

## ТРЕХМЕРНОЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ГЕОТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА В РАМКАХ ПРАВИЛ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПЛОЩАДКИ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛОГИСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В ДОЛИНЕ НОЛА (ЮЖНАЯ ИТАЛИЯ)

Принята к публикации 11.08.2025

Опубликована 18.08.2025

### ПЕТРОНЕ П.

Факультет наук о Земле, окружающей среде и ресурсах  
Неаполитанского университета имени Фридриха II,  
г. Неаполь, Италия

### АЛЛОККА В.

Факультет наук о Земле, окружающей среде и ресурсах  
Неаполитанского университета имени Фридриха II,  
г. Неаполь, Италия

### ФУСКО Ф.

Факультет гражданского строительства и инженерной  
защиты окружающей среды Миланского политехнического  
университета, г. Милан, Италия

### ИНКОНТРИ П.

Факультет наук о Земле, окружающей среде и ресурсах  
Неаполитанского университета имени Фридриха II,  
г. Неаполь, Италия

### ДЕ ВИТА П.

Факультет наук о Земле, окружающей среде и ресурсах  
Неаполитанского университета имени Фридриха II,  
г. Неаполь, Италия  
padevita@unina.it

### АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей адаптированный перевод статьи итальянских специалистов «Трехмерное инженерно-геологическое моделирование и геотехническая характеристика в рамках правил геотехнического проектирования на примере площадки строительства логистического комплекса в долине Нола (Южная Италия)» (Petrone et al., 2023). Она была опубликована в 2023 году в рецензируемом научном журнале *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* («Журнал по инженерной геологии и окружающей среде»), который выпускается издательством Springer Science+Business Media от имени Международной ассоциации инженерной геологии и окружающей среды. Указанная работа находится в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылок на

первоисточник и лицензию. В нашем случае полная ссылка на источник для перевода (Petrone et al., 2023) и лицензию открытого доступа приведена в конце.

При проектировании и строительстве зданий и другой инфраструктуры важным этапом для оптимизации затрат на строительство и минимизации рисков, связанных с непредвиденными грунтовыми условиями, является разработка надежной/достоверной трехмерной инженерно-геологической модели. Моделирование грунтовых условий (ground conditions) представляет собой сложную задачу, особенно в случаях геологических единиц (units) со сложной геометрией и пространственно изменчивыми геотехническими свойствами. В этом отношении для определения инженерно-геологических единиц обычно применяются комбинированные геологические и геотехнические критерии.

Эти концепции учтены в действующих правилах геотехнического проектирования, прописанных в Еврокоде 7, и в разработанных на их основе национальных нормативных документах, например в итальянских «Строительных нормах и правилах» (Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)). Однако, несмотря на такую развитую нормативную базу, нет обстоятельных методических рекомендаций по 3D инженерно-геологическому моделированию и геотехнической характеристике площадок будущего строительства.

В представленной работе рассматривается случай исследования весьма гетерогенной и гетерополитической пирокластично-аллювиальной стратиграфической обстановки равнины Нола (административная область Кампания, Южная Италия), характерной для площадки планируемого строительства логистического комплекса коммуны Нола. Использованные подходы основывались на анализе большого массива стратиграфических, лабораторных и полевых геотехнических данных, собранных для проектирования указанного объекта, с помощью инженерно-геологического моделирования в специализированном программном комплексе с расширенными возможностями для пространственного моделирования геологической и геотехнической информации, а также ее визуализации.

Полученные результаты показали, что представленный процесс работы, в том числе анализ статистической изменчивости геотехнических свойств и определение представительных значений геотехнических параметров, потенциально может рассматриваться как методологический подход, соответствующий действующим (в Италии. – Ред.) правилам геотехнического проектирования и фундаментальным принципам инженерно-геологического моделирования и картирования.

Перевод статьи выполнен при поддержке ГК «ПЕТРОМДЕЛИНГ» и Алексея Бершова.

#### **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

трехмерное моделирование; сложные грунтовые условия; геотехническое проектирование; строительство; гражданские инженерные сооружения; инженерно-геологическая единица; инженерно-геологический тип; трехмерная инженерно-геологическая модель.

#### **ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:**

Петроне П., Аллокка В., Фуско Ф., Инконтри П., Де Вита П. Трехмерное инженерно-геологическое моделирование и геотехническая характеристика в рамках правил геотехнического проектирования на примере площадки строительства логистического комплекса в долине Нола (Южная Италия) // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 2. С. 100–118.  
DOI:10.58339/2949-0677-2024-7-2-100-118.

## **ENGINEERING GEOLOGICAL 3D MODELING AND GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION IN THE FRAMEWORK OF TECHNICAL RULES FOR GEOTECHNICAL DESIGN: THE CASE STUDY OF THE NOLA'S LOGISTIC PLANT (SOUTHERN ITALY)**

Accepted for publication 11.08.2025

Published 18.08.2025

#### **PETRONE P.**

Department of Earth, Environmental and Resources Sciences (DiSTAR), Federico II University of Naples, Naples, Italy

#### **INCONTRI P.**

Department of Earth, Environmental and Resources Sciences (DiSTAR), Federico II University of Naples, Naples, Italy

#### **ALLOCCA V.**

Department of Earth, Environmental and Resources Sciences (DiSTAR), Federico II University of Naples, Naples, Italy

#### **DE VITA P.**

Department of Earth, Environmental and Resources Sciences (DiSTAR), Federico II University of Naples, Naples, Italy  
padevita@unina.it

#### **FUSCO F.**

Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico Di Milano, Milan, Italy

#### **ABSTRACT**

We present an adapted translation of the paper “Engineering geological 3D modeling and geotechnical characterization in the framework of technical rules for geotechnical design: the case study of the Nola’s logistic

plant (Southern Italy)" by Italian specialists (Petrone et al., 2023). It was published in 2023 in the peer-reviewed journal "Bulletin of Engineering Geology and the Environment" by the Springer Science+Business Media publishing company. It is an open access article under the CC BY 4.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted, the original source and the license are referred to. In our case, the full reference to the original paper (Petrone et al., 2023) used for the presented translation and to the open access license are given at the end.

In the design and construction of buildings and infrastructures, the reconstruction of a reliable 3D engineering geological model is an essential step to optimize costs of the construction and limit risks from failure or damage due to unforeseen ground conditions. The modeling of ground conditions is a challenging issue to be tackled especially in the case of geological units with complex geometries and spatially variable geotechnical properties. In such a direction, coupled geological and geotechnical criteria are usually adopted to define engineering geological units.

These concepts are considered by the current technical rules for geotechnical design such as the Eurocode 7 and by the national regulations which have followed it, known in Italy as "Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)".

Notwithstanding this advanced regulatory framework, no comprehensive indications on methodological approaches were given for the 3D engineering geological modeling and geotechnical characterization of a design and construction site.

In this paper, the case study of the highly heterogeneous and heteropic pyroclastic-alluvial stratigraphic setting of the Nola plain (Campania, Southern Italy) characterizing the site of the Nola's logistic plant is dealt with. The approaches are based on the engineering geological modeling analysis of a high number of stratigraphic, laboratory and in situ geotechnical data, collected for the design of the plant, and the use of a specialized modeling software providing advanced capabilities in spatial modeling of geological and geotechnical information, as well as in their visual representation.

The results obtained, including also the analysis of statistical variability of geotechnical properties and the identification of representative geotechnical values, can be potentially considered a methodological approach, consistent with the current technical rules for geotechnical design as well as with fundamental concepts of engineering geological modeling and mapping.

The translation of the paper was carried out with the support of the "PETROMODELING" Group of Companies and Aleksey Bershov.

#### KEYWORDS:

3D modeling; complex ground conditions; geotechnical design; construction; civil engineering works; engineering geological unit; engineering geological type; 3D engineering geological model.

#### FOR CITATION:

Petrone P, Allocca V, Fusco F, Incontri P, De Vita P. Trekhmernoe inzhenerno-geologicheskoe modelirovaniye i geotekhnicheskaya kharakteristika v ramkakh pravil geotekhnicheskogo proektirovaniya na primere ploshchadki stroitel'stva logisticheskogo kompleksa v doline Nola (Yuzhnaya Italiya) [Engineering geological 3D modeling and geotechnical characterization in the framework of technical rules for geotechnical design: the case study of the Nola's logistic plant (Southern Italy)] // Geoinfo. 2024. T. 7. № 2. S. 100–118. DOI:10.58339/2949-0677-2024-7-2-100-118 (in Rus.).

#### ВВЕДЕНИЕ ►

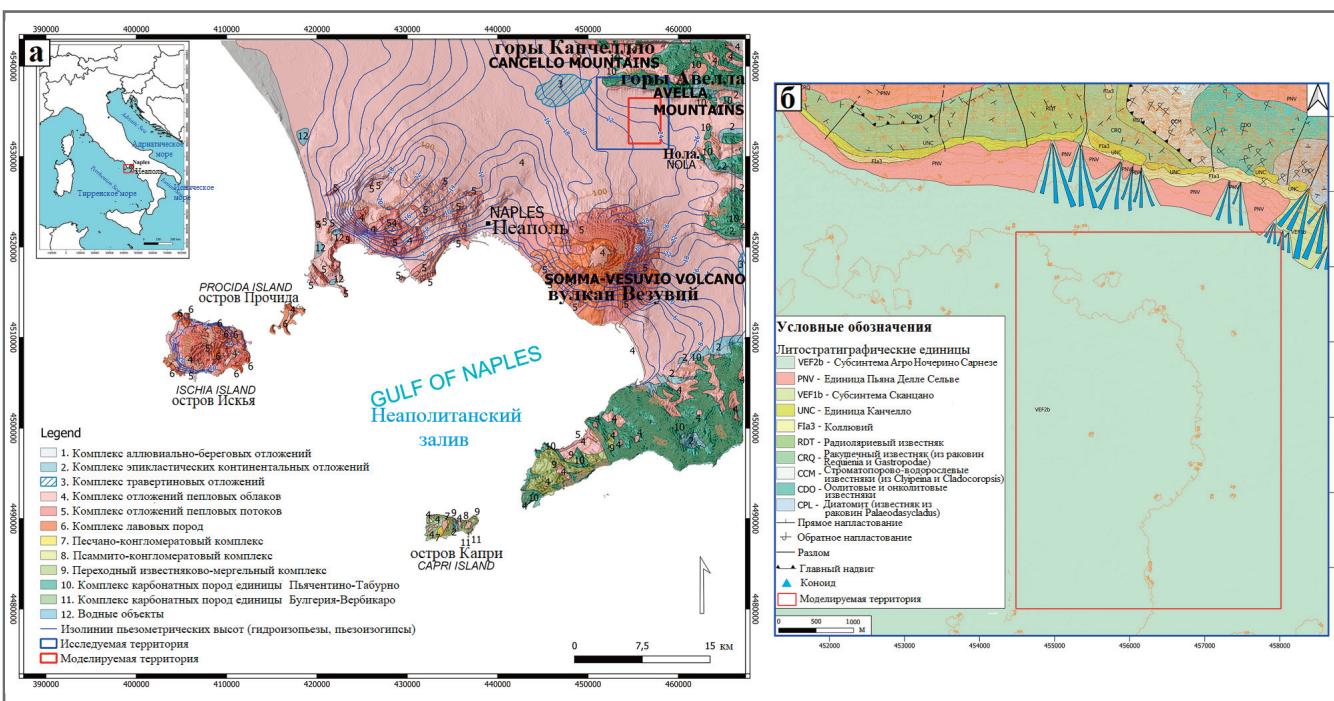
Для проектирования и строительства гражданских инженерных сооружений фундаментальным этапом для оптимизации затрат и минимизации соответствующих рисков является трехмерное инженерно-геологическое моделирование, включающее распознавание геологических материалов, характеристику их физико-механических свойств и воссоздание трехмерной геометрии. В этом отношении литологические/стратиграфические характеристики и неперекрывающиеся геотехнические свойства позволяют идентифицировать инженерно-геологические единицы (units), которые рассматриваются как специализированная категория геологических единиц с однородными литологическими/стратиграфическими и инженерными свойствами [1]. Эти единицы используются для картирования и применимы при проектировании, строительстве и экс-

плутации гражданских сооружений. Кроме того, полагается, что выделение инженерно-геологических единиц позволяет строить не только инженерно-геологические карты, но и 3D модели грунтовых оснований (subsoil). В частности, инженерно-геологическое картирование стало чрезвычайно актуальным после предложения номенклатуры инженерно-геологических единиц [1], которая была принята аналогично номенклатуре литостратиграфических единиц [2] как зависящая от масштаба анализа. В результате были установлены различные типы инженерно-геологических единиц – от качественных до количественных – в зависимости от вида исследований, которые необходимо проводить с учетом масштаба изысканий и представления данных [3].

