

УДК 551.4.042

DOI 10.21661/r-471996

*B.N. Бурова*

## **ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ЗДАНИЙ ДЛЯ ОПОЛЗНЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Аннотация: в данной статье рассмотрены принципы оценки уязвимости зданий от оползней на основе имитационного моделирования. Обоснованы подходы к интерпретации результатов такого моделирования для оценок уязвимости. Проанализированы данные моделирования для различных вариантов воздействия оползней на здания разных конструкций. Построены кривые уязвимости зданий от оползней разного размера. Значения уязвимости могут быть использованы при оценках риска в составе инженерно-геологических изысканий и других видов работ.*

*Ключевые слова: оползни, риск-анализ, уязвимость, имитационное моделирование, принципы моделирования, интерпретация результатов, оценка уязвимости.*

*V.N. Burova*

## **ASSESSING THE VULNERABILITY OF BUILDINGS TO LANDSLIDES ACCORDING TO THE SIMULATION RESULTS**

*Abstract: this article describes the principles of assessing the vulnerability of buildings from landslides based on simulation. Approaches to the interpretation of the results of such modeling for vulnerability assessments are substantiated. The analysis of simulation results for different variants of landslides impact on buildings of different structures is carried out. Curves of vulnerability of buildings from landslides of different sizes are constructed. Vulnerability values can be used in risk assessments as part of engineering-geological surveys and other types of work.*

*Keywords: landslides, risk analysis, vulnerability, imitation modeling, the principles of modeling, interpretation of results, vulnerability assessment.*

## *Введение*

Оценка уязвимости различных объектов от воздействия на них опасных природных процессов является одной из составляющих частей риска-анализа, позволяющего определять потери в различных средах и использовать эти данные в политике, направленной на их уменьшение.

Проблема количественной оценки уязвимости объектов от опасных экзогенных геологических процессов до настоящего времени остается не решенной полностью и привлекает все большее внимание специалистов во всем мире. Одним из путей решения данной задачи является использование данных имитационного моделирования. Как правило такое моделирование проводится для уже произошедших событий, по которым имеется фактический материал, достаточный для построений функций уязвимости [4]. Имитационной моделью называют специальный программный комплекс, который позволяет имитировать природный процесс и его воздействие на исследуемый объект. Результатом интерпретации данных имитационного моделирования являются кривые уязвимости для выбранного источника опасности и объекта. Такой подход позволяет в дальнейшем получить прогнозные количественные значения уязвимости объектов при различных воздействиях.

В данной статье представлены результаты воздействия оползней (источник опасности) на жилые здания (объект опасности) с различными конструктивными характеристиками, полученными в результате имитационного моделирования.

Оползни являются наиболее широкораспространенным экзогенным геологическим процессом на территории России. Более 50% городов подвержены воздействию оползней, что провоцирует значительные экономические потери.

*Принципы имитационного моделирования.* Механизмы воздействия оползней на объекты весьма различны и зависят от характеристики и расположения оползня по отношению к объекту. Воздействие оползня на объект можно рассматривать, как внезапный динамический удар, либо нарастающее статическое давление. Очень важным является расположение оползня относительно объекта. Выделяются две основные схемы: а) оползень локализуется выше объекта по

склону и воздействует на объект извне, оказывая на объект сдвигающее и сдавливающее усилие; б) оползень образуется в пределах сжимаемой толщи основания объекта и производит растягивающее, сдвигающее усилие, а также вызывает оседание и наклон. Другим важным моментом представляется соотношение размеров объекта и оползня. Существуют критические значения отношения размеров оползня ( $R_{on}$ ) (площадь, объем, вес) и объекта ( $R_{ob}$ ).

$$r_{kp} = R_{on} / R_{ob}.$$

При превышении критического значения уязвимость объекта всегда равна 1. Все эти аргументы учтены при оценке уязвимости жилых зданий с использованием имитационного моделирования воздействия оползневого процесса.

