



Источник изображения: <https://stock.adobe.com/>

ПОДРОБНЕЕ О РОЛИ АНАЛИТИКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

Принята к публикации 11.09.2025

Опубликована 25.11.2025

ВАНИ В.Д.

Институт аэрокосмической инженерии, г. Дундигал, р-н Хайдарабад, шт. Телангана, Индия v.divyavani@iare.ac.in

РАДЖ В.Х.

Факультет прикладных наук Инженерного колледжа «Нью Хорайзон» (New Horizon – «Новый горизонт»), г. Бангалор, шт. Карнатака, Индия

ДАТТ А.

Университет «Лавли Профешинал» («Прекрасный профессиональный университет»), г. Фагвара, шт. Пенджаб, Индия

РАВИНДРАНАТХ Р.

Факультет менеджмента Инженерного колледжа «Мангалам» (Mangalam – «Удача»), г. Коттаям, шт. Керала, Индия

ТЯГИ Л.К.

Институт менеджмента и технологий «Ллойд» (Lloyd), г. Грейтр-Нойда, шт. Уттар-Прадеш, Индия

АЛМУСАВИ М.

Факультет инженерии компьютерных технологий Колледжа технической инженерии Исламского университета, г. Наджаф, Ирак

ЯДАВ Д.К.

Институт инженерии и технологий «Ллойд», сектор Нолежд Парк II, г. Грейтр-Нойда, шт. Уттар-Прадеш, Индия

АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей немного сокращенный и адаптированный перевод доклада преимущественно индийских инженеров-геологов и геотехников «Подробнее о роли аналитики больших данных в инженерно-геологических изысканиях» (Vani et al., 2024), который был сделан на 3-й Международной конференции по гражданскому строительству, проектированию строительных объектов и инженерным методам охраны окружающей среды (ICS-MEE), проходившей 2–3 мая 2024 года в индийском городе Коттаям штата Керала. Данное мероприятие было организовано Инженерным колледжем «Мангалам», получило финансовую поддержку от Министерства науки и технологий Индии и собрало более 1000 участников со всего мира. Материалы этой конференции были в том же году опубликованы в рецензируемом сборнике трудов научных конференций E3S Web of Conferences, который выпускает французское издательство EDP Sciences (Edition Diffusion Presse Sciences).

Рассматриваемая статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0, позволяющей распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений, ссылки на первоисточник и

DOI. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Vani et al., 2024) приводится в конце.

В данной обзорной статье рассматривается преобразующая роль аналитики больших данных для инженерно-геологических исследований, которая заключается в переходе от традиционных методов прошлого к парадигме, основанной на данных, что позволяет дополнить процесс принятия решений и повысить точность результатов исследований подземной среды. Данный обзор демонстрирует значительные улучшения в описании площадок будущего строительства, оценках рисков и методах строительства при использовании методов статистической аналитики больших массивов данных при инженерно-геологических изысканиях. В статье подчеркивается способность технологии больших данных радикально трансформировать инженерно-геологические изыскания благодаря усовершенствованию прогнозного моделирования, управления рисками и повышению устойчивости инженерных практик. Также подчеркивается важнейшая роль технологии больших данных в решении проблем глобального потепления и разрушения озонового слоя. Путем анализа многих случаев из практики и методов, основанных на искусственном интеллекте (ИИ), в работе проливается свет на повышение эффективности и экологические преимущества инженерно-геологических изысканий с использованием ИИ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

инженерная геология; большие данные; искусственный интеллект; машинное обучение.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Вани В.Д., Радж В.Х., Датт А., Равиндранатх Р., Тьяги Л.К., Алмусави М., Ядав Д.К. Подробнее о роли аналитики больших данных в инженерно-геологических изысканиях (пер. с англ.) // Геоинфо. 2025. Т. 7. № 3. С. 44–53. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-44-53.

DIGGING DEEPER: THE ROLE OF BIG DATA ANALYTICS IN GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS

Accepted for publication 11.09.2025

Published 25.11.2025

VANI V.D.

Institute of Aeronautical Engineering, Dundigal, Hyderabad District, Telangana, India
v.divyavani@iare.ac.in

TYAGI L.K.

Lloyd Institute of Management and Technology, Greater Noida, Uttar Pradesh, India

RAJ V.H.

Department of Applied Sciences, New Horizon College of Engineering, Bangalore, Karnataka, India

ALMUSAWI M.

Department of computers Techniques engineering, College of technical engineering, The Islamic University, Najaf, Iraq

DUTT A.

Lovely Professional University, Phagwara, Punjab, India

YADAV D.K.

Lloyd Institute of Engineering & Technology, Knowledge Park II, Greater Noida, Uttar Pradesh, India

RAVEENDRANATH R.

Department of Management Studies, Mangalam College of Engineering, Kottayam, Kerala, India

ABSTRACT

We bring to the attention of our readers a slightly abridged and adapted translation of the report by primarily Indian geological and geotechnical engineers “Digging deeper: the role of big data analytics in geotechnical investigations” (Vani et al., 2024), which was presented at the 3rd International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering (ICS-MEE) held on 2–3 May 2024 in the Indian city of Kottayam, Kerala. That event was organized by the Mangalam College of Engineering, received financial support from the Ministry of Science and Technology of India, and gathered more than 1,000 participants from all over the world. In the same year, the proceedings of that conference were published in the peer-reviewed conference proceedings series “E3S Web of Conferences” issued by the French publishing house “EDP Sciences” (“Edition Diffusion Presse Sciences”). The paper on the basis of that report by Indian specialists is available in open access under the CC BY 4.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes, original source, and DOI are noted. In our case, the full reference to the original paper (Chen et al., 2020), which was used for the presented translation, is given in the end.

