

Интересные аномалии удельного электрического сопротивления рядом с погребальной камерой Тутанхамона



Предлагаем нашим читателям ознакомиться с содержанием статьи итальянских исследователей «Геофизические аномалии, обнаруженные с помощью электротомографии в районе, окружающем гробницу Тутанхамона» [1]. Она была опубликована весной 2019 года в журнале *Journal of Cultural Heritage* («Журнале культурного наследия»), а с 2018 года находится в открытом доступе на бесплатном академическом сайте ResearchGate по лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License. Эта лицензия разрешает некоммерческое использование статьи и ее распространение на любом носителе при условии, что на оригинальную работу есть правильная ссылка и не производится никаких модификаций или адаптаций. Поэтому мы предлагаем не перевод, а краткий обзор материалов этой работы [1] (по этой же причине надписи на рисунках со ссылками на публикацию [1] не переводились). Ее авторы – Федерико Фишанжер, Джанлука Катанзарити, Чезаре Комина, Луиджи Самбуэлли, Джанфранко Морелли, Филиппо Барсулья, Ахмед Эллайти и Франческо Порселлия. Они являются сотрудниками Туринского политехнического университета, Туринского университета и компаний Geostudi Astier и 3DGeoimaging.

Электротомографические исследования выявили наличие двух аномалий удельного электрического сопротивления вблизи погребальной камеры Тутанхамона в Долине Царей (г. Луксор, Египет). В рассматриваемой статье [1] подробно

обсуждаются стратегия получения данных, методы их анализа и возможное археологическое значение обнаруженных аномалий.

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

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА «ГЕОИНФО»

info@geoinfo.ru

НПО «ТЕРРАЗОНД».

ООО «КБ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ»

Введение

Долина Царей в городе Луксор (Египет), возможно, является самым важным некрополем Древнего Египта, который всегда привлекал внимание египтологов и воображение широкой публики.

Наиболее известна гробница молодого фараона Тутанхамона (кодовое название KV62), правившего Египтом с 1333 по 1323 год до нашей эры. Она была обнаружена Говардом Картером в 1922 году вместе с почти неповрежденными погребальными сокровищами. А в 2015 году египтолог Николас Ривз выдвинул гипотезу, согласно которой гробница Тутанхамона могла бы быть частью более крупной гробницы, возможно принадлежавшей царице Нефертити. Эта гипотеза была основана на тщательном изучении результатов трехмерного лазерного сканирования с высоким разрешением, полученных организацией Factum Arte. Чтобы проверить ее, в ноябре 2015 года японский специалист Хирокацу Ватанабэ по заказу Министерства памятников древности Египта провел предварительное георадиолокационное сканирование изнутри KV62 и решил, что гипотеза Ривза, вероятно, подтверждена. Однако второе георадарное исследование, выполненное в 2016 году командой National Geographic, не смогло удостоверить первоначальный вывод Ватанабе. Именно поэтому итальянские исследователи Федерико Фишанжер и др. в феврале 2018 года выполнили третье георадиолокационное сканирование изнутри KV62, данные по которому пока еще только анализируются и готовятся к публикации.

Между тем в 2016 году Министерство памятников древности Египта поручило масштабный проект под названием «Полное геофизическое исследование Долины Царей» команде итальянских ученых. Соответствующие исследования были поддержаны и частично спонсированы также Политехническим университетом Турина, компаниями Geostudi Astier s.r.l., 3DGeoimaging, Фондом развития провинции Новара (Италия) и Национальным географическим обществом США.

В соответствии с вышеуказанным проектом проводятся работы для геофизического картирования всей территории Долины Царей. Пока они ограничиваются натурными наружными измерениями и исключают выполнение измерений изнутри гробниц.

Часть полученных по данному проекту результатов была рассмотрена в статье «Геофизические аномалии, обнаруженные с помощью электротомографии в районе, окружающем гробницу Тутанхамона» [1], опубликованной в 2018 году на бесплатном академическом сайте ResearchGate и весной 2019 года в журнале Journal of Cultural Heritage («Журнале культурного наследия»). Авторы указанной статьи Федерико Фишанжер, Джанлука Катанзарити, Чезаре Комина, Луиджи Самбуэлли, Джанфранко Морелли, Филиппо Барсулья, Ахмед Эллайти и Франческо Порселлиа – сотрудники Туринского

политехнического университета, Туринского университета и компаний Geostudi Astier и 3DGeoimaging (Италия).

Эти исследования [1] проводились в мае 2017 года, включали электротомографию (ERT) территории, окружающей гробницу Тутанхамона, и являлись подготовительной (дополняющей) стадией перед вышеупомянутым третьим георадиолокационным сканированием изнутри KV62 для проверки гипотезы Ривза. Также надо было оценить применимость и полезность методов электротомографии (более гибких и простых в применении на неровной холмистой территории по сравнению с георадарными) для полного геофизического картирования Долины Царей. А самой главной целью была демонстрация важности мультидисциплинарного подхода, объединяющего геофизику, геологию и археологию, а также влияния новых технологий на египтологические исследования.