В ходе дальнейшего развития концепций Фукс [4], следуя идеям Терцаги [5], подчеркнул важность геотехники

в сфере геологии, применяемой в гражданском строительстве, отметив отсутствие на классических геологических картах количественной информации по геотехническим свойствам дисперсных и скальных грунтов, таким как прочность на сдвиг, проницаемость и сжимаемость. Соответственно, инженерно-геологическое картирование сильнее фокусировалось на выделении инженерно-геологических единиц, характеризующихся однородными литостратиграфическими и геотехническими свойствами, геометрические границы которых соответствуют изменениям их геотехнических особенностей.

Дальнейший прогресс в определении инженерно-геологических моделей (ИГМ) был достигнут Международной ассоциацией по инженерной геологии (МАИГ/IAEG) и Комиссией по окружающей среде C25 [6], которые выделили концептуальные, наблюдательные



**Рис. 1.** Фрагменты: а – гидрогеологической карты Южной Италии масштаба 1:250000 (по [46] с изменениями); б – геологической карты Италии масштаба 1:50000 (с изменениями с сайта итальянского Высшего института охраны окружающей среды и исследований – ISPRA)

и аналитические ИГМ с указанием областей их применения.

Концепции инженерно-геологических единиц (units) и 3D моделирования грунтовых оснований полностью соответствуют требованиям Еврокода 1997 года (EN 1997-1:2004 [7]) и национальным нормативным документам, разработанным на его основе. К последним относятся итальянские «Строительные нормы и правила» (“Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)”), принятые в 2008 и 2018 годах [8], в которых прописаны правила планирования геотехнических изысканий и обработки их результатов. В рамках этих документов создание 3D инженерно-геологических моделей стало важным инструментом познания, дающим больше возможностей для наглядного отображения пространственной изменчивости инженерно-геологических свойств грунтового основания (subsoil) [6, 9, 10]. Поэтому в последние годы в области трехмерного геологического моделирования был достигнут значительный прогресс.

Алан и Норман [11] для построения объемных моделей предложили метод горизонтов (Horizons Method). Некоторые исследователи разработали программное обеспечение для 3D геологического моделирования с использованием платформ/программ для создания 3D графики, таких как OpenGL [12] и GOCAD [13]. Кроме того, Британская геологическая служба (BGS) создала трехмерные геологические модели в

широком диапазоне масштабов с помощью 3D геоинформационной системы [14–17]. На базе Генеральной инспекции карьеров Франции (The General Inspectorate of Quarries of France) была разработана многослойная 3D геологическая модель территории г. Парижа [18]. Также была предложена разработка 3D геологических моделей, чтобы показать распределение и объемы пригодных для добычи полезных ископаемых, приуроченных к четвертичным отложениям на юго-западе Германии [19], а также залежей угля на западе Греции [20]. Некоторые авторы [21–23] улучшили управление данными и plugin для 3D геомоделирования территории столицы Китая.

В более поздних исследованиях инженерно-геологические модели создавались на основе данных бурения, геотехнических или геофизических изысканий с использованием пакетов программ для 3D моделирования, например Leapfrog [24, 25]. Достигнутый прогресс в вычислительной скорости, в сборе и оцифровке увеличивающегося количества геологических и геотехнических данных привел к улучшению их трехмерного представления, что способствовало более точной оценке соответствующих опасностей и неопределенностей при градостроительном планировании [16, 26–30]. Это позволило перейти от концептуальной модели к реалистичной [31] путем объединения/интеграции пространственной ин-

формации с показателями физических и геотехнических свойств, которые должны быть оценены с помощью статистических подходов.

И наконец, Бейнс с сотрудниками [32] занимались вопросом неопределенностей в инженерно-геологической модели, рассматривая ее как комплекс взаимосвязанных концептуальных моделей и данных наблюдений, которые характеризуются соответственно эпистемической (обусловленной ограниченностью знаний, сведений, возможностей модели) и алеаторной (связанной со случайными вариациями в процессах или явлениях) неопределенностью [33, 34]. При этом чем больше объем данных наблюдений, тем выше точность модели. На точность также влияет структура данных, которая определяет алгоритм моделирования и визуализацию результатов [35].

В процессе данного исследования 3D геологические и инженерно-геологические модели создавались в программе RockWorks (разработанной компанией RockWare Inc.) на основе обширной базы литологических и геотехнических данных, полученных при детальных стратиграфических и геотехнических изысканиях, выполненных для проекта “C.I.S. – Interporto Campano – Vulcano Buono”. В соответствии с Еврокодом 1997 года была проведена статистическая оценка геотехнических свойств инженерно-геологических единиц на основе результатов полевых и лабораторных испытаний.

Сложная геометрия пирокластических-аллювиальных отложений исследуемой территории и их пространственно изменчивые геотехнические характеристики, включая очень плохие свойства торфяных линз, определили сложность задачи данной работы, заключавшейся в разработке ориентированного подхода к геотехническому проектированию гражданских инженерных сооружений при сложных грунтовых условиях, который должен соответствовать действующим техническим регламентам по геотехническому проектированию.

## ОПИСАНИЕ ИЗУЧАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ ►

### Геологические и геоморфологические особенности равнины Нола ►

Равнина Нола находится в северо-восточном секторе Кампанская равнины, примерно в 16 км к северу от вулкана Везувий, к северу от гор Канчелло и к востоку от гор Авелла (рис. 1). Геолого-структурная обстановка исследуемой территории сформировалась вследствие работы генетических механизмов Кампансской равнины, которые определялись сильными взаимодействиями между вулканическими, тектоническими и седиментационными процессами и явлениями, происходившими в четвертичный период [36–40].

Кампанская равнина представляет собой широкую полуграбеновую структуру [41], образованную системами нормальных разломов, протягивающихся в направлениях СВ-ЮЗ, СЗ-ЮВ и В-З, которые образовывались с позднего плиоцена [36] до раннего плейстоцена [42] и опустили Апеннинскую горную цепь со стороны тирренского побережья. Анализ мощных толщ аллювиальных и пирокластических отложений, заполняющих эту геологическую структуру, выполненный на основе бурения глубоких скважин, позволил отнести их формирование ко времени от среднего-позднего плейстоцена до голоцену [36, 38, 43–47].

С геоморфологической точки зрения исследуемая территория расположена в верхней части долины Реджи-Ланы, которая в целом характеризуется искусственной дренажной сетью, построенной между 1610 и 1616 годами для освоения территории и борьбы с разливами реки Кланио. Эта долина окружена горными хребтами, образованными мезокайнозойскими карбонатными породами [48, 49]. Перепады

высот там в целом очень невелики, что характеризует рельеф как субравнинный с крутизной поверхности менее 2% при наклоне в юго-западном направлении.

Из-за равнинной морфологии и ограниченного дренажа эта территория когда-то характеризовалась болотистой средой, которая способствовала образованию органических отложений, таких как торф и палеопочки, переслаивающихся с аллювиальными и пирокластическими отложениями, образовавшимися при извержениях вулкана Везувий и вулканов района Флегрейские поля за последние 10 тыс. лет [50, 51]. Кроме того, другие исследования (например, [52]) показали, что формированию болотистой среды способствовали также лахары, обломочные и селевые потоки и повторяющиеся наводнения.

Основные геологические особенности этой территории можно разделить на две группы. В первую входят коренные мезозойские литостратиграфические единицы карбонатной платформенной формации, образующие горы Канчелло и Авелла, которые граничат с исследуемой территорией на севере и на востоке. Вторая группа включает четвертичные отложения, образованные переходными (от морских к континентальным) фациями, связанными с положительными гляциоэвстатическими колебаниями, которые происходили в течение среднего-верхнего плейстоцена, и пирокластические отложения пеплопадов и пепловых потоков [53, 54], возникавших в результате интенсивной вулканической деятельности 116 тыс. лет назад (кампанийский серый туф, [55]) и 15 тыс. лет назад (неаполитанский желтый туф, [56]).

На исследуемой территории эти отложения включают дегритово-коллювиальную единицу (PNV) *Пиано-делле-Сельве* и дегритовую единицу *Гъяе Карбонатике ди Туфино* (VEF2b2). Первая представляет собой пирокластический-аллювиальный комплекс, образованный супесчано-гравийными отложениями. С геотехнической точки зрения эти отложения, как правило, характеризуются низкими коэффициентами пористости/пустотности, что приводит к соответствующему оседанию при увеличении вертикальной нагрузки. А вторая единица состоит из аллювиальных известняковых гравийно-галечных отложений с полигенным песчаным заполнителем. По физико-механическим свойствам эти отложения можно охарактеризовать как в различной степени

водонасыщенные грунты со значительной величиной модуля упругости [57].

### Инженерно-геологические проблемы исследуемой территории ►

В конце 1970 года один из участков равнины Нола был выбран в качестве площадки для строительства логистического и коммерческого района, образованного следующими тремя сооружениями с различными и взаимодополняющими функциями:

- одним из ведущих в Европе распределительных центров торговой платформы B2B (Business-to-Business) «Центр Ингрессо Звилуппо», то есть «Центр развития оптовой торговли» (Centro Ingrosso Sviluppo – CIS);
- международной логистической платформой, связанной с ведущими мировыми транспортными узлами, «Интерпорто Кампано» (Interporto Campano);
- многофункциональным центром торговли, отдыха и развлечений «Вулькано Буно» (Vulcano Buono).

«Интерпорто Кампано» (<https://www.interportocampano.it>) – это одна из важнейших логистических платформ в Европе, которая предлагает транспортную систему, интегрированную с железнодорожными, автомобильными и морскими линиями, для предоставления услуг по хранению, управлению и распределению товаров. Это мультимодальная система сооружений (связанная с использованием различных видов транспорта в одной перевозке), занимающая разные площадки (рис. 2) и включающая ряд сервисов для всей охватываемой ею территории, (здания, склады, путепроводы, железнодорожную станцию и различную инфраструктуру). Для проектирования и строительства этой системы было выполнено множество геологических и геотехнических исследований, позволивших распознать сложную стратиграфическую и литологическую природу, а также физико-механические характеристики грунтов, прямо или косвенно имеющих отношение к строительству. Анализ стратиграфических данных, полученных в результате бурения с непрерывным отбором образцов керна, показал, что верхние 4 м грунта состоят из чередующихся песчанистых пылеватых грунтов (sandy silts) и пылеватых песков (silty sands), относящихся к группе ML (низкопластичным пылеватым грунтам) по унифицированной системе классификации грунтов USCS (Unified Soil Classification).

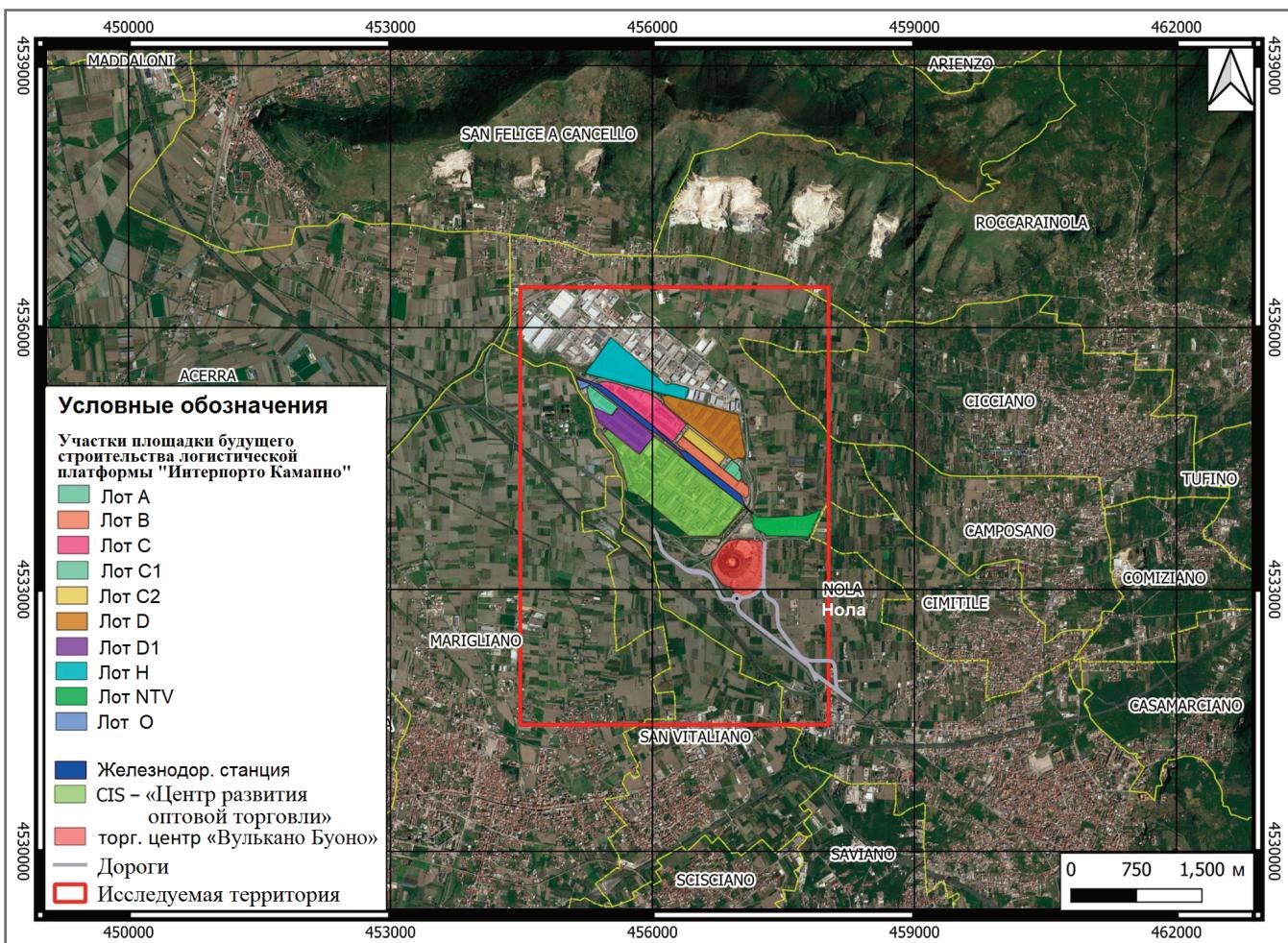


Рис. 2. Карта логистического комплекса «Интерпорт Кампано» с указанием конкретных подзон, на которые он разделен в соответствии с логистической деятельностью

cation System). А глубже всего залегают литоидные и псевдолитоидные туфы.