This review paper explores the transformative role of big data analytics in geotechnical engineering, transferring past conventional methods to a data-driven paradigm that complements decision-making and precision in

subsurface investigations. By integrating large statistics analytics with geotechnical engineering, this study demonstrates big improvements in site characterization, danger assessment, and production methodologies. The research underscores the capability of big data to revolutionize geotechnical investigations through improved prediction models, threat management, and sustainable engineering practices, highlighting the critical role of big data in addressing international warming and ozone depletion. Through the examination of numerous case studies and AI-driven methodologies, this paper sheds light at the efficiency gains and environmental benefits attainable in geotechnical engineering.

KEYWORDS:

geotechnical engineering; big data; artificial intelligence; machine learning.

FOR CITATION:

Vani V.D., Raj V.H., Dutt A., Raveendranath R., Tyagi L.K., Almusawi M., Yadav D.K. Podrobnее o roli analitiki bol'shikh dannykh v inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh (per. s angl.) [Digging deeper: the role of big data analytics in geotechnical investigations (translated from English into Russian)] // Geoinfo. 2025. T. 7. № 3. S. 44–53. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-44-53 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Строительство, в том числе геотехническое, значительно выигрывает при огромных объемах данных, собираемых в ходе инженерно-геологических изысканий. Для перевода данных в осмысленную форму необходимы их анализ и визуализация. Последние также нужны для понимания трудностей, с которыми сталкиваются организации, собирающие и/или использующие инженерно-геологические данные. Для анализа и визуализации данных, например, для систем бизнес-интеллекта (Business Intelligence, BI) подходит интерактивный продукт компании Microsoft под названием Power BI.

При инженерно-геологических изысканиях для оценки геоданных, изменяющихся как в пространстве, так и во времени, важнейшую роль играет статистический анализ. По причине быстрого развития средств измерений и оцифровки были разработаны специальные методы анализа данных для эффективной обработки огромного количества неоднозначной и неполной информации. В сферах цифрового интеллекта (digital intelligence) и цифровой экономики происходит непрерывная смена парадигм в направлении от традиционных моделей, основанных на физике, к подходам, основанным на данных (data-driven frameworks). Это объясняется тем, что модели, основанные на данных, являются более гибкими и полезными в ситуациях, когда физические особенности или механизмы либо недостаточно хорошо поняты, либо слишком сложны для точного моделирования [1].

Для характеристики генетических свойств геоматериалов авторами работы [2] была предпринята попытка использовать биологические понятия из области генетики. Они предложили но-

вую стратегию, основанную на общих характеристиках определенных типов горных пород в определенной местности или зоне. Этот подход позволяет выявлять генетические признаки геоматериалов путем анализа параметрических данных по ним с использованием теории больших данных (big data). Была создана программная платформа для обработки и оценки больших объемов данных. В процессе представленного в указанной публикации исследования было проанализировано около 80 тысяч наборов данных по физико-механическим свойствам геоматериалов из типичного района в целях выработки рекомендаций по определению характеристик геоматериалов, обеспечению проектирования данными и возможному их использованию для предотвращения стихийных бедствий.

В инженерной геологии хорошо известно, что особенности площадок будущего строительства имеют индивидуальный характер. Данные, полученные в результате исследований на одной площадке, нельзя напрямую использовать для другой. Тем не менее на практике часто случается так, что принятие решений для конкретной площадки опирается не на набор данных, специфичный именно для нее, а на обобщенную информацию. Например, для расчета проектных характеристик грунтов инженеры часто используют модели трансформации (transformation models), причем в большинстве случаев их калибруют с использованием обобщенных данных. С другой стороны, полный отказ от применения таких моделей был бы крайне непрактичным и избыточным [3]. Их эффективность позволяет предположить, что использование обобщенных данных может принести пользу при принятии решений по конкретным

площадкам. В эпоху технологии *больших данных* инженерам-геологам целесообразно учитывать полезность обобщенных баз данных.

В публикации [4] рассматривается значение расчетов надежности в геотехническом проектировании с акцентом на контроль качества на протяжении всего жизненного цикла здания или сооружения. Подчеркивается, что хотя неопределенности можно обрабатывать вероятностными методами, они обычно являются «известными неизвестными», для работы с которыми требуются исторические данные и измеримая информация.

При работе со сложными реальными данными, неточными данными и географической изменчивостью, которые трудно обрабатывать с использованием детерминированных методов, большую роль играет достоверность. Поскольку географические неопределенности влияют, например, на сейсмические характеристики разных участков, важна геопространственная база данных для описания инженерно-геологической информации, специфичной для конкретной площадки, а также для совершенствования методик геопространственного зонирования. В работе [5] представлена многоисточниковая геопространственная информационная система, включающая такие компоненты, как платформа больших данных, геостатистическая оценка плотности распределения значений, оптимизация метода геостатистической интерполяции и др. Эта система была применена для территории Сеульского Столичного Региона в Южной Корее для обеспечения геопространственного зонирования сейсмических воздействий, характерных для конкретных площадок. Для каждого административного района зонирование

включало получение многоисточниковых геопространственных карт, геослоев и факторов воздействия на площадки.

Инженерно-геологические изыскания требуют проведения специальных испытаний, однако сделанные на их основе выводы могут быть неверными из-за сложности методик, неточного управления данными или уникальных свойств грунтов. Для обеспечения бесперебойного хода работ и точности данных при изысканиях используют геоинформационную систему на основе ВР нейронной сети (обучаемой методом обратного распространения ошибки – BackPropagation). Такой подход обеспечивает надлежащую обработку данных и дает заслуживающую доверия основу для исследований, гарантируя надежность и точность результатов [6].

