

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4.042

ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ОБЪЕКТОВ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2018 г. В. Н. Булова^{1,*}, Е. А. Карфидова^{1,**}

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 10100 Россия

*E-mail: valentina_burova@mail.ru,

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

Поступила в редакцию 07.02.2018 г.

Рассмотрены и проанализированы основные методы оценок уязвимости объектов, подверженных воздействию опасных природных процессов, и определена специфика этих оценок на урбанизированных территориях. Предложены новые инженерно-экономические подходы к оценкам уязвимости объектов (зданий) урбанизированных территорий, основанные на использовании данных о нормативных обследованиях состояния этих объектов. В качестве основного показателя характеристики состояния (или его уязвимости) приняты относительные совокупные затраты на проведение обмерно-обследовательских работ оцениваемого объекта. Для семи различных сценариев формирования совокупных затрат на проведение обмерно-обследовательских работ построены графики их роста для кирпичных и панельных 5-этажных домов. Проведено сравнение изменения совокупных затрат на обмерно-обследовательские работы по сценариям, отличающимся различными категориями технического состояния зданий и различными категориями сложности: зданий, работ и инженерно-геологических условий. Исходя из допущения о том, что относительная уязвимость пропорциональна совокупным затратам на проведение обмерно-обследовательских работ, рассчитана относительная уязвимость зданий в зависимости от года эксплуатации. Разработанные подходы к оценкам уязвимости являются универсальными, оперативными и доступными.

Ключевые слова: уязвимость, техническое состояние, сложность зданий, сложность работ, обмерно-обследовательские работы, совокупные затраты, жизненный цикл

DOI: 10.1134/S0869780318040014

ВВЕДЕНИЕ

На территории крупных городов геологическая среда претерпевает значительные изменения в результате воздействия на нее высоких техногенных нагрузок вследствие концентрации промышленного, гражданского, административного, транспортного строительства и т.д., что в свою очередь приводит к значительным социально-экономическим потерям. Следовательно, урбанизированная территория это сложная природно-техническая система со своими закономерностями развития, обусловленными природными и техногенными факторами. Негативные последствия от воздействия опасных геологических процессов на объекты инфраструктуры урбанизированных территорий можно оценивать через вероятностные ущербы (риски) в материальном и (или) социальном выражении. Риск от опасных природных процессов на урбанизированных территориях можно в свою очередь оценивать через уязвимость различных объектов (реципиентов риска), характерных для крупных городов. В на-

стоящее время предлагаются различные методы оценки уязвимости определенного объекта от опасностей различного генезиса, но их применимость в определенных условиях не всегда возможна.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ

Основные методы, используемые для оценок уязвимости, относятся к эмпирическим, инженерно-экспертным, аналитическим и комбинированным [2, 3].

Применимость этих методов определяется масштабом исследований, доступностью и качеством экспериментального материала, возможностью построения адекватной модели, наличием квалифицированных специалистов-экспертов.

Эмпирический метод связан с обработкой данных о прошлых событиях, приведших к негативным последствиям в виде различных степеней повреждения объектов от конкретной опасности. Этот метод широко применяется для оценок уяз-

вимости объектов от землетрясений. Оценки уязвимости разрабатываются на основе законов разрушения зданий и сооружений, полученных из анализа и обобщения статистических материалов по разрушению жилых, общественных и промышленных зданий от воздействий поражающих факторов. Под законом разрушения объекта понимают зависимость между вероятностью его повреждения и интенсивностью проявления поражающего фактора (опасности, определенной интенсивности). Но в силу различных причин вероятность и степень повреждения объектов бывают разными. Один и тот же объект при воздействии на него опасности определенной интенсивности может получить повреждения различной степени – оказаться целым, либо получить *i*-ую степень разрушения. Таким образом для одного и того же объекта может рассматриваться не одна, а несколько степеней разрушения. Наиболее удобным видом представления данных об уязвимости объектов, является графический – так называемые графики законов разрушения, широко используемые при оценке ущерба и уязвимости от сейсмических воздействий, а также при техногенных воздействиях на объекты.

Экспертный метод может дать качественные результаты в тех случаях, когда можно собрать представительную группу специалистов по данному вопросу и хорошо организовать проведение опроса на основе специально разработанных анкет.

Аналитический метод наиболее применим в тех случаях, когда можно создать адекватную модель изучаемого явления (математическую, физическую и др.). Модель всегда представляет собой некую упрощенную схематизацию, поэтому важным моментом применения моделирования является оценка достаточности модели.

Комбинированный метод получения оценок уязвимости – попытка компенсировать недостаточность данных наблюдений, субъективность экспертного метода и дефицит возможности процедур аналитического моделирования путем объединения данных наблюдений и аналитических оценок. Комбинированный метод это применение любого из сочетаний перечисленных методов, например верификация результатов моделирования экспериментальными данными.

В настоящее время использование эмпирического метода для оценок уязвимости возможно для землетрясений, так как для этого процесса имеется достаточная база данных о последствиях его проявления не только в России, но и за рубежом. Для остальных опасностей необходимо использовать, на наш взгляд, комбинирование различных методов из-за отсутствия представительного ряда статистических данных о степени повреждения зданий и сооружений от воздействия на них опасных природных процессов.