Проведенные на этой территории геотехнические исследования и лабораторные испытания позволили отобрать образцы грунта ненарушенного сложения и охарактеризовать их геотехнические свойства. Кроме того, серия таких испытаний, как стандартное динамическое зондирование методом SPT и статическое зондирование методом CPT, выявила очень сложную геотехническую обстановку. Наличие сильноожимаемых органических грунтов и их неравномерное пространственное распределение, характеризующееся линзовидной геометрией, были признаны основными геотехническими проблемами, поскольку потенциально они могут вызывать неравномерные осадки сооружений. По этой причине на определенных площадках (лотах NTV, О и С на рисунке 2) были проведены геотехнические исследования, направленные на действие консолидации этих отложений путем создания искусственной нагрузки от насыпных грунтов, равной нагрузке от возводимых сооружений. Такая

практика привела к осадкам величиной от 0,7 до 15,9 см.

## ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ►

### Построение 3D инженерно-геологических моделей ►

В представленной работе выполнено количественное представление грунтового огнования (subsoil) на основе геологических и геотехнических исследований с высокой детализацией оценки литологических и геотехнических свойств (рис. 3). Благодаря масштабу анализа ( $>1:5000$ ) выделенные инженерно-геологические единицы (units) соответствуют максимальному уровню детализации и считаются инженерно геологическими типами (engineering geological types) [1]. Инженерно-геологические свойства были определены с помощью лабораторных испытаний и полевых измерений, а также проанализированы с использованием статистических методов в соответствии с рекомендациями ЕвроКода (1997 г.).

С использованием программы *RockWorks* были построены геологическая и инженерно-геологическая модели исследованной территории. Данный инструмент позволяет обрабатывать разнородные данные (литологические, стратиграфические, геофизические, геохимические, гидрогеологические, геотехнические) и применять различные методы интерполяции для создания 3D моделей – построение перекрывающихся регулярных сеток (regular mesh surfaces) для создания сеточной модели (grid model) или воксельных матриц для создания объемных моделей (solid model).

### Организация собранных данных и создание базы данных ►

На основе стратиграфических и геотехнических данных была реконструирована геологическая модель изучаемой территории (рис. 4). Наборы этих данных включают результаты:

- бурения 41 скважины с непрерывным отбором образцов керна;



Рис. 3. Блок-схема использованного методологического подхода

- 107 стандартных пенетрационных испытаний (динамического зондирования методом SPT);
- 93 испытаний на внедрение конуса (статического зондирования методом CPT);
- 73 лабораторных испытаний образцов грунта ненарушенного сложения, отобранных в ходе изысканий.

Первым этапом работ стала геопространственная привязка мест расположения скважин и выполнения испытаний методом CPT (в международной системе координат UTM WGS84). Высотные отметки были получены по доступной цифровой модели рельефа на основе лазерной съемки из базы геоданных Неаполитанского городского метрополитена (Città Metropolitana di Napoli) (<http://sit.cittametropolitana.na.it/lidar.html>).

На втором этапе были созданы два набора данных, относящихся к стратиграфической и геотехнической информации, полученной в результате бурения и испытаний CPT соответственно. На основе множества доступных данных были разработаны три разных типа 3D моделей грунтового основания (sub-soil) – литологическая, геотехническая и инженерно-геологическая. Литологическая модель создавалась с использованием результатов непосредственных наблюдений в ходе стратиграфических исследований при бурении скважин. Эти данные были импортированы и обработаны в системе управления данными

ми бурения (*borehole data manager*) соответствующего программного обеспечения с помощью инструмента *lithology* («литология»), связанного с таблицей *lithology type* («литологический тип»), определяющей репрезентативное ключевое слово (*keyword*), то есть литологический маркер, и значение G (*G value*) для каждого наблюдаемого литологического типа. *Ключевое слово, или литологический маркер*, представляет собой краткое однозначное название, присваиваемое литологии после пересмотра классификационных терминов. Сначала использовалось классификационное название на основе именно гранулометрического состава [58]. А потом применение унифицированной системы классификации грунтов USCS позволило присвоить каждому литологическому типу название, а также буквенно-цифровое (*symbol*) и графическое (*pattern*) обозначения. Значения G представляют собой целые числа, используемые для отображения литологических типов в интерполированных литологических моделях.

Для оценки параметров сжимаемости (compressibility parameters), которые применялись при создании геотехнических моделей, использовались результаты полевых и лабораторных геотехнических испытаний. При этом рассматривалось несколько эмпирических формул, известных из геотехнической научной литературы. Эти формулы ос-

новывались на результатах испытаний песчаных и пылеватых грунтов, аналогичных исследуемым, методами SPT и CPT. Для создания инженерно-геологических моделей с высоким разрешением применялось непрерывное определение параметров по вертикали с помощью испытаний CPT. Поэтому геотехнические параметры, полученные при испытаниях SPT, не использовались для создания инженерно-геологической модели, хотя они применялись для валидации значений, полученных при испытаниях CPT. Таким образом, параметрами, сохраненными во вкладке P-Data («точечные данные») базы данных/модуля Borehole Manager («Управление данными по скважинам») программы Rockworks и использованными для построения геотехнических моделей (с шагом по глубине 0,2 м), были сопротивление под конусом и по боковой поверхности зонда. Кроме того, с помощью эмпирических формул были получены модуль упругости, одометрический модуль деформации и индекс компрессии (compression index).

*Модуль упругости E* оценивался как среднее значение результатов вычислений по приведенным ниже эмпирическим формулам.

1. *Формула Де Бира* [59], основанная на корреляционной связи между модулем упругости E и сопротивлением под конусом зонда ( $q_c$ ) с эмпирическим

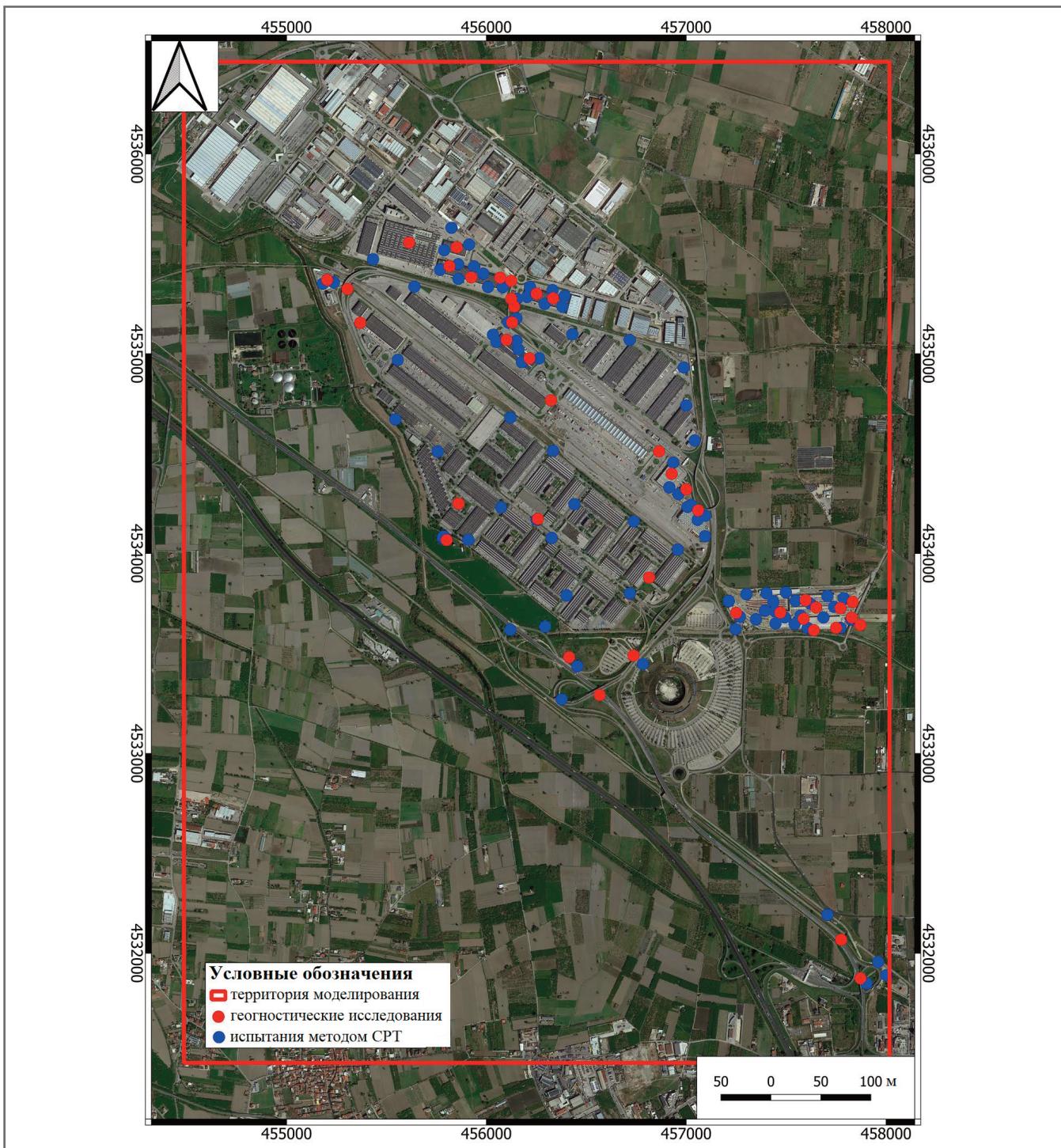


Рис. 4. Карта территории моделирования с указанием мест расположения скважин и проведения статического зондирования методом СРТ

коэффициентом  $\alpha$ , значение которого назначается на основе характера испытанного грунта [60]:

$$E = \alpha \cdot q_c (\text{МПа}). \quad (1)$$

2. Формула Шмертмана [61, 62], по которой модуль напрямую коррелирует с сопротивлением под конусом с постоянным коэффициентом 2,5:

$$E = 2,5 \cdot q_c (\text{кг}/\text{см}^2). \quad (2)$$

3. Формула Феллениуса [63]:

$$E = \alpha \cdot q_t \cdot C_n (\text{кПа}), \quad (3)$$

где  $q_t$  – скорректированное сопротивление под конусом зонда ( $q_t = q_c + u_2 - (1 - a)$ );  $q_c$  – измеренное сопротивление под конусом;  $u_2$  – поровое давление, измеренное у основания конуса (между конусом и муфтой трения);  $a$  – отношение площади поперечного сечения основания конуса к площади поперечного сечения внутренней части зонда, связанной с конусом, на которой закреплены датчики конуса;  $\alpha$  – эмпирический коэффициент, назначенный «Ка-

надским руководством по фундаментостроению» [60].

Одометрический модуль деформации  $M$  оценивался по уравнению Сангерлера [64], применимому для пылеватых (silts) и пылеватых песчаных (silty sands) грунтов:

$$M (\text{МПа}) = q_c \cdot \alpha_m, \quad (4)$$

где константа  $\alpha_m$  зависит от литологического типа и назначается на основе системы классификации грунтов USCS.

И наконец, Урми и Ансари [65] предложили оригинальное решение для получения значения индекса компрессии  $C_c$  (compression index) в соответствии со следующими корреляционными зависимостями:

$$C_c = 0,24 e^{-0,19 q_{cl}}, \quad (5)$$

$$C_c = 0,2336 - 0,0333 q_{cl}, \quad (6)$$

где  $q_{cl}$  – сопротивление под конусом зонда.

