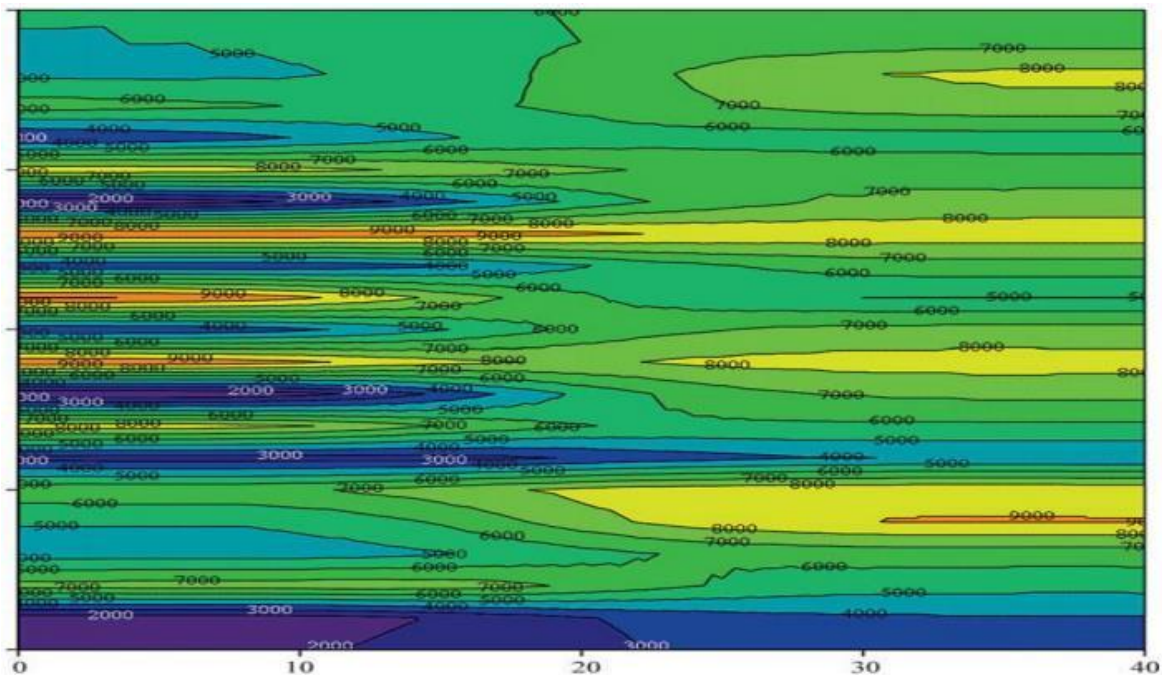


Когда можно считать реалистичной стратиграфическую модель площадки изысканий?



Представляем вниманию читателей обзор материалов начальной части статьи «Количественная оценка неопределенностей в предполагаемом стратиграфическом разрезе и уменьшение работы по его описанию при использовании ограниченных данных инженерно-геологических исследований» [2], написанной сотрудником факультета гражданского строительства, охраны окружающей среды и теоретической механики Университета Дейтона Сянжун Ваном (Xiangrong Wang, г. Дейтон, шт. Огайо, США) и опубликованной в 2020 году в журнале *Underground Space* («Подземное пространство»). Для обзора выбрана наиболее интересная общая часть этой статьи. В обзоре рассмотрен разработанный авторами метод моделирования для количественной оценки неопределенности.

Болдырев Геннадий Григорьевич

Директор по научной работе и инновациям ООО «НПП Геотек», г. Пенза, Россия
g-boldyrev@geotek.ru

Введение

Как указывает Сянжун Ван в самом начале своей статьи [2], в отличие от строительных материалов, которые выпускают с заданными свойствами, грунты обладают природной изменчивостью и неоднородностью вследствие длительности их формирования и изменчивости внешних (как силовых, так и климатических) условий. Определение свойств грунтов при инженерных изысканиях выполняется в ограниченном объеме и составляет тысячные доли от общего объема исследуемого массива грунта. Ограниченность лабораторных и полевых исследований, включая геофизические, обусловленная нормативными

требованиями (в России – СП 47.13330. – *Ред.*), приводит к тому, что невозможно проводить прямые и непрерывные наблюдения по всей площадке строительства. Поэтому заключение (отчет) о стратиграфии и свойствах грунтов, выдаваемое заказчику, неизбежно связано с неопределенностями различной степени.

Более того, геологам известно, что существует компромисс между затратами на инженерно-геологические исследования участка и дополнительными выгодами от получения геотехнической информации, которая может быть использована на последующих этапах проектирования и строительства. Поэтому инженеры-геологи, геотехники и проектировщики сталкиваются с проблемой точного описания стратиграфии участка при минимальных затратах. Для решения этой проблемы, с точки зрения С. Вана [2], необходимы новые подходы к методам проведения и интерпретации результатов исследований, которые помогут не только отразить возможные (вероятностные) инженерно-геологические условия, но и обеспечить получение количественной оценки их неопределенности в соответствии с лабораторными и полевыми исследованиями, а также предложить места дополнительных выработок и отбора образцов грунта, изучение которых поспособствует максимально возможному снижению неопределенности инженерно-геологических и геотехнических исследований.