СПЕЦИФИКА ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ ОБЪЕКТОВ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Исходя из определения общего понятия уязвимости, как свойства любого материального объекта частично или полностью утрачивать способность к выполнению своих естественных или заданных функций в результате его поражения процессом или явлением определенного генезиса, интенсивности и длительности воздействия, необходимо определить источник и объект опасности. Источники и объекты опасности тесно связаны между собой и подразделяются на девять основных групп: природный, социогенный, техногенный, природно-социальный, природно-техногенный, социоприродный, социотехногенный, техноприродный и техносоциальный [4].

На урбанизованных территориях, помимо отсутствия достоверных данных о повреждениях зданий и сооружений от природных опасностей, нет возможности определения дифференцированного источника опасности из-за специфики этих территорий.

На территории крупных городов природная среда серьезно нарушена, одновременно развивается большое количество различных геологических и инженерно-геологических процессов, оказывающих воздействия на различные объекты инфраструктуры города. Нередко один объект испытывает воздействие сразу нескольких процессов. К тому же, в соответствии с нормативными документами строительство объектов, расположенных в пределах территорий, подверженных воздействию опасных природных процессов, осуществляется с проведением защитных мероприятий, что должно приводить к сведению к минимуму воздействия опасного процесса на объект. Но, к сожалению, это не всегда так, известно много фактов, когда интенсивность опасных процессов на урбанизованных территориях увеличивается на порядок в результате техногенного вмешательства. Следовательно, источник опасности на урбанизованных территориях не может идентифицироваться, как чисто природный, согласно приведенной выше классификации, и, на наш взгляд, должен рассматриваться, как комплексный, состоящий из трех основных – природного, техногенного и социального.

Исходя из сказанного, можно сделать следующее предложение – уязвимость объекта, в частности здания определенного типа (материал, конструкция, этажность, возраст и другие характеристики), можно оценивать, опираясь на оценку инженерно-геологических условий территории, на которой расположено это здание, учитывающую совокупность природных и техногенных условий. Определить состояние объекта на текущий момент можно исходя из коэффициента из-

носа, который в первую очередь зависит от времени его эксплуатации [1].

Деформации зданий, как правило, обуславливаются действием нескольких факторов, одновременно их вызывающих, и нет четких критериев для выделения из них какого-то одного преобладающего. Оценка состояния (деформированности и отвечающей ей уязвимости) зданий чаще всего происходит визуально, путем фиксации раскрытости трещин и их дальнейшей типизации по величине раскрытости.

Таким образом, уязвимость существующих объектов не является величиной постоянной. Она закономерно изменяется во времени под влиянием различных природных и техногенных факторов. При этом величина этих изменений или реализованной уязвимости **для всех действовавших факторов** может быть всегда достаточно точно установлена на определенный момент времени в процессе контроля технического состояния зданий, который осуществляется путем периодических обследований. Такие обследования – обязательная практика при оценке физического износа и стоимости эксплуатируемых жилых зданий, процедуру которой на территории России регламентирует ВСН 53-86 (р)¹. Специально отметим здесь, что физический износ, установленный по указанному документу, представляет собой в терминологии риска реализованную экономическую уязвимость строительных объектов для всех природных и техногенных воздействий, которым они подверглись в процессе эксплуатации.

Экономическая уязвимость характеризует относительные (удельные) потери стоимости объекта в результате негативных воздействий любой природы. Она может быть установлена для проектируемых и строящихся зданий и сооружений в зоне возможного поражения определенным опасным природным процессом двумя основными способами:

- по результатам оценки актуальной (реализованной) экономической уязвимости объектов аналогичных или подобных по типу конструкций после подобных по интенсивности разрушающих воздействий;
- путем расчета возможных деформаций оцениваемого строительного объекта, обусловленных определенными по интенсивности воздействиями и превышающих предельно допустимые значения, установленные в проектной документации на строительство.

Во всех этих случаях экономическая уязвимость конкретных объектов для определенных опасных природных процессов (определенных

инженерно-геологических условий) оценивается через их возможные потери или соответствующие показатели физической уязвимости по формуле

$$V_e(H) = D_d(H)/D_e = \sum_{i=1}^{i=n} (N_i/N)K_{ei}, \quad (1)$$

где $V_e(H)$ – экономическая уязвимость здания или сооружения (объекта) для опасности H определенного генезиса и интенсивности (или определенных инженерно-геологических условий) (доли единицы); $D_d(H)$ – стоимость восстановления объекта после поражения опасностью H (руб.); D_e – стоимость объекта до поражения (руб.); N_i – размеры (объем, площадь или длина) поврежденной части i -го элемента объекта; N – размеры всего i -го элемента; K_{ei} – безразмерный коэффициент, характеризующий долю стоимости i -го элемента в общей стоимости объекта до его поражения; n – количество отдельных элементов в объекте.