Для выделения и описания инженерно-геологических единиц (units), то есть инженерно-геологических типов (types) [1], были выполнены интеграция и интерпретация литологических и геотехнических данных.

### Размеры модели ►

Размеры модели были предварительно установлены с учетом граничных координат и расстояний между соседними узлами (шага узлов сетки), которые определяют плотность моделей, а именно их детализацию и время, необходимое для обработки данных. Площадь моделируемой территории составила примерно  $17,5 \times 10^6 \text{ м}^2$  (см. рис 4).

Для достижения баланса между разрешением модели и временем обработки были установлены шаги узлов сетки по осям  $X$  и  $Y$ , равные половине среднего расстояния между скважинами, а шаг по оси  $Z$  был соотнесен с шагом отбора образцов из керна в соответствии с рекомендациями по моделированию в программном комплексе *Rockworks* (см. сайт его разработчика – компании RockWare: <https://www.rockware.com>). В данном исследовании для всех рассматриваемых моделей изначально был установлен шаг по осям  $X$  и  $Y$  величиной 500 м на основе среднего расстояния между инженерно-геологическими скважинами, которое составляло примерно 1000 м. Однако для улучшения пространственного разрешения шаг был уменьшен до 100 м. Это сочли приемлемым компромиссом между разрешением и временем обработки, которое в результате оказалось в три раза больше, чем при разрешении в 500 м. А для вертикальной оси  $Z$  были отдельно протестированы разные значения шага и общей высоты сетки. В итоге сделали выбор в пользу более хорошего разрешения по высоте, что было обусловлено следующими факторами:

а) разными значениями глубины скважин, которые превышали таковые при испытаниях CPT;

б) шагом сетки по оси  $Z$  величиной 0,1 м, который был меньше шага измерений при испытаниях CPT (составлявшего 0,2 м).

В итоге в соответствии с заданными параметрами объем литологической модели, полученной по обработанным результатам изысканий (бурения), получился примерно  $745,7 \times 10^6 \text{ м}^3$ , а объем геотехнических моделей, построенных по результатам испытаний методом CPT, составил около  $420,0 \times 10^6 \text{ м}^3$ .

### Создание 3D моделей ►

Для 3D моделирования грунтового основания использовались различные алгоритмы интерполяции. Выбор наиболее подходящего метода интерполяции основывался на типе создаваемой модели и обоснованности полученных результатов.

*Литологическая модель* была создана с использованием данных по литологии, полученных непосредственно в результате бурения скважин, и алгоритма интерполяции путем блэндинга литологических данных (литоблендинга), который является единственным доступным методом для литологического моделирования латеральных литологических переходов – гетероптических фаций и геологических тел с линзовидной геометрией. Литоблендинг (lithoblenning) – это алгоритм, который экстраполирует литологические типы по результатам исследований скважин в объемную блочную модель («смешивает» литологические данные). Он строит лигроны вокруг каждой скважины, которые могут резко обрываться при встрече с литологической зоной соседней скважины. Если конкретнее, данный алгоритм функционирует как геопространственный метод ближайшего соседа, предназначенный исключительно для литологического моделирования.

После построения трехмерной модели использованное программное обеспечение позволило извлекать разрезы и 3D схемы разрезов (fence diagrams) с помощью соответствующих инструментов – *Lithology Section* («Литологический разрез») и *Lithology Fence Diagram* («3D схема литологических разрезов»).

Для создания трехмерных моделей также использовались значения геотехнических параметров – сопротивлений под конусом и по боковой поверхности зонда, полученных при испытаниях CPT, а также модуля упругости, одометрического модуля деформации и индекса компрессии, рассчитанных по эмпирическим формулам. Для построения

3D моделей геотехнических параметров наиболее подходящим по сравнению с другими доступными для объемного моделирования методами (триангуляцией и кригингом) экспертами был признан *метод обратных расстояний с учетом анизотропии* (inverse distance anisotropic interpolation method). Этот метод основан на направленном поиске, что может улучшить интерполяцию значений вокселей между кластерами точек данных и может быть полезным для моделирования данных по скважинам в слоистых отложениях.

И наконец, для построения поверхностей раздела (границ) между перекрывающимися (overlapping) инженерно-геологическими единицами был применен алгоритм кригинга (kriging).

С помощью комбинированной интерпретации литологических и геотехнических моделей в конечном итоге была создана *инженерно-геологическая модель*, показывающая обобщенное (synthetic) подразделение грунтового основания (subsoil) на слои, соответствующие определенным инженерно-геологическим типам (types) [1].

### Статистическая характеристика геотехнических свойств ►

Согласно Еврокоду-1997 геотехнические свойства инженерно-геологических единиц (units) описываются *характеристическими значениями* (*characteristic values*), установленными с учетом статистического разброса, которые можно считать применимыми к проектированию гражданских сооружений, взаимодействующих с их грунтовыми основаниями (и тогда называть «проектными характеристическими значениями геотехнических параметров»; см. рис. 3).

В отношении прочности на сдвиг или сжимаемости характеристическое значение – это величина с приемлемо высокой вероятностью превышения, что подразумевает низкую вероятность непревышения и, следовательно, принятие низкого уровня риска. До введения Еврокода-1997 не существовало руководств, которые бы предоставляли информацию о том, как определять характеристические значения геотехнических параметров для использования на стадии проектирования. В связи с этим различные авторы обсуждали правильный подход. Например, Симпсон и др. [66] отметили сложность признания однозначно подходящего метода для определения характеристических значений, поскольку степень неопределенности конкретного геотехниче-

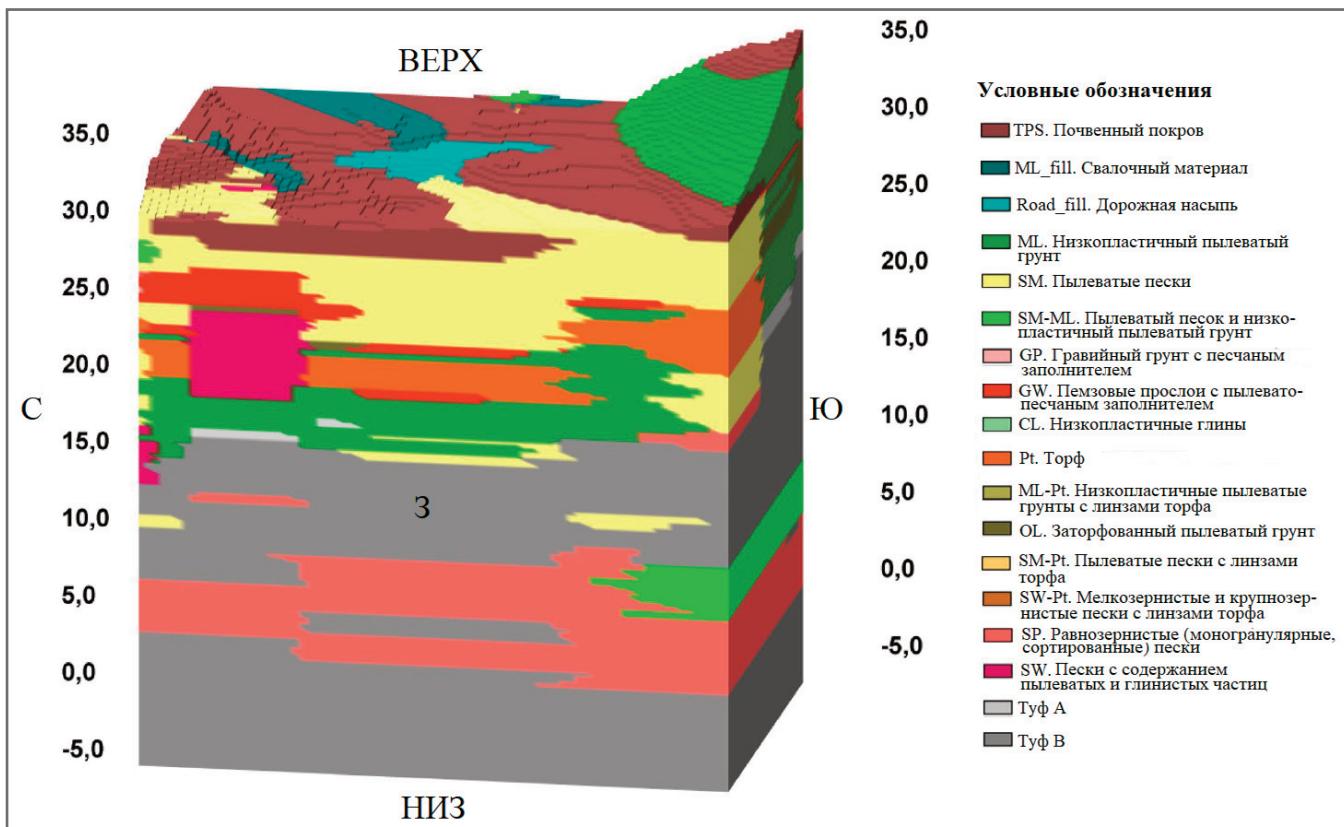


Рис. 5. Литологическая модель с классификацией по системе USGS

ского параметра значительно варьирует в зависимости от локальных геологических условий. Они пришли к выводу, что среднее значение не подходит в качестве характеристического и рекомендовали учитывать наихудшие условия, которые могут встретиться или возникнуть, хотя этот подход и может быть чрезвычайно консервативным. В 1981 году в «Датском своде правил по фундаментостроению» [67] также было констатировано, что характеристические значения параметров прочности и деформируемости грунта должны устанавливаться путем консервативной оценки на основе результатов соответствующих измерений, предоставляя проектировщику выбор уровня консервативности этой оценки.

И наконец, в Еврокоде 7 представлены рекомендации по планированию геотехнических исследований и использованию их результатов с констатацией того, что характеристические значения геотехнических параметров могут быть определены с помощью статистических методов обработки данных лабораторных и полевых испытаний. Кроме того, выбор репрезентативного значения должен основываться не только на чисто статистическом анализе результатов, но и на мнении проектировщика в связи с решаемой им инженерной задачей.

В этом исследовании использовались статистические процедуры для на-

хождения репрезентативных значений пяти инженерно-геологических параметров, которые были определены для характеристики инженерно-геологических типов: сопротивления под конусом и по боковой поверхности зонда при испытаниях методом СРТ, модуля упругости, одометрического модуля и индекса компрессии, полученных с помощью эмпирических формул на основе результатов СРТ.

Этот подход основывался на частотном анализе, результаты которого были представлены с использованием 25, 50 и 75-го процентиля, показанных в виде диаграмм рахмаха типа «ящиков с усами» (box plots) (указанные процентили представляют собой собой значения рассматриваемой случайной величины, которые она не превышает с вероятностями соответственно 25, 50 и 75%; иначе говоря, 25, 50 и 75% значений этой величины находятся ниже соответствующих процентиелей. – Ред.).