Проведение исследований

Изучаемая территория вокруг KV62 расположена в центральной области восточной ветви Долины Царей. Она включает часть дна долины, по которой проходит основная туристическая тропа между домом отдыха и входами в гробницу Рамсеса V и Рамсеса VI (KV9) и в гробницу Тутанхамона (KV62), а также скалистый холм, в котором расположены эти две гробницы, и часть каньона, ведущую к гробнице фараона Меренптаха (KV8).

Авторы работы [1] с самого начала предполагали, что исследуемая подземная среда будет отражать сочетание природных и антропогенных материалов и структур, в том числе естественные паводковые отложения в центральной долине, древнеегипетские объекты, результаты археологических раскопок и пр. В частности, ниже поверхностного слоя пылеватых паводковых отложений толщиной около 2 м в слоях, переработанных прошлыми археологическими раскопками, обнаруживаются обломки известняков размером примерно 2–3 см в заполнителе из известняковой пыли. Эти антропогенные переработанные материалы перекрывают следующий естественный паводковый слой, состоящий из незрелой плохо отсортированной аллювиальной брекчии с обломками размером от 0,05 до 0,75 м в мелкозернистом заполнителе. Кровля естественного коренного известняка под этим слоем ожидается на глубине 5–6 м от дна долины. А холм над KV62 образован как известняком фиванской формации, так и естественным аэрированным обломочным материалом с бортов долины.

Над и рядом с холмом, в котором находится гробница Тутанхамона, Фишанжером с коллегами [1] было проведено два обширных 3D электротомографических исследования: в феврале – марте и в мае 2017 года. Расположение пройденных профилей показано на рисунке 1. При этом использовался 72-канальный прибор для измерения удельного электрического сопротивления – резистивомер IRIS Syscal Pro Switch. Сначала рассматривались 9 наборов данных, полученных на профилях ERT № 1 (А, В, С), 8, 9, 10, 11, 12, 13, 26, 27 (см. рис. 1), номера которых возрастают в зависимости от хронологии измерений. Эти профили были ориентированы с востока на запад, с севера на юг или примерно дугообразно, точнее ближе к ломаным линиям (ERT 1 (А, В, С)). На них использовалось 48, 66, 70, 72 или 96 электродов с шагом 1 или 2 м. Расположение электродов отображалось согласованно с системой координат всего вышеупомянутого проекта с учетом логистических ограничений. На рисунке 2 представлены некоторые фотографии процесса сбора данных.