При оценке экономической уязвимости строительных объектов для опасных природных процессов всегда следует учитывать, что их исходные стоимостные показатели определялись в разное время и должны быть приведены к единым на дату расчета. Еще одно важное для прогнозной оценки уязвимости обстоятельство связано с учетом ее реализованной составляющей для эксплуатируемых и длительно строящихся зданий и сооружений, особенно после их расконсервации. Уязвимость таких объектов для природной опасности H рекомендуется определять с учетом физического износа их несущих конструкций на момент оценки по формуле

$$V_c(H) = V_e(H) + W_s, \quad (2)$$

где $V_c(H)$ – экономическая уязвимость эксплуатируемого объекта для опасности H (доли единицы); $V_e(H)$ – начальная экономическая уязвимость этого объекта для опасности H , определенная без учета его износа по формуле (1); W_s – физический износ несущих конструкций объекта (основание, фундамент, наружные и внутренние стены, колонны и т.п.), являющийся обобщенным показателем реализованной в различных деформациях на момент оценки экономической уязвимости этого объекта для всех действовавших на него природных и техногенных опасностей за время строительства и эксплуатации. Такой износ рекомендуется устанавливать по результатам натурного обследования объекта или по данным Бюро технической инвентаризации (БТИ) по следующим формулам, установленным ВСН 53-86¹:

$$W_c = \sum_{i=1}^{i=n} (P_i/P_c)W_i, \quad (3)$$

¹ ВСН 53-86(р). Правила оценки физического износа жилых зданий. М.: ГОСГРАЖДАНСТРОЙ, 1985. 44 с. <http://www.gosthelp.ru/text/vsn5386rPravilaocenKifizi.html>

$$W_s = \sum_{i=1}^{i=m} W_c K_{ci}, \quad (4)$$

где W_c – физический износ отдельной конструкции, элемента или системы объекта, определяемый в долях единицы по результатам их обследования с использованием таблиц 1-71 ВСН-53-86(р) для зданий и по действующим ведомственным нормативно-методическим документам – для сооружений; P_i – размеры (площадь или длина) поврежденного участка конструкции, элемента или системы; P_c – размеры всей конструкции, элемента или системы; n – число поврежденных участков; W_i – физический износ участка конструкции, элемента или системы; K_{ci} – безразмерный коэффициент, характеризующий долю восстановительной стоимости отдельной конструкции, элемента или системы в общей восстановительной стоимости объекта; m – число отдельных конструкций, элементов или систем в объекте.

В силу значительных региональных и местных различий (иногда на порядок) в стоимости одних и тех же строительных и других объектов, значения экономической уязвимости для опасных природных процессов колеблются в еще больших пределах, чем соответствующие оценки физической уязвимости. Но они являются, по всей видимости, единственно возможными интегральными показателями как экономических, так и физических потерь сложных объектов локального уровня (зданий, сооружений и их систем в отдельных поселениях).

ИНЖЕНЕРНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ УЯЗВИМОСТИ

Теоретические предложения по оценке уязвимости очень часто трудно воплотить в реальность в силу самых различных причин, одна из которых, прежде всего, – ограниченный доступ к необходимой информации или ее недостаточность. Поэтому, на наш взгляд, весьма оправданно использовать данные, которые легко установить в соответствии с нормативными документами. Исходя из определения уязвимости, как степени повреждения объекта от воздействия на него определенной опасности, о чем было сказано выше, предлагаем учитывать оценки технического состояния зданий и сооружений, расположенных в различных природно-техногенных условиях в соответствии с нормативными документами².

В основе новых методических подходов оценок состояния (уязвимости) зданий рекомендуется использовать относительные экономические

показатели, отвечающие нормативам эксплуатационных затрат на обследование технического состояния здания. При этом *предлагается исходить из положения, что данные затраты пропорциональны относительной уязвимости на определенный момент времени.*

Выделяются следующие категории состояния зданий^{2,3}:

- нормативное техническое состояние,
- работоспособное техническое состояние,
- ограниченно-работоспособное техническое состояние,
- аварийное состояние.

Первое обследование технического состояния зданий и сооружений проводится не позднее, чем через 2 года после их ввода в эксплуатацию. В дальнейшем обследование технического состояния зданий и сооружений проводится не реже одного раза в 10 лет и не реже одного раза в 5 лет для зданий и сооружений или их отдельных элементов, работающих в неблагоприятных условиях (агрессивные среды, вибрации, повышенная влажность, сейсмичность района 7 и более баллов и др.). Для уникальных зданий и сооружений устанавливается постоянный режим мониторинга.

Для конструкций, зданий (сооружений), находящихся в нормативном техническом состоянии и работоспособном состоянии, эксплуатации при фактических нагрузках и воздействиях возможна без ограничений. При этом для конструкций, зданий (сооружений), находящихся в работоспособном состоянии, устанавливается требование **более частых периодических** обследований в процессе эксплуатации.

Таким образом, частота обследований зависит от категории технического состояния объекта оценки, а также расположения здания в определенных инженерно-геологических условиях.

Если по результатам оценки категория технического состояния здания (сооружения) соответствует ограниченно работоспособному состоянию или если при повторном измерении параметров здания (сооружения) результаты измерений различаются более чем на 10%, то техническое состояние такого здания (сооружения) подлежит обязательному **внеплановому обследованию.**

Обеспечение безопасной эксплуатации здания и соблюдение контроля его технического состояния при выполнении плановых (нормативных) обследований для поддержания здания в нормативно-техническом и/или работоспособном техническом состоянии на протяжении всего жизненного цикла здания, определяется величиной

² ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. “Правила обследования и мониторинга технического состояния” М.: Стандартинформ, 2010. 66 с. // <http://docs.cntd.ru/document/1200078357>

³ ВСН 57-88(р). Положение по техническому обследованию жилых зданий ГОСКОМАРХИТЕКТУРЫ. 1989. 42 с. // <http://mtsk.mos.ru/Handlers/Files.ashx/Download?ID=20042>

