk in urban areas (review of foreign publications). *Geoekologiya*, 2017, no.3, pp.3-16 (in Russian)
- Prirodnye opasnosti Rossii. Otsenka i upravlenie prirodnymi riskami* [Natural hazards of Russia. Assessment and management of natural risks]. Ragozin A.L., Ed., Moscow, KRUK, 2003. 320 p. (in Russian)
- Rekomendatsii po otsenke geologicheskogo riska na territorii g. Moskvy* [Recommendations on geological risk assessment in Moscow territory]. Ragozin A.L., Ed., *Moskomarkhitektura, GU GO ChS g. Moskvy*. Moscow, GUP NIATs Publ., 2002. 59 c. (in Russian)
- Sergeev, E.M. Geological basement of Moscow. *Gorod, priroda, chelovek* [City, nature, man]. Moscow, Mysl, 1982, pp. 109–142 (in Russian)
- Clayton, C.R.I. Urban site investigation. *Engineering Geology for Tomorrow's Cities*. Culshaw, M.G., Reeves, H.J. Jefferson, I. and Spink, T.W., Eds., Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2009, no. 22, pp. 15–141.
- Culshaw, M.G. Price, S.J. The 2010 Hans Cloos Lecture. The contribution of urban geology to the development, regeneration and conservation of cities. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2011, vol. 70, no. 3, pp. 333–376.
- Kalsnes, B., Nadim, F., and Lacasse, S. Managing geological risk. *Geologically active. Proceedings of the 11th IAEG Congress, Auckland, New Zealand, 5–10 September 2010*, Williams et al., Eds., London Taylor & Francis group, 2010, pp. 111–126.
- Knill, J. Core values: the first Hans-Cloos lecture. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2003, vol. 62, no. 1, pp. 1–34.
- Kozlyakova, I., Eremina, O., Anisimova, N., and Kozhevnikova, I., Study of geology and Carboniferous roof topography upon engineering geological mapping of Moscow territory. *Developments in Engineering Geology*. Eggers, M.J., Griffiths, J.S., Parry, S., Culshaw, M.G. Eds., Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2016, vol. 27, pp. 45–53, <http://doi.org/10.1144/EGSP27.4>
- Kozlyakova, I.V., Mironov, O.K., and Eremina, O.N., Engineering Geological Zoning of Moscow by the conditions for subsurface construction. *Proceedings 12th IAEG Congress, Turin, Italy*. Springer, 2015, vol. 5, pp.923–926.

19. Marchiori-Faria, D.G., Ferreira, C.J. et al. Hazard mapping as part of civil defense preventive and contingency actions: a case study from Diadema, Brazil. *Engineering Geology for Tomorrow's Cities. IAEG 2006, 6–10 Sept. 2006*, CD-rom, 2009, paper no. 4–154.
20. Marker, B.R. Geology of megacities and urban areas. *Engineering Geology for Tomorrow's Cities*. Culshaw, M.G., Reeves, H.J. Jefferson, I. and Spink, T.W., Eds., Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2009, no. 22, pp. 33–48.
21. Mora, S., Disasters should not be protagonists of Disaster Risk. *Geologically active. Proceedings of the 11th IAEG Congress, Auckland, New Zealand, 5–10 September 2010*, Williams et al., Eds., London Taylor & Francis group, 2010, pp. 89–110.
22. Osipov, V.I., Large-scale thematic geological mapping of Moscow area. *Engineering Geology for Society and Territory*, vol. 5, G. Lollino et. al., Eds., Springer International Publishing, Switzerland, 2014, pp. 11–16.
23. Pereyra, F.X., Rimoldi, H. Geological and environmental aspects of the development of megacities: the case of Buenos Aires metropolitan area (AMBA), Argentina. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2003, vol. 62, no. 4, pp. 431–351.
24. Ragozin, A.L., Yolkin, V.A., Geological risks, formation and assessment in urbanized areas in Russia. *Engineering Geology for Tomorrow's Cities. IAEG 2006, 6–10 Sept.*, CD-rom, 2006, paper no. 282.
25. Zhang, F., Yang, Q., Jia, X., Liu, J., and Wang, B., Land-use optimization by geological hazard assessment in Nanjing City, China. *Engineering Geology for Tomorrow's Cities. IAEG 2006, 6–10 Sept. 2006*, CD-rom, 2006, paper no. 324.