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ ►

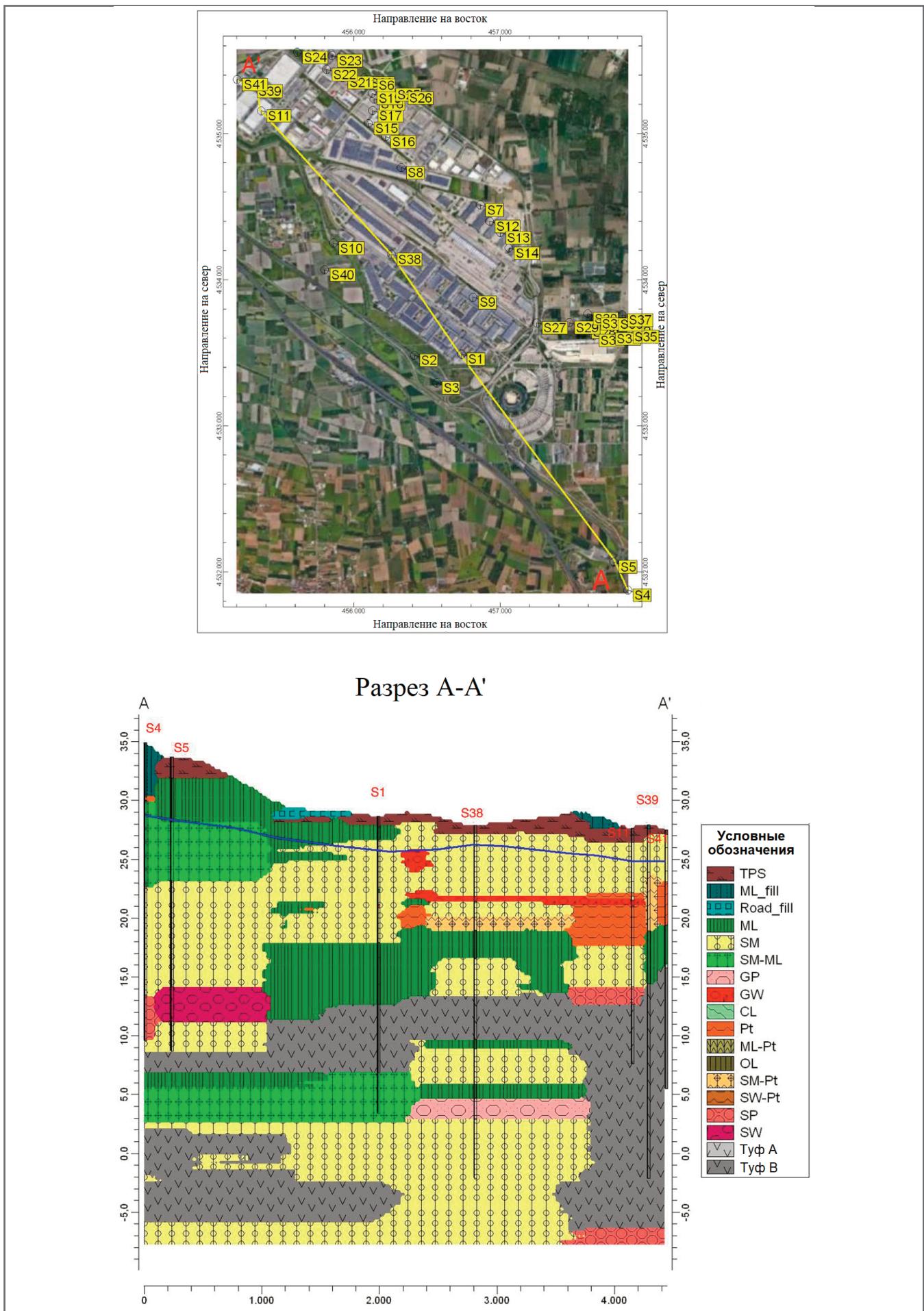
Здесь будут представлены и обсуждены результаты процесса моделирования (3D модели и 2D изображения будут показаны с увеличением вертикального масштаба в 100 раз для улучшения визуализации тонких слоев грунта).

## Литологическая модель ►

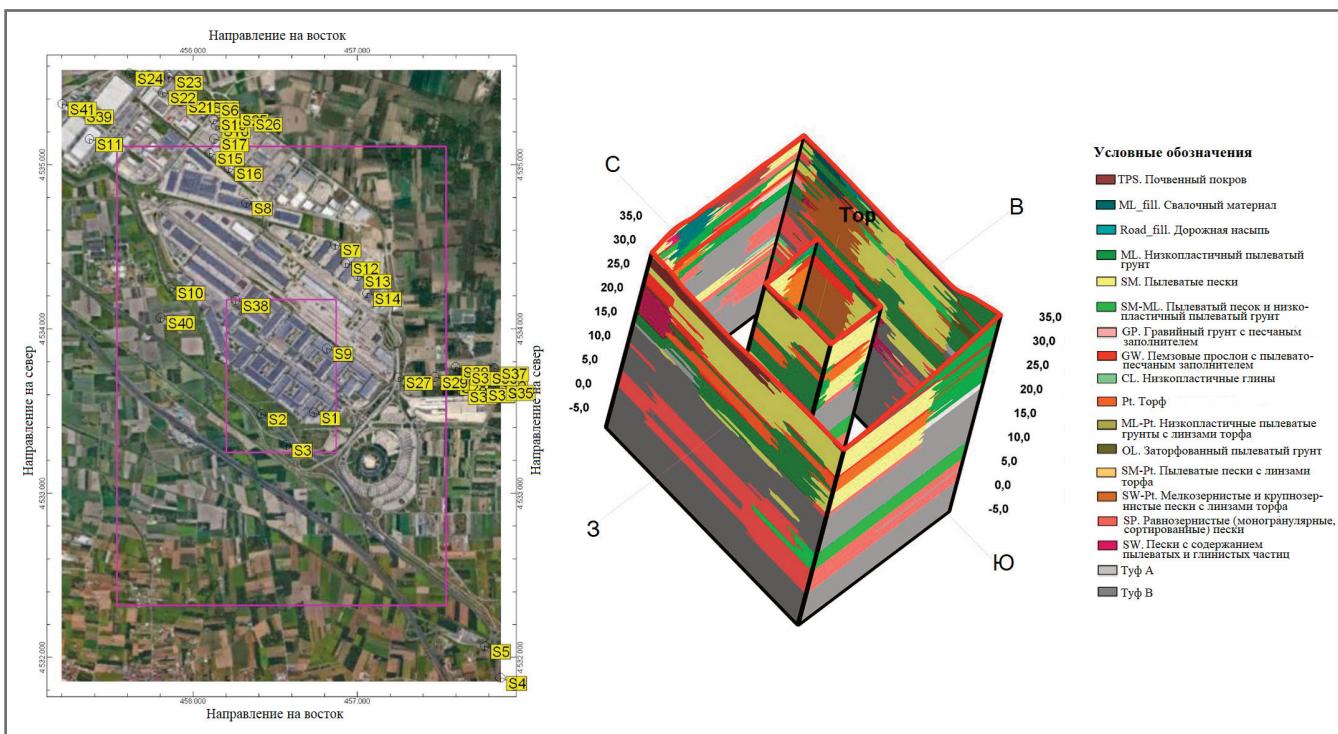
Трехмерная литологическая модель (рис. 5) показывает распределение литологических типов, непосредственно наблюдавшихся по скважинам, выделяя латеральные переходы, обусловленные гетероптическими фациями, и наличие геологических тел линзовидной формы. Исследуемая территория в основном характеризуется чередованием низкопластичных пылеватых грунтов (ML) и пылеватых песков (SM) с торфяными линзами (Pt) и редкими слоями крупнозернистых грунтов (GP, GW, SP, SW). В более глубокой зоне залегает туфовая формация с горизонтальными и вертикальными разрывами сплошности, что определяет взаимное проникновение (клинообразное переслаивание) с рыхлыми пирокластическими песчаными отложениями (SM, SP).

Из 3D литологической модели был получен ряд двумерных изображений исследуемого грунтового основания (subsoil). Например, на рисунке 6 показан разрез А-А' (от точки изысканий S4 на юго-востоке рассматриваемой территории до точки изысканий S41).

Кроме того, была построена серия 3D схем разрезов (fence diagrams) для всего грунтового массива исследуемой территории. Ориентация таких схем может выбираться вручную или по умолчанию при помощи инструментов, ко-



**Рис. 6.** Линия разреза A-A' на карте исследуемой территории и сам разрез A-A' с классификацией по системе USGS (пояснения к обозначениям по системе USGS для данного случая см. в легенде на рисунке 5)



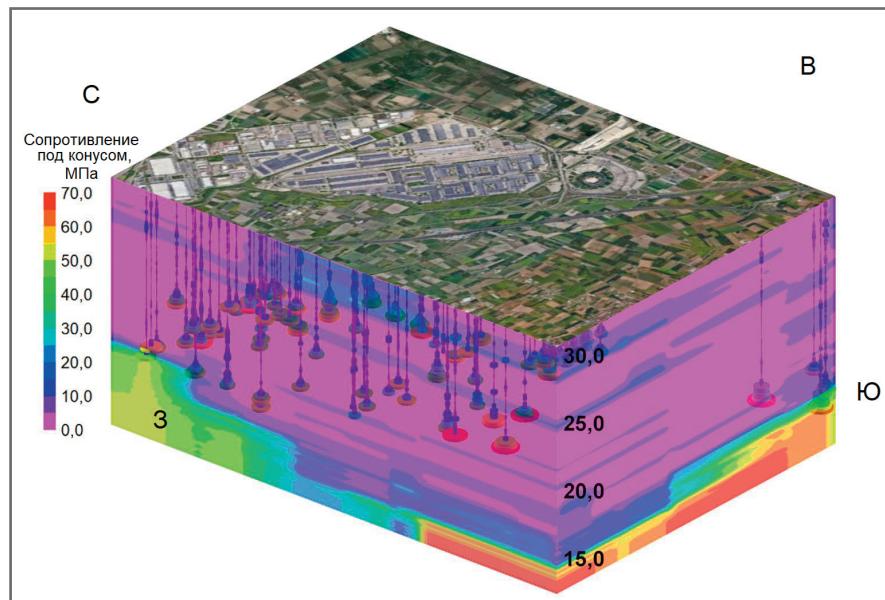
**Рис. 7.** Линии разрезов (фиолетового цвета) на карте исследуемой территории и концентрическая 3D схема этих разрезов с классификацией по системе USGS

торые позволяют работать с разными 3D моделями. На рисунке 7 показана 3D схема разрезов, воспроизведенная с помощью одного из этих инструментов.

### Геотехническая модель ►

Было построено пять геотехнических моделей, показывающих пространственную изменчивость сопротивления под конусом и по боковой поверхности зонда, измеренных методом CPT, а также геотехнических параметров, полученных с помощью эмпирических формул (модуля упругости, одометрического модуля и индекса компрессии). Для каждого из этих параметров была построена 3D модель с графическим представлением их значений с помощью цветовых шкал от более «теплых» цветов (со стороны красного), обозначающих более высокие значения, до более «холодных» цветов (со стороны фиолетового), обозначающих более низкие значения (например, рис. 8).

К базовой модели были добавлены точечные данные, приуроченные к конкретным глубинам стволов скважин, из вкладки *P-Data* («точечные данные») базы данных *Borehole Manager* («Управление данными по скважинам») программы *Rockworks* – в виде ряда перекрывающихся цветных дисков, которые показываются в соответствии с шагом выборки точечных данных (который в рассматриваемом случае составляет



**Рис. 8.** 3D модель сопротивления под конусом зонда по результатам испытаний методом CPT

0,2 м). Их размеры (диаметр) и цвета отражают значения параметров.

Анализ трехмерных моделей сопротивления под конусом, модуля упругости и одометрического модуля позволил прийти к выводу, что до глубины 4–5 м залегают грунты со значительными показателями геотехнических свойств. Однако глубже наблюдалось их общее ухудшение из-за чередования слоев с плохими соответствующими параметрами. И наконец, модели показали заметное улучшение геотехнических свойств на самой большой исследованной глуби-

не – начиная с высотной отметки около 15 м над уровнем моря, где были самые высокие значения сопротивления под конусом (примерно 70 МПа), модуля упругости (около 140 МПа) и одометрического модуля деформации (примерно 122 МПа).

По 3D моделям сопротивления под конусом, сопротивления по боковой поверхности зонда и индекса компрессии можно судить о меньшей пространственной изменчивости величин этих параметров и о постепенном их увеличении до глубины, соответствующей

отметкам около 20–25 м над уровнем моря. При этом на разных глубинах видны высокие значения индекса компрессии из-за наличия слоев сильно сжимаемых органических грунтов (рис. 9).

### Инженерно-геологическая модель ►

Совместная интерпретация 3D геотехнических моделей с литологической позволила выделить инженерно-геологические единицы (units), относящиеся к категории *инженерно-геологических типов* (по классификации ЮНЕСКО и МАИГ 1976 года [1]), и на этой основе осуществить построение инженерно-геологической модели (рис. 10). Далее рассмотрим выделенные инженерно-геологические типы для исследуемой территории.

*1. Инженерно-геологический тип А* включает малосжимаемые пылеватые грунты, относящиеся к группе ML по системе классификации USCS. Эти грунты главным образом являются нормально уплотненными (NC – normally consolidated) и лишь локально – переуплотненными (OC – overconsolidated). Их пучколановая природа способствует формированию сцепления зерен благодаря процессам слабой кристаллизации, таким как цеолитизация. Анализ геотехнических свойств показал, что данная единица (unit/type) в целом хорошо подходит для устройства фундаментов с малыми осадками (выделенный инженерно-геологический тип А соответствует инженерно-геологическому элем-

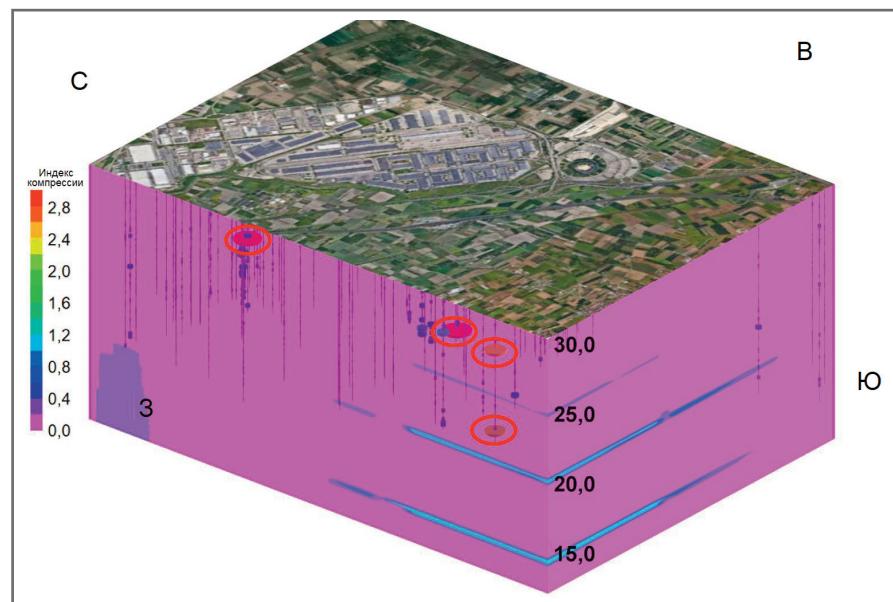


Рис. 9. 3D модель индекса компрессии. Слои с высокой сжимаемостью обведены красным

менту по современным российским стандартам. – Ред.).