*Характеристика программного инструмента имитационного моделирования.* В данной работе представлены данные моделирования воздействия оползня на здание с использованием системы автоматического проектирования PLAXIS 3D. Эта система предназначена для комплексных расчётов напряжённо-деформированного состояния и устойчивости геотехнических объектов различного назначения методом конечных элементов в условиях пространственной задачи. Этот программный комплекс позволяет дать расчётное обоснование проектируемых сооружений для стадий строительства, эксплуатации и реконструкции. Программа PLAXIS 3D эффективно решает сложные геотехнические задачи современного высокотехнологичного строительства, а также может производить моделирование работы строительных конструкций и их взаимодействия с грунтом при воздействии дополнительных нагрузок, спровоцированных воздействием оползней (или других опасностей) на объект.

При воздействии опасных природных процессов, в том числе и оползней, на жилые здания возникают дополнительные вертикальные и горизонтальные перемещения основания и фундамента, что значительно изменяет напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций существующего здания. Программа PLAXIS 3D дает возможность получить значения дополнительных осадок оснований и фундаментов в результате воздействия оползней на здания, что позволяет в дальнейшем выявить соотношение между величинами

дополнительных осадок фундаментов и степенью деформирования зданий или их уязвимостью.

#### *Характеристика объектов и варианты имитационного моделирования*

При проведении моделирования параметры здания и грунтового основания выбирались наиболее типичными для Центральной России. Грунтовое основание выбрано однородным, линейно- и нелинейно-деформируемым. В качестве объекта воздействия опасных природных процессов рассмотрено типовое жилое 16-ти этажное здание с различными конструктивными характеристиками: с полным каркасом; с неполным каркасом; бескаркасные с различными типами фундаментов – столбчатым, ленточным и из перекрестных лент.

Также при постановке задачи были рассмотрены различные схемы воздействия оползней на здание, о которых упоминалось выше.

Было проведено моделирование по следующим вариантам:

1. Здание с полным каркасом, фундамент столбчатый, оползень, размером 2 м под угловым фундаментом.
2. Здание с полным каркасом, фундамент столбчатый, оползень, размером 5 м под угловым фундаментом.
3. Здание с полным каркасом, фундамент столбчатый, оползень, размером 10 м под угловым фундаментом.
4. Здание с полным каркасом, фундамент столбчатый, оползень, размером 15 м под угловым фундаментом.
5. Здание с полным каркасом, фундамент столбчатый, оползень, размером 15 м под подошвой трех центральных фундаментов.
6. Здание с неполным каркасом, фундамент столбчатый и ленточный, оползень, размером 5 м под углом фундамента.
7. Здание с неполным каркасом, фундамент столбчатый и ленточный, оползень, размером 15 м под углом фундамента.
8. Здание с неполным каркасом, фундамент столбчатый и ленточный, оползень, размером 15 м под центральной частью фундамента.

9. Здание без каркаса, фундамент в виде перекрестных лент, оползень, размером 5 м под углом фундамента.

10. Здание без каркаса, фундамент в виде перекрестных лент, оползень, размером 15 м под углом фундамента.

11. Здание без каркаса, фундамент в виде перекрестных лент, оползень, размером 15 м под центральной частью фундамента.

12. Здание с полным каркасом, фундамент столбчатый, оползень шириной 5 м и распределительной нагрузкой 50 кПа на угловую колонну здания.

13. Здание с полным каркасом, фундамент столбчатый, оползень шириной 5 м и распределительной нагрузкой 250 кПа на угловую колонну здания.

14. Здание с полным каркасом, фундамент столбчатый, оползень шириной 5 м и распределительной нагрузкой 500 кПа на угловую колонну здания.

15. Здание с полным каркасом, фундамент столбчатый, оползень шириной 10 м и распределительной нагрузкой 50 кПа на две центральные колонны здания.