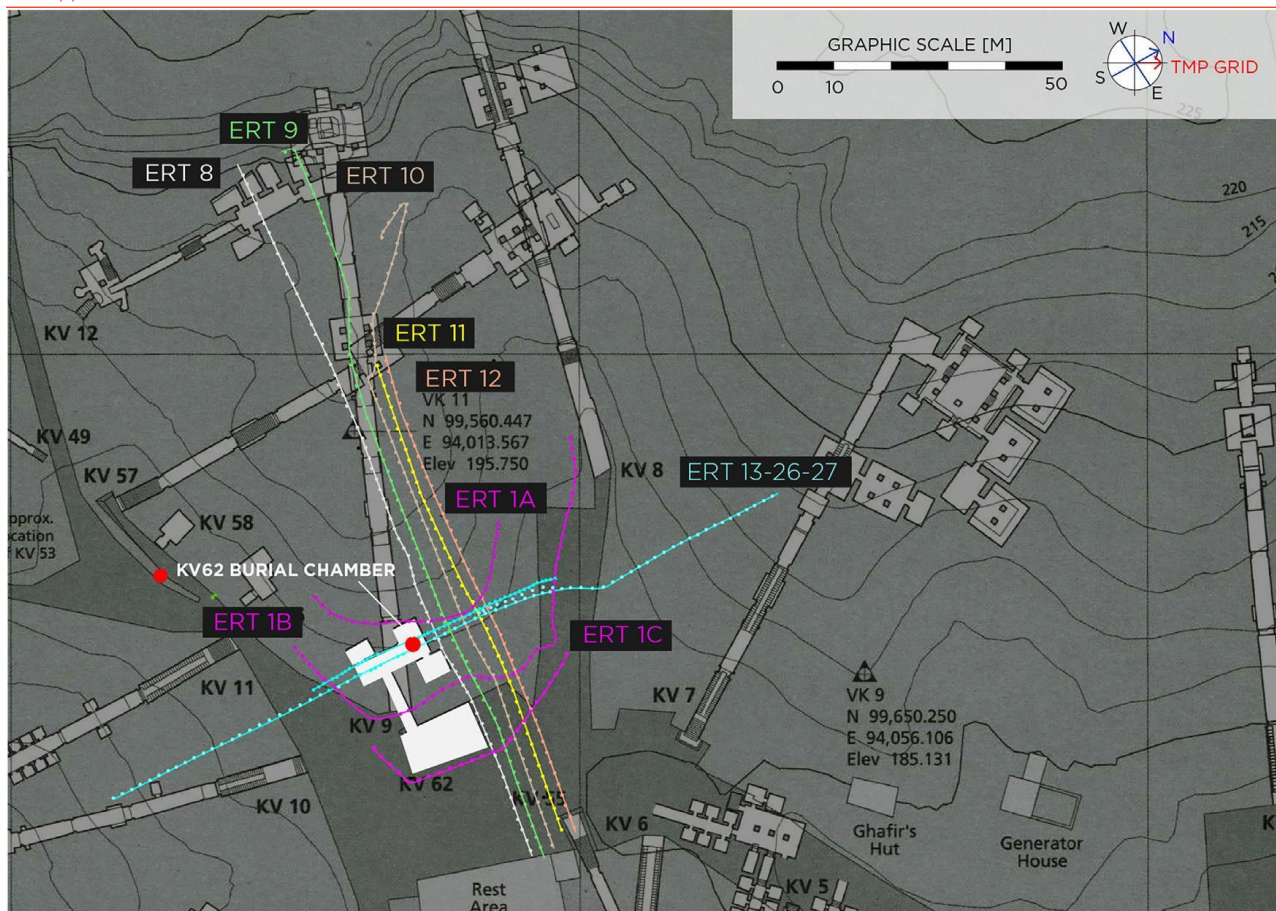


Рис. 1. Расположение пройденных профилей электротомографии (ERT с соответствующими номерами) в районе гробницы Тутанхамона (KV62). Цветные точки означают электроды, помещенные в землю [1]

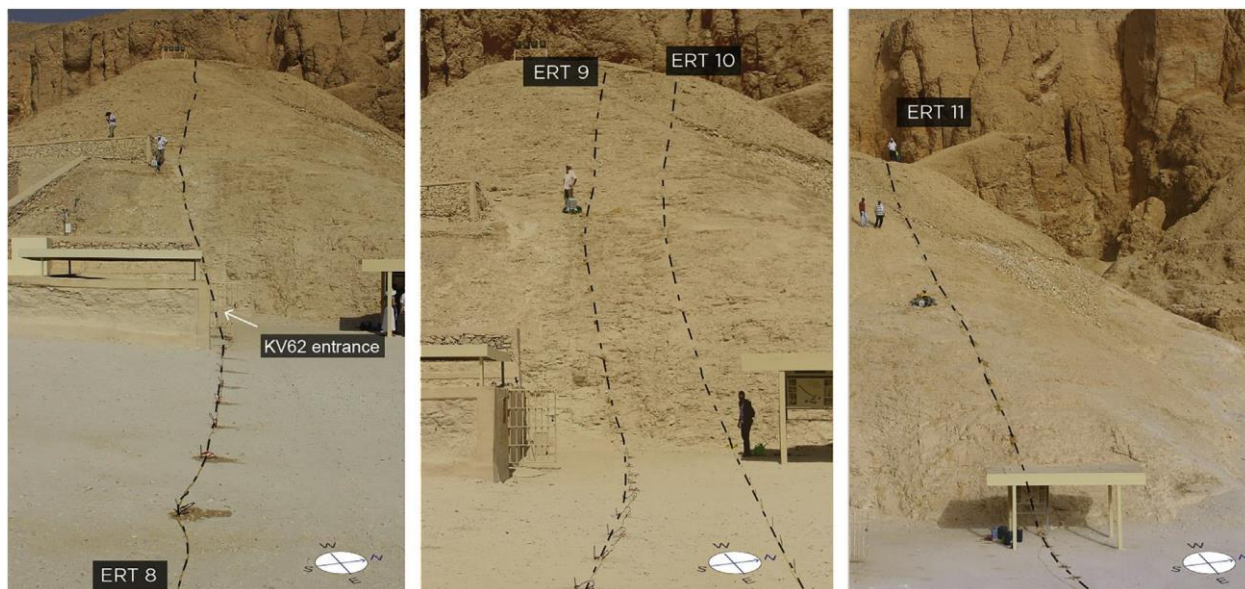


Рис. 2. Сбор электротомографических данных по профилям № 8–11 (ERT 8–ERT 11) [1]

Фишанжер с соавторами [1] отметили, что распределение удельного электрического сопротивления в Долине Царей обычно трехмерно:

- из-за наличия гробниц и коридоров, идущих в разных направлениях;
- из-за естественной горизонтальной и вертикальной неоднородности электрических свойств горных пород, связанной со сложной литологией территории;
- из-за сложной 3D топографии (особенно вокруг области KV62), которую необходимо должным образом учитывать для надежного моделирования результатов геофизических исследований.

Принимая во внимание эти особенности, авторы работы [1] выполнили сбор электротомографических данных в основном при линейной или квазилинейной установке электродов (см. рис. 1). Этот выбор был обусловлен следующими соображениями: основные археологические объекты в исследуемом районе расположены ниже уровня земли (например, кровля KV62 находится примерно на 13 м ниже уровня дневной поверхности). Необходимость достижения этих глубин при сохранении хорошего вертикального разрешения и привела к выбору прямолинейной геометрии. Более того, упрощенный подход к сбору данных должен был помочь строго контролировать их качество.

