

Георидиолокационные и электротомографические исследования в городских районах на примере Матеры (Южная Италия)



Предлагаем вниманию читателей «GeoИнфо» адаптированный перевод статьи большой группы итальянских авторов «Георадиолокационные и электротомографические исследования в городских районах на примере Матеры (Южная Италия)». Она была опубликована в 2020 году в 12 выпуске рецензируемого интернет-журнала Remote Sensing («Дистанционное зондирование»), выпускаемого швейцарским издательством MDPI и индексируемого в Scopus, SCIE (Web of Science), Ei Compendex, AGRICOLA, GeoRef, Astrophysics Data System, Inspec, dblp и многих других базах данных.

Указанная статья находится в открытом доступе в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY), поэтому ее можно использовать в некоммерческих и коммерческих целях, переводить или изменять при условии правильной ссылки на первоисточник.

Она носит практический характер и посвящена геофизическим исследованиям, проведенным в некоторых важных районах исторического города Матера (Южная Италия), который считают одним из самых древних в мире. Его территория характеризуется очень сложной приповерхностной стратиграфией, включающей и антропогенные, и природные объекты, и является гидрогеологически нестабильной. Поэтому Матера представляет собой идеальную и очень сложную «полевую лабораторию» для тестирования новых подходов к приповерхностным исследованиям в городских районах. В статье представлены результаты приповерхностных изысканий, проведенных с помощью совместного применения

методов георадиолокации (GPR) и электроразведочной томографии (ERT). Обследования проводились на трех важных участках в городской черте Матеры: на Соборной площади (Пьяцца Дуомо), на площади Святого Иоанна (Пьяцца Сан-Джованни) и в городском парке Объединения Италии (Вилла Комунале дель-Унита д'Италия). Эти испытательные участки представляют большой интерес для археологических и архитектурно-археологических исследований и характеризуются склонностью к нестабильности грунта из-за наличия в нем различных полостей и других структур, образовавшихся под влиянием человеческой деятельности. Эффективность съемки была повышена за счет использования усовершенствованных методов 3D-электротомографии, которые позволили представить картину исследованного подземного пространства в трехмерном виде и получить информацию как о местоположении, так и о геометрии погребенных антропогенных объектов, а также о характеристиках неглубоко залегающих геологических слоев. Результаты этих исследований в настоящее время все еще вызывают интерес и изучаются муниципалитетом с целью поддержки реализации программ «умных городов» по более эффективному управлению подземным пространством.

Перевод подготовлен аналитической службой журнала «ГеоИнфо» при поддержке его спонсоров – ООО «КБ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ» и НПО «ТЕРРАЗОНД».

Белланова Джессика (Bellanova Jessica)

Институт методологий анализа состояния окружающей среды, г. Тито-Скало, Италия, jessica.bellanova@imaa.cnr.it

Каламита Джузеппе (Calamita Giuseppe)

Институт методологий анализа состояния окружающей среды, г. Тито-Скало, Италия, giuseppe.calamita@imaa.cnr.it

Катапано Илария (Catapano Ilaria)

Институт электромагнитных исследований окружающей среды, г. Неаполь, Италия, catapano.i@irea.cnr.it

Чуччи Алессандро (Ciucci Alessandro)

Компания Geostudi Astier S.r.l., г. Ливорно, Италия, ciucci@geostudias-tier.com

Корнаккья Кармела (Cornacchia Carmela)

Институт методологий анализа состояния окружающей среды, г. Тито-Скало, Италия, carmela.cornacchia@imaa.cnr.it

Дженнарелли Жанлука (Gennarelli Gianluca)

Институт электромагнитных исследований окружающей среды, г. Неаполь, Италия, gennarelli.g@irea.cnr.it

Джоколи Алессандро (Giocoli Alessandro)

Исследовательский центр Trisaia Итальянского национального агентства по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию (ENEA), г. Ротонделла, Италия, alessandro.giocoli@enea.it

Физангер Федерико (Fisangher Federico)

Компания Geostudi Astier S.r.l., г. Ливорно, Италия, fisangher@geostudiastier.com

Людено Джованни (Ludeno Giovanni)

Институт электромагнитных исследований окружающей среды, г. Неаполь, Италия, ludeno.g@irea.cnr.it

Морелли Джанфранко (Morelli Gianfranco)

Компания Geostudi Astier S.r.l., г. Ливорно, Италия, morelli@geostudiastier.com

Перроне Анджела (Perrone Angela)

Институт методологий анализа состояния окружающей среды, г. Тито-Скало, Италия, angela.perrone@imaa.cnr.it

Пищителли Сабатино (Piscitelli Sabatino)

Институт методологий анализа состояния окружающей среды, г. Тито-Скало, Италия, sabatino.piscitelli@imaa.cnr.it

Солдовьери Франческо (Soldovieri Francesco)

Институт электромагнитных исследований окружающей среды, Неаполь, Италия, soldovieri.f@irea.cnr.it

Лапенна Винченцо (Lapenna Vincenzo)

Институт методологий анализа состояния окружающей среды, г. Тито-Скало, Италия, vincenzo.lapenna@imaa.cnr.it (автор, ответственный за переписку)

***Ключевые слова:** приповерхностная геофизика; электромагнитное зондирование; 2D-томография; 3D-томография; умные и жизнеспособные города.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня все больше становится понятной необходимость умного управления городскими территориями и их защиты. Понятие «умный город» тесно связано с его устойчивостью, которая должна быть обеспечена как в обычных ситуациях, так и при кризисных событиях [1–3]. А это возможно только при обеспечении надлежащего и взаимосвязанного функционирования критически важных частей инфраструктуры (энергетической, информационно-коммуникационной, транспортной и пр.).

Сценарии рисков для городских территорий и их инфраструктур являются комплексным результатом их уязвимости к опасностям, вызванным различными природными и антропогенными причинами. Эти рассуждения приводят к осознанию

необходимости долгосрочного мониторинга и оценки состояния городов и их инженерных сетей [4–6].

В том числе крайне важно обеспечить мониторинг подземной среды и управление ею, что должно рассматриваться не только с точки зрения снижения факторов риска, но и с точки зрения поиска и эксплуатации объектов экономической, социальной и культурной ценности [7–9]. Действительно, приповерхностные грунтовые слои представляют собой «резервуары» важных для культуры и экономики города ресурсов (археологических объектов, инженерных сетей и т. д.), но при этом в подземном пространстве приходится продолжать строить стратегически важные подземные сооружения и сети (транспортные, трубопроводные, энергоснабжения и т. д.). Этот двойной аспект в числе прочих влечет за собой необходимость планировать действия, влияющие на подповерхностную среду. Ведь захороненные в ней археологические объекты могут быть факторами социального и экономического роста и в то же время препятствиями для деятельности по управлению городским хозяйством, поскольку их сохранение влечет за собой строгие ограничения в отношении планирования и выполнения инженерных работ.

Соответственно, одной из основных научных и технологических задач является разработка и комбинированное применение неинвазивных диагностических методов для получения 2D и 3D изображений городской подповерхностной среды с высоким разрешением [10].

В данной статье будут представлены первые результаты геофизических исследований, проведенных в нескольких важных городских районах исторического города Матера (регион Базиликата, Южная Италия), на которые может повлиять гидрогеологическая нестабильность. Эти изыскания были запланированы и проводились в рамках проекта «Облачная платформа и разумная визуализация подземных объектов для оценки природных рисков в районах “умных городов”» (CLARA Smart Cities – CLOUD pLatform and smart underground imaging for natural RiskAssessment in urban areas for Smart Cities) и финансировались Министерством образования, университетов и исследований Италии (MIUR).

В 2019 году Матера была объявлена культурной столицей Европы, а ее исторический центр Сасси (Sassi) в 1993 году был занесен в Список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО. В соответствующей декларации ЮНЕСКО указано: «Матера – наиболее выдающийся нетронутый образец поселения пещерных людей в Средиземноморском регионе, идеально адаптированный к его ландшафту и экосистеме. Первая населенная людьми зона относится к палеолиту, а более поздние поселения иллюстрируют ряд важных этапов в истории человечества».

Подземная среда современной городской части Матеры характеризуется множеством пустот и пещер, связанных с соответствующими особенностями приповерхностных грунтов, а также обилием старинных и совсем древних антропогенных объектов [11].

Данная статья посвящена геофизическим исследованиям, проведенным в трех самых интересных местах исторического центра Матеры, а именно: на Соборной площади (Пьяцца Дуомо), на площади Святого Иоанна (Пьяцца Сан-Джованни) и в городском парке Объединения Италии (Вилла Комунале дель-Унита д'Италия) (рис. 1). Эти работы проводились специально для того, чтобы выявить полости, археологические объекты и участки, подверженные микроосадкам и гидрогеологическим рискам.



Рис. 1. Исторический центр города Матера с указанием местоположений трех тестовых участков (на основе спутникового снимка с сайта Google Earth)

Здесь будут представлены результаты совместного применения геофизических методов георадиолокации (GPR) и электротомографии (ERT) для получения 2D и 3D изображений подземного пространства.

Георадиолокационные (георадарные) исследования применялись для изучения подповерхностных грунтовых слоев с очень высоким разрешением (в десятки сантиметров) в основном в целях выявления погребенных древних сооружений и определения их геометрических характеристик. Кроме того, эти работы имели решающее значение для обнаружения таких техногенных элементов, как трубопроводы и металлические арматурные конструкции.

Метод электротомографии позволил увеличить глубину исследований до нескольких десятков метров и был использован для получения информации не только об антропогенных объектах, но и, что еще более важно, о структурно-литологических элементах подземной среды с разрешением в несколько метров.

Полученные 2D и 3D изображения позволили реконструировать подповерхностные геологические условия и идентифицировать погребенные полости и археологические объекты. Результаты выявили потенциальные возможности предложенного комбинированного подхода, который можно рассматривать как полезный инструмент для поддержки планирования возможных вмешательств в подземную среду с учетом социальной и культурной ценности того или иного исследуемого участка.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Места пробных исследований

Город Матера расположен в регионе Базиликата на юге Италии. Как уже отмечалось, в 1993 году он был внесен в Список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО, а в 2019 году был признан культурной столицей Европы [12] благодаря наличию исторического центра Сасси и «Парка пещерных церквей» с доисторическими поселениями, включающими жилые и культовые помещения, и более поздними церквями, монастырями и скитами, построенными в естественных пещерах района Мурджа Матерана.