Таблица 1. Категории сложности зданий

Категории*	Характеристика категорий
I	Глубина заложения фундаментов – не превышает 1.5 м; в шурфах воды нет; разновидность кладки – 1–2. Конструктивные материалы стен – 1 вид. Перекрытия – простые расчетные схемы, симметричные нагрузки, прямоугольные грузовые площади. Здания жилые первого и второго периода индустриального строительства.
II	Глубина заложения фундаментов – 1.5–3.0 м; в шурфах вода с умеренным притоком, требуется периодическая откачка; разновидность кладки – 3. Конструктивные материалы стен – 2 вида. Перекрытия – сложные расчетные схемы, различные формы грузовой площади. Разнотипные помещения в пределах этажей. Здания общественные первого и второго периода индустриального строительства.
III	Глубина заложения фундаментов – превышает 3.0 м; в шурфах обильный приток воды; разновидность кладки – 4 и более видов. Конструктивные материалы стен – 3 и более вида. Перекрытия – безбалочные, рамная или рамно-связевая расчетная схема. Сборные железобетонные элементы предварительно напряжены. Изгибаемые элементы многопролетные с несимметричными нагрузками и неравными пролетами. Здание подвергалось реконструкции с перестройкой части основных несущих конструкций. Здания жилые и общественные с индивидуальными проектами второго и третьего периода индустриального строительства.

* Отнесение зданий ко II и III категориям осуществляется по наличию одного признака.

совокупных затрат на обмерно-обследовательские работы.

Применительно к исследуемой проблеме авторы при анализе эксплуатационных затрат (в части обязательных) ограничиваются только рассмотрением затрат на визуальные обмерно-обследовательские работы. Проведенный анализ нормативно-технических документов, регламентирующих безопасность, обследование и мониторинг технического состояния здания^{2,3,4} и ценообразование

⁴ Федеральный закон N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». 2009. 22 с. // http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/

Таблица 2. Категории сложности работ

Категории	Характеристика категорий
I	Визуальное экспертно-техническое обследование зданий. Составление паспортов зданий с выпуском чертежей, схем, планов и разрезов. Сверка с натурой имеющейся технической документации. Нормативное техническое состояние зданий.
II	Визуальное экспертно-техническое обследование зданий (выявление состава и конструктивных схем зданий, конструкций узлов сопряжения и примыкания конструкций и их элементов, фиксация дефектов конструкций и составление чертежей). Нормативное техническое состояние зданий.
III	Визуальное экспертно-техническое обследование зданий (выявление состава и конструктивных схем зданий, конструкций узлов сопряжения и примыкания конструкций и их элементов, фиксация дефектов конструкций и составление чертежей). Изучение эксплуатационной документации. Определение аварийных и наиболее опасных мест здания для подготовки противоаварийных охранных мер. Инструментальное обследование строительных конструкций с изготовлением чертежей, нанесение мест обрушения, гнили и повреждений на графический материал. Нормативное техническое состояние зданий, работоспособное техническое состояние, ограниченно-работоспособное техническое состояние.

в проектном комплексе^{2,5}, позволил выделить основные составляющие формирования совокупных затрат: соотношение стоимости единичных затрат с категориями сложности зданий и категориями сложности работ, периодичность плановых обследований.

Характеристики категории сложности зданий и работ приведены в табл. 1 и 2, составленных с использованием таблиц 1, 2 ГОСТа 31937–2011. Единичные затраты на обмерно-обследовательские работы здания находятся в прямой зависимости от категории сложности здания.

⁵ ГОСТ 31937–2011 ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и оценке соответствия в строительстве (МНТКС). 2012. 89 с. // https://www.spbgasu.ru/upload-files/users/iastahov/norm/GOST_31937-2011_.pdf

Таблица 3. Характеристика сценариев формирования совокупных относительных затрат на обмерно-обследовательские работы

Сценарий	Период нормативного жизненного цикла					Период сверхнормативного жизненного цикла					Всего обследований
	Состояние	Периодичность мероприятия	Категория сложности		Число обследований	Состояние	Периодичность мероприятия	Категория сложности		Число обследований	
			здания	работ				здания	работ		
I	НТС*	каждые 10 лет	1	1	10	РТС**	каждые 10 лет	1	1	1	11
II	НТС	каждые 5 лет	1	1	16	РТС	каждые 5 лет	1	1	2	18
III	НТС	каждые 10 лет	2	2	10	РТС	каждые 10 лет	2	2	1	11
IV	НТС	каждые 5 лет	2	2	16	РТС	каждые 5 лет	2	2	2	18
V	НТС	каждые 10 лет	2	2	10	РТС	каждые 5 лет	2	3	2	18
VI	НТС	каждые 5 лет	2	2	16	РТС	через 2 года	2	3	4	20
VII	НТС	каждые 5 лет	2	2	16	ОРТС***	через 1 год	3	3	6	22

* НТС – нормативное техническое состояние, **РТС – работоспособное техническое состояние, ***ОРТС – ограниченно-работоспособное техническое состояние.

Рост единичных затрат с увеличением сложности работ превышает рост единичных затрат с увеличением сложности здания. Единичные затраты на обмерно-обследовательские работы здания находятся в обратной зависимости от высоты здания. Единичные затраты на обмерно-обследовательские работы определяются по базовой цене на 100 м³ здания (в рублях).

Расчет совокупных затрат при обмерно-обследовательских работах предлагается проводить с использованием относительных коэффициентов цен, соответствующих отношению действительных затрат при определенном сценарии к действительным затратам при проведении обмерно-обследовательских работ I категории сложности здания и работ^{6,7}. На рис. 1 показана диаграмма соотношения цен на обмерно-обследовательские работы.

