

УДК 624.131.5:504.064.2

Гайворонская А.Н., Серый С.В., Ховрах Е.Ю.

магистрант по направлению 20.04.01 Техносферная безопасность

Научный руководитель: Вендина Т.Н., к.г.н., доцент

Белгородский государственный национальный исследовательский

университет

Россия, г.Белгород

**МЕТОДОЛОГИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ В
СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ
УСЛОВИЯХ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Аннотация: В статье рассматриваются современные подходы к количественной оценке геоэкологических рисков при строительстве в условиях сложного рельефа и нестабильных грунтов. Обоснована необходимость перехода от качественных методов оценки к количественным показателям, интегрирующим данные геотехнического мониторинга и геоинформационного моделирования. Предложена методология, включающая этапы сбора данных, пространственного анализа, построения карт риска и принятия управленческих решений. Особое внимание уделено применению геостатистических методов и систем искусственного интеллекта для повышения точности прогнозов опасных геоморфологических процессов.

Ключевые слова: техносферная безопасность, геоэкологические риски, инженерно-геоморфологические условия, геотехнический мониторинг, геоинформационное моделирование, количественная оценка рисков, геостатистика, искусственный интеллект.

A.N. Gaivoronskaya, S.V. Sery, E.Yu. Khovrakh
Master's student in the program 20.04.01 Technosphere Safety
Supervisor: T.N. Vendina, PhD, Associate Professor
Belgorod State National Research University
Russia, Belgorod

**METHODOLOGY FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF
GEOECOLOGICAL RISKS DURING CONSTRUCTION IN COMPLEX
ENGINEERING AND GEOMORPHOLOGICAL CONDITIONS AS A
TOOL FOR ENSURING TECHNOSPHERIC SAFETY**

Abstract: The article discusses modern approaches to the quantitative assessment of geoecological risks in construction under conditions of complex terrain and unstable soils. The necessity of transitioning from qualitative assessment methods to quantitative indicators integrating geotechnical monitoring data and geoinformation modeling is substantiated. A methodology is proposed that includes stages of data collection, spatial analysis, risk mapping, and managerial decision-making. Special attention is paid to the application of geostatistical methods and artificial intelligence systems to improve the accuracy of forecasts for hazardous geomorphological processes.

Keywords: technosphere safety, geoecological risks, engineering and geomorphological conditions, geotechnical monitoring, geoinformation modeling, quantitative risk assessment, geostatistics, artificial intelligence.

Введение. Актуальность проблемы количественной оценки геоэкологических рисков при строительстве обусловлена рядом объективных факторов. Во-первых, в условиях плотной городской застройки и ограниченности выбора строительных площадок традиционные подходы к оценке безопасности часто оказываются

недостаточными. Исследования показывают, что только около 20% российских городов могут быть отнесены к геоэкологически безопасным, что требует внедрения более точных методов оценки рисков [1]. Во-вторых, активное освоение территорий со сложными инженерно-геологическими условиями (склоновые участки, карстовые зоны, районы распространения просадочных и набухающих грунтов, сейсмически активные области) сопровождается увеличением аварийности и разрушений зданий и сооружений. В каждом субъекте РФ выявлены проявления не менее трех осложняющих строительство условий, а в большинстве регионов они занимают более 50% площади [2].

Современный этап развития техносферной безопасности характеризуется переходом от реактивного управления (ликвидация последствий аварий) к проактивному (предотвращение возникновения опасных ситуаций). Реализация этого подхода невозможна без разработки и внедрения надежных методов количественной оценки рисков, позволяющих на этапе планирования строительства выявлять зоны потенциальной опасности и обосновывать инженерно-защитные мероприятия.

Цель данной работы – разработка методологии количественной оценки геоэкологических рисков при строительстве в сложных инженерно-геоморфологических условиях, базирующейся на интеграции данных геотехнического мониторинга и методов геоинформационного моделирования.

Основные подходы к оценке геоэкологических рисков. В настоящее время в практике инженерных изысканий и проектирования используются преимущественно качественные и полуколичественные методы оценки геоэкологических рисков. К ним относятся: инженерно-геологическое районирование территорий по степени благоприятности для строительства, балльные оценки опасности геологических процессов, экспертные методы.