Участок Долины Царей очень проблематичен с точки зрения контактных сопротивлений на электродах, которые часто составляют порядка сотен килоом (в частности, в зонах, занятых обломочным материалом, где даже большие количества соленой воды вокруг электродов не были эффективными для снижения контактных сопротивлений). Поэтому авторы статьи [1] ожидали, что будут получены зашумленные наборы данных. Кроме того, контроль качества результатов измерений более важен для трехмерных квадруполь, где у авторов отсутствовала возможность отображения псевдоразрезов для подтверждения выбросов данных, а возникновение отрицательных значений кажущегося сопротивления могло также затруднить интерпретацию.

Тем не менее использование линейных или квазилинейных расстановок электродов не ограничило построение точной 3D модели удельного сопротивления с трехмерным подходом к обработке данных. Действительно, 5 параллельных линий электродов (то есть ERT 8–ERT 12) находились на расстояниях около 2 м друг от друга. Это позволило достичь хорошей 3D-чувствительности, даже несмотря на то что этот выбор ограничивал съемку относительно небольшим сектором холма.

При выборе пространственного положения профилей Фишанжер с коллегами [1] руководствовались разными соображениями.

1. Они намеревались проверить возможности визуализации электротомографических данных на таком известном объекте, как гробница Тутанхамона. С этой целью они спроектировали «контрольную» линию ERT 13 так, чтобы она располагалась точно вдоль главной оси предкамеры и погребальной камеры KV62.

2. Авторы работы [1] стремились получить подробные изображения подземной среды вблизи северной стены погребальной камеры Тутанхамона. С этой целью они запланировали пройти от 8 до 12 профилей, чтобы проверить возможное продление погребальной камеры на север. С помощью линий ERT 26 и ERT 27, которые проходят близко и параллельно с ERT 13, они также попытались проверить возможные улучшения пространственного разрешения, используя более короткое расстояние между электродами (1 м).

3. Набор данных ERT 1, включенный в рассматриваемое обсуждение, был самым первым из полученных авторами работы [1] в Долине Царей и при этом единственным с трехмерным расположением электродов. Этот сбор данных осуществляется тремя ветвями из 24, 48 и 24 электродов, соответственно регистрируемых в два этапа. Генерация квадрупольной последовательности для такой геометрии включала как квадруполь «обычного кабеля» (когда передающий и приемный электроды принадлежат одному кабелю), так и квадруполь «перекрестного кабеля» (когда передающие и принимающие диполи находятся не в одном кабеле, причем во всех возможных комбинациях). Хотя эта

первая съемка характеризовалась меньшей глубиной исследования, она была ценна для лучшего понимания сложности участка с точки зрения сбора и обработки данных и помогла улучшить планирование следующих съемок. Данные ERT 1 были включены в обработку и в 3D-исследование чувствительности окончательной модели.

Для сбора всех наборов данных авторами работы [1] использовались следующие установки электродов: диполь-дипольная, «реципрокная» Шлюмберже и трехэлектродная (точечно-дипольная).

Диполь-дипольные установки, несмотря на их высокую чувствительность к шуму, были выбраны из-за хорошей горизонтальной чувствительности их измерений, которая может помочь в горизонтальном обнаружении аномалий.

«Реципрокная» установка Шлюмберже использовалась для добавления наборов измерений с более высоким отношением «сигнал/шум». Небольшое внутреннее разделение электродов («реципрокная» схема) использовалось для уменьшения контактных сопротивлений на питающих электродах, для подачи более высоких токов в землю и для усиления сигналов на приемниках.

Трехэлектродные (точечно-дипольные) установки электродов применялись, чтобы увеличить глубину исследований во время всей съемки.

Полный проход для трех различных конфигураций на профиле из 72 электродов включил около 8 000 измерений, а весь сбор данных занял около 40–45 минут. Всего было использовано 568 электродов для получения около 35 000 измерений.

Для определения точных положений электродов и топографической съемки исследуемой области использовался автоматический электронный тахеометр (рис. 3). Все измерения были привязаны к топографической сетке, установленной Фиванским картографическим проектом. Локальная эталонная (базовая) система электродов была построена методом пересечений между известными точками координат с подключением ориентиров VK11 (на холме над гробницей Тутанхамона), VK9 (рядом с KV7), VK2 (на вершине холма над домом отдыха) и VK3 (на холме рядом с KV3 и KV4). Впоследствии, чтобы проследить за изменениями опорного пункта (базовой станции) и создать новую топографическую полигональную сетку, были использованы контрольные (реперные) точки для позиционирования тахеометра даже в областях, невидимых с других топографических опорных пунктов / базовых станций.