Предлагается рассмотреть семь различных сценариев формирования совокупных затрат на обмерно-обследовательские работы, наиболее характерные для крупных городов (табл. 3). **Сценарии** определяются соотношением категории сложности здания, его расположения в пределах различных природных условий, категории сложности работ и соответствующей им частоте обследований и стоимости единичных расходов.

⁶ СБЦ МРР-3.2.05.06-12 на работы по обследованию и мониторингу технического состояния строительных конструкций и инженерного оборудования зданий и сооружений, в том числе сооружений метрополитена, попадающих в зону влияния строительных объектов, осуществляемые с привлечением средств бюджета города Москвы. 2012. 70 с. // <http://files.stroyinf.ru/data2/1/4293782/4293782655.htm>

⁷ СБЦП 81-02-25-2001 ГСН Справочник базовых цен на обмерные работы и обследования зданий и сооружений. Москва. 2016. 29 стр. // <http://files.stroyinf.ru/Data1/6/6804/>

Также принимаются условия о проведении капитального ремонта здания на половине времени жизненного цикла и обследования после окончания нормативного жизненного цикла. Время формирования совокупных затрат включает два периода жизненного цикла: нормативного и сверхнормативного.

1. Первый сценарий (I) – совокупные затраты формируются из обследований, относящихся к I категории сложности работ, зданий I категории сложности, расположенных в пределах благоприятных природных (инженерно-геологических) условий. Данный сценарий предполагает сохранение нормативного технического состояния здания на протяжении жизненного цикла эксплуатации и изменение его в периоде сверхнормативного жизненного цикла на работоспособное



Рис. 1. Диаграмма соотношения цен на обмерно-обследовательские работы. Категория сложности зданий: а – I, б – II, в – III.

техническое состояние. Категории сложности зданий и работ остаются неизменными.

2. Второй сценарий (II) – отличается от первого расположением здания в неблагоприятных природных (инженерно-геологических) условиях, что обязывает проводить обследования чаще.

3. Третий сценарий (III) – совокупные затраты формируются из обследований, относящихся ко II категории сложности работ, зданий II категории сложности, расположенных в пределах благоприятных природных (инженерно-геологических) условий. Данный сценарий предполагает сохранение нормативного технического состояния здания на протяжении жизненного цикла эксплуатации и изменение его в периоде сверхнормативного жизненного цикла на работоспособное техническое состояние. Категории сложности зданий и работ остаются неизменными.

4. Четвертый сценарий (IV) – отличается от третьего расположением здания в неблагоприятных природных (инженерно-геологических) условиях, что обязывает проводить обследования чаще.

5. Пятый сценарий (V) – совокупные затраты формируются из обследований, относящихся ко II категории сложности, зданий II категории сложности, расположенных в пределах благоприятных природных (инженерно-геологических) условий. Данный сценарий предполагает сохранение нормативного технического состояния здания на протяжении жизненного цикла эксплуатации и изменение его в периоде сверхнормативного жизненного цикла на работоспособное техническое состояние и III категорию сложности работ.

6. Шестой сценарий (VI) – формирование совокупных затрат в жизненном цикле аналогично пятому сценарию в неблагоприятных природных (инженерно-геологических) условиях.

7. Седьмой сценарий (VII) – формирование совокупных затрат аналогично шестому сценарию на протяжении жизненного цикла. По данному сценарию предполагается сохранение нормативного технического состояния здания на протяжении жизненного цикла эксплуатации и его изменение в периоде сверхнормативного жизненного цикла на ограниченно-работоспособное техническое состояние. В седьмом сценарии в период сверхнормативного жизненного цикла рассматриваются здания после реконструкции III категории сложности и III категории сложности работ.

Для выбранных сценариев (I–VII) построены графики роста относительных затрат с нарастающим итогом для кирпичных и панельных 5-этажных домов на период, превышающий регламентирующие сроки эксплуатации и равный 1.25 жизненного цикла – $(y_1 - y_7)$ (рис. 2).

Соответственно для кирпичных и панельных зданий это 150 и 88 лет. Первый и второй сценарии (I категория сложности здания и I категория сложности работ) характерны для зданий жилищного фонда первого этапа индустриального строительства. Третий и четвертый сценарии (здания II категории сложности и II категории сложности работ) характерны для зданий общественного назначения первого и второго периода индустриального строительства: школы, поликлиники, больницы, кинотеатры. Пятый, шестой и седьмой сценарии также характерны для общественных зданий первого и второго периодов индустриального строительства.

В табл. 4 представлены характеристики линий тренда совокупных затрат на обследование по 7-ми сценариям для рассматриваемых зданий, где:

ЖЦ – жизненный цикл; СЖЦ – сверхнормативный жизненный цикл; y – расчетные значения линии тренда совокупных относительных затрат; x – год эксплуатации здания. Жирным шрифтом выделены сценарии, характерные для зданий, расположенных в неблагоприятных природных (инженерно-геологических) условиях.

Расчетные коэффициенты регрессии для уравнений линии тренда превышают значение 0.90. Ежегодный рост в период жизненного цикла рассчитывается как отношение среднего значения роста совокупных затрат к продолжительности нормативного жизненного цикла для сценариев I–V. Ежегодный рост в период сверхнормативного ЖЦ для сценариев VI–VII рассчитывается как производная уравнений линии тренда (y_6 и y_7) совокупных относительных затрат. В шестом сценарии ежегодный рост в период сверхнормативного жизненного цикла определяется по уравнениям прямой, в седьмом – по уравнению полинома второй степени.