В Казахстане в свое время большое внимание исследователей было уделено созданию инженерно-геологической базы данных для Университета Назарбаева в г. Астане. Для построения этой базы данных использовался фиксированный набор данных, включавший карту города и информацию, сгенерированную пользователями по данным более чем 2000 скважин. В зависимости от стратиграфических особенностей и геологического происхождения территорию Астаны разделили на восемь зон. При этом выделили шесть основных инженерно-геологических элементов [7]. Были учтены инженерно-геологические характеристики грунтов. Границы между элювиальными и аллювиальными грунтами, а также пределы пластичности были точно связаны с модулем упругости E . Для определения оптимальных изменений длины забивных свай для каждой зоны была составлена инженерно-геологическая карта.

ПОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ ►

В области инженерной геологии работа по предписаниям уступила место использованию более точных приближений, основанных на ограниченной информации, полученной при инженерных изысканиях на площадках. В эпоху, когда методы принятия решений должны больше основываться на данных и зависеть от них, особенно при работе с зеттабайтами (миллиардами терабайтов) информации, процесс обработки геоданных включает несколько этапов, представленных на рисунке 1.

Согласно статье [8] каждое данное имеет ценность независимо от его каче-



Рис. 1. Цифровой конвейер геоданных включает пять этапов.

ства или способности вписываться в физическую модель. Определение этой ценности путем изучения реальности данных с использованием вероятностных методов, машинного обучения или других подходов, основанных на данных, представляет собой серьезную задачу для научного сообщества. Ее решение позволит по-новому взглянуть на работу инженеров-геологов и геотехников в иммерсивной цифровой среде, где, вероятно, уже присутствует машинный интеллект.

При этом следует отметить, что на пути усилий по продвижению гендерного равенства в геотехнической профессии есть ряд препятствий, ограничивающих привлечение и представительство женщин в академической среде. Например, в Индии, хотя в сфере проектирования для строительства женщины в настоящее время составляют около 15–17% профессорско-преподавательского состава, в сфере геотехники их только 11%. В США только в одном из десяти научно-исследовательских институтов две женщины или более занимают академические должности, а более чем в трети таких учреждений их нет вовсе. Поэтому среди женщин меньше тех, кто завершает соответствующее обучение и получает степень бакалавра, магистра или доктора, – и это актуальная проблема [9]. То есть для развития и устойчивости отрасли геотехники большое значение имеет в том числе

поддержка сильного женского профессорско-преподавательского состава в этой профессии.

В работе [10] предлагается делать упор на развитие инженерной геологии и в том числе геотехники, основанных на данных. Предлагается применять инновационные алгоритмы для работы с геоданными с помощью новых технологий, отвечающих практическим требованиям и использующих существующие знания.

Продолжаются исследования в области описания площадок на основе данных. Они охватывают в том числе такие вопросы, как объяснимая идентификация участков на основе данных и работа с «непривлекательными» данными. Среди требующих решения задач – развитие машинного обучения с превращением его в ключевой инструмент, методов этого обучения с достижением интеллектуальности по аналогии с цифровыми двойниками. Цель данной повестки – в перспективе революционизировать машинное обучение в сфере инженерной геологии.

В докладе [11] рассматривается применение технологий больших данных и искусственного интеллекта (ИИ) при исследованиях геоопасностей в основном на примере района водохранилища «Три ущелья» (Three Gorges). В этой работе предлагается актуальная информация о возможностях ИИ при изучении геоопасностей. Она может стать ориен-

тиром для будущих исследований. Для улучшения знаний о геологических условиях в разных местностях и связанных с ними рисках необходимо выработать рекомендации по усилению технологий ИИ и больших данных в сфере инженерно-геологических изысканий.

Инженерно-геологическое описание площадки имеет очень большое значение для проектов гражданского строительства. В настоящее время этот процесс стал более точным и эффективным благодаря сочетанию технологий искусственного интеллекта и интернета вещей (Internet of Things, IoT) [12]. С использованием ИИ анализируются геологические и геопространственные данные, тогда как технология интернета вещей делает возможными мониторинг и сбор полевых данных по площадке в реальном времени.

Точность описания площадки становится выше и прогнозы получают качественнее при вводе в модели ИИ геофизических данных, собираемых посредством встроенных в грунт сенсорных сетей, которые дают динамическую картину подповерхностных условий.

Совместное использование технологий искусственного интеллекта и интернета вещей при инженерных изысканиях можно облегчить благодаря таким платформам и инструментам, как информационное моделирование объектов строительства (Building Information Modeling, BIM) и геоинформационные системы (ГИС, GIS). От этой синергии зависят развитие современной инфраструктуры и обеспечение долговечности и устойчивости проектов гражданского строительства в будущем.

Концепция «Индустрия 4.0» («Четвертая промышленная революция» — переход к автоматизированному и интеллектуальному производству, интеграция цифровых технологий и физических производственных систем) и новые технологии, такие как машинное обучение, стимулируют развитие инженерной геологии в направлении цифровой трансформации и интеллектуализации. Однако из-за скудности и «непривлекательности» данных исследования в области машинного обучения и его применения в инженерно-геологической практике продвигаются медленно. В одном из таких исследований [13] предлагается разработать обучающую базу данных, отражающую специфику конкретного проекта и знания в области инженерной геологии, такие как механика грунтов и принципы численного анализа.