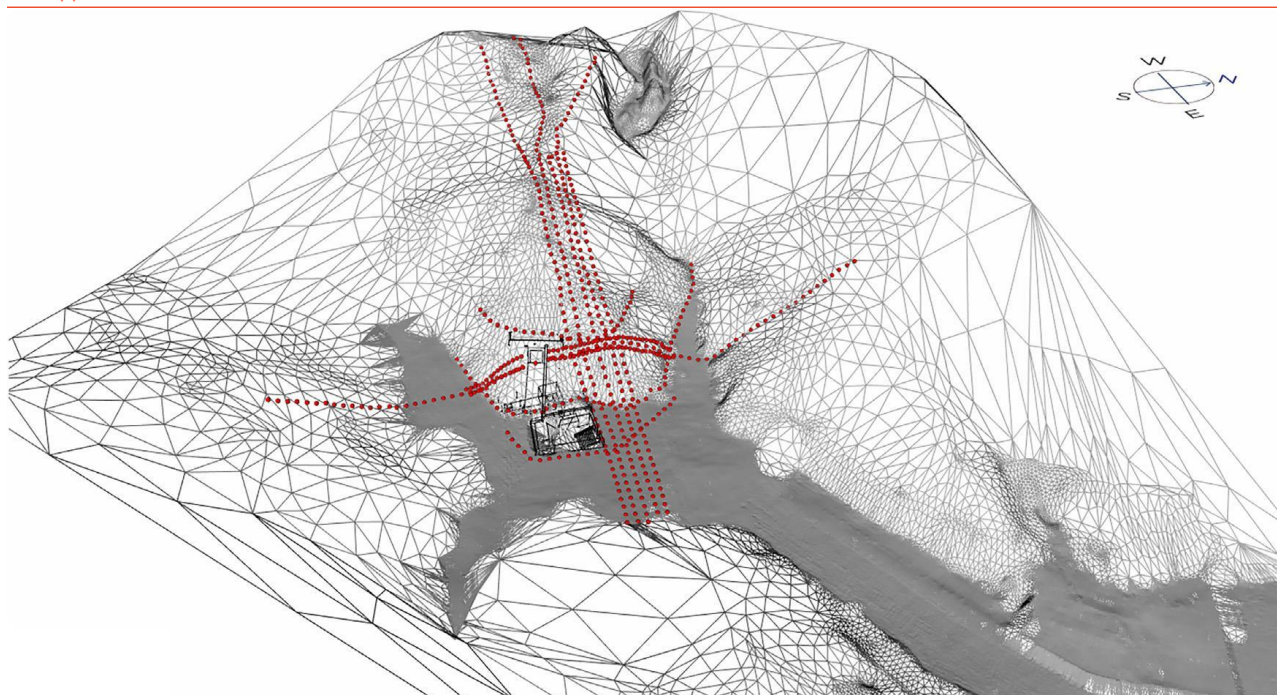


Рис. 3. Линии топографической и электротомографической съемок в районе KV62 [1]

После создания и связывания локальной системы с полученной топографической системой авторами работы [1] была проведена плано-высотная съемка положений электродов с целью создания цифровой модели рельефа (ЦМР) для позиционирования и моделирования полученных геофизических данных.

Обработка и инверсия данных

Одна из самых сложных задач сбора данных была связана с высокими контактными сопротивлениями на электродах. Среднее значение подаваемых токов составляло около 5–6 мА, минимальное – 0,1 мА (в областях обломочного материала), а максимальные величины в несколько десятков миллиампер наблюдались в зонах более высокой проводимости (низкоомных). В любом случае, из-за высокого фонового сопротивления (около 5 000 Ом*м) измеренные потенциалы на приемниках можно было считать удовлетворительными при средних значениях около 90 мВ. В наборах данных ERT 8–ERT 12 более высокие контактные сопротивления имели место на электродах, расположенных на покрытом обломочным материалом участке в западной части холма KV62.

Фишанжер с соавторами [1] удалили сильно зашумленные данные из каждого набора, приняв для этого следующие критерии:

- результаты измерений с инструментальным стандартным отклонением более 5%;
- квадруполь, относившиеся к плохо заземленным электродам;
- квадруполь с подаваемыми токами менее 0,1 мА;
- квадруполь с разностью потенциалов на приемниках менее 0,1 мВ;
- отрицательные значения кажущегося удельного сопротивления;
- значения кажущегося удельного сопротивления выше 50 000 Ом*м;
- выбросы, выявленные при визуальном анализе псевдоразрезов кажущегося удельного сопротивления.

Финальные псевдоразрезы для некоторых примеров профилей представлены на рисунке 4. Качество данных, по мнению авторов работы [1], в целом было приемлемым. Хорошая повторяемость измерений на соседних линиях дала уверенность в точности измеренных значений кажущегося удельного сопротивления. Это видно на рисунке 4, на котором сопоставлены псевдоразрезы электротомографических съемок ERT 8, ERT 9 и ERT 10. На этом же рисунке на псевдоразрезах в западной области можно отметить более редкое расположение точек из-за более высокого контактного сопротивления в этой зоне.