16. Здание с полным каркасом, фундамент столбчатый, оползень шириной 10 м и распределительной нагрузкой 250 кПа на две центральные колонны здания.

17. Здание с полным каркасом, фундамент столбчатый, оползень шириной 10 м и распределительной нагрузкой 500 кПа на две центральные колонны здания.

*Результаты моделирования.* В результате проведенного моделирования были получены значения дополнительных осадок оснований и фундаментов, дополнительные относительные разности осадок по осям здания и дополнительное горизонтальное перемещение.

Полученные данные сравнивались с предельными допустимыми дополнительными деформациями для зданий различных конструктивных особенностей и категорий состояния конструкций в соответствии с СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07 – 85\*. ОАО «НИЦ «Строительство» [3]. Для каждой категории состояния конструкций допускаются определенные значения дополнительных осадок зданий [1; 2]. Для

зданий относящихся к третьей категории состояния конструкций это 2 см, ко второй категории – 3 см и для зданий 1 категории состояния конструкций – 5 см.

Таблица 1

## Результаты имитационного моделирования

Варианты моделирования	Дополнительные изменения, мм	
	дополнительная осадка	дополнительная относительная разность осадок
1	22,36	
2	23,8	0,002162
3	31,9	
4	36,8	0,004562
5	25,8	0,002764

Анализ результатов моделирования показал, что наибольшие значения дополнительных осадок наблюдались у здания с полным железобетонным каркасом и столбчатым фундаментом (варианты 1–5) (табл. 1). В зависимости от категории состояния конструкций и части здания, под которым образовался локальный оползень, могут наблюдаться ситуации, при которых дальнейшая эксплуатация здания без принятия соответствующих мер невозможна. Во всех остальных случаях значения дополнительных осадок, дополнительной относительной разности осадок по осям здания и дополнительного перемещения не превышают допустимых значений. У зданий с фундаментами, имеющими жесткие горизонтальные связи (ленточный и перекрестный – варианты 6–17), дополнительные осадки не выходят за пределы допустимых, даже при оползнях значительных размеров. Это происходит из-за того, что рамная конструкция фундамента принимает на себя дополнительные вертикальные перемещения и перераспределяет их внутри конструкции. Дополнительная осадка здания на столбчатом фундаменте практически в три раза больше, чем на ленточном и перекрестном.

*Интерпретация результатов моделирования.* Одной из самых важных задач анализа результатов моделирования является выявление соотношений между величинами дополнительных осадок фундаментов и степенью деформирования зданий или их уязвимостью. Основываясь на допущении, что износ конструкций возрастает пропорционально увеличению дополнительной осадки,

кривую аппроксимирующую обозначенную зависимость, можно использовать для построения кривой уязвимости здания.

По результатам моделирования были построены кривые зависимости дополнительной осадки фундамента от воздействия оползней различных размеров, расположенных под углом здания, превышающей допустимые значения и приводящей к деформированию фундаментов зданий, а соответственно и их уязвимости (рис. 1).