*2. Инженерно-геологический тип В* включает сильносжимаемые пылеватые грунты от слабоуплотненных до нормально уплотненных (NC) и торф (MН-peat), для которых характерна требующая внимания изменчивость физических и геотехнических свойств. Характерной особенностью данной единицы (unit/type) является наличие линзовидных торфяных отложений, которые повышают сжимаемость всей единицы в целом, что обуславливает ее низкое геотехническое качество, то есть ограниченную пригодность для устройства

фундаментов и значительные величины ожидаемых осадок (выделенный инженерно-геологический тип В не соответствует инженерно-геологическому элементу по современным российским стандартам. – Ред.).

*3. Инженерно-геологический тип С* включает мелкозернистые пепловые туфы от полулитой до литой с пространственно изменчивыми мощностью и степенью спекания/«сваривания» (welding). Базальный туфовый горизонт (horizon) везде перекрыт выветрелым грунтом, называемым «каппеллачко» («старой потреманной шляпой»). Низкая степень сжимаемости этого туфа

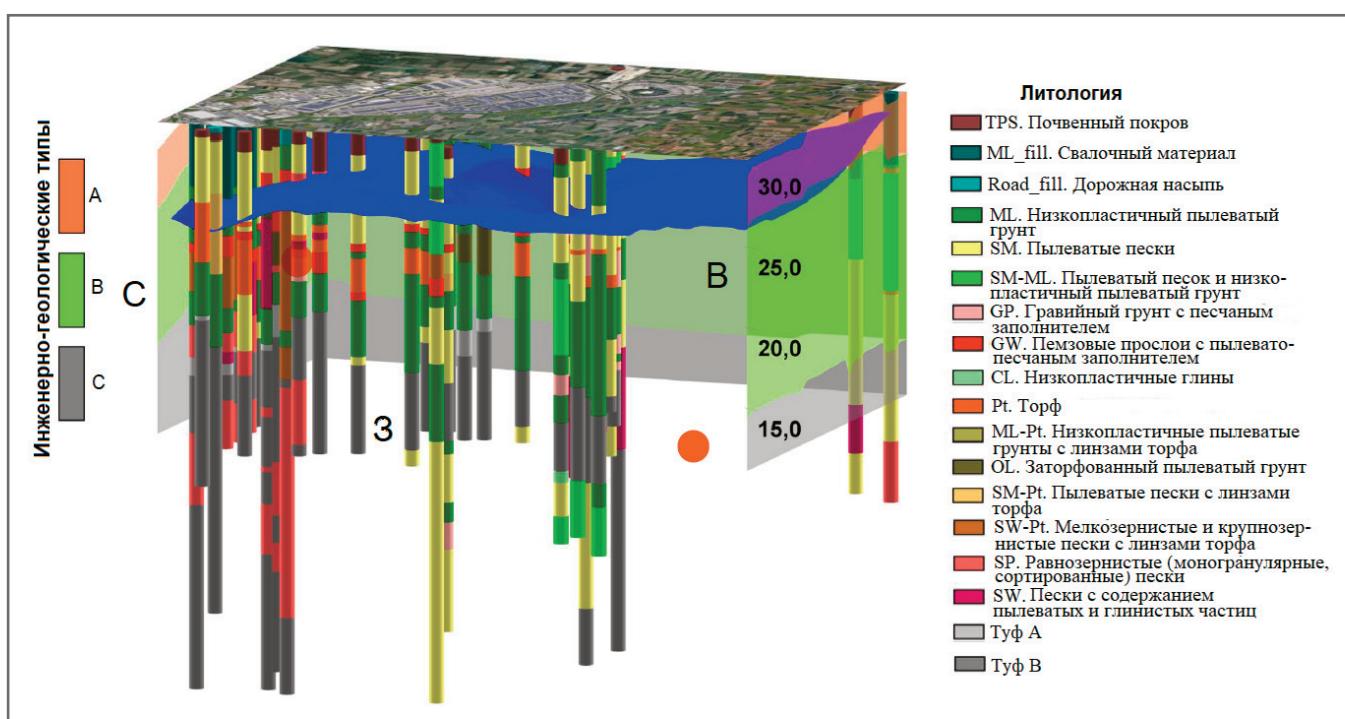
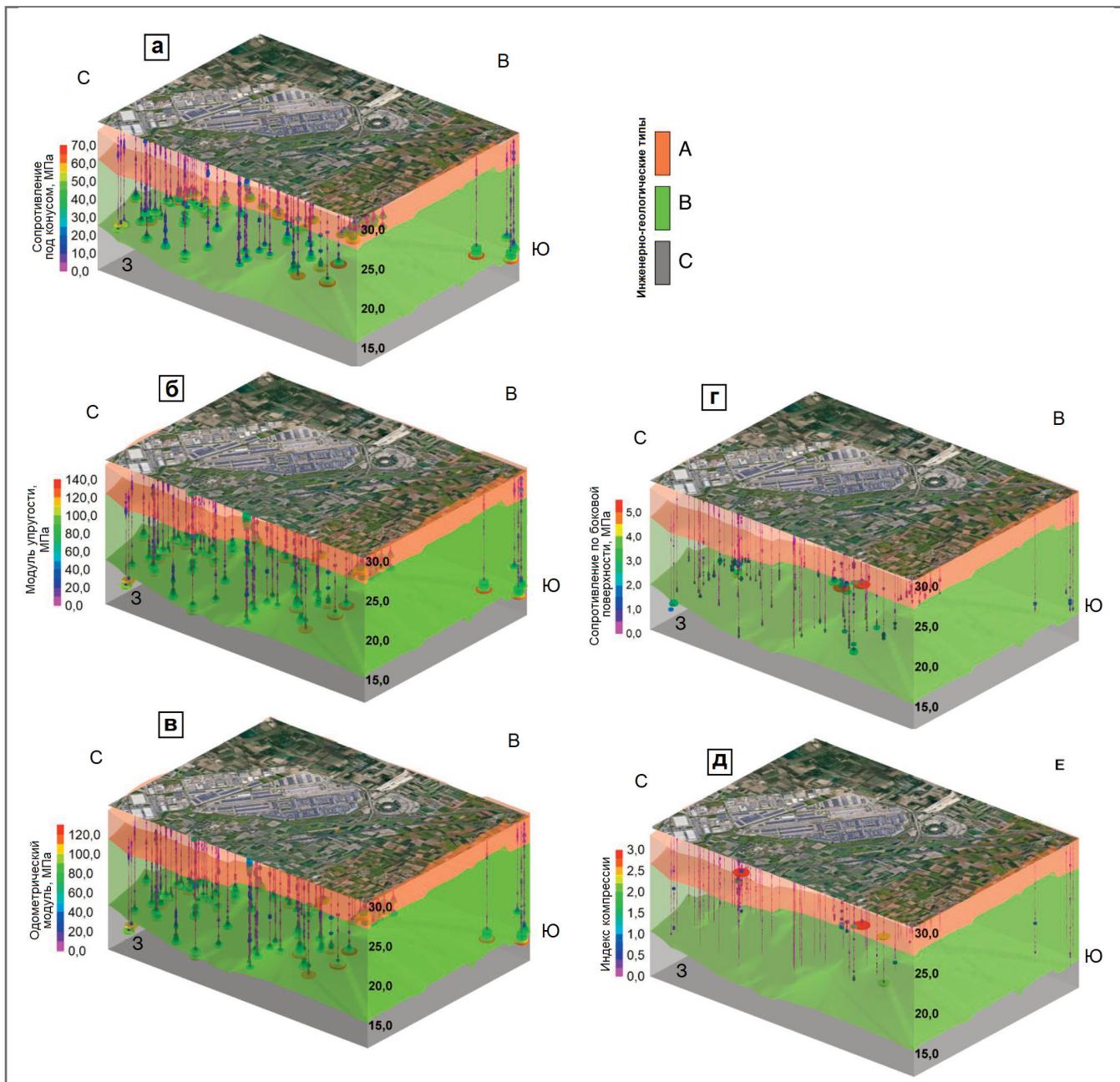


Рис. 10. Инженерно-геологические единицы/типы и литологические колонки с указанием классификации USCS



**Рис. 11.** Инженерно-геологическая модель, объединенная со следующими геотехническими моделями: а – сопротивления под конусом зонда; б – модуля упругости; в – одометрического модуля деформации; г – сопротивления по боковой поверхности зонда, д – индекса компрессии

подтверждается высокими значениями сопротивления под конусом, модуля упругости и одометрического модуля. Его кровля определяется по глубине отказа при статическом зондировании методом СРТ. Благодаря хорошим геотехническим характеристикам этот горизонт можно считать опорным (коренным) для строительства будущих глубоких фундаментов с пренебрежимо малыми ожидаемыми осадками (выделенный инженерно-геологический тип С не совсем соответствует инженерно-геологическому элементу по современным российским стандартам. – Ред.).

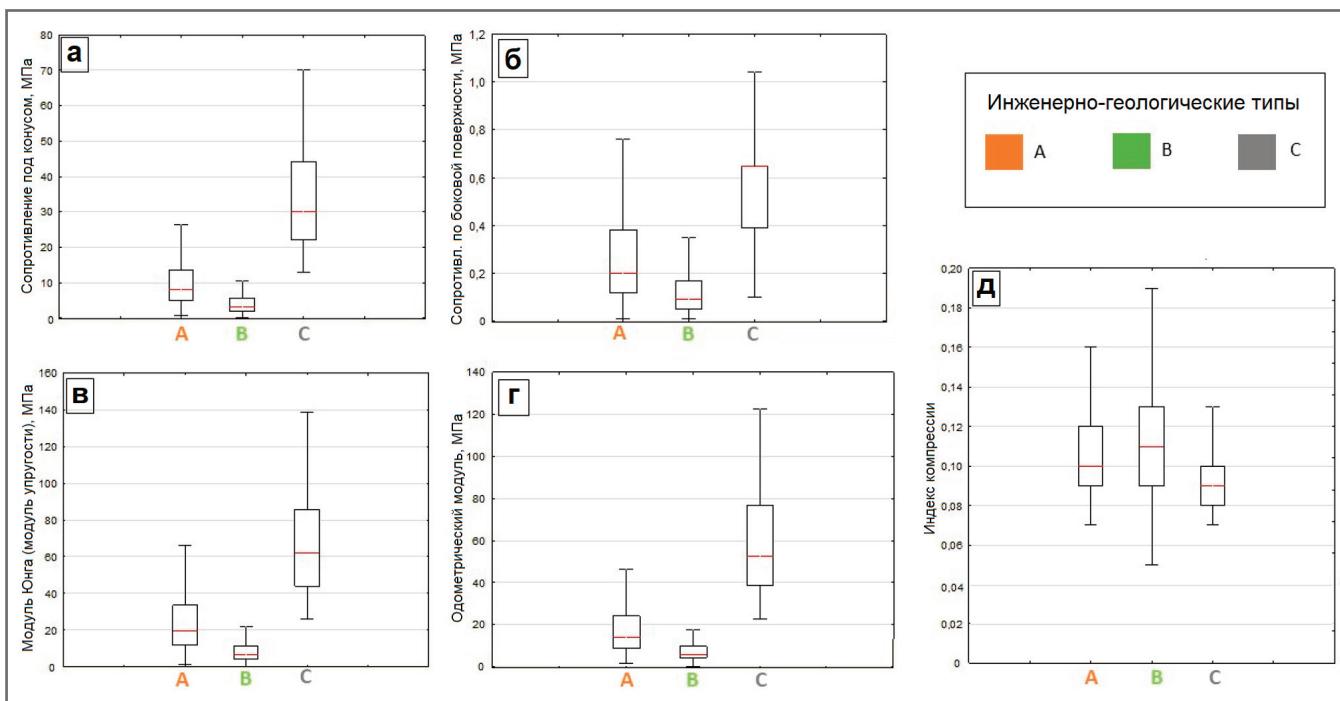
Хорошие геотехнические свойства инженерно-геологического типа А, зале-

гающего на меньшей глубине, вероятно, обусловлены степенью переуплотнения, вызванного понижением уровня грунтовых вод (УГВ) либо из-за мелиоративных мероприятий на рассматриваемой территории, либо из-за чрезмерной эксплуатации подземных вод для сельскохозяйственных нужд. Теперь УГВ преимущественно совпадает с подошвой инженерно-геологического типа А.