Стремительное развитие новых технологий существенно расширило наши знания и компетенции в области искусственного интеллекта. Например, быстрое увеличение объемов географических данных, мощные вычислительные возможности и достижения в области ИИ привели к росту использования географического анализа в экологических приложениях. Искусственный интеллект меняет все поле исследований и делает возможным выполнение геопространственного анализа с высоким разрешением [14]. Большие массивы данных до сих пор требовали использования традиционных инструментов обработки данных, однако на замену таким приложениям пришел искусственный интеллект, обеспечивающий лучшее понимание и возможность извлечения информации из огромных объемов данных [15].

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ ►

В условиях глобального потепления и разрушения озонового слоя необходимы технологии, которые могут заменить опасные методы в строительной отрасли [16]. Подходы, основанные на использовании искусственного интеллекта, могут уменьшить зависимость от лабораторных работ, снизить выбросы углекислого газа и повысить точность геотехнического проектирования и строительства. В публикации [17] представлено исследование использования в инженерной геологии интеллектуальных алгоритмов обучения, таких как: искусственные нейронные сети; нечеткая логика (Fuzzy Logic); эволюционный алгоритм обучения GEP (Gene Expression Programming); адаптивная нейро-нечеткая система вывода (ANFIS — adaptive neuro-fuzzy inference system), то есть гибридная система, которая сочетает принципы нейронных сетей и нечеткой логики; инструмент «дисперсионный анализ» (ANOVA — Analysis of Variance) (следует отметить, что это статистический метод, который не является интеллектуальным алгоритмом обучения, но используется в машинном обучении для анализа различий между средними значениями двух или более выборок и оценки их статистической значимости. — *Ред.*). Данные алгоритмы помогают прогнозировать геотехнические и экологические проблемы, тем самым снижая опасные глобальные эффекты.

Экспериментальные подходы к земляным работам в уже застроенных ме-

стах, где строительство осложнено, могут приводить к ошибкам (в том числе из-за человеческого фактора), вызывающим непредвиденные проблемы. Но при использовании эволюционных подходов к обучению большинство таких задач удалось решить.

Исследование, представленное в статье [18], было сосредоточено на применении искусственных нейронных сетей (ИНС) для прогнозирования конечной осевой несущей способности буровых свай, часто используемых для строительства дорог, мостов и высотных сооружений. В указанной работе использовались результаты испытаний на нагрузку фундаментов глубокого заложения в Неваде, взятые из соответствующей базы данных (Nevada Deep Foundation Stress Test Database). Модель ИНС показала хорошие результаты по неизвестным данным в отношении обобщений и точности прогнозирования: среднеквадратическая ошибка составила 12486,509 кН, средняя абсолютная ошибка — 10589,4364 кН, а коэффициент детерминации R^2 достиг 0,87.

В обзоре [19] рассказывается о многомерном наборе данных по глинам китайской провинции Цзяньсу (J-CLAY/5/124), использованном для разработки модели искусственной нейронной сети с целью прогнозирования модуля упругости основания дорожной одежды (subgrade resilience modulus, M_r). Модель ИНС была обучена и оптимизирована с помощью метода поиска с запретами, или табу-поиска (tabu search). Результаты использования этой версии показали высокую точность: значения скорректированного коэффициента детерминации R^2 составили 0,87560629 и 0,892192118. Прогнозы имели низкие погрешности: средняя абсолютная ошибка составила 0,217086317, а среднеквадратическая ошибка — 0,071266013. Оптимизация табу-поиска повысила общую эффективность модели, что дало увеличение таких показателей, как: полнота (recall); точность (precision); F1-мера, или сбалансированная F-оценка (F1 score); общая точность (accuracy). Также это привело к снижению функции потерь (loss reduction). Таким образом, полученная модель ИНС продемонстрировала обнадеживающие результаты при оценке модуля упругости земляного полотна M_r для глин J-CLAY/5/124, что дало полезную информацию для работ с приложениями для инженерной геологии.

Исследование, представленное в статье [20], было направлено на поиски возможностей объединения предыдущих достижений в области байе-

Таблица. Различные методы искусственного интеллекта и машинного обучения, используемые в геотехнике

Ссылка	Метод, алгоритм	Сфера применения	Основные показатели точности*				Результаты и преимущества
			СКО, кН	(СКО) ² , кН ²	САО, кН	R ²	
[17]	ИНС; НЛ; ЭАО; АННСВ; ДА**	Прогнозирование в геотехнических и экологических сферах	-	-	-	-	Улучшение прогнозирования в геотехнических вопросах, снижение глобальных воздействий на окружающую среду
[18]	ИНС	Осевая несущая способность буровых свай	12480	-	10586	0,87	Повышение точности прогнозирования для проектирования и строительства фундаментов
[19]	ИНС, оптимизированная методом поиска с запретами, или табу-поиска	Прогнозирование модуля упругости основания (земляного полотна)	-	1,404	0,965	0,875–0,892	Высокая точность прогнозирования модуля упругости основания (земляного полотна), улучшенная эффективность работы модели
[20]	Байесовский обратный анализ	Описание (характеризация) площадки	-	-	-	-	Эффективный подход к определению функций вероятности для параметров дисперсных и скальных грунтов
[21]	ИНС; Монте-Карло с отсеиванием; «случайный лес»	Выборочные геотехнические исследования (взятие образцов, испытания)	-	-	-	-	Снижение вычислительных затрат, эффективность выборочных геотехнических исследований (взятия образцов, испытаний)
[22]	«Случайный лес»; глубокое обучение	Оценка свойств грунтов (по данным статического зондирования методом СРТ)	-	-	-	0,65–0,75 для сопротивления под конусом; 0,14–0,75 для сопротивления по боковой поверхности	Очень высокая эффективность использования метода «случайный лес» для оценки свойств грунтов

* СКО – средняя квадратическая ошибка; САО – средняя абсолютная ошибка; R² – коэффициент детерминации.