С геологической точки зрения территория городского района Матеры попадает в контекст возрастного и структурного перехода между прибрежной полосой Апулийской карбонатной платформы и Бранданского молассового прогиба (по названию реки Брандано). Город Матера появился на восточном краю вышеуказанного прогиба, возникшего в среднем плиоцене в мезозойских альтамурских известняках и характеризующегося наличием двух поднятий, образовавшихся при тектонических движениях, – одного в юго-западной части города, называемого горстом Загарелла [13, 14], и второго в юго-восточной части, называемого горстом Матера (рис. 2). На известняковом субстрате осели калькаренитовые отложения, потом мелкодисперсные обломочные материалы, представленные плейстоценовыми морскими глинами, а затем песчаные и террасированные конгломератные отложения, замыкающие плиоценово-плейстоценовый осадочный цикл. Морфология этой территории, характеризующаяся глубокими узкими ущельями (теснинами) и голыми горными плато, в которые интегрировано множество древних пещерных церквей, пастушьих троп с колодцами вдоль них и укрепленных жилых помещений, образует один из самых ярких ландшафтов Средиземноморья [15].

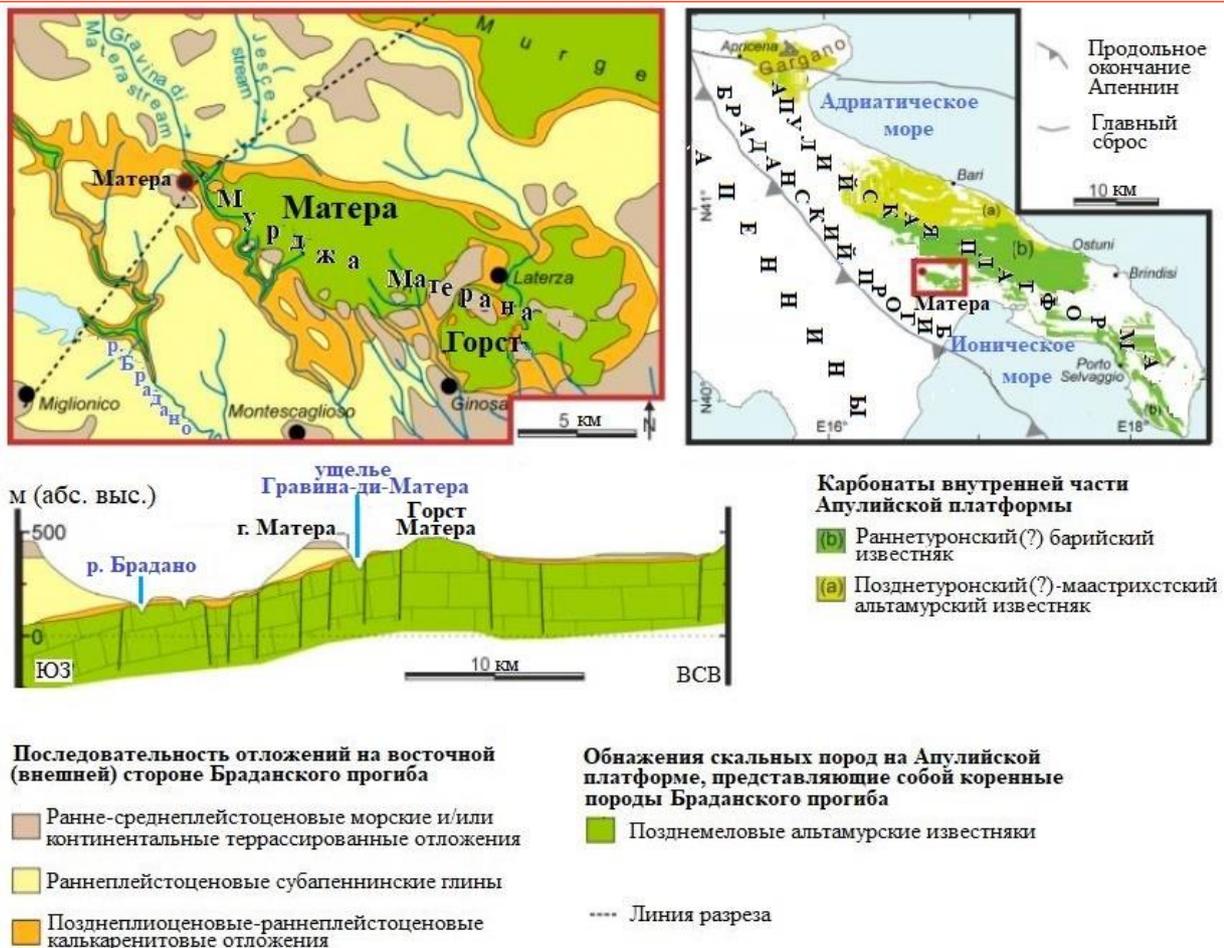


Рис. 2. Геологические условия территории вокруг городской зоны Матеры (по данным Festa et al., 2018).

Как уже упоминалось, пробные геофизические исследования проводились на трех различных участках, представляющих собой наиболее важные места города.

Первым исследуемым участком была Соборная площадь (Пьяцца Дуомо) в самой высокой части Чивиты, считающейся наиболее старой городской частью Матеры, расположенной между Сассо Баризано и Сассо Кавеозо (пещерными кварталами в склонах скалистого ущелья, относящимися к древнему району Сасси, где обнажаются калькаренитовые отложения, толщина которых достигает примерно 40 м). На этой площади находится кафедральный собор Темноволосой Мадонны и Святого Евстафия (Мадонны делла-Бруна и Сант-Эустахио), построенный в XIII веке в апулийском романском стиле и являющийся главным местом католического богослужения в городе Матера и епархией архиепископа Матеры и Ирсини (Матеры-Ирсини). Этот район имеет огромное историческое и архитектурное значение и представляет собой место необычайной туристической привлекательности.

Вторая исследуемая территория – площадь Святого Иоанна (Пьяцца Сан-Джованни) – расположена за стенами древнего города. На ней находится церковь Святого Иоанна Крестителя (Сан-Джованни Баттиста) – культовое здание, построенное еще в средневековье и считающееся архитектурной жемчужиной благодаря изысканной архитектурной композиции и прекрасному убранству. Это памятник огромной

исторической и архитектурной ценности, необыкновенно привлекательный для туристов, который должен быть сохранен и передан будущим поколениям.

Учитывая историческое и архитектурное значение обеих вышеуказанных площадей, а также ту роль, которую они играют для туризма в Матере, необходимо было провести углубленное изучение их подповерхностной среды, направленное на выявление полостей, пещер, подземелий и склепов, а также на определение границ территорий, на которые может быть оказано влияние гидрогеологической нестабильности, что имеет, можно сказать, стратегическое значение.

Третий район геофизических исследований – это городской парк Объединения Италии (Вилла Комунале дель-Унита д'Италия). Он расположен в современном районе города, где пылевато-глинистые грунты, принадлежащие к аллювиальным отложениям и формации субапеннинских глин, перекрывают калькарениновые отложения. Парк занимает площадь около 3850 кв. м и имеет форму треугольника, вершины которого расположены на пересечениях трех улиц и направлены на северо-запад, юго-восток и юго-запад. Он был создан примерно в 1930-х годах, чтобы компенсировать ликвидацию заброшенного ботанического сада неподалеку, где был построен Дворец провинции Матера (Палаццо делла Провинция ди Матера) между улицами Ридола и Лукана (Виа Доменико Ридола и Виа Лукана). В нем много садово-парковых скульптур и атрибутов для отдыха, и там часто собирается множество граждан. В этом парке были запланированы геофизические исследования для картирования водонасыщенных зон, потенциально ответственных за микроосадки, и для изучения геометрических границ между пылевато-глинистыми слоями и калькарениновыми грунтами.

2.2. Георадиолокационные исследования

Одной из ключевых технологий зондирования, обычно используемых для изучения подповерхностного пространства, является георадиолокация (GPR), то есть исследования с помощью георадара, обычно используемые для диагностики с высоким разрешением неглубоко залегающих слоев (до нескольких метров или чуть больше). Эта технология является очень легкой в применении только в очень простых случаях. Но когда встречаются действительно сложные подземные условия, интерпретация георадарных записей является довольно сложной задачей, требующей усовершенствованной обработки данных [16]. Одним из наиболее часто используемых методов обработки является микроволновая (СВЧ-) томография, при которой принимается, что получение георадиолокационных изображений является более общей основой обратной электромагнитной задачи (обратной задачи рассеяния). Одна из целей последней заключается в том, чтобы обнаружить, локализовать и оценить геометрию скрытых под землей границ и объектов, отталкиваясь от поля обратного рассеяния, измеренного путем зондирования исследуемой среды с помощью известного поля падающего излучения [17].

Эффективность георадарной съемки в Матере была повышена не только за счет использования микроволновой томографии, но и благодаря применению георадарной системы IDS Stream-X, оснащенной 16-канальной системой многоэлементных антенн (антенной решеткой), работающей на единой номинальной частоте 200 МГц.

Как обычно в георадарах, использовались конфигурации отражений, а расстояние между передающей и приемной антеннами было пренебрежимо мало с точки зрения длины зондирующей волны. Соответственно, была принята моностатическая (однопозиционная)

конфигурация измерений. Особенностью этой системы является возможность одновременной записи 16 георадарограмм (совокупностей георадарных трасс, полученных при проведении съемки по тому или иному профилю) с равномерным шагом 12 см, так что при каждом проходе георадара по профилю исследовалась полоса шириной 1,8 м. Размеры антенной системы составляли 2,4 м x 0,92 м, масса – около 36 кг. Эта система могла собирать данные, двигаясь со скоростью до 15 км/ч.

В Матере каждая георадарограмма была получена путем фиксации пространственного смещения 0,017 м между двумя последовательными георадиолокационными трассами. Для каждой трассы временное окно сбора данных (быстрое время) было установлено равным 127 нс и дискретизировано на 512 точек на трассе. Чтобы достичь полного охвата области исследования, множественные проходы контролировались с помощью сложных систем позиционирования и специального навигационного программного обеспечения.

Результаты георадарных исследований были получены с помощью микроволнового томографического подхода, специально адаптированного для системы Stream-X и способного обеспечить получение трехмерных изображений подповерхностной среды в виде горизонтальных срезов на разной глубине. Если более подробно, то записи были обработаны с использованием специальной стратегии обработки данных, состоящей из трех основных этапов: предварительной обработки, инверсии данных и псевдотрехмерного представления подповерхностных условий. Рассмотрим эти этапы более подробно.