Из представленных графиков роста относительных затрат на обмерно-обследовательские работы по различным сценариям за рассматриваемый период времени видно, что наибольший рост этих затрат характерен для кирпичных зданий. Максимальных значений он достигает по 7 сценарию, характеризующему изменением категории состояния зданий и работ в сверхнормативный период, как для кирпичных, так и панельных зданий и, соответственно равен 99.92 и 60.65 относительных единиц.

Целесообразно сравнить относительные совокупные затраты на обмерно-обследовательские работы по сценариям, характеризующимся как однотипностью категорий сложности зданий и работ на протяжении всего рассматриваемого периода для кирпичных и панельных зданий, расположенных в различных по сложности инженерно-геологических условиях, так и меняющихся

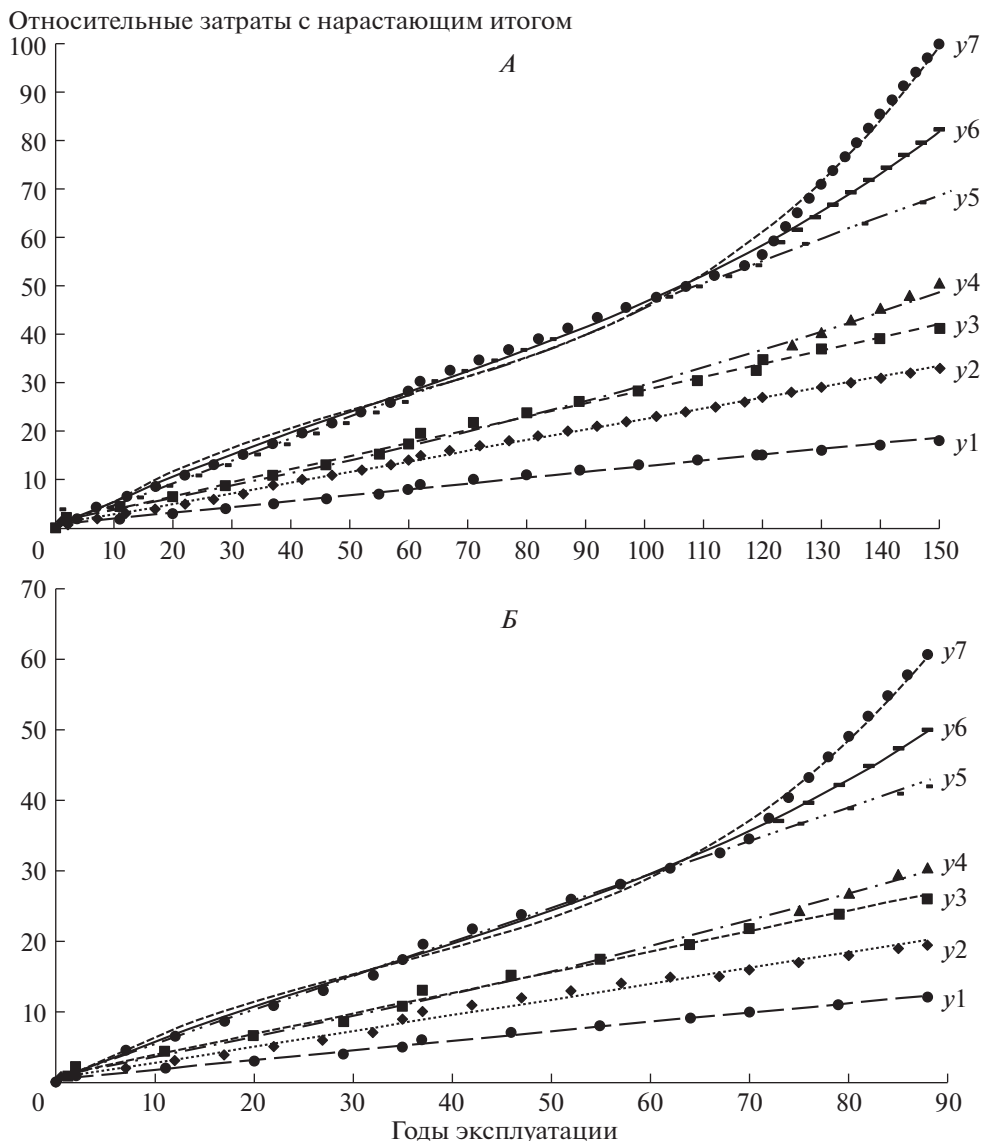


Рис. 2. Графики роста относительных затрат с нарастающим итогом в течение срока эксплуатации по 7-ми сценариям (y1 – y7) для кирпичных (А) и панельных (Б) зданий.

категории сложности зданий и работ. Выбрано 5 различных вариантов (табл. 5).