Недостатками этих подходов являются высокая степень субъективности, отсутствие единых критериев оценки и невозможность достоверного прогнозирования изменения риска во времени.

В зарубежной практике все большее распространение получают количественные методы, основанные на вероятностных моделях. Риск в таких моделях определяется как произведение вероятности возникновения опасного события на величину возможного ущерба [3]. Однако прямой перенос этих методов на российские условия затруднен из-за отсутствия достаточных статистических данных о частоте и последствиях геологических аварий, а также специфики нормативно-правовой базы.

Существующее положение дел указывает на необходимость разработки отечественной методологии количественной оценки геоэкологических рисков, адаптированной к существующей системе инженерных изысканий и проектирования, но при этом использующей современные достижения в области геоинформационных технологий и математического моделирования.

Инструментальная база количественной оценки. Ключевым элементом предлагаемой методологии является создание системы сбора и обработки данных, обеспечивающей объективность и достоверность оценки. Основу этой системы составляет геотехнический мониторинг, под которым понимается система инструментальных наблюдений за состоянием грунтового массива, подземных конструкций и прилегающей застройки на всех этапах жизненного цикла объекта [4]. Данные геотехнического мониторинга служат исходным материалом для количественного анализа изменения параметров геологической среды под влиянием техногенных факторов.

Особого внимания заслуживает применение геоинформационного моделирования (ГИМ) и геостатистических методов для построения карт распределения риска по территории. Метод кригинга – пространственной

интерполяции, учитывающей автокорреляцию данных, – позволяет с высокой точностью восстанавливать поля геологических параметров в точках, где прямые измерения не проводились [5]. Модели пространственной автокорреляции дают возможность выявлять структурные связи между различными факторами риска и строить многофакторные прогнозные модели.

Учитывая, что «повышение уровня достоверности прогноза связей между различными показателями риска может быть достигнуто с применением систем искусственного интеллекта» [6], предлагается использовать нейросетевые алгоритмы и методы машинного обучения для обработки массивов данных мониторинга и автоматической визуализации степени риска. Искусственные нейронные сети способны выявлять скрытые закономерности в многомерных данных, что особенно важно при прогнозировании таких сложных процессов, как оползнеобразование, карстово-суффозионные явления и техногенные изменения режима подземных вод.

Методология количественной оценки геоэкологических рисков.

Предлагаемая методология включает последовательную реализацию следующих этапов:

Первый этап – сбор и систематизация данных. На этом этапе формируется база данных, включающая результаты инженерно-геологических изысканий, данные геотехнического мониторинга, сведения о ранее произошедших аварийных ситуациях, а также дистанционные данные (космические снимки, материалы лазерного сканирования). Особое внимание уделяется пространственной привязке всех данных для последующего ГИС-анализа.

Второй этап – анализ факторов риска и выбор показателей. Осуществляется идентификация опасных геоморфологических и инженерно-геологических процессов, характерных для данной территории

(оползни, обвалы, карст, суффозия, подтопление, просадки и т.д.). Для каждого процесса определяются количественные показатели, характеризующие его интенсивность и вероятность активизации. В качестве таких показателей могут выступать скорости вертикальных и горизонтальных смещений, величины деформаций, градиенты напоров подземных вод и т.п.

Третий этап – пространственное моделирование. С использованием геостатистических методов (кригинг, модели пространственной автокорреляции) строятся карты распределения выбранных показателей по исследуемой территории. Применение систем искусственного интеллекта позволяет прогнозировать изменение этих показателей во времени с учетом планируемых техногенных воздействий (уплотнение грунтов, изменение режима подземных вод, статические и динамические нагрузки от сооружений).

Четвертый этап – интегрированная оценка риска. На основе полученных карт и прогнозных моделей рассчитывается интегральный показатель геоэкологического риска для каждого участка территории. При этом учитываются как вероятность активизации опасного процесса, так и потенциальный ущерб для планируемых или существующих объектов. Расчет ущерба базируется на стоимостной оценке возможных потерь (повреждение конструкций, нарушение эксплуатационной пригодности, ущерб здоровью людей).