** ИНС – искусственная нейронная сеть (ANN – artificial neural network); НЛ – нечеткая логика (FL – Fuzzy Logic); ЭАО – эволюционный алгоритм обучения (GE – Gene Expression Programming); АННСВ – адаптивная нейро-нечеткая система вывода (ANFIS – adaptive neuro-fuzzy inference system), то есть гибридная система, которая сочетает принципы нейронных сетей и нечеткой логики; ДА – дисперсионный анализ (ANOVA – Analysis of Variance) (следует еще раз отметить, что это статистический метод, который не является интеллектуальным алгоритмом обучения, но используется в машинном обучении для анализа различий между средними значениями двух или более выборок и оценки их статистической значимости. – Ped.).

совских методов при характеристике площадок и на создание базовой системы байесовского обратного оценивания/анализа (Bayesian inverse evaluation/analysis) для непосредственной оценки фактической изменчивости. Эта система связывает распределение и степень природной изменчивости грунтов основания, статистическую непредсказуемость, погрешности измерений и неопределенность, присущую формулам/моделям преобразований, в процессе описания площадки на различных этапах инженерных изысканий. Такая работа с данными упрощает вывод функций распределения вероятностей для случайных величин характеристик дисперсных и скальных грунтов, что дает более эффективный метод, необходи-

мый для описания площадок с теми или иными инженерно-геологическими условиями.

В обзоре [21] описывается гибридный подход к работе с инженерно-геологическими данными, сочетающий метод адаптивный выборки и метод последовательной выборки (hybrid adaptive sequential sampling approach). Он включает использование ИНС, метод Монте-Карло с отсеиванием (Monte Carlo dropout) и алгоритм «случайный лес» (Random Forest). Искусственные нейронные сети хорошо подходят для решения задач с множественными выходными данными, тогда как метод Монте-Карло с отсеиванием позволяет эффективно прогнозировать неопределенности для неизученных участков. Алгоритм «случайный лес» позволяет оце-

нивать относительную значимость данных для их классификации и снижает риск переобучения (за счет использования ансамбля деревьев решений, построенных на различных подвыборках данных. – Ped.). Данный подход показал свою эффективность применения в инженерной геологии благодаря снижению вычислительных затрат и расширению возможностей выборочных инженерно-геологических исследований (взятия образцов, испытаний).

Одним из наиболее популярных методов исследований грунтов и оценки их физических свойств является статическое зондирование – испытания грунтов на внедрение конусного зонда/пенетрометра (Cone Penetration Tests, CPT). При исследовании, представленном в докладе [22], сравнивалась эффективность

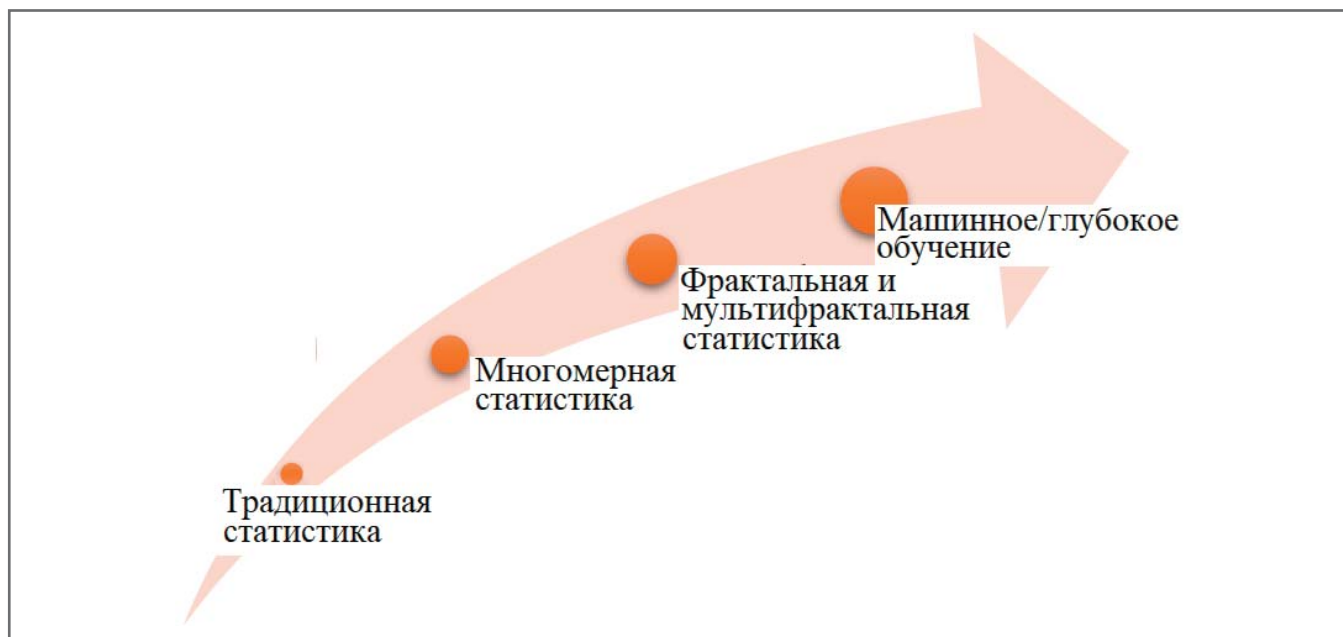


Рис. 2. Различные методы предварительной обработки инженерно-геологических данных