1. Предварительная обработка результатов георадиолокационной съемки – это последовательность стандартных процедур во временно́й области, которые направлены на извлечение полезного сигнала из необработанных данных путем устранения записей прямых волн между передающими и приемными антеннами, уменьшения шума и усиления полезных сигналов. Этот этап начинается с коррекции синхронизации начала отсчета (нулевого времени) и включает в себя такие процедуры, как выделение целевого интервала на записи и удаление фона. Эти процедуры нужны для удаления прямых волн, сигналов прямого прохождения и волн, отраженных от поверхности грунта [18, 19]. Здесь синхронизация нулевого времени используется для отсекающей первой части сигнала, вплоть до отражения на границе раздела между воздухом и поверхностью грунта, которая принимается плоской. Таким образом, нулевое время георадарограммы фиксируется в соответствии с границей раздела между воздухом и исследуемой грунтовой средой. Соответственно, при получении георадарограмм учитывается только распространение и рассеяние сигнала внутри исследуемого подповерхностного пространства. Процедура выделения целевого интервала используется для удаления или ослабления сигнала из-за прямых волн между антеннами и для выбора той части временно́го окна наблюдения, в которой ожидается появление полезного сигнала. Процедура удаления фона (путем вычитания среднего по всем трассам) обычно обеспечивает более четкое изображение скрытых под землей отражающих объектов, но для достаточно протяженных плоских границ раздела между материалами.

2. Инверсия данных позволяет выполнить реконструкцию отражающих границ и для решения проблемы визуализации использует микроволновую томографию. В частности, эта проблема формулируется в частотной области путем рассмотрения двумерной однородной скалярной модели слабого рассеяния. Обратная задача рассеяния решается с помощью приближения Борна для определения математической зависимости,

описывающей взаимодействия между микроволнами и электромагнитными характеристиками исследуемой среды [20].

3. Псевдотрехмерное представление подповерхностных условий получается путем объединения двумерных микроволновых томографических изображений, полученных в результате инверсии данных. При этом результаты представляются в виде горизонтальных срезов.

Вернемся к выполнению инверсии данных. При каждой такой процедуре обрабатывают одну георадарограмму (результаты одного пройденного георадаром профиля), принимая в качестве эталонных условий двумерную однородную нерассеивающую немагнитную среду, характеризующуюся постоянной относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_b . Рассеяние активируется с помощью антенн, которые моделируются как нитевидные источники, поляризованные вдоль неизменной оси и питаемые единым источником тока. Передающая и приемная антенны расположены на границе раздела между воздухом и грунтовой средой, а горизонтальное расстояние между ними, как уже отмечалось выше, незначительно. Следовательно, модель рассеяния определяется в конфигурации многомоностатического/многочастотного измерения отражения.

Пусть Ω – исследуемая пространственная область, где расположены объекты, которые должны быть отображены на георадарограмме; r – общая точка в Ω ;

$\chi(r) = \frac{\epsilon(r)}{\epsilon_b} - 1$ – функция передачи контраста, учитывающая изменения эквивалентной диэлектрической проницаемости относительно таковой в исследуемой среде. Согласно этим допущениям явление рассеяния при каждой угловой частоте описывается следующим линейным интегральным уравнением [20]:

$$E_s(x_s, x_0, \omega) = k_b^2 \int_{\Omega} G(x_0, \omega, r) E_{inc}(x_s, \omega, r) \chi(r) dr, \quad (1)$$

где E_s – поле рассеяния, измеренное в точке x_0 , когда источник зондирующего сигнала находится в точке $x_s = x_0$; E_{inc} – поле падающего излучения в Ω , то есть поле в исследуемой области при отсутствии каких-либо отражающих границ; k_b – волновое число во вмещающей среде; G – известная функция Грина, относящаяся к рассматриваемой ситуации.

Интегральное уравнение (1) дискретизируется в соответствии с методом моментов с использованием пиксельного представления для неизвестной функции передачи контраста. Соответственно, получение изображения рассматривается как решение следующей матричной задачи:

$$E_s = L[\chi], \quad (2)$$

где E_s – это K -мерный вектор данных ($K = M \times F$, где M – количество точек пространственных измерений, F – количество частот); χ – N -мерный неизвестный вектор (где N – количество точек в Ω); L – $K \times N$ -размерная матрица, полученная путем дискретизации уравнения (1) (стоит отметить, что матрица L зависит от принятой конфигурации измерений, а также от эталонных условий).

Соответственно, для правильного определения L необходимо знать положение точек измерений, а также электромагнитные параметры исследуемой среды. К тому же из-за того что линейная система в уравнении (2) получается в результате дискретизации некорректного интегрального уравнения, нахождение ее решения, то есть инверсия матрицы L , является некорректной задачей [21]. Следовательно, ее решение очень чувствительно к неопределенностям (погрешностям) измерений и шуму в данных. Чтобы получить устойчивое аппроксимированное решение, должна быть применена схема регуляризации и принята схема усеченного сингулярного разложения (сокращенного разложения по сингулярным значениям – TSVD) [21]. Соответственно, аппроксимированное решение уравнения (2) определяется следующим образом:

$$\tilde{\chi} = \sum_{n=1}^H \frac{\langle E_s, u_n \rangle}{\sigma_n} v_n, \quad (3)$$

где $\tilde{\chi}$ – вектор контраста;

$\langle E_s, u_n \rangle$ – скалярное произведение в пространстве данных;

H – ранг аппроксимации (индекс усечения);

$\{\sigma_n\}_{n=1}^Q$ – набор сингулярных чисел матрицы L , упорядоченных по убыванию;

$\{u_n\}_{n=1}^Q$; $\{v_n\}_{n=1}^K$ – наборы сингулярных векторов в данных и неизвестных пространствах соответственно.

Порог $H \leq Q$ ($Q = \min\{K, N\}$) определяет степень регуляризации решения и выбирается как компромисс между требованиями к точности и разрешению с одной стороны (что предполагает большее значение H) и устойчивостью решения с другой стороны (что требуется для поддержания низкой величины H). Результат визуализации представляется как пространственная карта модуля полученного вектора контраста, нормализованного до его максимального значения для исследуемой области. Следовательно, области Ω , в которых модуль вектора контраста существенно отличается от нуля, указывают на положение и геометрию объектов-мишеней [19, 20] (эта часть не очень понятна, результаты неубедительные, то есть, по сути, это просто интерполяция между профилями. – *Ред.*).

2.3. Электрическая томография

На сегодняшний день электротомография (ERT) представляет собой надежный геофизический метод для исследований приповерхностных слоев. Он применяется для решения широкого спектра геологических, экологических и инженерных задач [22–25]. Постоянный электрический ток подается в подповерхностную среду с помощью питающих электродов возбуждающей многоэлектродной системы, развернутой вдоль профиля, а ответные электрические сигналы (напряжения) обнаруживаются на поверхности с помощью системы приемных электродов. Можно использовать множество различных расстановок электродов, однако наиболее распространенными являются следующие конфигурации: односторонняя осевая дипольная (диполь-дипольная), Шлюмберже и Веннера. Принимая во внимание геометрию систем электродов, по результатам анализа принятых электрических сигналов можно получить двумерный или трехмерный

электрический псевдоразрез, в котором представлено пространственное распределение кажущегося удельного сопротивления. Наконец, с помощью алгоритмов, используемых для инверсии данных, можно получить томографическую карту удельного электрического сопротивления.

В Матере геоэлектрические исследования проводились с помощью системы Syscal Pro Switch 96 (производства французской компании IRIS Instruments), оснащенной передатчиком, способным передавать токи до 2,5 А и прикладывать напряжения до 800 В (250 Вт). Этот инструмент позволяет одновременно управлять максимальным количеством электродов, равным 96, автоматически выполнять последовательность измерений и компенсировать спонтанные потенциалы (естественные потенциалы собственной поляризации грунтов). Учитывая размер участка исследований и движение автомобилей и пешеходов во время съемки, использовать очень плотную сетку сбора данных было невозможно. При этом использованные электроды находились на расстоянии 2 м друг от друга. Съемка с помощью односторонних осевых дипольных (диполь-дипольных) и точечно-дипольных (трехэлектродных) конфигураций приемных и питающих электродов при их распределении по всей сетке позволила компенсировать недостаточную чувствительность из-за основного шага электродов и избежать сильных локальных вариаций записей. Впоследствии геоэлектрические данные были обработаны и подвергнуты инверсии с помощью программного обеспечения ERT Lab, разработанного итальянской компанией Geostudi Astier, которое использует метод конечных элементов (МКЭ) для моделирования подповерхностных условий. На протяжении итераций при инверсии влияние негауссовского шума (не следующего закону распределения Гаусса) надлежащим образом контролировалось с помощью надежного алгоритма определения веса данных [26, 27].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом разделе будут представлены результаты, полученные при обработке данных георадиолокационных и электротомографических съемок, проведенных в Матере, с помощью методик, описанных в разделе 2. В частности, подповерхностное пространство Соборной площади (Пьяцца Дуомо) исследовалось с использованием обоих указанных методов, тогда как на площади Святого Иоанна (Пьяцца Сан-Джованни) применялась только георадиолокация, а в городском парке Объединения Италии (Вилла Комунале дель-Унита д'Италия) – только электротомография.

Что касается георадарных исследований, то необработанные данные, собранные на обоих испытательных участках, обрабатывались с использованием одних и тех же алгоритмов. В частности, начало отсчета времени (нулевое время) на георадарограммах было установлено на 7 нс, а также была применена процедура выбора целевого интервала 12–57 нс. При этом убирались записи прямой электромагнитной связи между антеннами, которая полностью подавляла сигналы обратного рассеяния от скрытых под землей объектов. Кроме того, отфильтровывались сигналы после 57 нс, которые соответствовали только шуму. Как следствие, если принять, что средняя относительная диэлектрическая проницаемость исследуемой среды ϵ_r равна 9, то максимальная глубина исследования z составит 2,5 м. После этого было выполнено быстрое преобразование Фурье для получения данных в частотной области, необходимых в качестве входных для инверсии. В этом случае диапазон эффективной частоты, оцененный с помощью спектрального

анализа, составил 100–600 МГц и был дискретизирован по 26 равномерно распределенным частотам. Все представленные результаты были получены путем установления порога усеченного сингулярного разложения таким образом, чтобы отфильтровать все сингулярные значения, которые на 25 дБ ниже максимального.