Увеличение затрат при расположении зданий в неблагоприятных инженерно-геологических условиях и неизменности категорий сложности зданий и работ на протяжении всего рассматриваемого периода практически одинаково для кирпичных и панельных зданий и составляет 1.6–1.8 раз (сценарии I–II и III–IV). При изменении категории сложности работ в сверхнормативный жизненный цикл для зданий, расположенных в благоприятных инженерно-геологических условиях, увеличение затрат составляет 1.2 раза (сценарии III–V). Когда же происходит изменение категорий сложности работ при условии расположения зданий в неблагоприятных инженерно-

геологических условиях (сценарии III–VI), увеличение затрат составляет 1.9–2.0 раз, а при изменении категорий зданий и работ (сценарии III–VII) – 2.3–2.4 раза. Анализ этих данных позволяет сделать вывод о том, что при формировании совокупных затрат для обмерно-обследовательских работ зданий любой категории сложности, наибольшее влияние оказывает сложность инженерно-геологических условий. Изменение категорий сложности зданий и работ имеет подчиненное значение.

Ежегодный рост совокупных затрат на обмерно-обследовательские работы за период ЖЦ для всех сценариев подтверждает утверждение, сделанное на основе анализа совокупных затрат за весь период (см. табл. 5). В период сверхнорма-

Таблица 4. Характеристики линий тренда и темпов роста совокупных затрат на обследование по 7-ми сценариям

№	Уравнения линий тренда		Ежегодный рост в период			
			ЖЦ		СЖЦ	
	для зданий		для зданий		для зданий	
	кирпичных	панельных	кирпичных	панельных	кирпичных	панельных
I	$y_1 = 0.1198x + 0.7404$	$y_1 = 0.1346x + 0.4488$	0.13	0.14	0.10	0.11
II	$y_2 = 0.2196x + 0.5653$	$y_2 = 0.2229x + 0.5863$	0.23	0.23	0.23	0.19
III	$y_3 = 0.2732x + 1.0984$	$y_3 = 0.2922x + 0.9738$	0.29	0.31	0.22	0.24
IV	$y_4 = 0.4574x + 0.1867$	$y_4 = 0.4776x + 0.7683$	0.47	0.49	0.43	0.41
V	$y_5 = 0.0007x^2 + 0.207x + 1.8328$	$y_5 = 0.0009x^2 + 0.2494x + 1.1175$	0.29	0.31	0.52	0.49
VI	$y_6 = 2 \cdot 10^{-5}x^3 - 0.0031x^2 + 0.5922x - 0.224$	$y_6 = 5 \cdot 10^{-5}x^3 - 0.0051x^2 + 0.6063x + 0.15$	0.47	0.49	0.86	0.86
VII	$y_7 = 5 \cdot 10^{-5}x^3 - 0.0085x^2 + 0.8232x - 1.8515$	$y_7 = 0.0001x^3 - 0.0141x^2 + 0.8276x - 0.6393$	0.47	0.49	1.45	1.45

Таблица 5. Увеличение совокупных затрат по выбранным сценариям

Сценарии	Превышение затрат (в число раз)					
	за весь период		ежегодного роста за:			
			ЖЦ		СЖЦ	
	кирпичные	панельные	кирпичные	панельные	кирпичные	панельные
I–II	1.8	1.6	1.8	1.6	2.3	1.7
III–IV	1.7	1.6	1.6	1.6	1.9	1.7
III–V	1.2	1.2	1.0	1.0	2.4	2.0
III–VI	2.0	1.9	1.6	1.6	3.9	3.6
III–VII	2.4	2.3	1.6	1.6	6.6	6.0

тивного жизненного цикла картина меняется. Темпы роста затрат резко возрастают, особенно для сценариев с изменением категорий сложности зданий и работ. Для сценариев III–VI и III–VII темпы роста составляют 3.6–3.9 и 6.0–6.6 соответственно. Такое резкое увеличение темпов роста затрат ставит вопрос о целесообразности дальнейшей эксплуатации зданий.

Исходя из общего представления об увеличении уязвимости зданий во времени и соответствующем росте материальных затрат, связанных с поддержанием здания в нормативном техническом состоянии, предлагается соотносить значения относительных совокупных затрат на обмерно-обследовательские работы на определенный период эксплуатации зданий со значениями относительной уязвимости [3]. При этом необходи-

мо использовать следующее допущение – максимальная величина итоговых затрат по каждому сценарию соответствуют относительной полной уязвимости здания, равной 1. Тогда относительную уязвимость в определенный год эксплуатации можно определить по формуле

$$Y_t = OZ_t / OZ_{\max}, \quad (5)$$

где Y_t – относительная уязвимость за определенный период эксплуатации (t); OZ_t – относительные затраты с нарастающим итогом за определенный период эксплуатации (t); OZ_{\max} – максимальные относительные итоговые затраты за рассматриваемый период по определенному сценарию.