таких алгоритмов машинного обучения, как «случайный лес» и глубокое обучение, на основе данных СРТ для прогнозирования сопротивлений грунта под конусом и по боковой поверхности зонда. Метод использования алгоритма «случайный лес» для регрессионного анализа (random forest regression technique) превзошел глубокие нейронные сети по эффективности прогнозирования, дав коэффициенты детерминации R^2 в диапазонах 0,65–0,68 для сопротивления под конусом и 0,14–0,75 для сопротивления по боковой поверхности. На практике это дало такие преимущества, как сбор проектных параметров на основе более простых испытаний, снижение стоимости проекта, повышение качества и эффективности испытаний методом СРТ, а также помощь в выборе геотехнического проекта. В таблице сопоставлены различные методы искусственного интеллекта и машинного обучения, применяемые в геотехнике.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОПИСАНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИТИКИ ДАННЫХ ►

На сохранение водных ресурсов и устойчивость окружающей среды может повлиять ухудшение состояния почв в результате ведения сельского хозяйства в засушливых районах, где в основном используются химические удобрения [23]. С использованием геоинформационной системы, полевых и лабораторных изысканий были исследованы

почвы сельскохозяйственных угодий, чтобы определить степень их ухудшения. Было выделено три категории деградации почв: слабая, средняя и сильная. Кроме того, были определены состояния недеградированной и слабодеградированной почвы. Причинами слабой деградации являются изменения гранулометрического состава, общей пористости и водопроницаемости [24]. Для предотвращения ухудшения состояния почв использовались карты потенциала деградации для участков с высоким риском. В местах, где уже наблюдается ухудшение состояния почв, было рекомендовано применять меры по их охране и восстановлению. Деградированные почвы также могут быть улучшены за счет внесения в них органических веществ, что повысит их стабильность и водоудерживающую способность [25].

При исследовании, рассмотренном в работе [26], была разработана многокритериальная методика для управления доступностью ресурсов подземных вод в бассейне долины Арген (Arghen) в Марокко. С помощью геоинформационной системы были созданы тематические карты, отображавшие гидродинамическое функционирование и геометрию водоносных горизонтов. Для картирования и классификации районов долины по потенциальным запасам подземных вод использовалось одиннадцать гидрологических, топографических и геологических переменных. Согласно статье [27] на 17% площади бассейна расположены зоны с высокими потенциальными запасами, на

64% – со средними, на 18% – с низкими. Для валидации карты потенциальных запасов подземных вод были использованы наборы данных для 159 буровых скважин [28].

Геологические риски представляют серьезные проблемы для экологии и человеческого общества, так как они вызваны геодинамической активностью или изменениями в окружающей среде. Технологии анализа геологических опасностей значительно продвинулись вперед благодаря расширению объемов данных дистанционного зондирования Земли и развитию методов глубокого обучения. Чтобы лучше понять применение глубокого обучения для оценки геологических опасностей, авторы работы [29] сосредоточились на таких типичных источниках данных, как системы мониторинга *in situ*, спутниковые платформы и беспилотные летательные аппараты.

На рисунке 2 в качестве примеров моделей глубокого обучения представлены сверточные (Convolutional Neural Networks, CNN) и рекуррентные (Recurrent Neural Networks, RNN) нейронные сети. Их применение для анализа геологических опасностей, потенциальные возможности и препятствия для дальнейших исследований в этом направлении рассмотрены в статье [30].

Для улучшения прогнозирования устойчивости склонов в работах [31–34] была предложена гибридная стратегия ансамблевого обучения методом стекинга (стекинг-ансамблирования). Среди 11 оптимизированных методов машинного


обучения при данном подходе использовался алгоритм искусственной пчелиной колонии (Artificial Bee Colony) для определения оптимальной комбинации базовых классификаторов и соответствующего мета-классификатора. Авторы работ [35–36] проводили обучение и тестирование с использованием конечноеlementного анализа. Благодаря указанной выше стратегии удалось значительно улучшить прогнозирование устойчивости склонов: показатель AUC (Area Under Curve – «площадь под кривой рабочих характеристик (ROC-кривой)») оказался на уровне 90,4%, что на 7% выше, чем у лучших из 11 оптимизированных методов машинного обучения [37]. Предложенный подход проде-

монстрировал заметно более хорошие результаты также и по сравнению с использованием стандартного ансамблевого классификатора. Еще для исследования значимости переменных, влияющих на устойчивость склонов, применялся метод линейной квантизации векторов признаков, или линейной векторной квантизации (Learning Vector Quantization, LVQ) [38–41].

ВЫВОДЫ ►

В данном обзоре хорошо продемонстрировано значительное влияние использования аналитики больших данных на инженерно-геологические изыскания. Эти исследования стали точными, эффективными и экологичными

благодаря переходу от старых эмпирических подходов к революционным методам, основанным на данных.

- Переход от традиционных эмпирических методов к технологиям, основанным на данных, повышает точность, эффективность и устойчивость.
- Искусственный интеллект и машинное обучение снижают неопределенности и повышают качество прогнозирования характеристик дисперсных и скальных грунтов.
- Интеграция аналитики больших данных в инженерно-геологические изыскания способствует внедрению устойчивых методов, согласующихся с международными усилиями по уменьшению воздействий на изменения климата. 

Источник для перевода ► (Source for the translation) ►

Vani V.D., Raj V.H., Dutt A., Raveendranath R., Tyagi L.K., Almusawi M., Yadav D.K. Digging deeper: the role of big data analytics in geotechnical investigations // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2024. Vol. 529 Proceedings of the 3rd International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering (ICS-MEE), 2024, Mangalam College of Engineering, Kottayam, Kerala, India. Article 04012. DOI:10.1051/e3sconf/202452904012.