3.1. Соборная площадь (Пьяцца Дуомо)

Георадиолокационные и электротомографические исследования, проведенные на Соборной площади (Пьяцца Дуомо), были запланированы для получения информации о возможном наличии таких скрытых под землей объектов, как резервуары для хранения воды и каналы (или трубопроводы, лотки). Площадь исследованного участка составляла около 534 кв. м, длина в северном направлении (по оси **X**) – 13,45 м, в восточном (по оси **Y**) – 39,80 м (рис. 3).



Рис. 3. Линии съемки методами георадиолокации и электротомографии на Соборной площади (Пьяцца Дуомо), и расположение старого резервуара для хранения воды (на снимке с сайта Google Earth)

Для достижения полного охвата исследуемого участка было выполнено 8 проходов георадара Stream-X, поэтому после обработки в соответствии с томографическим подходом, описанным в разделе 2.2, было собрано 120 георадарограмм. На рисунке 4, а–е показаны горизонтальные срезы трехмерной реконструкции исследуемой области на следующих глубинах (**z**): 0,15; 0,69; 0,96; 0,99; 1,23; 1,50; 1,77 м. Эти изображения показывают наличие нескольких погребенных сооружений, используемых для накопления и хранения воды. В частности, конструкции, имеющие удлиненную форму, могут быть отнесены к каналам (трубопроводам), тогда как конструкции круглой и прямоугольной формы могут представлять собой резервуары. Интерпретация наиболее репрезентативных горизонтальных срезов дана на рисунке 5, где штриховые белые линии обрисовывают

распознанные объекты. В частности, смотровой колодец, люк которого виден на каменной мостовой площади (см. рис. 3), отчетливо просматривается на томографическом изображении при $z = 0,15$ м (см. рис. 5, а). А круглый резервуар для хранения воды диаметром около 10 м становится видимым на изображениях начиная с $z = 0,69$ м (см. рис. 5, б). Вода направлялась в этот резервуар с помощью наклонного канала (трубопровода), который начинает появляться на срезах начиная с глубины $z = 0,69$ м и полностью виден на изображении для $z = 0,96$ м (см. рис. 5, в). Это связано с наклоном указанной конструкции. На рисунке 5, в видны еще два канала (трубопровода). Один находится в левой части изображения и имеет длину около 10 м; а в районе $y = 16$ м появляется другой, небольшой, который связан с каналом (трубопроводом), идущим в сторону круглого резервуара.

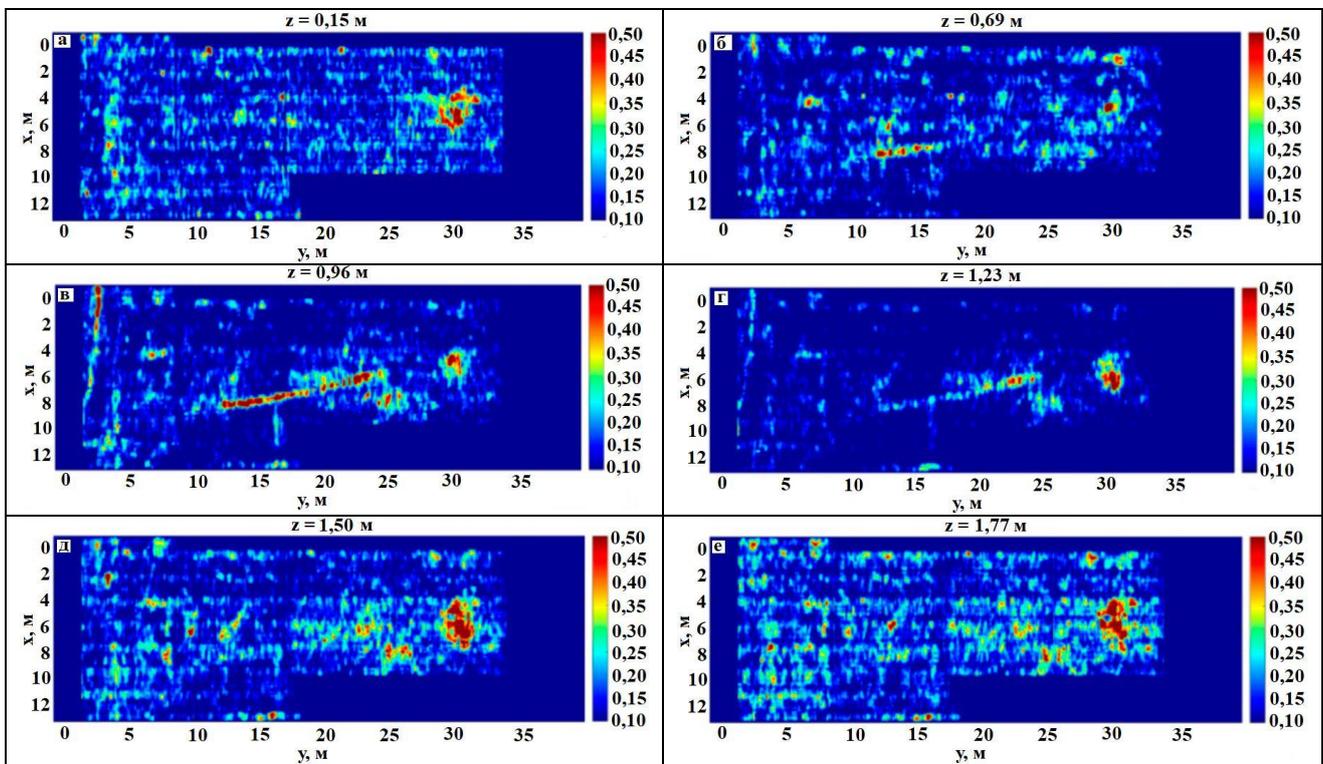


Рис. 4. Визуализация результатов псевдотрехмерной георадиолокационной томографии с помощью горизонтальных срезов на разных глубинах: а – 0,15 м; б – 0,69 м; в – 0,96 м; г – 1,23 м; д – 1,50 м; е – 1,77 м. Видны несколько аномалий, которые объясняются наличием канала (трубопровода) и резервуаров для хранения воды. Томографические изображения показывают нормализованную интенсивность полученного контраста

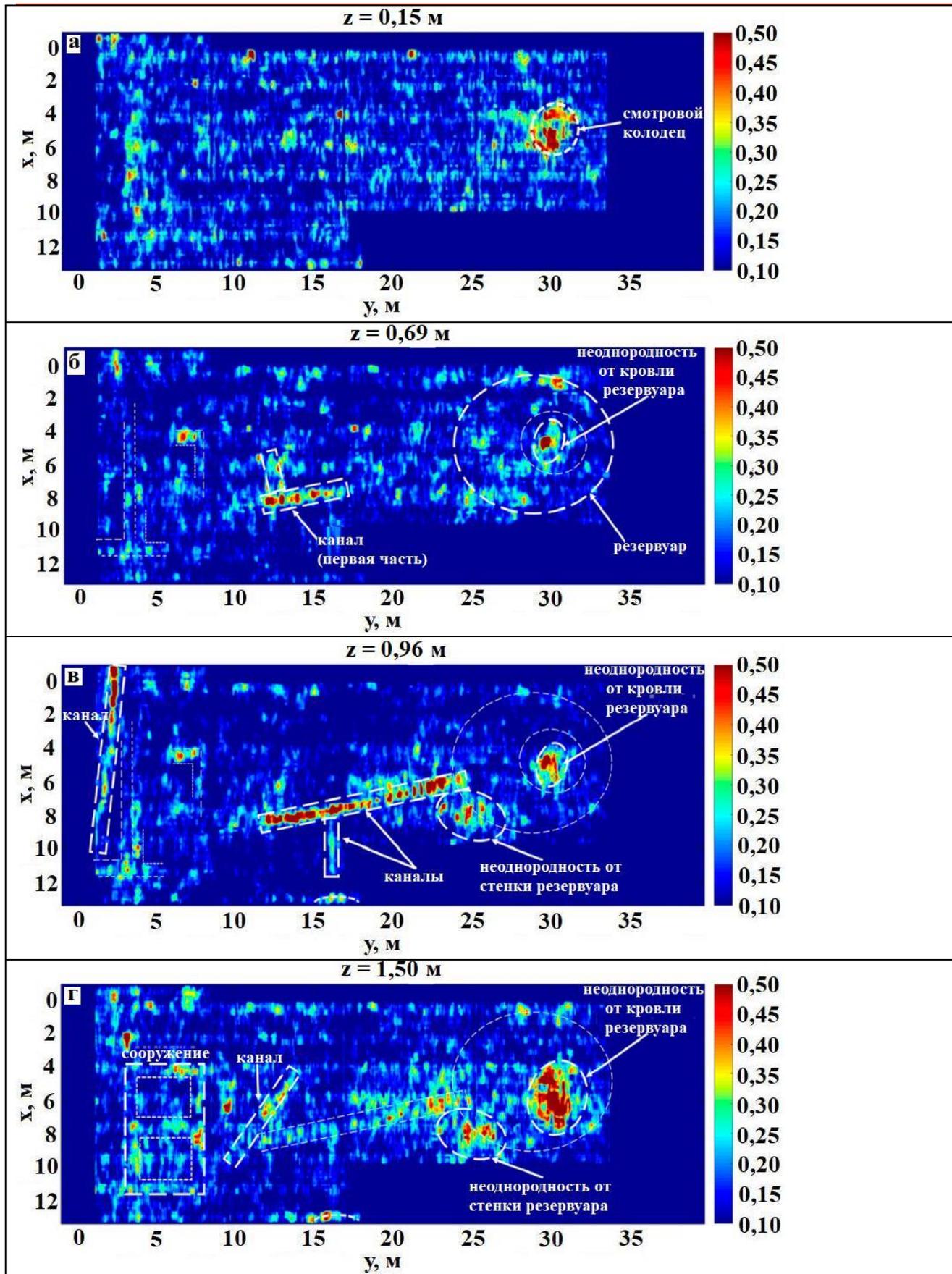


Рис. 5. Интерпретация результатов псевдотрехмерной георадиолокационной томографии. Для примера представлены изображения на самых значимых глубинах: а – 0,15 м; б –

0,69 м; в – 0,96 м; г – 1,50 м. Выявленные сооружения выделены штриховыми белыми линиями и идентифицированы

Кроме того, изображение на глубине $z = 1,5$ м (см. рис. 5, г) показывает наличие сооружения прямоугольной формы, которое, видимо, состоит из двух помещений и начинает проявляться на меньших глубинах. Это сооружение соединено с каналом (трубопроводом), полностью проявляющимся в левой части изображения для $z = 0,96$ м. На рисунке 5, г проявляется еще один наклонный канал (трубопровод), который, по-видимому, связан с прямоугольным сооружением и каналом (трубопроводом), идущим к круглому резервуару. И наконец, еще две аномалии имеются в области круглого резервуара, и они могут быть связаны с некоторой неоднородностью его кровли и частью его стенки. Чтобы показать, как эти аномалии расположены в области резервуара, на рисунке 5, б, в повторены изображения смотрового колодца.