Еще один существенный фактор, определяющий различия в геотехническом поведении типов А и В – наличие сильноожимаемых торфяных отложений в инженерно-геологическом типе В. Из представленных ранее в статье 2D и 3D литологических моделей видно, что

торфяные отложения имеют весьма изменчивую мощность. Их неравномерное залегание может привести к значительным неравномерным осадкам, как показали другие случаи, имевшие место на рассматриваемой территории при чрезмерных нагрузках на эти грунты.

На рисунках 11, а–д, где инженерно-геологическая модель грунтового основания (subsoil) объединена с каждой из геотехнических моделей, видна высокая степень соответствия между пространственными изменениями геотехнических параметров и инженерно-геологической моделью. Поэтому, учитывая средние значения показателей геотехнических свойств, можно охарактери-



**Рис. 12.** Диаграммы размаха типа «ящиков с усами» (box plots) для трех инженерно-геологических единиц/типов (units/types) для таких показателей, как: а – сопротивление под конусом зонда; б – сопротивление по боковой поверхности зонда; в – модуль упругости (Юнга); г – одометрический модуль деформации; д – индекс компрессии

**Таблица. Значения процентилей геотехнических характеристик, рассчитанные для трех инженерно-геологических единиц/типов А, В, С**

Процентиль, %-й	Сопротивление под конусом, МПа			Сопротивление по боковой поверхности, МПа			Модуль упругости (Юнга), МПа			Одометрический модуль деформации, МПа			Индекс компрессии		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
5	2,09	1,02	14,1	0,06	0,05	0,2	4,5	2,4	31,1	4,3	2,7	24,9	0,08	0,09	0,07
25	5	2	22	0,12	0,06	0,39	11,8	4,1	44	8,8	4,2	35,5	0,09	0,09	0,08
50	8	3,2	30	0,2	0,09	0,65	19,8	6,7	62,3	14	5,9	52,5	0,1	0,11	0,09
75	13,7	5,5	44	0,38	0,17	0,65	33,6	11,3	85,6	24	9,6	77	0,12	0,13	0,1
95	27,8	21,5	59,8	1,3	2,6	3,2	67,4	41,12	116,6	48	34,6	104,3	0,3	1,9	0,3

зователь выделенные инженерно-геологические типы следующим образом.

1. *Инженерно-геологический тип А* (малосжимаемые пылеватые грунты – ML) характеризуется значениями от средних до высоких для сопротивления под конусом (8 МПа), модуля упругости (19,8 МПа) и одометрического модуля (14 МПа) и при этом низким индексом компрессии (0,1).

2. *Инженерно-геологический тип В* (сильносжимаемые пылеватые грунты и торф – MH-peat) имеет весьма изменчивые значения сопротивления под конусом (3,2 МПа), модуля упругости (6,7 МПа), одометрического модуля (5,9 МПа), индекса компрессии (0,12) и характеризуется высокими уровнями

сжимаемости (вероятно, также из-за торфяных линз).

3. *Инженерно-геологический тип С* (полулитой туф) демонстрирует самые высокие значения сопротивления под конусом зонда (30 МПа), сопротивления по боковой поверхности зонда (0,65 МПа), модуля упругости (62,3 МПа) и одометрического модуля (52,5 МПа), что также подтверждается низкими индексами компрессии (0,07).

### Статистическая характеристика геотехнических свойств ►

Инженерно-геологические единицы/типы (units/types) были геотехнически охарактеризованы с помощью стати-

стического анализа основных свойств, который проводился с использованием диаграмм размаха типа «ящиков с усами» (box plots). Для каждой инженерно-геологической единицы была рассчитана диаграмма размаха для каждого показателя геотехнических свойств, а затем было проведено их попарное сравнение (рис. 12, а–д), что выявило согласованность с тем, что было описано ранее по поводу их значений. То есть тип С – это единственная инженерно-геологическая единица с более высокими показателями геотехнических свойств, так как сопротивление под конусом, сопротивление по боковой поверхности, модуль упругости и одометрический модуль достигают там самых

больших значений, а индекс компрессии – наименьших. Напротив, тип В характеризуется самыми плохими геотехническими свойствами, поскольку первые четыре параметра из вышеупомянутых имеют тенденцию к распределению в сторону самых низких значений, а индекс компрессии – в сторону самых больших в соответствии с более высокой сжимаемостью этих грунтов.

Статистический анализ показателей геотехнических свойств для каждой инженерно-геологической единицы (unit/type) базировался на расчетах 5, 25, 50, 75 и 95-го процентиляй (см. таблицу). Как известно из практики геотехнического проектирования, выбор используемых процентиелей зависит от решаемой задачи и объема грунта, вовлеченного в деформации под действием антропогенных нагрузок (строительства). Репрезентативное значение геотехнического параметра можно обоснованно и осторожно оценить, принимая во внимание величины этого параметра, варьирующие от более низких значений (5-го процентиля) в случае малого объема вовлеченных в деформирование грунтов до медианных значений (50-го процентиля) в случае большого объема вовлеченных в деформирование грунтов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Методы, использованные в данном исследовании, и полученные результаты направлены на разработку комплексного (с системным сочетанием методов моделирования и анализа) методологического подхода для трехмерного инженерно-геологического моделирования и геотехнической характеристики площадок будущего строительства, характеризующихся сложными стратиграфическими условиями, гетерогенными и гетероптическими отложениями. Задумывалось, что этот подход должен соответствовать как концепциям инженерно-геологического моделирования и картирования, так и действующим техническим регламентам в области геотехнического проектирования, включая Еврокод 7 (Eurocode 7), а также национальным нормативным документам, принятых на его основе, таким как итальянские «Строительные нормы и правила» (Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)). В этом отношении равнина Нола представляет собой характерный пример того, как сложная стратиграфическая обстановка, характеризую-

щаяся гетерогенными и гетероптическими отложениями, определяет сложные грунтовые условия и может влиять на геотехническое проектирование, что требует применения надлежащих подходов к инженерно-геологическому моделированию и характеристике грунтового основания.

Из трехмерных представлений литологических, стратиграфических и геотехнических условий, рассмотренных в данной работе, следует, что пирокластико-аллювиальные отложения, формирующие грунтовую среду территории долины Нола, преимущественно состоят из чередования песчанистых пылеватых грунтов (sandy silts) и пылеватых песков (silty sands) с линзами торфа. Присутствие органических грунтов, характеризующихся высокой сжимаемостью (торфа. – Ред.), в сочетании с их резко изменчивым пространственным распределением, представляет собой критически важный фактор, который надо учитывать при проектировании фундаментов, чтобы избежать неравномерных осадок. Очень сложная стратиграфическая «архитектура» и изменчивые геотехнические свойства отложений позволили на максимально детальном уровне, соответствующем имеющимся данным, выделить разные инженерно-геологические единицы/типы (units/types) (авторы статьи приравнивают выделенные ими единицы (units) к типам (types) по рекомендациям 1976 года; возможно, они не пишут сразу про типы вместо единиц из-за понимания того, что они не так уж и однородны по своему состоянию, учитывая наличие линз торфа, литологическое разнообразие и разброс свойств в выделенных типах А, В и С. – Ред.).

В этом отношении построение 3D моделей может рассматриваться как важный подход к уточнению инженерно-геологического описания площадки, которое будет использоваться для выявления задач проектирования, связанных с грунтовым основанием с плохими геотехническими характеристиками.

Анализ и интерпретация литологических и геотехнических особенностей исследуемой территории позволили разработать инженерно-геологическую модель, в результате чего были выделены три инженерно-геологические единицы/типа (units/types) в детальном масштабе ( $>1:5000$ ), которые различались по своим геотехническим характеристикам. В частности, инже-

нерно-геологический тип В с геотехнической точки зрения является более проблематичным из-за присутствия сильносжимаемых органических материалов, относящихся к органическим грунтам (OL) или торфам (Pt) по системе классификации USCS. Труднопрогнозируемое пространственное распределение этих материалов связано с тем, что они имеют форму линз с различными толщиной и глубиной залегания. Присутствие таких грунтов может привести к неравномерным осадкам фундаментов, как это уже случалось при строительстве, ранее проводившемся на этой территории. Помимо точной оценки пространственной геометрии этих отложений, еще одним важным моментом является присвоение характеристических значений геотехнических параметров каждой инженерно-геологической единице (unit), которая будет использоваться на этапе проектирования.

И наконец, предлагаемый подход – это не просто использование программного обеспечения для 3D моделирования на основе стратиграфических и геотехнических данных, поскольку он последовательно включается в концептуальную схему действий при инженерно-геологическом моделировании и картировании, основанную на определении инженерно-геологических единиц (units) [1]. В этом смысле данная статья потенциально представляет собой рекомендации по применению технических регламентов по геотехническому проектированию, связывающих геологию и геотехнику. ■

*Финансирование открытого доступа данной статьи было предоставлено Неаполитанским университетом имени Фридриха II (UNINA – Università degli Studi di Napoli Federico II) в рамках соглашения издателя и подкомиссии Ассоциации ректоров итальянских университетов, занимающейся такими соглашениями (CRUI-CARE). Проведение исследования финансировалось в рамках проекта по программе PRIN (Progetti di Rilevante Interesse Nazionale – «Проекты, представляющие значительный национальный интерес») 2017 года под названием «НАСУЩНОЕ – городская геология и геологические опасности: инженерная геология для более безопасных, устойчивых и умных городов» («URGENT – URban Geology and geohazards: Engineering geology for safer, resilieNt and smart ciTies»).*

**ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►****(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►**

Petrone P., Allocca V., Fusco F., Incontri P., De Vita P. Engineering geological 3D modeling and geotechnical characterization in the framework of technical rules for geotechnical design: the case study of the Nola's logistic plant (Southern Italy) // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2023. Vol. 82. Article 12 (by CC BY 4.0 license: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-022-03017-y>.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►****(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER) ►**

1. UNESCO, IAEG. Engineering geological maps: a guide to their preparation // Earth Sci Ser Paris. 1976. Vol. 15. P. 1–79.
2. ISSC – International Subcommission on Stratigraphic Classification of IUGS International Commission on Stratigraphy. International Stratigraphic guide. New York: John Wiley & Sons Inc., 1976. 220 p. ISBN-10:0471367435.
3. Gonzalez de Vallejo L.I., Ferrer M. Geological Engineering. CRC Press/Balkema Leiden, 2011. 700 p. ISBN-10:0415413524.
4. Fookes P.G. Geology for engineers: the geological model, prediction and performance // Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 1997. Vol. 30. P. 293–424. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1997.030.P4.02>.
5. Terzaghi K. Rock defects and loads on tunnel supports // Proctor R.V., White T.L. (eds.). Rock tunneling with steel supports. 1946. Vol. 1. Youngstown, OH: Commercial Shearing and Stamping Company. P. 17–99.
6. Parry S., Baynes F.J., Culshaw M.G., Eggers M., Keaton J.F., Lentfer K., Novotny J., Paul D. Engineering geological models: an introduction: IAEG commission 25 // Bull. Eng. Geol. Environ. 2014. Vol. 73. P. 689–706. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0576-x>.
7. CEN. EN 1997-1:2004: Eurocode 7: Geotechnical Design – Part 1: General Rules. Brussels European Committee for Standardization, 2004.
8. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni. D.M. 14 gennaio 2008 // Gazzetta Ufficiale. 2008. № 29. February 4.
9. Kolat C., Ulusay R., LutfiSuzen M. Development of geotechnical microzonation model for Yenisehir (Bursa, Turkey) located at a seismically active region // Eng. Geol. 2012. Vol. 127. P. 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.12.014>.
10. Donghee K., Kyu-Sun K., Seongkwon K., Youngmin C., Woojin L. Assessment of geotechnical variability of Songdo silty clay // Eng. Geol. 2012. Vol. 133–134. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.02.009>.
11. Alan M.L., Norman L.J. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections // Comput. Geosci. 2003. Vol. 29. P. 547–555. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00051-7).
12. Zhang S.S., Liu Z.H. 3D visualization of geological structure based on multi-layer DEM surface modeling // J. Geomat. 2003. Vol. 28. № 3. P. 14–15.
13. Douglas P., Mary C., Bruce T., Hugo O., Donald A.M. Alpine-scale 3D geospatial modeling: applying new techniques to old problems // Geoph. 2007. Vol. 3. P. 527–549. <https://doi.org/10.1130/GES00 093.1>.
14. Lelliott M., Bridge D., Kessler H., Price S., Seymour K. The application of 3D geological modeling to aquifer recharge assessments in an urban environment // Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 2006. Vol. 39. P. 293–302. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/05-027>.
15. Lelliott M., Cave M., Wealthall G. A structured approach to the measurement of uncertainty in 3D geological models // Quat. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 2009. Vol. 42. P. 95–106. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/07-081>.
16. Robins N., Davies J., Dumpleton S. Groundwater flow in the south Wales coalfield: historical data informing 3D modeling // Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 2008. Vol. 41. P. 477–486. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/07-055>.
17. Royse K.R., Rutter H.K., Entwistle D.C. Property attribution of 3D geological models in the Thames Gateway, London: new ways of visualising geoscientific information // Bull. Eng. Geol. Environ. 2009. Vol. 68. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0171-0>.
18. Thierry P., Prunier-Leparmentier A., Lembezat C., Vanoudheusden E., Vernous J. 3D geological modeling at urban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution: the Paris example (France) // Eng. Geol. 2009. Vol. 105. P. 51–64. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.12.010>.
19. Kostic B., Suess M., Aigner T. Three-dimensional sedimentary architecture of Quaternary sand and gravel resources: a case study of economic sedimentology (SW Germany) // Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.). 2007. Vol. 96. P. 743–767. <https://doi.org/10.1007/s00531-006-0120-8>.
20. Krassakis P., Pyrgaki K., Gemeni V., Roumpos C., Louloudis G., Koukouzas N. GIS-based subsurface analysis and 3D geological modeling as a tool for combined conventional mining and in-situ coal conversion: the case of Kardia Lignite Mine // Western Greece Mining. 2022. Vol. 2. P. 297–314. <https://doi.org/10.3390/mining2020 016>.
21. Dong M. 3D geological modeling and its applications to zoning mapping of construction suitable sites in Shunyi developing district, Beijing: master's thesis. Beijing: Chinese University of Geosciences, 2008.
22. Apel M. From 3D geo-modeling systems towards 3D geoscience information systems: data model, query functionality and data management // Comput. Geosci. 2006. Vol. 32. P. 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.06.016>.
23. Choi Y., Yoon S.Y., Park H.D. Tunneling analyst: a 3D GIS extension for rock mass classification and fault zone analysis in tunneling // Comput. Geosci. 2009. Vol. 35. № 6. P. 1322–1333. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.05.002>.