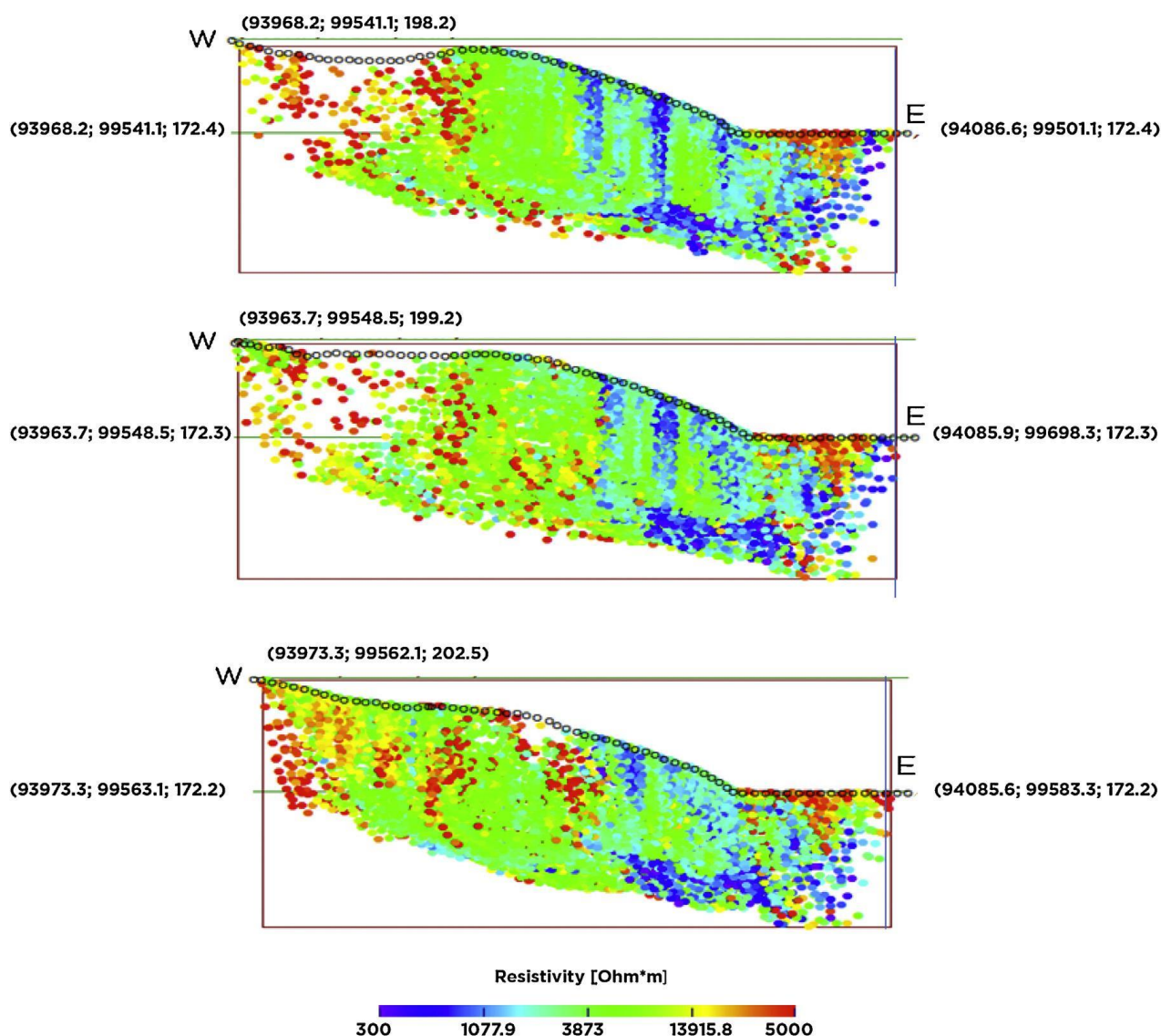


Рис. 4. Псевдоразрезы кажущегося удельного сопротивления по результатам электротомографических съемок ERT 8, ERT 9 и ERT 10 (сверху вниз) после отфильтровывания зашумленных данных [1]. Цветовая шкала – удельное электрическое сопротивление, Ом*м (слева – низкое справа – высокое). На разрезах слева – запад, справа – восток

Фишанжер с соавторами [1] отмечают, что для оценки надежности электротомографических изображений после инверсии полезным инструментом является так называемая карта чувствительности. Такая карта показывает, учитывая установку электродов, насколько изменение удельного электрического сопротивления в блоке модели влияет на показания потенциала. Чем выше чувствительность, тем надежнее окончательное значение удельного сопротивления блока.

Чувствительность можно вычислить как квадратные корни значений диагонали матрицы $\mathbf{J}^T \cdot \mathbf{J}$ (где $\mathbf{J}$ – якобиан, то есть матрица производных данных относительно сопротивления каждого модельного блока; $\mathbf{T}$ указывает на транспонирование).