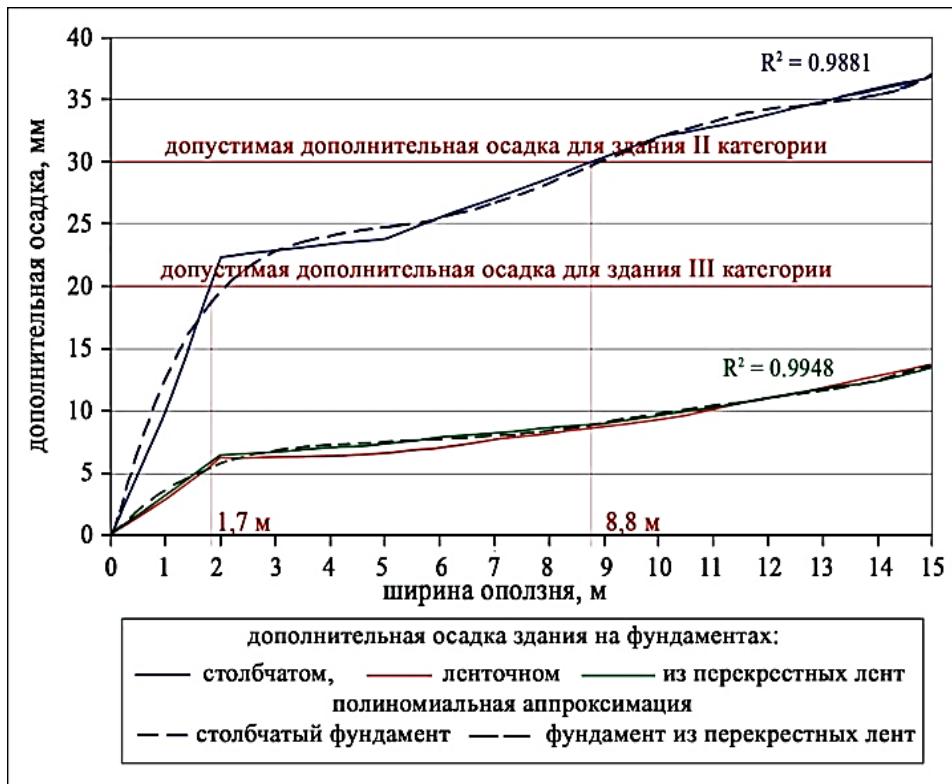


Рис. 1. Зависимость дополнительной осадки фундамента при возникновении под углом здания оползня различных размеров

Превышение допустимых дополнительных осадок для зданий III категории состояния конструкций, происходит при значениях ширины оползня выше 1,7 м. Для здания II категории состояния конструкций критическое значение ширины оползня, при котором дополнительные осадки превышают допустимые значения, составляет 8,8 м. Из этого можно сделать, с некоторыми допущениями, следующие выводы. Прежде всего, при полученных значениях размера оползня (1,7 и 8,8 м), воздействующего под углом фундамента рассматриваемого здания, происходит его переход из одной категории состояния в другую.

Учитывая, что каждая категория состояния отличается увеличением износа конструкций на 20% (Приложение 4 «Рекомендаций..., 1998») [2], а значения дополнительной осадки, лежат в основе определения данных категорий, то полученные значения дополнительных осадок могут быть использованы для определения степени уязвимости здания при определенных пересчетах.

Основываясь на допущении, что износ конструкций возрастает пропорционально увеличению дополнительной осадки, спровоцированной развитием оползня различного размера под угловым фундаментом, мы можем рассматривать кривую аппроксимирующего полинома как кривую уязвимости здания от оползня. С учетом переходных коэффициентов (по категориям состояния конструкций зданий) 0,667 для зданий с полным каркасом, на столбчатом фундаменте II категории и 0,400 для зданий I категории были рассчитаны значения уязвимости.

Переходные коэффициенты определены исходя из соотношения допустимых дополнительных осадок для зданий различной категории в соответствии с СП. Для третьей категории состояния конструкций зданий значения уязвимости равнозначны значениям полинома, для второй и первой категорий значения уязвимости рассчитываются с учетом переходных коэффициентов (табл. 2, рис. 2).

Таблица 2

Величина уязвимости здания каркасного типа на столбчатом фундаменте от оползня (локализация оползня под углом подошвы фундамента)

Ширина оползня, м	Величина уязвимости, доли ед.		
	III категория	II категория	I категория
0,5	0,071	0,047	0,029
1,0	0,139	0,092	0,056
1,5	0,170	0,113	0,068
2,0	0,196	0,131	0,078
2,5	0,218	0,145	0,087
3,0	0,230	0,153	0,092
3,5	0,239	0,159	0,096
4,0	0,245	0,163	0,098
4,5	0,246	0,164	0,099