Пятый этап – разработка рекомендаций по снижению риска. Результаты оценки риска служат основой для принятия управленческих решений: корректировки градостроительных регламентов, выбора оптимальных конструктивных решений, проектирования инженерной защиты территории, назначения режимов эксплуатации. Сформированные рекомендации оформляются в виде интерактивных карт и аналитических записок с визуализацией зон различной степени опасности.

Обсуждение и перспективы применения. Разработанная методология позволяет преодолеть основные недостатки существующих подходов к оценке геоэкологических рисков. Во-первых, использование объективных данных геотехнического мониторинга и геоинформационного моделирования существенно снижает субъективность оценки по сравнению с экспертными методами. Во-вторых, количественный характер показателей делает возможным их использование в системах автоматизированного проектирования и управления строительством. В-третьих, предлагаемый подход позволяет осуществлять мониторинг изменения риска во времени, что особенно важно для объектов с длительным сроком эксплуатации.

Важным преимуществом методологии является ее адаптивность к различным геоморфологическим условиям. Набор учитываемых факторов риска и используемые математические модели могут корректироваться в зависимости от конкретных природных условий региона: для горных районов – с акцентом на оползневые и селевые процессы; для равнинных территорий – на просадочные и набухающие грунты; для прибрежных зон – на абразию и подтопление.

Перспективы дальнейших исследований связаны с созданием единой цифровой платформы для интеграции геотехнического мониторинга и геоинформационного моделирования, разработкой унифицированных нормативных документов, регламентирующих количественную оценку геоэкологических рисков, и внедрением методов искусственного интеллекта в практику инженерно-геологических изысканий.

Заключение. Таким образом, в работе предложена методология количественной оценки геоэкологических рисков при строительстве в сложных инженерно-геоморфологических условиях, основанная на интеграции данных геотехнического мониторинга и методов геоинформационного моделирования. Разработанный подход включает

последовательную реализацию этапов сбора данных, пространственного анализа факторов риска, построения карт распределения показателей, интегрированной оценки риска и разработки управленческих решений.

Особенностью предложенной методологии является использование геостатистических методов (кригинг, модели пространственной автокорреляции) и систем искусственного интеллекта для повышения точности прогнозов и учета сложных нелинейных взаимосвязей между факторами риска. Это позволяет перейти от качественных и полуколичественных оценок к объективным количественным показателям, пригодным для автоматизированной обработки и принятия управленческих решений.

Практическая реализация разработанной методологии будет способствовать повышению уровня техносферной безопасности при строительстве в сложных геоморфологических условиях, снижению аварийности и экономического ущерба от опасных геологических процессов, а также более обоснованному территориальному планированию и проектированию инженерной защиты.

Использованные источники:

1. Харченко С.В., Корнилова А.В. Геоэкологическая безопасность городских территорий: проблемы и перспективы // Экология урбанизированных территорий. – 2022. – № 3. – С. 45-52.

2. Ананьев В.П., Потапов А.Д. Инженерная геология и гидрогеология: учебник для вузов. – М.: Издательство АСВ, 2021. – 384 с.

3. Королев В.А. Количественная оценка геологических рисков: современное состояние и проблемы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2020. – № 6. – С. 3-16.

4. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями № 1, 2). – М.: Минстрой России, 2017. – 86 с.

5. Ильина С.В., Новиков В.А. Применение геостатистических методов в инженерно-геологических исследованиях // Инженерные изыскания. – 2021. – № 10-11. – С. 28-35.

6. Мазур И.И., Шапиро В.Д. Управление рисками в строительстве: монография. – М.: Экономика, 2022. – 312 с.

7. Фролов Д.М., Григорьев А.С. Техногенная трансформация рельефа городских территорий и ее влияние на геозэкологическую безопасность // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – № 2. – С. 56-69.

8. Никонова Н.А., Фирсова Т.Н. Искусственный интеллект в задачах прогнозирования опасных геологических процессов // Материалы Международной научно-практической конференции «Цифровые технологии в геологии». – Казань, 2023. – С. 112-118.