Как уже отмечалось выше, чтобы исследовать более глубокие слои подповерхностной среды, были проведены электротомографические исследования с использованием системы Syscal Pro Swich 96 при равномерном распределении на поверхности 96 электродов. Чтобы избежать проблем, связанных с дорожным движением во время съемки, и локальных эффектов, использовались односторонняя осевая дипольная (диполь-дипольная) и трехэлектродная (точечно-дипольная) установки электродов с расстоянием между электродами 2 м. 3D электротомографическая модель, полученная с помощью программы ERT Lab, достигла максимальной глубины 8 м (рис. 6, а). На картине удельного электрического сопротивления выделяется стратиграфическая граница между высокоомной зоной (с высоким удельным сопротивлением $\rho > 300 \text{ Ом*м}$), связанной с калькаренимом, и более поверхностным проводящим материалом ($\rho < 300 \text{ Ом*м}$), который можно было бы отнести к антропогенной засыпке. Низкие значения удельного сопротивления более мелкозалегающих слоев могут быть связаны с их литологической природой (например, если это глина, илистый или пылеватый грунт) или с неуплотненным материалом с более высоким содержанием воды. Контакт между проводящим материалом, залегающим ближе к поверхности, и высокоомным материалом, находящимся глубже, отчетливо виден на 2D вертикальном разрезе удельного электрического сопротивления (рис. 6, б) – он проходит через середину площадки. Представление значений удельного сопротивления с помощью горизонтальных срезов с увеличивающейся глубиной (рис. 7) позволяет определить расположение резервуара, находящегося в первых 3 м подповерхностной среды в западной зоне квадрата. И наконец, на глубине 5 м хорошо виден резкий переход от проводящего материала к высокоомному.

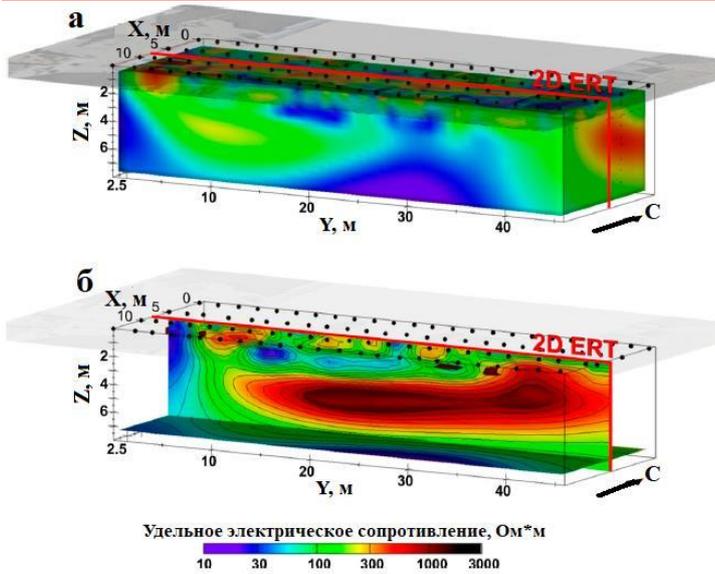
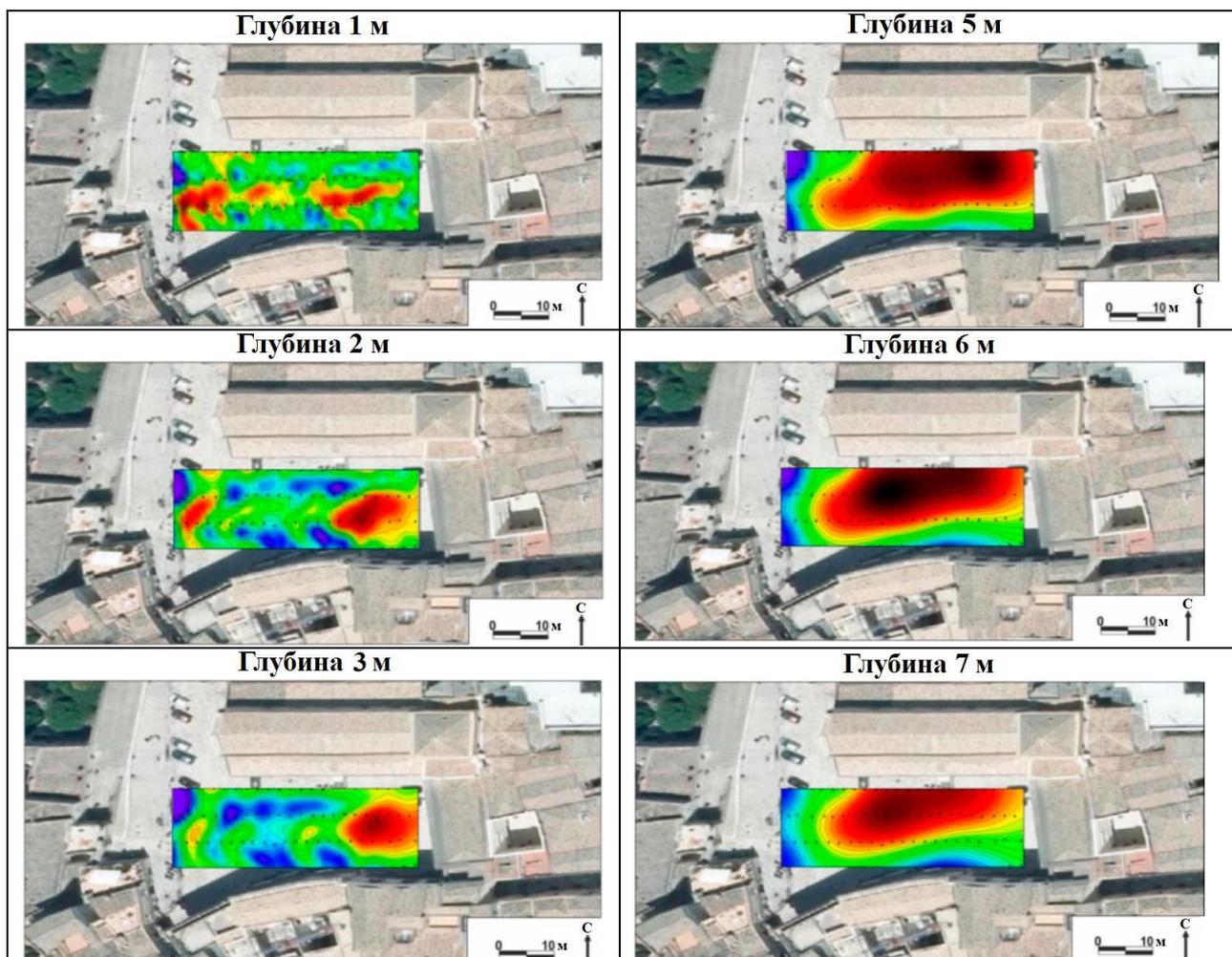


Рис. 6. Результаты обработанных данных электротомографической съемки на исследуемом участке Соборной площади (Пьяцца Дуомо): а – 3D-модель; б – вертикальный 2D-разрез для средней части площади (зона высокого удельного электрического сопротивления связана с наличием подземного резервуара)



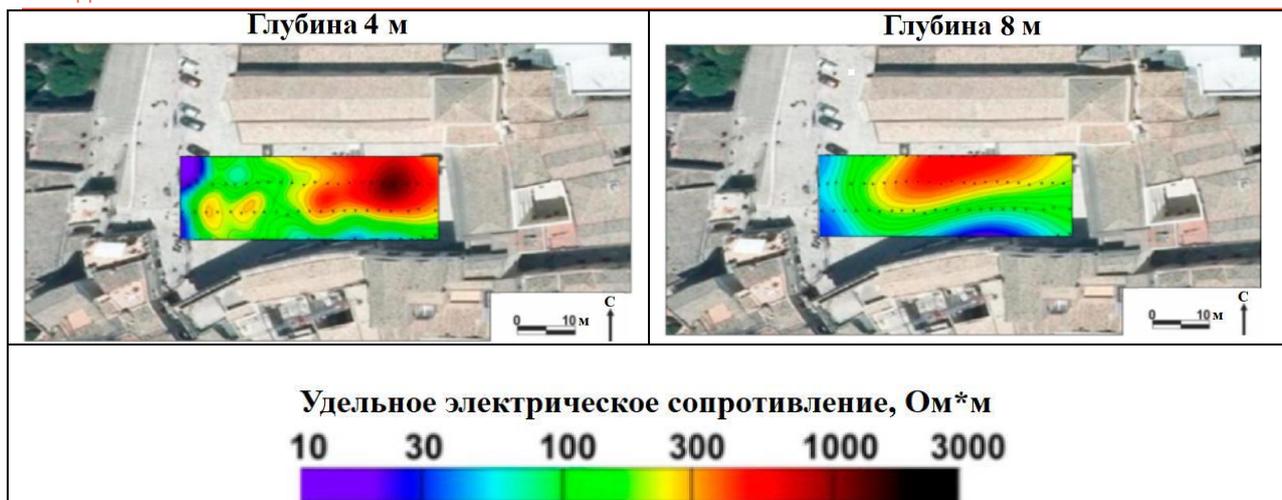


Рис. 7. Горизонтальные срезы 3D результатов электротомографии исследуемого участка Соборной площади (Пьяцца Дуомо), наложенные на космический снимок с сайта Google Earth

3.2. Площадь Святого Иоанна (Пьяцца Сан-Джованни)

На площади Святого Иоанна (Пьяцца Сан-Джованни) были запланированы геофизические исследования участка в 586 кв. м при максимальных горизонтальных размерах 35 и 18 м (рис. 8, а). Исследуемая территория находилась недалеко от церкви Святого Иоанна Крестителя (Сан-Джованни Баттиста), и ее часть охватывала зону, которая ранее была предметом археологического исследования, позволившего обнаружить гробницы и древние стены (рис. 8 б, в) [28]. Вход в указанную церковь соответствует координатам $x = 0$ м, $y = 7$ м на томографических георадиолокационных изображениях.