Для интерпретации стратиграфии площадки строительства при редком расположении точек наблюдений были разработаны некоторые подходы, основанные на методах интерполяции. Однако большинство из этих методов, как отмечает Ван [2], могут обеспечить получение только точечных оценок максимального правдоподобия (MLE) без учета неопределенности моделирования. Другими словами, если и определяется наиболее вероятная стратиграфическая конфигурация, ее вероятность и изменчивость не оцениваются. Поэтому нет уверенности в точности полученной оценки инженерно-геологических условий.

Далее Ван [2] указывает, что существует несколько стохастических методов моделирования (в том числе с использованием цепей Маркова, условного гауссовского случайного поля, многоточечной геостатистики), применяя которые можно получить несколько возможных геологических моделей. Но с помощью лишь немногих из этих методов удастся количественно оценить неопределенность, связанную с природной неоднородностью геологических условий. По сравнению с получением модели геологического строения площадки количественная оценка неопределенностей моделирования предъявляет более высокие требования к принятым методам создания моделей. Ведь такое количественное определение изменчивости имеет смысл, только если каждая из стохастических моделей генерируется в соответствии с присущими исследуемому участку характеристиками геологического строения. Однако некоторые неявные предположения, используемые в существующих методах моделирования (например, фиксированные корреляционные структуры в гауссовских случайных полях, стационарная вероятность перехода матриц в моделях цепей Маркова, предопределенные шаблоны данных в методах нейронных сетей), могут накладывать определенные ограничения на способность воспроизводить врожденный анизотропный и нестационарный характер геологической среды.

В последнее время для построения моделей сложных геологических структур стал применяться метод моделирования на основе случайного поля Маркова (MRF). В частности, в основе моделирования с помощью метода MRF и цепей Маркова лежит предположение о том, что геостратиграфические структуры

включают случайные свойства и могут быть описаны с применением указанного метода. Это предположение, как отмечает Ван [2], получило широкое признание и постоянно используется для моделирования стратиграфии и свойств осадочных отложений. Разница лишь в том, что структура MRF-модели обеспечивает более гибкий и интуитивно понятный способ представления пространственной корреляции Маркова, которая позволяет отражать и воспроизводить неоднородные и нестационарные характеристики геологических структур.

Далее будет кратко рассмотрен разработанный метод моделирования для количественной оценки неопределенности.

Стохастическое геологическое моделирование

В отличие от обычных проблем сегментации или распознавания, которые сосредоточены на извлечении скрытого поля из полного набора результатов наблюдений во всех пространственных точках (например, для всех пикселей изображения) в случайном поле, при геотехническом исследовании площадки (в испытательном поле) точки, для которых имеется точная информация, расположены довольно редко. Поэтому, как подчеркивает Ван [2], моделирование стратиграфии, по сути, должно приводить к разумным выводам о подповерхностных характеристиках для не исследовавшихся непосредственно участков в соответствии с доступными данными для редко расположенных точек исследований и с имеющимися знаниями о геологическом строении местности.

Далее Ван [2] указывает, что предполагаемая стратиграфия может считаться реалистичной только в том случае, если и тренды, и крупномасштабные характеристики (общий вид анизотропной модели и нестационарный стратиграфический профиль), и локальные особенности (например, небольшие линзы и локальные колебания границ между разными типами грунтов) отражены разумно. В частности, нужно использовать результаты наблюдений, полученные при бурении и изучении выходов грунтов на поверхность, а также уже известную (или полученную с помощью геофизических методов) информацию о стратиграфии местности. При этом надо исходить из предположения, что осадочные процессы и соответствующие стратиграфические особенности характеризуются материальными переходами в пространстве и могут быть вероятностно описаны моделью MRF.

По сравнению с результатами использования других методов интерполяции случайные модели интуитивно более понятны в физическом смысле. Поскольку локальные и глобальные характеристики тесно взаимодействуют друг с другом, сложно выполнить моделирование, в котором оба аспекта учитывались бы одновременно. Поэтому стохастический процесс моделирования разбивается на два этапа, которые Ван [2] рассматривает далее.