На рисунках 5 и 6 показан анализ чувствительности всего набора результатов измерений для однородной модели удельных сопротивлений участка. Значения чувствительности нормализуются по отношению к их максимальным значениям. Следовательно, блок с наивысшей чувствительностью имеет балл 1. Авторы работы [1] обращают внимание читателей на то, что общая чувствительность, являющаяся квадратичной суммой чувствительности отдельных квадрупольей, очень высока для блоков, непосредственно прилегающих к электродам, которые участвуют во многих измерениях. Блоки с чувствительностью выше порогового значения 0,01 (1% от максимума) должны рассматриваться как находящиеся под значительным влиянием измерений. Цветовая шкала на рисунках 5 и 6 – логарифмическая, а значения выше 0,01 насыщены красным цветом для графической группировки объемов модели с хорошим разрешением. Этот анализ учитывает только квадрупольи, используемые для обработки результатов после удаления зашумленных данных.

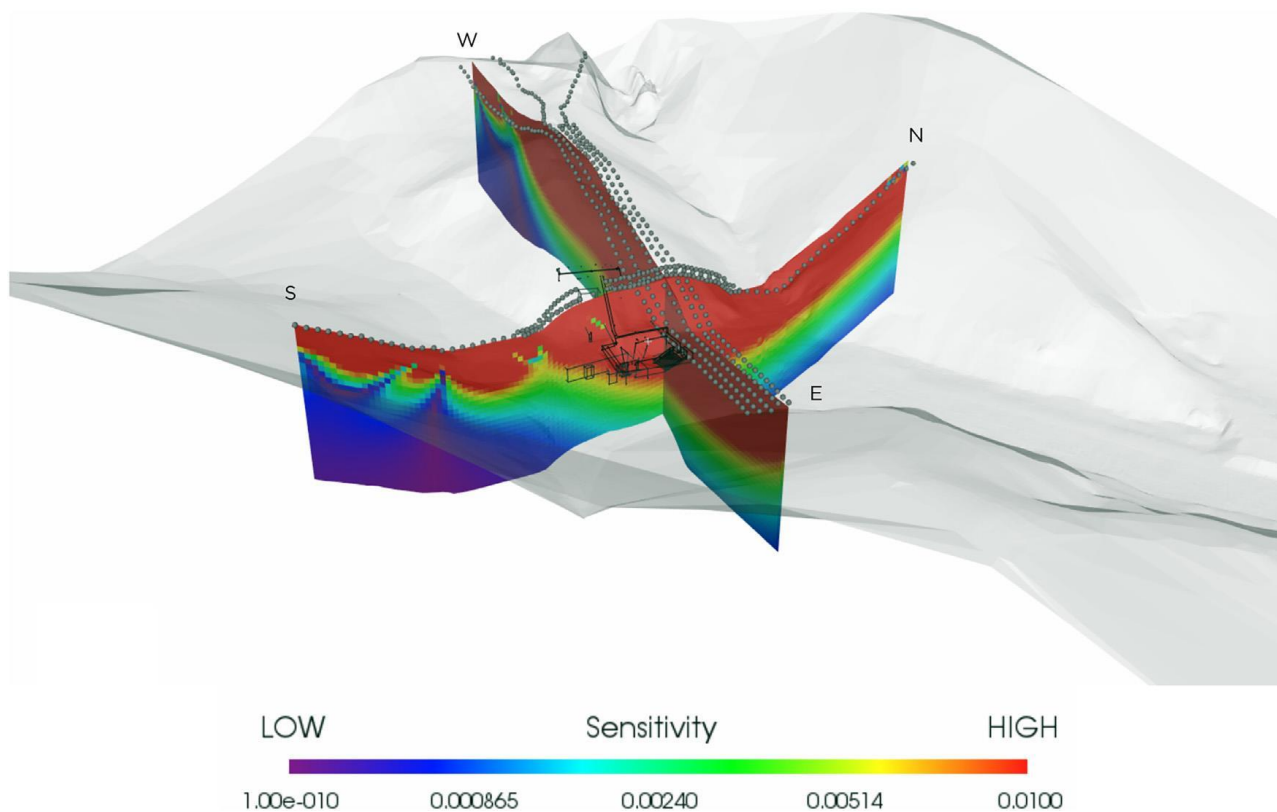


Рис. 5. Анализ чувствительности для полного набора квадрупольей на участке KV62 [1]. Цветовая шкала отражает чувствительность (слева – низкую, справа – высокую)