Георадарные измерения системой Stream-X были выполнены по 17 профилям. Было получено 255 георадарограмм, охвативших область, обрисованную на рисунке 8. На рисунке 9, а–г показаны основные результаты обработки георадиолокационных данных, отображенные в виде горизонтальных срезов на следующих глубинах (z): 0,18; 0,24; 0,30; 0,87 м.

Площадь Святого Иоанна
(Пьяцца Сан-Джованни)

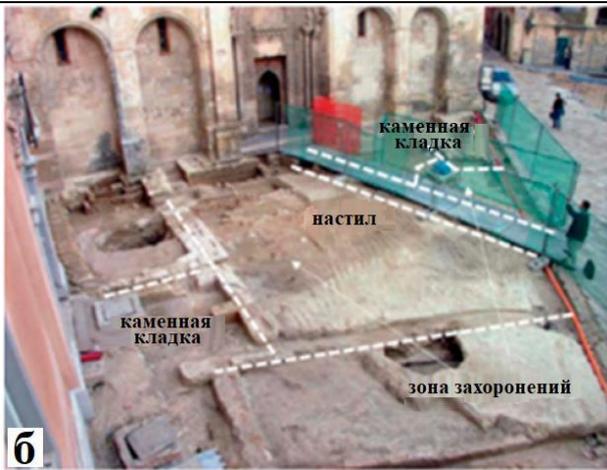
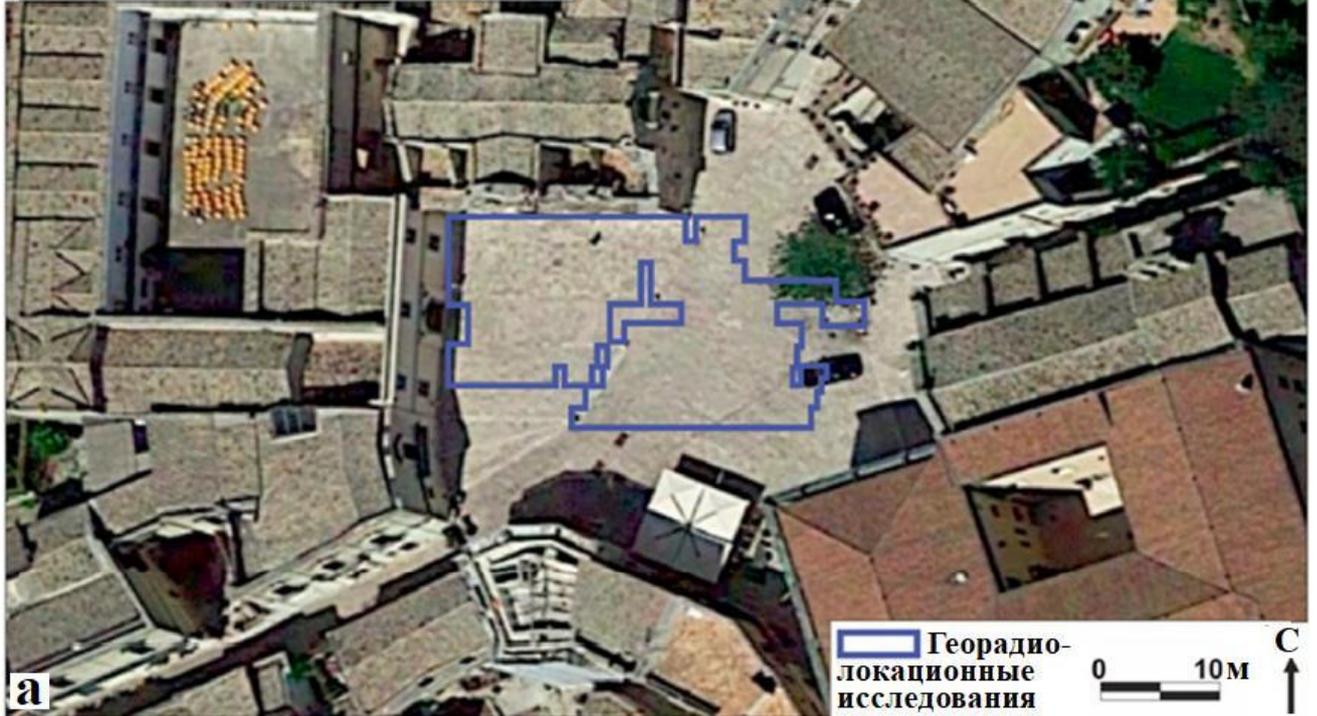


Рис. 8. Участок георадиолокационной съемки на площади Святого Иоанна (Пьяцца Сан-Джованни), обозначенный синими контурами, на основе космического снимка с сайта Google Earth (а); гробницы и стены, обнаруженные в ходе археологических исследований, проведенных в прошлые годы (б, в)

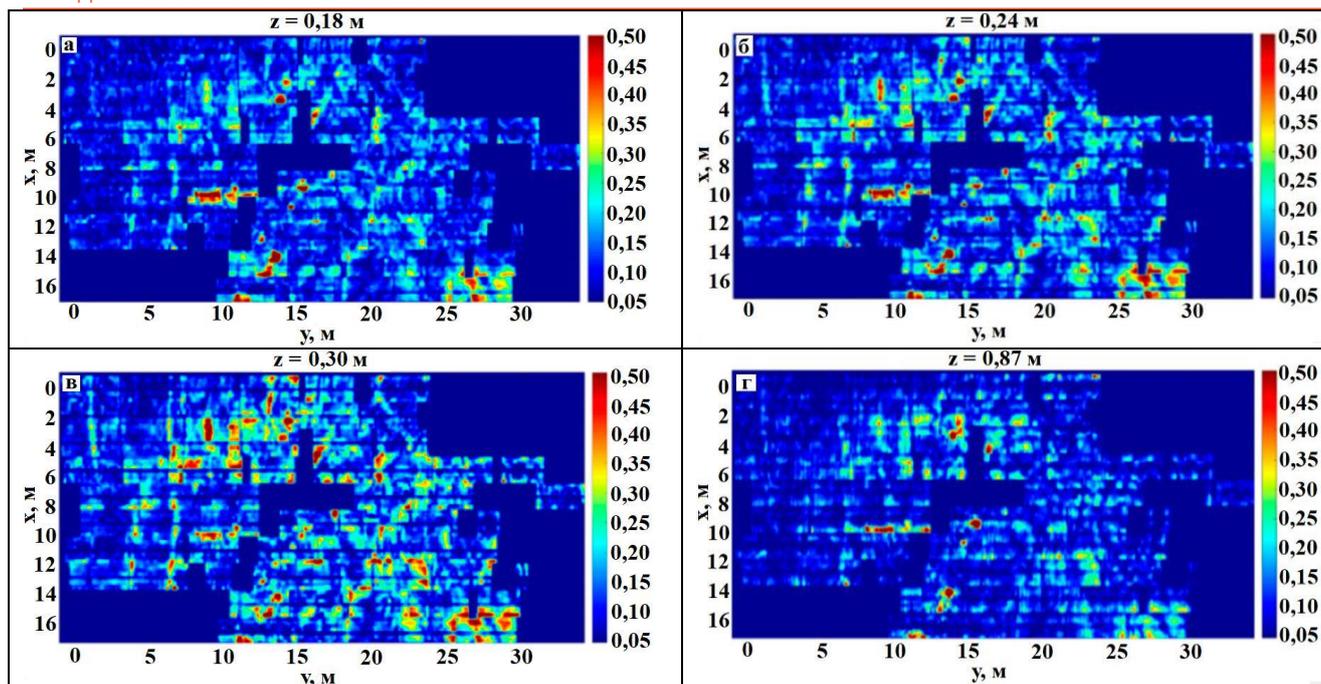


Рис. 9. Визуализация псевдотрехмерной георадарной томографической модели с помощью горизонтальных срезов на разных глубинах (z): а – 0,18 м; б – 0,24 м; в – 0,30 м; г – 0,87 м. На изображениях показана нормализованная интенсивность полученного контраста

Томографическая реконструкция на глубине $z = 0,18$ м показывает степень освоения человеком неглубокой части подповерхностного пространства, в то время как несколько отражающих объектов, широко распространенных на исследуемой территории, проявляются на глубинах 0,24 и 0,30 м. Интерпретация томографического изображения при $z = 0,30$ м представлена на рисунке 10, а, где белыми штриховыми линиями обрисованы обнаруженные сооружения из каменной кладки. Такая интерпретация ограничивалась зоной захоронений, которая была обнаружена перед церковью во время археологических исследований, проведенных в прошлые годы [28]. В правом нижнем углу рисунка 10, а в диапазоне y от 25 до 30 м также показано подземное помещение (склеп). И наконец, на глубине $z = 0,87$ м появляется квадратная конструкция площадью около 16 кв. м (рис. 10, б).