5,0	0,250	0,167	0,100
5,5	0,253	0,169	0,101
6,0	0,259	0,173	0,104
6,5	0,264	0,176	0,106
7,0	0,270	0,180	0,108
7,5	0,277	0,185	0,111
8,0	0,286	0,191	0,114
8,5	0,296	0,197	0,118
9,0	0,304	0,203	0,122
9,5	0,314	0,209	0,126
10,0	0,323	0,215	0,129

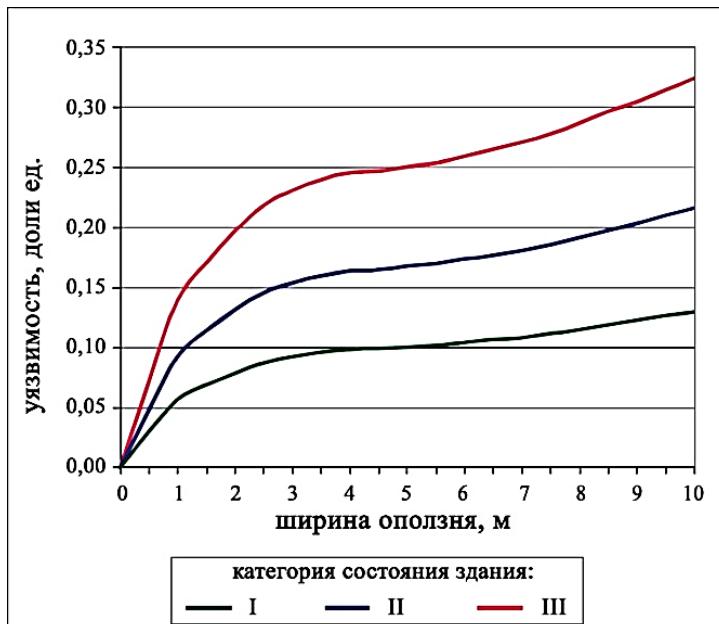


Рис. 2. Кривые уязвимости здания каркасного типа на столбчатом фундаменте при развитии оползня различной ширины под углом фундамента

### Выходы

Разработанные подходы к оценке уязвимости объектов экономики на примере оползней позволяют разработать типовые нормативные таблицы, необходимые для оценок риска возможных негативных последствий воздействия этого процесса с целью предотвращения чрезвычайных ситуаций.

Кривые уязвимости могут быть аналогично получены для различных конкретных вариантов взаимодействия оползней с объектами (здания, сооружения и т. д.), являющимися условиями имитационного моделирования и

использованы в дальнейшем при выполнении работ по оценке риска в составе материалов по инженерным изысканиям.

*Работа выполнена в рамках проекта РНФ 16-17-00125 «Оценка риска опасных природных процессов на урбанизированных территориях».*

### ***Список литературы***

1. Правила оценки физического износа жилых зданий ВСН 53–86 (р) // Госгражданстрой. – М., 1988.
2. Рекомендации по обследованию и мониторингу технического состояния эксплуатируемых зданий, расположенных вблизи нового строительства или реконструкции. – Москомархитектура, 1998.
3. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 4. 2.01.07 – 85\* // ОАО «НИЦ «Строительство».
4. «SafeLand. Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies». Grant Agreement No.: 226479. Deliverable.

### ***References***

1. Rules for assessing the physical wear and tear of residential buildings VCN 53–86 (r) // Gosgrazhdanstroy. – M., 1988.
2. Recommendations for the inspection and monitoring of the technical condition of operated buildings located near new construction or reconstruction. – Moscomar- chitecture, 1998.
3. CP 20.13330.2011. Loads and impacts. Updated version CNaP 4. 2.01.07 – 85\* // OAO "RC "Building".
4. SafeLand. Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies». Grant Agreement No.: 226479. Deliverable.

---

**Бурова Валентина Николаевна** – канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Россия, Москва.

**Burova Valentina Nikolaevna** – candidate of geological and mineralogical sciences, leading researcher at the Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS (IEG RAS), Russia, Moscow.

---