Список литературы, использованной авторами переведенной статьи ► (References used by the authors of the translated paper) ►

1. Wang Y., Zhang W., Qi X., Ching J. Data analytics in geotechnical and geological engineering // Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. 2022. Vol. 16. № 1. Article 1-1.
2. Jayahari L., Nagachary K., Saxena K.K., Seeniappan K., Rana R.S. Mechanical characterisation and study of nickel based super alloy 718 at subzero temperatures // Advances in Materials and Processing Technologies. 2022. Vol. 8. № 2. P. 549–563.
3. Liu D., Liu H., Wu Y., Zhang W., Wang Y., Santosh M. Characterization of geo-material parameters: gene concept and big data approach in geotechnical engineering // Geosystems and Geoenvironment. 2022. Vol. 1. № 1. Article 100003.
4. Indira D. N. V. S. L. S., Ganiya R.K., Babu P.A., Xavier A.J., Kavisankar L., Hemalatha S., Senthilkumar V., Kavitha T., Rajaram A., Annam K., Yeshitla A. Improved artificial neural network with state order dataset estimation for brain cancer cell diagnosis. BioMed Research International. Hindawi, 2022. Vol. 2022. Article 7799812. <https://doi.org/10.1155/2022/7799812>.
5. You M., Hong Z., Tan F., Wen H., Zhang Z., Lv J. Stratigraphic identification using real-time drilling data // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2024. Vol. 16. № 9. P. 3452–3464.
6. Bhukya M.N., Kota V.R., Depuru S.R. A simple, efficient, and novel standalone photovoltaic inverter configuration with reduced harmonic distortion // IEEE access. 2019. Vol. 7. P. 43831–43845.
7. Salmi E.F., Phan T., Sellers E.J., Stacey T.R. A review on the geotechnical design and optimisation of ultra-long ore passes for deep mass mining // Environmental Earth Sciences. 2024. Vol. 83. № 10. P. 1–36.
8. Djogo M., Vasic M., Despotovic I., Mihajlovic S. Geological and geotechnical aspects of the most significant deep landslides in the Danube area on the territory of Vojvodina // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. № 9. Article 3622.
9. Naresh M., Munaswamy P. Smart agriculture system using IoT technology // International journal of recent technology and engineering. 2019. Vol. 7. № 5. P. 98–102.
10. Abbaszadeh Shahri A., Shan C., Larsson S., Johansson F. Normalizing large scale sensor-based MWD data: an automated method toward a unified database // Sensors. 2024. Vol. 24. № 4. Article 1209.
11. Gharieb A., Gabry M.A., Elsayy M., Edries T., Mahmoud W., Algarhy A., Darraj N. In-house integrated big data management platform for exploration and production operations digitalization: from data gathering to generative AI through machine learning implementation using cost-effective open-source technologies – experienced mature work // SPE Conference at Oman Petroleum & Energy Show, Muscat, Oman, April 2024. Paper SPE-218560-MS. <https://doi.org/10.2118/218560-MS>.