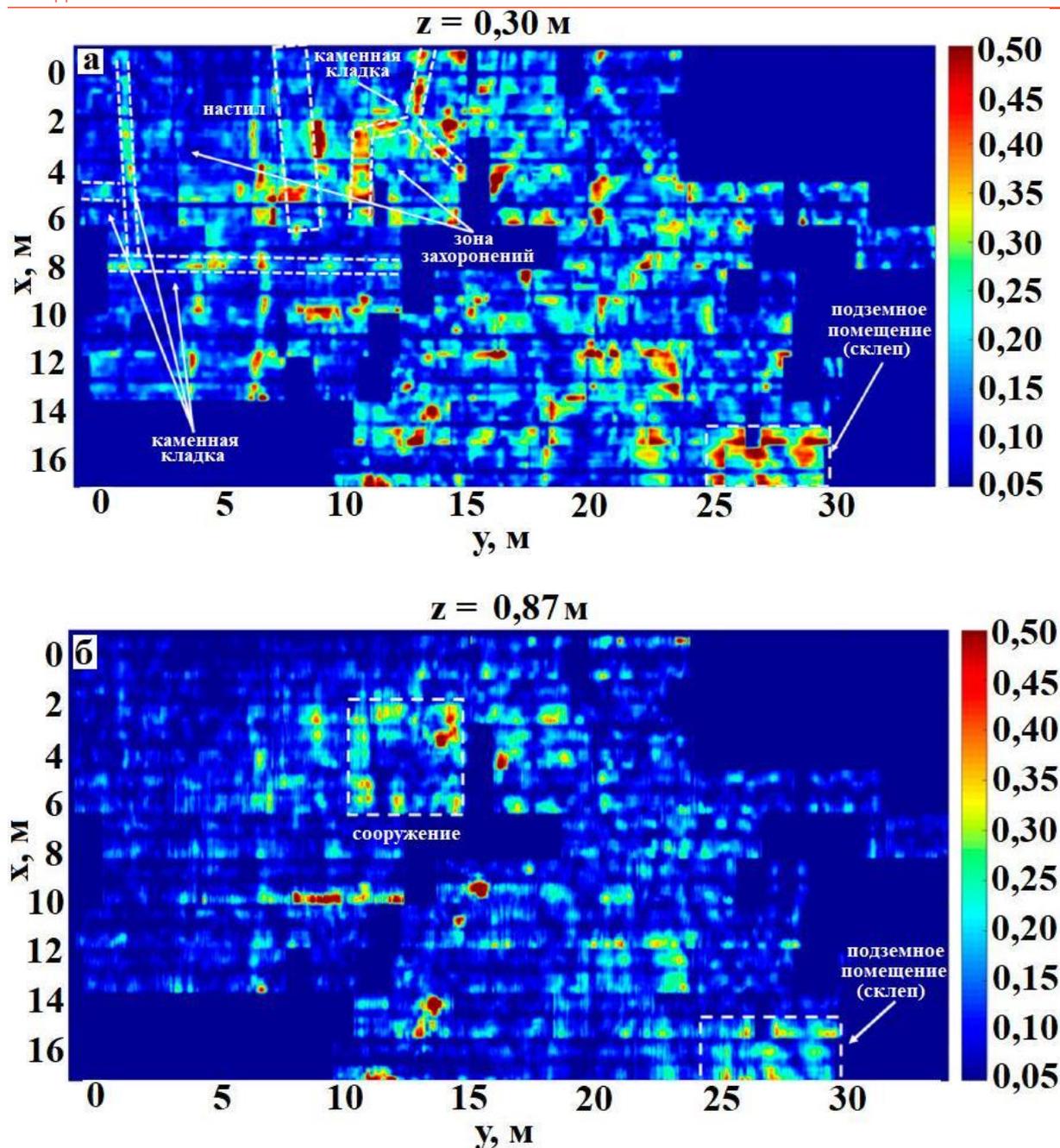


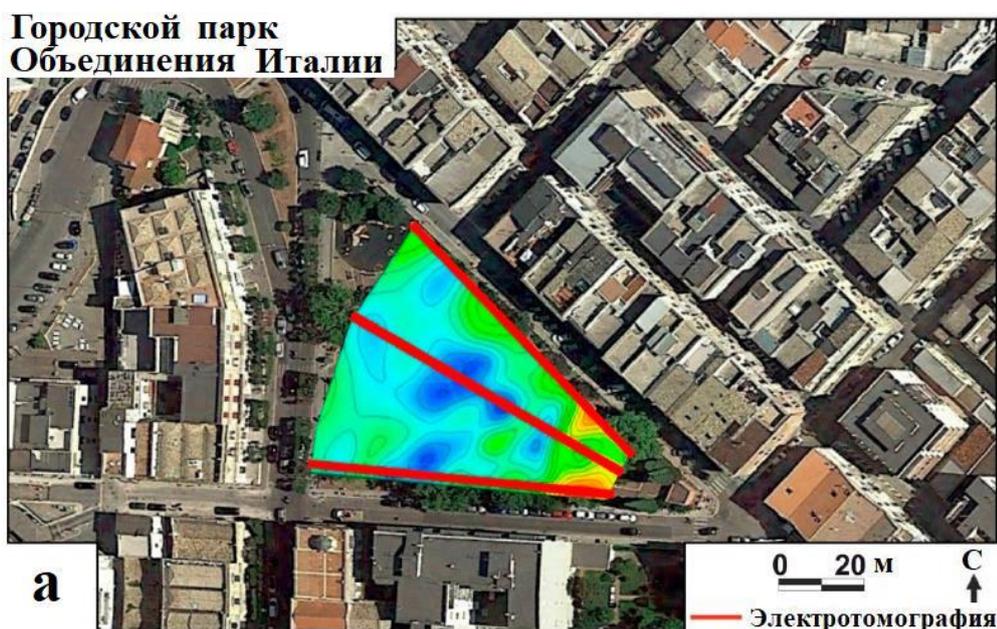
Рис. 10. Результаты интерпретации данных псевдотрехмерной георадиолокационной томографии. Примеры выявленных сооружений обрисованы штриховыми белыми линиями

Высокий уровень освоения человеком, наличие проволочных сеток и плохие контакты электродов сделали обработку электротомографических изображений невозможной и ненадежной. Геоэлектрические данные, полученные на площади Святого Иоанна (Пьяцца Сан-Джованни), были особенно зашумленными, и оказалось, что на них преобладают эффекты, вызванные вмешательством, проведенным в 2007 году при ремонте тротуара и подземных конструкций [28, 29]. Поэтому (с учетом наличия результатов георадарных исследований и начатых было полевых измерений удельного сопротивления) электротомографическая съемка в этом районе не проводилась.

3.3. Городской парк Объединения Италии (Вилла Комунале дель-Унита д'Италия)

С литологической точки зрения городской парк Объединения Италии (Вилла Комунале дель-Унита д'Италия) находится в городской зоне с наличием аллювиальных илистых отложений и более крупнозернистого материала. Эти аллювиальные грунты залегают на субапеннинских глинах, которые, в свою очередь, перекрывают отложения калькаренита (рис. 11). Присутствие глинистых материалов в неглубоко залегающих подповерхностных слоях предопределило план исследований только с помощью электротомографии. Действительно, высокая проводимость слоев глины ($\rho < 10 \text{ Ом*м}$) сильно снижает глубину проникновения микроволн.

Электротомографические исследования выполнялись с помощью системы Syscal Pro Swich 96 с использованием 96 электродов, равномерно распределенных по поверхности. Измерения проводились по трем профилям, выбранным таким образом, чтобы минимизировать влияние антропогенного шума и избежать наличия препятствий для установки электродных датчиков. Для каждого профиля были получены разрезы удельного электрического сопротивления с использованием программы ERT Lab (см. рис. 11, а). Чтобы иметь пространственное представление о картине распределения удельного сопротивления, с помощью простой интерполяции была получена псевдотрехмерная карта (см. рис. 11, б).



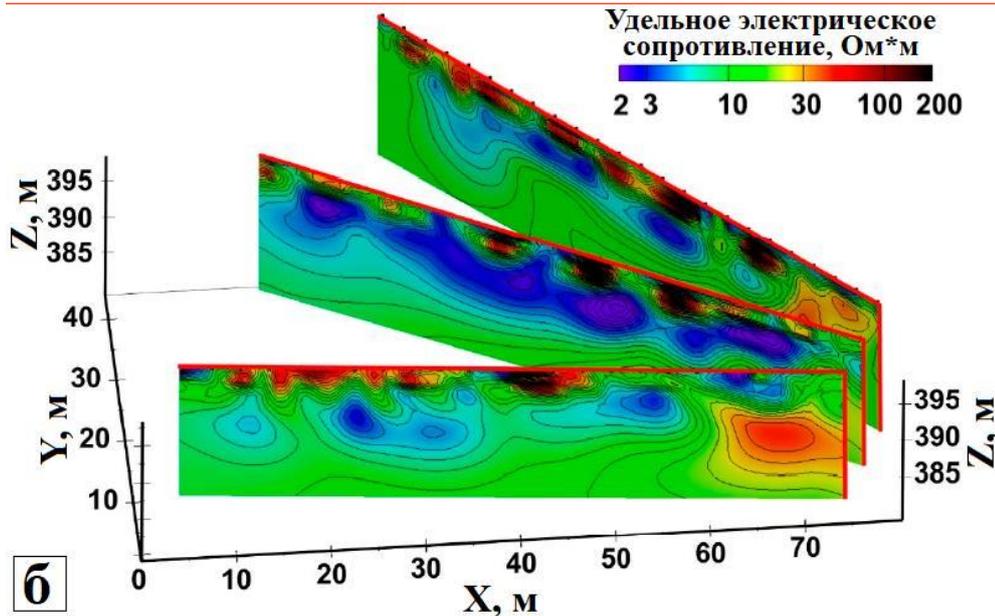


Рис. 11. Результаты электротомографических исследований городского парка Объединения Италии (Вилла Комунале дель-Унита д'Италия): а – карта удельного электрического сопротивления на глубине 10 м, наложенная на космический снимок с сайта Google Earth (наличие зоны проводимости, связанной с присутствием аллювиальных отложений с высоким содержанием воды, и резкий контраст удельного сопротивления в правой части вполне очевидны); б – разрезы удельного электрического сопротивления, полученные по трем разным профилям, показанным красными прямыми линиями на рисунке 11, а

Анализ электротомографических изображений с учетом ограничений геологических полевых исследований позволяет выделить следующие четыре основных аспекта.

1. Наличие неглубоко залегающего высокоомного (100–200 Ом*м) слоя толщиной 2–3 м, который может быть связан с насыпным материалом, локально затронутым подземными коммуникациями.

2. Для результатов по всем профилям – наличие высокопроводящего (2–3 Ом*м) слоя, вероятно связанного с аллювиально-илистыми отложениями с заметным содержанием воды.

3. Наличие внизу слоя со средним (2–25 Ом*м) сопротивлением коррелирует с субапеннинскими глинами.