Согласно проведенным расчетам по предложенной формуле построены графики относи-

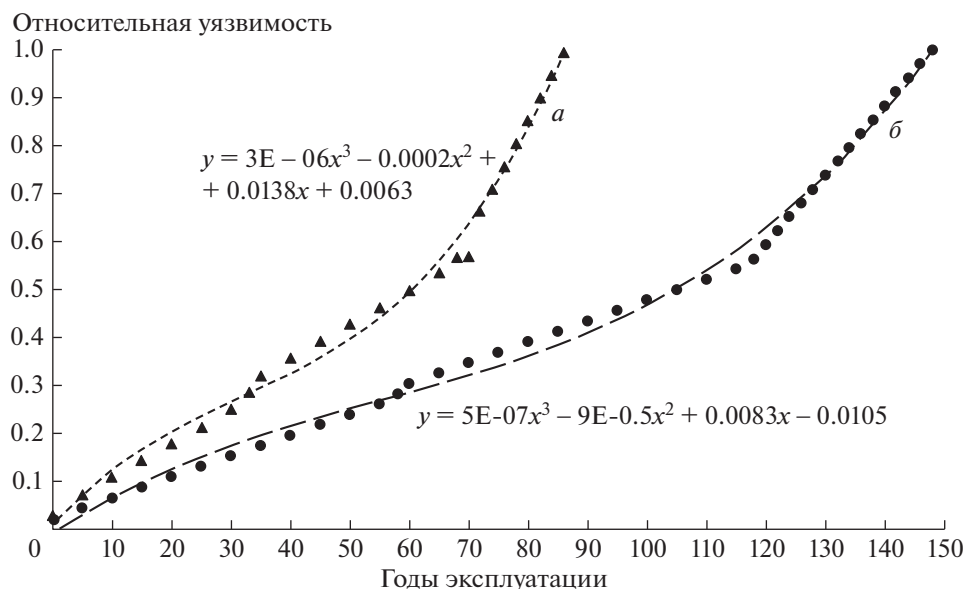


Рис. 3. Относительная уязвимость панельных (а) и кирпичных (б) 5-этажных зданий по сценарию VII (у7).

тельной уязвимости по VII сценарию (у7) для панельных и кирпичных зданий (рис. 4). Очевидно, что уязвимость кирпичных зданий на любой период эксплуатации значительно меньше, чем для панельных зданий (см. рис. 3), это предопределено наибольшими совокупными затратами на обмерно-обследовательские работы на всем протяжении срока эксплуатации кирпичных зданий.

Аналогичные расчеты относительной уязвимости и построение графиков производятся для любых зданий и условий, что оперативно позволяет оценивать уязвимость и переходить к дальнейшим оценкам риска потерь.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные подходы универсальны, оперативны и доступны, так как при оценках уязвимости применяются нормативные данные, открытые для использования.

2. Предлагаемый подход к оценке уязвимости зданий (относительных значений) на урбанизированной территории, базирующийся на положении о соответствии относительных совокупных затрат на обмерно-обследовательские работы состоянию здания, учитывает:

– метрические и инженерно-экономические характеристики здания (высоту, объем, категорию сложности, категорию технического состояния, период эксплуатации, категорию сложности производимых работ),

– количество обследований за период эксплуатации здания (в зависимости от продолжительности жизненного цикла),

– расположение здания в благоприятных или неблагоприятных инженерно-геологических условиях.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 16-17-00125 “Оценка риска опасных природных процессов на урбанизированных территориях”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов В.И., Бурова В.Н., Карфидова Е.А. Формирование сведений о геоэкологических условиях в границах кадастрового деления территории города Москвы // Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций. Вып. 17: М: РУДН, 2015. С. 76–82.
2. 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.
3. Рагозин А.Л., Бурова В.Н. и др. Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. М.: Изд-во “КРУК”, 2003. Т. 6. 320 с.
4. Рагозин А.Л. Общие положения оценки и управления природным риском // Геоэкология. 1999. № 5. С. 417–429.

VULNERABILITY ASSESSMENT OF ENGINEERING STRUCTURES IN URBAN AREAS

V. N. Burova^{a,#} and E. A. Karfidova^{a,##}

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

[#]*E-mail: valentina_burova@mail.ru,*

^{##}*E-mail: e.karfidova@yandex.ru*

The main methods for assessing the vulnerability of engineering structures (buildings) in urbanized areas, including those affected by hazardous natural processes, are considered and analyzed. New engineering and economic approaches are proposed for assessing the vulnerability of buildings, based on the use of the Inspection Regulations and monitoring of their technical condition. The relative costs of carrying out the inspection work of the assessed object are taken as the main indicator of the building's vulnerability. Growth graphs of the formation of a cumulative costs for carrying out inspection work for brick and panel five-story houses were built for seven different scenarios, differing in the category of technical condition of the building and the categories of complexity of the building, complexity of inspection works and complexity of engineering-geological conditions. Proceeding from the assumption that a relative vulnerability is proportional to the total costs of conducting all inspection works, the relative vulnerability of buildings is calculated for any period of operation. The developed approaches to the vulnerability assessment are universal, operational and available.

Key words: *vulnerability, categories of the technical condition of building, category of building's complexity, category of work complexity, inspection and survey work, total costs, life cycle*

REFERENCES

1. Osipov, V.I., Burova, V.N., Karfidova, E.A. Formation of data on geoecological conditions within the boundaries of cadastral division of the city of Moscow. *Sergeevskie chteniya. Inzhenerno-geologicheskie i geoekologicheskie problem gorodskikh aglomeratsii. Vyp.17* [Proc. Sci. conference in commemoration of acad. Sergeev. Engineering geological and geoenvironmental problems in urban areas. Issue 17], Moscow, RUDN Publ., 2015, pp. 76–82. (in Russian)
2. 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, no. 6, pp. 421–425
3. Ragozin, A.L., Burova, V.N. et al. *Prirodnye opasnosti Rossii. Otsenka i upravlenie prirodnymi riskami* [Natural hazards of Russia. Assessment and management of natural risks]. Moscow, KRUK Publ., 2003, vol. 6, 320 p. (in Russian)
4. Ragozin, A.L. *Obshchie polozheniya otsenki i upravleniya prirodnymi riskov* [General issues of assessment and management of natural risks]. *Geoekologiya*, 1999, no. 5, pp. 417–429. (in Russian)