1. На первом этапе применяется многократное имитационное моделирование вероятностей (моделирование методом Монте-Карло – MCS) с использованием одностороннего свойства Маркова для генерации начальных стратиграфических конфигураций на основе результатов полевых испытаний (например, статического зондирования), а также информации по стратиграфической ориентации, полученной с помощью геофизических исследований. Ход этого моделирования очень похож на общий процесс интерпретации, когда границы между слоями для начала формируются на основе последовательного случайного отбора проб грунтов из одной скважины, а затем распространяются на скважины,

расположенные в других местах, которые выбираются на основе предварительных знаний о стратиграфической ориентации. Единственное отличие состоит в том, что при моделировании Монте-Карло спонтанно рассматривается стратиграфическая неопределенность из-за стохастического характера этого метода. На данном этапе полностью учитываются масштабные характеристики (то есть анизотропные слоистые структуры в соответствии с профилем, полученным на основе статического зондирования методом СРТ, и нестационарная стратиграфическая ориентация, выявленная с помощью геофизических изысканий или уже имеющихся знаний по геологическому строению исследуемой территории), а локальные особенности определенные ранее методом MRF, рассматриваются лишь частично, поскольку предварительные результаты, выраженные в виде исходной стратиграфической конфигурации, еще не оптимизированы.

2. На втором этапе пространственные точки в сгенерированной исходной стратиграфической конфигурации, отличные от мест расположения скважин, оптимизируются с использованием алгоритма Монте-Карло с цепями Маркова (MCMC) для соответствия локальным характеристикам, ранее определенным с помощью метода MRF. Здесь Ван [2] отмечает, что чрезмерная коррекция модели MRF может исказить крупномасштабные характеристики в начальной конфигурации, так как крупномасштабные тренды обусловлены сложными физическими процессами и, следовательно, не будут идеально следовать случайной математической модели (например, одним из известных негативных последствий здесь является чрезмерное сглаживание). Чтобы избежать такой избыточной коррекции, исходную стратиграфическую конфигурацию на этапе № 1 следует рассматривать как ограничение во время последующего процесса оптимизации на этапе № 2. Поэтому используется функция правдоподобия как мера сходства между начальной и оптимизированной конфигурациями.

На рисунке представлена блок-схема, отражающая вышеупомянутые процедуры моделирования.

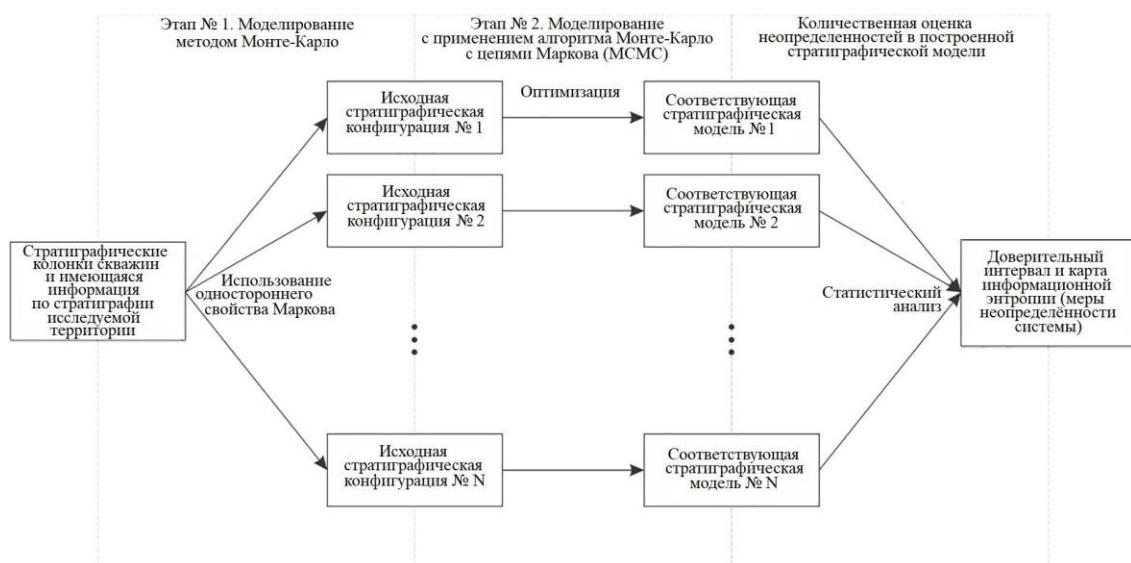


Рис. Блок-схема подхода к моделированию и количественной оценке неопределенности (по [2])

Заключение

При объединении двух вышеупомянутых этапов моделирования полученные стратиграфические модели могут разумно отражать как крупномасштабные, так и локальные характеристики участка изысканий в соответствии с результатами наблюдений и известной ранее информацией по геологическому строению местности. Поэтому они могут рассматриваться как отражающие реальную стратиграфию.

Источники

1. atomsro.ru/wp-content/uploads/file/0PORTAL/AtomStroyStandart_2016/Barvashov_2016_AS.pdf
2. Wang X. Uncertainty quantification and reduction in the characterization of subsurface stratigraphy using limited geotechnical investigation data // Underground Space. 2020. Vol. 5. P. 125–143. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S2467967418300837?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2467967418300837?via%3Dihub).