4. Идентификация справа на всех электротомографических изображениях сектора со значениями удельного электрического сопротивления в диапазоне 30–50 Ом*м, относящегося к калькаренитовому субстрату в гетероптическом контакте с субапеннинскими глинами, как указано на геологической карте [30]

4. ВЫВОДЫ (ЗАКЛЮЧЕНИЕ)

Напомним, что были выбраны три испытательных участка, расположенных в городской зоне Матеры: Соборная площадь (Пьяцца Дуомо), площадь Святого Иоанна (Пьяцца Сан-Джованни) и городской парк Объединения Италии (Вилла Комунале дель-Унита д'Италия). Это были интересные испытательные участки для применения новых

методов электрической и электромагнитной томографии благодаря сложности геологических условий и наличию крупных и разрушенных антропогенных объектов в приповерхностных слоях. Интерпретация полученных результатов раскрыла способ обсуждения возможностей и ограничений методов георадиолокации и электротомографии в общем контексте городской геофизики (к сожалению, в самой статье не было раздела «Дискуссия», хотя результаты интерпретации были не то чтобы спорными, но неоднозначными. – **Ред.**).

Действительно, исторические районы Матеры представляют собой идеальную лабораторию под открытым небом для проверки способности методов георадиолокации и электротомографии выявлять и реконструировать геометрию подземных объектов, поскольку эта городская подповерхностная среда постоянно изменялась деятельностью человека на протяжении всей многотысячелетней истории города.

Использование томографического подхода к инверсии георадарных данных стало ключом к получению трехмерной геометрической реконструкции захороненных антропогенных объектов в сложной геологической среде. Примечательны результаты, полученные на Соборной площади (Пьяцца Дуомо), где была полностью реконструирована геометрия резервуара для хранения воды.

В то же время электротомография представляет собой мощный метод исследования подповерхностных слоев с гораздо меньшими ограничениями по глубине, но с более низким пространственным разрешением, чем у георадиолокационного метода. При этом использование электрической томографии дает информацию даже при наличии чрезвычайно высокопроводящих слоев, когда распространение сигналов георадара является сильно ограниченным. Результаты геофизических исследований, проведенных на испытательном участке городского парка Объединения Италии (Вилла Комунале дель-Унита д'Италия), подтверждают ключевую роль метода электротомографии в исследовании проводящей подземной среды.

На сегодняшний день совместное применение методов георадиолокации и электротомографии, использование новых томографических подходов при инверсии данных и методов информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) для визуализации данных можно рассматривать как мощный инструмент для получения трехмерных изображений подземного пространства в городских районах.

Что касается будущих направлений исследований, то комбинация методов георадиолокации и электротомографии с другими неинвазивными и экономичными датчиками (например, микроэлектромеханических систем для измерения нескольких параметров окружающей среды, волоконной оптики) и инструментами ИКТ для обмена геопространственными данными и визуализации будет играть ключевую роль в градостроительном проектировании.

Наконец, рассмотренные случаи из практики по исследованиям Матеры продемонстрировали возможность преобразования исторических центров в своего рода лаборатории, где исследователи, технические специалисты инновационных компаний, государственных учреждений и общественных организаций (в соответствии с четырехзвенной моделью инновационной деятельности) могут активно участвовать в разработке новых стратегий для умных и устойчивых городов.

Эта работа была поддержана проектом Clara (SCN_00451), финансируемым программой MIUR (Программой умных городов и сообществ и социальных инноваций, PON R&S 2007–2013).

Авторы благодарят администрацию Матеры и фонд Matera 2019 за их поддержку в организации геофизических исследований и распространении полученных научных результатов.

Источник для перевода

Bellanova J., Calamita G., Catapano I., Ciucci A., Cornacchia C., Gennarelli G., Giocoli A., Fisanger F., Ludeno G., Morelli G., Perrone A., Piscitelli S., Soldovieri F., Lapenna V. GPR and ERT investigations in urban areas: the case-study of Matera (Southern Italy) // Remote Sensing. Basel, Switzerland: MDPI, June 2020. 12 (11): 1879. URL: researchgate.net/publication/342081736_GPR_and_ERT_Investigations_in_Urban_Areas_the_Case-Study_of_Matera_Southern_Italy.

Список литературы, использованной авторами переведенной статьи

1. Meijer A., Bolivar M. Governing the smart city: a review of the literature on smart urban governance // *Rev. Adm. Sci.* 2016. 82. 392–408.
2. Trindade E.P., Hinning M.P., Moreira da Costa E., Sabatini Marques J., Cid Bastos R., Yigitcanlar T. Sustainable development of smart cities: a systematic review of the literature // *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.* 2017. 3–11.
3. Salvia M., Cornacchia C., Di Renzo G.C., Braccio G., Annunziato M., Colangelo A., Orifici L., Lapenna V. Promoting smartness among local areas in a Southern Italian region: The Smart Basilicata Project // *Indoor Built Environ.* 2016. 25. 1024–1038.
4. Desouza K.C., Flanery T.H. Designing, planning, and managing resilient cities: a conceptual framework // *Cities.* 2013. 35. 89–99.
5. Arafah Y., Winarso H. Redefining smart city concept with resilience approach // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2017. 70. 012065.
6. Cuomo V., Soldovieri F., Ponzio F.C., Ditommaso R. A holistic approach to long term SHM of transport // *The International Emergency Management Society (TIEMS) Newsletter.* Brussels, Belgium: The International Emergency Management Society, 2018. P. 67–84. ISSN 2033-1614.
7. Showstack R. Scientist call for a renewed emphasis on urban geology // *EOS Earth Space Sci. News.* 47. 431–432.
8. Bobylev N. Sterling, Urban underground space: a growing imperative perspectives and current research in planning and design for underground space use // *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2016. 55. 1–4.
9. Bobylev N. Underground space as an urban indicator: measuring use of subsurface // *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2016. 55. 40–51.
10. Lapenna V. Resilient and sustainable cities of tomorrow: The role of applied geophysics // *Boll. Geofis. Teor. Appl.* 2017. 58. 237–251.

11. Laureano P. Iscrizione alla Lista del Patrimonio Mondiale, Comune di Matera, I Sassi e il Parco delle Chiese Rupestri // Verso il Piano di Gestione del sito UNESCO. Matera, Italy, 2012.
12. Tropeano M., Sabato L., Festa V., Capolongo D., Casciano C.I., Chiarella D., Gallicchio S., Longhitano S.G., Moretti M., Petruzzelli M. et al. “Sassi”, the old town of Matera (southern Italy): first aid for geotourists in the “European Capital of Culture 2019 // Alp. Mediterr. Quat. 2018. 31. 133–145.
13. Tropeano M., Sabato L., Pieri P. Filling and cannibalization of a foredeep: the Bradanic Trough, Southern Italy // Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 2002. 191. 55–79.
14. Beneduce P., Festa V., Francioso R., Schiattarella M., Tropeano M. Conflicting drainage patterns in the Matera Horst area, Southern Italy // Phys. Chem. Earth. 2004. 29. 717–724.
15. Festa V., Sabato L., Tropeano M. 1:5000 geological map of the upper Cretaceous intraplateau-basin succession in the “Gravina di Matera” canyon (Apulia Carbonate Platform, Basilicata, southern Italy) // Ital. J. Geosci. 2018. 137. 3–15.
16. Solimene R., Catapano I., Gennarelli G., Cuccaro A., Dell’Aversano A., Soldovieri F. SAR imaging algorithms and some unconventional applications: a unified mathematical overview // IEEE Signal Proc. Mag. 2014. 31. 90–98.
17. Persico R. Introduction to ground penetrating radar: inverse scattering and data processing. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2014.
18. Catapano I., Gennarelli G., Ludeno G., Soldovieri F., Persico R. Ground-penetrating radar: operation principle and data processing // Wiley Encycl. Electr. Electron. Eng. 2019. 1–23.
19. Catapano I., Gennarelli G., Ludeno G., Soldovieri F. Applying ground-penetrating radar and microwave tomography data processing in cultural heritage: state of the art and future trends // IEEE Signal Process. Mag. 2019. 36. 53–61.
20. Catapano I., Ludeno G., Soldovieri F., Tosti F., Padeletti G. Structural assessment via ground penetrating radar at the Consoli Palace of Gubbio (Italy) // Remote Sens. 2018. 10. 45.
21. Bertero M.; Boccacci M. Introduction to inverse problems in imaging. London, UK: CRC Press; Taylor&Francis Group, 1998.
22. Giocoli A., Hailemichael S., Bellanova J., Calamita G., Perrone A., Piscitelli S. Site and building characterization of the Orvieto Cathedral (Umbria, Central Italy) by electrical resistivity tomography and single-station ambient vibration measurements // Eng. Geol. 2019. 260. 105195.
23. Moscatelli M., Piscitelli S., Piro S., Stigliano F., Giocoli A., Zamuner D., Marconi F. Integrated geological and geophysical investigations to characterize the anthropic layer of the Palatine hill and Roman Forum (Rome, Italy) // Bull. Earthq. Eng. 2014. 12. 1319–1338.
24. Pazzi V., Tapete D., Cappuccini L., Fanti R. An electric and electromagnetic geophysical approach for subsurface investigation of anthropogenic mounds in an urban environment // Geomorphology. 2016. 273. 335–347.
25. Rizzo E., Capozzoli L., De Martino G., Grimaldi S. Urban geophysical approach to characterize the subsoil of the main square in San Benedetto del Tronto town (Italy) // Eng. Geol. 2019. 257. 105–133.
26. Morelli G., Labrecque D.J. Advances in ERT inverse modeling // Eur. J. Environ. Eng. Geophysics. 1996. 1. 171–186.
27. Novo, A.; Vinent, M.L.; Levy, T.M. Geophysical Surveys at Khirbat Faynan, an Ancient Mound Site in Southern Jordan. Int. J. Geophys. 2012, 2012, 8.

28. Sogliani F. Archeologia urbana a Matera // Dall'indagine Stratigrafica alla Condivisione dei Dati: Lo Scavo di S. Giovanni Battista-S. Maria La Nova. Mappa Data Book 1. Roma, Italy: Edizioni Nuova Cultura, 2015.
29. Piscitelli S., Rizzo E., Cristallo F., Lapenna V., Crocco L., Persico R., Soldovieri F. GPR and microwave tomography for detecting shallow cavities in the historical area of "Sassi of Matera" (Southern Italy) // Near Surface Geophys. 2007. 5. 275–284.
30. Studio Geologico RU Matera. Studio Geologico Tecnico. Carta Geologica Centro Capoluogo Parte Nord. 2014. Available online: <https://www.comune.matera.it/amministrazione-trasp/pianificazione-e-governo-del-territorio> (accessed on 13 January 2017).