24. Rose G., Kirk P., Gibbons C., Lander A. Three dimensional geological models in ground engineering: when to use, how to build and review, benefits and potential pitfalls // Australian Geomechanics. 2018. Vol. 53. № 3. P. 79–88.
25. Whiteman B.D. 3D ground modelling: geotechnical investigation for dolphin replacement and jetty strengthening at Cape Lambert A (CLA) // Good grounds for the future: NZGS Symposium. Dunedin, 2021.
26. Kessler H., Mathers S., Sobisch H.G. The capture and dissemination of integrated 3D geospatial knowledge at the British Geological Survey using GSI3D software and methodology. Comput Geosci. 200935. P. 1311–1321. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.04.005>.
27. Marache A., Breysse D., Piette C., Thierry P. Geotechnical modeling at the city scale using statistical and geostatistical tools: the Pessac case (France) // Eng. Geol. 2009. Vol. 107. № 34. P. 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.04.003>.
28. Royse K.R. Combining numerical and cognitive 3D modelling approaches in order to determine the structure of the chalk in the London Basin // Comput. Geosci. 2010. Vol. 36. P. 500–511. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.10.001>.
29. De Beer J., Price S.J., Ford J.R. 3D modelling of geological and anthropogenic deposits at the World Heritage Site of Bryggen in Bergen, Norway // Quat. Int. 2012. Vol. 251. P. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.06.015>.
30. De Beer J., Matthiesen H., Christensson A. Quantification and visualization of in situ degradation at the World Heritage Site Bryggen in Bergen, Norway // Conserv. Manag. Archaeol. Sites. 2012. Vol. 1. P. 215–227. <https://doi.org/10.1179/1350503312Z.00000 000018>.
31. Culshaw M.G. From concept towards reality: developing the attributed 3D geological model of the shallow subsurface // J. Eng. Geol. Hydrogeol. 2005. Vol. 38. P. 231–284. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/04-072>.
32. Baynes F.J., Parry S., Novotny J.N. Engineering geological models, projects and geotechnical risk // Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 2020. Vol. 54. <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-080>.
33. Bowden R.A. Building confidence in geological models // Geological Society, London, Special Publications. 2004. Vol. 239. P. 157–173. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.239.01.11>.
34. Lee E.M. Landslide risk assessment: the challenge of communicating uncertainty to decision makers // Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 2016. Vol. 49. P. 21–35. <https://doi.org/10.1144/qjegh2015-066>.
35. Wang L., Zheng Z., Zhu H. Construction and application of 3D model of engineering geology // International Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence (ATCI 2021). 2021. Vol. 2. P. 512–518. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-79197-1\\_75](https://doi.org/10.1007/978-3-030-79197-1_75).
36. Ippolito F., Ortolani F., Russo M. Struttura marginale tirrenica dell'Appennino campano: reinterpretazione di dati di antiche ricerche di idrocarburi // Mem. Soc. Geol. It. 1973. Vol. 12. P. 227–249.
37. Ortolani F., Aprile F. Principali caratteristiche stratigrafiche e strutturali dei depositi superficiali della Piana Campana // Boll. Soc. Geol. It. 1985. Vol. 104. P. 195–206.
38. Brancaccio L., Cinque A., Romano P., Rosskopf C., Russo F., Santangelo N. L'evoluzione delle pianure costiere della Campania: geomorfologia e neotettonica // Mem. Soc. Geol. It. 1995. Vol. 53. P. 313–336.
39. Romano P., Santo A., Voltaggio M. L'evoluzione geomorfologica della pianura del Fiume Volturno (Campania) durante il tardo Quaternario (Pleistocene medio-superiore-Olocene) // Il Quaternario. 1994. Vol. 7. P. 41–56.
40. Aprile F., Sbrana A., Toccace R.M. Il ruolo dei depositi piroclastici nell'analisi cronostratigrafica dei terreni quaternari del sottosuolo della Piana Campana (Italia meridionale) // Il Quaternario. 2004. Vol. 17. P. 547–554.
41. Milia A., Torrente M.M. Tectonics and stratigraphic architecture of a peri-Tyrrhenian half-graben (Bay of Naples, Italy) // Tectonophysics. 1999. Vol. 315. P. 301–318. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00280-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00280-2).
42. Cinque A., Alinaggi H.H., Laureti L., Russo F. Osservazioni preliminari sull'evoluzione geomorfologica della piana del Sarno (Campania, Appennino Meridionale) // Geogr. Fis. Dinam. Quat. 1987. Vol. 10. P. 161–174.
43. D'Erasmo. Studio geologico dei pozzi profondi della Campania // Boll. Soc. Nat. 1931. Vol. 4. P. 15–143.
44. Aprile F., Ortolani F. Nuovi dati sulla struttura profonda della Piana Campana a Sud Est del Fiume Volturno// Boll. Soc. Geol. It. 1978. Vol. 97. P. 591–608.
45. Brancaccio L., Cinque A., Romano P., Rosskopf C., Russo F., Santangelo N., Santo A. Geomorphology and neotectonics evolution of a sector of the Tyrrhenian flank of the southern Apennines (Region of Naples, Italy) // Z. Geomorph. N. F. 1991. Vol. 82. P. 47–58.
46. Torrente M.M., Milia A., Bellucci F., Rolandi G. Extensional tectonics in the Campania Volcanic Zone (eastern Tyrrhenian Sea, Italy): new insights into the relationship between faulting and ignimbrite eruptions // Ital. J. Geosci. (Boll. Soc. Geol. It.). 2010. Vol. 129. P. 297–315. <https://doi.org/10.3301/IJG.2010.07>.
47. De Vita P., Allocat V., Celico F., Fabbrocino S., Mattia C., Monacelli G., Musilli I., Piscopo V., Scalise A.R., Summa G., et al. Hydrogeology of continental southern Italy // J. Maps. 2018. Vol. 14. P. 230–241. <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1454352>.
48. Pescatore T., Ortolani F. Schema tettonico dell'Appennino campano-lucano // Boll. Soc. Geol. It. 1973. Vol. 92. P. 453–472.
49. Pescatore T., Sgroso I. I rapporti tra la piattaforma campano-lucana e la piattaforma abruzzese-campana nel Casertano // Ital. J. Geosci. 1973. Vol. 92. № 4. P. 925–938.
50. Di Vito M.A., Isaia R., Orsi G., Southon J., D'Antonio M., De Vita S., Pappalardo L., Piochi M. Volcanism and deformation since 12.000 years at the Campi Flegrei caldera (Italy) // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1999. Vol. 91. P. 221–246. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00037-2).
51. Santacroce R., Cioni R., Marinelli P., Sbrana A., Sulpizio R., Zanchetta G., Donahue D.J., Joron J.J. Age and whole rock-glass compositions of proximal pyroclastic from the major explosive eruptions of Somma-Vesuvius: a review as a tool for distal tephostratigraphy // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2008. Vol. 177. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.009>.

52. Di Vito M.A., De Vita S. Il Somma Vesuvio: storia eruttiva e impatto delle sue eruzioni sul territorio // Miscellania INGV. Roma, 2013. Vol. 18. P. 14–21.
53. Putignano M.L., Ruberti D., Tescione M., Vigliotti M. Evoluzione tardo quaternaria del margine casertano della Piana Campana (Italia meridionale) // Boll. Soc. Geol. Ital. 2007. Vol. 126. № 1. P. 11–24.
54. Santangelo N., Ciampo G., Di Donato V., Esposito P., Petrosino P., Romano P., Russo Ermolli E., Santo A., Toscano F., Villa I. Late Quaternary buried lagoons in the northern Campania plain (southern Italy): evolution of a coastal system under the influence of volcano-tectonics and eustatism // Ital. J. Geosci. (boll. Soc. Geol. It.). 2010. Vol. 129. № 1. P. 156–175.  
<https://doi.org/10.3301/IJG.2009.12>.
55. De Vivo B., Rolandi G., Gans P.B., Calvert A., Bohrson W.A., Spera F.J., Belkin H.E. New constraints on the pyroclastic eruptive history of the Campanian volcanic Plain (Italy) // Mineral. Petrol. 2001. Vol. 73. P. 47–65.
56. Deino A.L., Orsi G., De Vita S., Piochi M. The age of the Neapolitan Yellow Tuff caldera-forming eruption (Campi Flegrei caldera – Italy) assessed by 40Ar/39Ar dating method // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2004. Vol. 133. P. 157–170.  
[https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00396-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00396-2).
57. Carrara E., Iacobucci F., Pinna E., Rapolla A. Gravity and magnetic survey of the campanian volcanic area, Southern Italy // Boll. Geof. Teor. Appl. 1973. Vol. 57. P. 39–51.
58. AGI – Associazione Geotecnica Italiana/ Nomenclatura geotecnica e classificazione delle terre // Geotecnica. Roma: Associazione Geotecnica Italiana, 1963. P. 275–286.
59. De Beer E. Bearing capacity and settlement of shallow foundations on sands // Proc. Symp. on Bearing capacity and settlement of foundations, Duke University, Durham, 1965. P. 15–33.
60. Canadian Geotechnical Society. Canadian Foundation Engineering Manual, 3rd edn. Richmond: Canadian Geotechnical Society, 1992.
61. Schmertmann J.H. Static cone to compute static settlement over sand // J. Soil Mech. Found. Div. 1970. Vol. 96. № 3.  
<https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001418>.
62. Schmertmann J.H. Use the SPT to measure dynamic soil properties? – Yes, but...! // Dynamic Geotech. Testing Am. Soc. for Testing and Materials SPT. 1978. Vol. 654. P. 341–355. <https://doi.org/10.1520/STP35685S>.
63. Fellenius B.H. Results from long-term measurement in piles of drag load and downdrag // Canadian Geotechnical Journal. 2006. Vol. 43. № 4. P. 409–430.
64. Sanglerat G. The penetrometer and soil exploration: interpretation of penetration diagrams theory and practice // Developments in geotechnical engineering, 2nd edn. Amsterdam: Elsevier, 1972.
65. Urmı Z.A., Ansary M.A. Interpretation of compressibility characteristics for coastal soil of Bangladesh // Proceedings on International Conference on Disaster Risk Management, Dhaka, Bangladesh, 2019.
66. Simpson B., Pappin J.W., Croft D.D. Approach to limit state calculations in geotechnics // Ground Engng. 1981. Vol. 14. P. 21–28.
67. Danish Geotechnical Institute. Danish Code of Practice for Foundation Engineering // DGI Bulletin. 1978. Vol. 32. P. 52. ISBN: 87-7451-032-0.



Телеграм-канал журнала

**ГеоИнфо**  
Независимый электронный журнал

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>