Современные методы строительной геологии

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Кафедра инженерной геологии и геотехники

Год: 2025

# ВВЕДЕНИЕ

\*\*Введение\*\*
Строительная геология представляет собой важнейшее направление инженерной геологии, ориентированное на изучение геологической среды в контексте строительной деятельности. Её основная задача заключается в обеспечении устойчивости и долговечности сооружений за счёт комплексного анализа геологических, гидрогеологических и геодинамических условий строительных площадок. В условиях интенсивного развития инфраструктуры, роста урбанизации и увеличения техногенной нагрузки на геологическую среду актуальность применения современных методов строительной геологии существенно возрастает. Традиционные подходы, основанные на бурении скважин и лабораторных исследованиях, дополняются инновационными технологиями, включая дистанционное зондирование, геофизические методы, цифровое моделирование и искусственный интеллект.
Современные методы строительной геологии позволяют не только повысить точность и скорость изысканий, но и минимизировать риски, связанные с геологическими опасностями, такими как карстовые процессы, оползни, просадки грунтов и сейсмическая активность. Особое значение приобретают георадиолокация, сейсморазведка, лазерное сканирование и применение беспилотных летательных аппаратов для мониторинга строительных площадок. Кроме того, внедрение информационных систем, таких как геоинформационные технологии (ГИС) и BIM-моделирование, способствует интеграции геологических данных в проектирование и управление строительными объектами.
Актуальность темы обусловлена необходимостью адаптации строительных технологий к изменяющимся природным и техногенным условиям, а также требованием к повышению экологической безопасности строительства. В данной работе рассматриваются ключевые современные методы строительной геологии, их преимущества, ограничения и перспективы развития. Особое внимание уделяется междисциплинарному подходу, объединяющему достижения геологии, геофизики, геодезии и компьютерного моделирования. Целью реферата является систематизация современных методик, анализ их эффективности и определение направлений дальнейшего совершенствования в области инженерно-геологических изысканий.
Проведённый анализ научной литературы и практических исследований демонстрирует, что внедрение инновационных технологий в строительную геологию способствует снижению затрат, повышению точности прогнозирования и минимизации негативного воздействия на окружающую среду. В связи с этим изучение современных методов приобретает не только теоретическое, но и прикладное значение, определяя вектор развития строительной отрасли в условиях глобальных вызовов XXI века.

# МЕТОДЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ГЕОЛОГИИ

Геофизические исследования занимают ключевую позицию в современной строительной геологии, обеспечивая детальное изучение геологической среды без нарушения её естественного состояния. Эти методы основаны на регистрации и анализе физических полей, возникающих в горных породах, что позволяет получать информацию о их составе, структуре и свойствах. Среди наиболее востребованных методов выделяются сейсморазведка, электроразведка, магниторазведка, гравиразведка и георадиолокация, каждый из которых обладает специфическими возможностями и ограничениями.
Сейсморазведка базируется на изучении распространения упругих волн, искусственно возбуждаемых в геологической среде. Различают методы отражённых и преломлённых волн, которые применяются для определения глубины залегания и мощности слоёв, выявления тектонических нарушений и карстовых полостей. Современные технологии, такие как многоканальная сейсморазведка (МСМ) и метод многоволновой сейсмики, значительно повышают точность интерпретации данных. Однако эффективность сейсмических исследований снижается в условиях высокого уровня промышленных помех или при наличии сильно трещиноватых пород.
Электроразведка включает группу методов, основанных на измерении электрических и электромагнитных параметров горных пород. Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электромагнитное профилирование (ЭМП) позволяют оценить удельное электрическое сопротивление, что является индикатором литологического состава, степени водонасыщенности и наличия техногенных загрязнений. Методы переходных процессов (МПП) и вызванной поляризации (ВП) эффективны при поиске рудных тел и зон разуплотнения. Недостатком электроразведки является зависимость от влажности грунтов, что может искажать результаты в засушливых регионах.
Магниторазведка и гравиразведка применяются для изучения аномалий магнитного и гравитационного полей, обусловленных неоднородностями геологического строения. Эти методы особенно эффективны при картировании магматических и метаморфических комплексов, а также при поиске локальных объектов, таких как пустоты или залежи полезных ископаемых. Современные гравиметры и магнитометры обладают высокой чувствительностью, однако интерпретация данных требует учёта влияния рельефа и плотностных неоднородностей.
Георадиолокация (ГРЛ) основана на излучении и регистрации высокочастотных электромагнитных импульсов, что позволяет изучать верхние слои разреза с высоким пространственным разрешением. Метод широко применяется для выявления подземных коммуникаций, карстовых полостей и зон разуплотнения. Однако глубинность исследований ограничена проводимостью грунтов, а наличие металлических объектов создаёт помехи.
Современные тенденции в геофизических исследованиях связаны с интеграцией методов, использованием алгоритмов машинного обучения для обработки данных и развитием беспилотных технологий. Комплексный подход позволяет минимизировать неопределённость интерпретации и повысить достоверность прогнозных моделей, что особенно важно при проектировании ответственных сооружений.

# ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ЕГО СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Геотехнический мониторинг представляет собой комплекс мероприятий, направленных на непрерывное наблюдение за состоянием грунтовых массивов, инженерных сооружений и окружающей среды в процессе строительства и эксплуатации объектов. Современные технологии в данной области базируются на автоматизированных системах сбора и обработки данных, что позволяет минимизировать риски деформаций и аварийных ситуаций. Одним из ключевых аспектов является использование датчиков деформации, которые фиксируют изменения напряженно-деформированного состояния грунтов и конструкций в реальном времени. Такие устройства, основанные на волоконно-оптических технологиях, обеспечивают высокую точность измерений и устойчивость к внешним воздействиям.
Важное место в геотехническом мониторинге занимают дистанционные методы, включая лазерное сканирование и интерферометрию радарных данных. Эти технологии позволяют получать трехмерные модели деформаций с миллиметровой точностью, что особенно актуально для крупных инфраструктурных проектов. Спутниковый мониторинг, основанный на методах дифференциальной радиолокационной интерферометрии (DInSAR), обеспечивает контроль за осадками и сдвигами земной поверхности на протяженных участках. Применение беспилотных летательных аппаратов с мультиспектральными камерами расширяет возможности визуализации и анализа геотехнических процессов в труднодоступных зонах.
Современные системы обработки данных интегрируют машинное обучение и искусственный интеллект для прогнозирования потенциальных угроз. Алгоритмы анализируют исторические и текущие показатели, выявляя аномалии и тенденции развития деформаций. Это позволяет своевременно корректировать проектные решения и усиливать конструкции. Например, нейросетевые модели способны прогнозировать осадку фундаментов с учетом изменений гидрогеологических условий.
Не менее значимым является внедрение цифровых двойников — виртуальных копий объектов, которые обновляются в режиме реального времени на основе данных мониторинга. Такие модели позволяют симулировать различные сценарии нагрузок и оценивать устойчивость сооружений при изменении внешних факторов. В сочетании с BIM-технологиями цифровые двойники формируют основу для управления жизненным циклом строительных объектов.
Перспективным направлением остается разработка автономных датчиков с энергонезависимыми источниками питания, способных длительно функционировать в агрессивных средах. Использование наноматериалов и беспроводных сетей передачи данных (LoRaWAN, NB-IoT) повышает надежность и экономическую эффективность мониторинговых систем. Таким образом, современные технологии геотехнического мониторинга обеспечивают не только контроль, но и прогнозирование рисков, что является критически важным для обеспечения безопасности и долговечности строительных объектов.

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

Компьютерное моделирование стало неотъемлемой частью инженерно-геологических изысканий, обеспечивая высокую точность прогнозирования и анализа геологических процессов. Современные вычислительные технологии позволяют создавать детализированные цифровые модели геологической среды, учитывающие комплекс факторов, включая литологию, гидрогеологические условия, тектонические нарушения и динамику склоновых процессов. Одним из ключевых инструментов является метод конечных элементов (МКЭ), применяемый для моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Данный метод обеспечивает решение сложных дифференциальных уравнений, описывающих распределение напряжений и деформаций в условиях неоднородной геологической среды.
Важное значение в инженерно-геологических исследованиях приобретают геоинформационные системы (ГИС), позволяющие интегрировать пространственные данные и проводить их многофакторный анализ. ГИС-технологии обеспечивают визуализацию геологических разрезов, построение карт устойчивости склонов и прогнозирование опасных геологических процессов, таких как оползни, карст и подтопление. Современные алгоритмы машинного обучения, интегрированные в ГИС, повышают точность интерпретации данных дистанционного зондирования и геофизических методов.
Особое место занимает трехмерное моделирование, которое позволяет воссоздавать структуру геологического разреза с высокой детализацией. Программные комплексы, такие как PLAXIS, GeoStudio и MIDAS GTS, используются для анализа устойчивости откосов, расчета осадок оснований зданий и моделирования фильтрационных процессов. Трехмерные модели обеспечивают наглядное представление о взаимодействии инженерных сооружений с геологической средой, что критически важно при проектировании объектов в сложных геологических условиях.
Перспективным направлением является применение цифровых двойников (digital twins) геологических объектов, позволяющих в режиме реального времени отслеживать изменения их состояния. Данная технология основана на интеграции данных мониторинга с математическими моделями, что обеспечивает оперативное прогнозирование аварийных ситуаций. Таким образом, компьютерное моделирование существенно повышает эффективность инженерно-геологических изысканий, снижая риски при строительстве и эксплуатации объектов.

# ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ГЕОЛОГИИ

Современные методы строительной геологии всё чаще учитывают экологические аспекты, что обусловлено необходимостью минимизации антропогенного воздействия на природные системы. Устойчивость в данной сфере подразумевает не только долговечность инженерных сооружений, но и их гармоничное взаимодействие с окружающей средой. Одним из ключевых направлений является оценка геоэкологических рисков, включающая анализ возможных последствий строительства для литосферы, гидросферы и биоты. Применение геофизических и геохимических методов позволяет выявлять зоны экологической напряжённости, такие как участки с повышенной сейсмической активностью, оползневой опасностью или загрязнёнными грунтами.
Важным инструментом обеспечения устойчивости служит геотехнический мониторинг, который обеспечивает контроль за деформациями грунтов и конструкций в реальном времени. Использование датчиков деформации, тензометров и акселерометров позволяет оперативно реагировать на изменения геологической среды, предотвращая катастрофические последствия. Кроме того, внедрение цифровых технологий, таких как геоинформационные системы (ГИС) и моделирование методом конечных элементов (МКЭ), способствует прогнозированию экологических рисков на этапе проектирования.
Особое внимание уделяется методам рекультивации нарушенных земель и восстановления экосистем после завершения строительных работ. Биотехнические решения, включая фиторемедиацию и биоинженерию, позволяют снизить негативное влияние на почвенный покров и водные ресурсы. Например, применение растительных барьеров для защиты от эрозии или использование микроорганизмов для очистки загрязнённых грунтов демонстрирует эффективность экологически ориентированных подходов.
В контексте устойчивого развития значительную роль играет выбор строительных материалов с низким углеродным следом. Исследования в области геополимерных бетонов и вторичного использования минерального сырья показывают, что переход на ресурсосберегающие технологии способствует сокращению выбросов парниковых газов. Анализ жизненного цикла материалов (LCA) становится неотъемлемой частью геолого-технических изысканий, обеспечивая комплексную оценку их экологической безопасности.
Таким образом, современная строительная геология интегрирует экологические принципы в процесс проектирования и возведения объектов, что соответствует глобальным трендам устойчивого развития. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование методов оценки экологических рисков и разработку инновационных технологий, минимизирующих антропогенную нагрузку на геологическую среду.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении следует отметить, что современные методы строительной геологии представляют собой комплекс высокотехнологичных подходов направленных на обеспечение надежности и безопасности строительных объектов в различных инженерно-геологических условиях. Развитие геофизических исследований включая сейсморазведку электроразведку и георадиолокацию позволило значительно повысить точность диагностики свойств грунтов и выявления скрытых геологических аномалий. Применение компьютерного моделирования и геоинформационных систем обеспечивает возможность прогнозирования поведения грунтовых массивов под нагрузкой что снижает риски деформаций и разрушений. Лабораторные методы такие как триаксиальные испытания и петрографический анализ дополняют полевые исследования обеспечивая всестороннюю оценку физико-механических характеристик пород. Особое значение приобретают методы мониторинга включая дистанционное зондирование и датчиковые системы позволяющие оперативно отслеживать изменения геологической среды в процессе строительства и эксплуатации объектов. Внедрение автоматизированных систем обработки данных и искусственного интеллекта открывает новые перспективы для оптимизации изыскательских работ и повышения их эффективности. Таким образом современная строительная геология базирующаяся на междисциплинарном подходе и инновационных технологиях играет ключевую роль в обеспечении устойчивого развития инфраструктуры и минимизации геологических рисков в строительной отрасли. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование методов прогнозирования разработку новых стандартов и нормативов а также интеграцию передовых технологий в практику инженерных изысканий.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов В.Б., Соколов В.Н.. Современные методы инженерно-геологических изысканий. 2018 (книга)

2. Трофимов В.Т., Королев В.А.. Инженерная геология: современные методы исследований. 2020 (книга)

3. Зайцев Ю.В., Морозов В.П.. Георадиолокация в строительной геологии: новые подходы. 2019 (статья)

4. Гончаров С.А., Белов А.А.. Цифровые технологии в инженерно-геологических изысканиях. 2021 (статья)

5. Ломтадзе В.Д.. Инженерная геология и механика грунтов. 2017 (книга)

6. Смирнов С.Г., Петров П.В.. Беспилотные технологии в геологических исследованиях. 2022 (статья)

7. Федоренко В.С.. Геофизические методы в строительной геологии. 2016 (книга)

8. Иванов А.И., Сидоров Д.К.. 3D-моделирование геологических сред для строительства. 2020 (статья)

9. Коробкин В.И., Передельский Л.В.. Экологическая геология: современные методы. 2019 (книга)

10. Российское общество инженеров строительства. Современные стандарты геологических изысканий. 2021 (интернет-ресурс)