12. Ramprasad P., Basavapoornima C., Depuru S.R., Jayasankar C.K. Spectral investigations of Nd³⁺:Ba(PO₃)₂+La₂O₃ glasses for infrared laser gain media applications // *Optical Materials*. 2022. Vol. 129. Article 112482.
13. Dada M.A., Oliha J.S., Majemite M.T., Obaigbena A., Biu P.W. A review of predictive analytics in the exploration and management of US geological resources // *Engineering Science & Technology Journal*. 2024. Vol. 5. № 2. P. 313–337.
14. Goud J.S., Srilatha P., John K., Kumar R.V., Kumar K.T., Khan U., Raizah Z., Gill H.S., Galal A.M. Role of ternary hybrid nanofluid in the thermal distribution of a dovetail fin with the internal generation of heat // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. Vol. 35. Article 102113.
15. Li X., Zhao S., Shen Y., Xue Y., Li T., Zhu H. Big data-driven TBM tunnel intelligent construction system with automated-compliance-checking (ACC) optimization // *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 244. Article 122972.
16. Yue L., Jayapal M., Cheng X., Zhang T., Chen J., Ma X., Dai X., Lu H., Guan R., Zhang W.-H. Highly dispersed ultra-small nano Sn-SnSb nanoparticles anchored on N-doped graphene sheets as high performance anode for sodium ion batteries // *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 512. Article 145686.
17. IFCEE 2024: Drilled and Driven Foundations and Innovative and Emerging Approaches for Foundation Engineering / edited by D.M. Moug. American Society of Civil Engineers, 2024.
18. Girish K.M., Naik R., Prashantha S.C., Nagabhushana H., Nagaswarupa H.P., Raju K.S.A., Premkumar H.B., Sharma S.C., Nagabhushana B.M. Zn₂TiO₄:Eu³⁺ nanophosphor: self explosive route and its near UV excited photoluminescence properties for WLEDs // *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2015. Vol. 138. P. 857–865.
19. Goldstein D., Aldrich C., O'Connor L. A Review of Orebody Knowledge Enhancement using Machine Learning on Open Pit Mine Measure-While-Drilling Data // *MAKE*. MDPI, 2024. Vol. 6. № 2. P. 1343–1360.
20. Fernandez A., Segarra P., Sanchidrián J.A., Navarro R. Ore/waste identification in underground mining through geochemical calibration of drilling data using machine learning techniques // *Ore Geology Reviews*. 2024. Vol. 168. Article 106045.
21. Damodharan D., Rajesh Kumar B., Gopal K., De Poures M.V., Sethuramasamyraja, B. Utilization of waste plastic oil in diesel engines: a review // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2019. Vol. 18. № 4. P. 681–697.
22. Leung A.Y., Phoon K.K., Xiao T., Shuku T., Ching J. Report for ISSMGE TC309/TC304/TC222 and ASCE Geo-Institute Risk Assessment and Management Committee Fourth Machine Learning in Geotechnics Dialogue on “Machine Learning Supremacy Projects”, 5 December 2023, Okayama Convention Center, Okayama, Japan // *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2024. Vol. 18. № 1. P. 304–313. <https://doi.org/10.1080/17499518.2024.2316879>.
23. He B., Armaghani D.J., Lai S.H., He X., Asteris P.G., Sheng D. A deep dive into tunnel blasting studies between 2000 and 2023 – a systematic review // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024. Vol. 147. Article 105727.
24. Girish K.M., Prashantha S.C., Nagabhushana H., Ravikumar C.R., Nagaswarupa H.P., Naik R., Premakumar H.B., Umesh B. Multi-functional Zn₂TiO₄:Sm³⁺ nanopowders: excellent performance as an electrochemical sensor and an UV photocatalyst // *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2018. Vol. 3. № 2. P. 151–160.
25. Kelly R. A view on the state of practice in transportation geotechnics in Australia // *Transportation Geotechnics*. 2024. Vol. 46. Article 101259.
26. Recent Research on Geotechnical Engineering, Remote Sensing, Geophysics and Earthquake Seismology // *Proceedings of the 2nd MedGU, Marrakesh, 2022* (edited by A. Ciner et al.). Vol. 3.
27. Naik R., Chandra P.S., Bhushana N., Sharma Sh., Nagaswarupa H.P., Anantharaju K.S., Jnaneshwara D.M., Girish K.M. Tunable white light emissive Mg₂SiO₄:Dy³⁺ nanophosphor: its photoluminescence, Judd-Ofelt and photocatalytic studies // *Dyes and Pigments*. 2015. Vol. 127.
28. Maslakowski M., Lejzerowicz A., Pacanowski G., Kuszyk R.B. The use of non-invasive ERT method to diagnose karst in roadengineering in the Lublin Upland (Poland) // *Archives of Civil Engineering*. 2024. Vol. 70. № 1.
29. Sundaram R., Gupta S., Gupta S. Advances in the state-of-practice of geotechnical investigation in India // *Indian Geotechnical Journal*. 2024. Vol. 54. № 1. P. 109–133.
30. Rathod V.P., Tanveer S. Pulsatile flow of couple stress fluid through a porous medium with periodic body acceleration and magnetic field // *The Bulletin of the Malaysian Mathematical Society. Series 2*. 2009. Vol. 32. № 2. P. 245–259.
31. Alao J.O., Lawal K.M., Dewu B.B.M., Raimi J. The evolving roles of geophysical test sites in engineering, science and technology // *Acta Geophysica*. 2024. Vol. 72. № 1. P. 161–176.
32. Jisha P.K., Prashantha S.C., Nagabhushana H. Luminescent properties of Tb doped gadolinium aluminate nanophosphors for display and forensic applications // *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2017. Vol. 2. № 4. P. 437–444.
33. Alrobei H., Prashanth M.K., Manjunatha C.R., Kumar C.P., Chitrabanu C.P., Shivaramu P.D., Raghu M.S. Adsorption of anionic dye on eco-friendly synthesised reduced graphene oxide anchored with lanthanum aluminate: Isotherms, kinetics and statistical error analysis // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. № 7. P. 10322–10331.

34. Kulandaivel D., Rahamathullah I.G., Sathiyagnanam A.P., Gopal K., Damodharan D. Effect of retarded injection timing and EGR on performance, combustion and emission characteristics of a CRDi diesel engine fueled with WHDPE oil/diesel blends // Fuel. 2020. Vol. 278. Article 118304.
35. Hora S.K., Poongodan R., De Prado R.P., Wozniak M., Divakarachari P.B. Long short-term memory network-based metaheuristic for effective electric energy consumption prediction // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. № 23. Article 11263.
36. Raj T.V., Hoskeri P.A., Muralidhara H.B., Manjunatha C.R., Kumar K.Y., Raghu M.S. Facile synthesis of perovskite lanthanum aluminate and its green reduced graphene oxide composite for high performance supercapacitors // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2020. Vol. 858. Article 113830.
37. Jaidass N., Moorthi C.K., Babu A.M., Babu M.R. Luminescence properties of Dy³⁺ doped lithium zinc borosilicate glasses for photonic applications // Heliyon. 2018. Vol. 4. № 3. Article e00555.
38. Lakshmi L., Reddy M.P., Santhaiah C., Reddy U.J. Smart phishing detection in web pages using supervised deep learning classification and optimization technique ADAM // Wireless Personal Communications. 2021. Vol. 118. № 4. P. 3549–3564.
39. Spandana K., Rao V.S. Internet of Things (Iot) based smart water quality monitoring system // International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. № 3. P. 259–262.
40. Kumar K.U., Babu P., Basavapoornima C., Praveena R., Rani D.S., Jayasankar C.K. Spectroscopic properties of Nd³⁺-doped bismuth glasses for laser applications // Physica B: Condensed Matter. 2022. Vol. 646. Article 414327.
41. Cong Y., Inazumi S. Integration of smart city technologies with advanced predictive analytics for geotechnical investigations // Smart Cities. 2024. Vol. 7. № 3. P. 1089–1108.

Независимый электронный журнал ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
4 выпуска в 2025 году



WWW.GEOINFO.RU