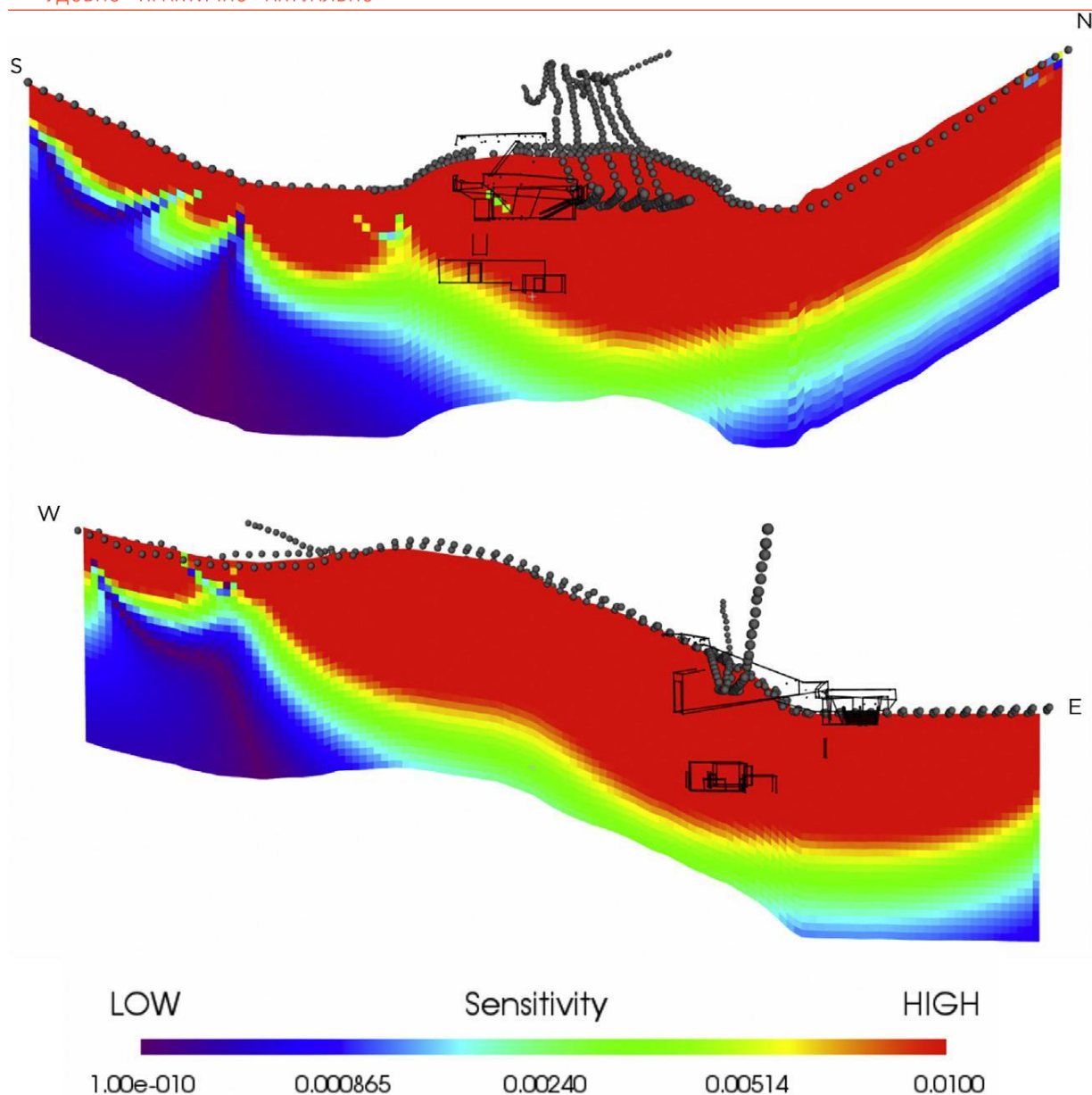


Рис. 6. Карты чувствительности для полного набора квадруполей на участке KV62. Вверху: разрез по данным электротомографической съемки ERT 13. Внизу: разрез по данным электротомографической съемки ERT 10 [1]. Цветовая шкала отражает чувствительность (слева – низкую, справа – высокую)

Разрез в направлении с севера на юг по линии ERT 13 (верхняя часть рисунка 6) показывает хорошую чувствительность для подземных объемов, содержащих KV62. Небольшое уменьшение чувствительности с глубиной в южной части гробницы Тутанхамона связано с наличием главного входа в нее, где авторы статьи [1] не могли разместить электроды. Разрез в направлении с востока на запад по линии ERT 10 (нижняя часть рисунка 6) показывает более низкую чувствительность в самой верхней части холма, где из-за обломочного материала больший процент результатов измерений был удален из набора данных. Некоторые локальные снижения также были обусловлены тем, что несколько неработающих электродов не позволили осуществить контакт с грунтом.

Инверсия данных была выполнена путем объединения их различных наборов и создания единой 3D-модели подповерхностного пространства. Перед окончательной инверсией было проведено несколько предварительных испытаний на отдельных профилях и их комбинациях, чтобы оценить качество данных и получить полезную информацию для

заключительного этапа инверсии. Испытания на инверсию проводились также с учетом и без учета вклада измерений по линиям 26 и 27 на расстоянии 1 м друг от друга. Никакого особого улучшения окончательной модели при включении этих последних данных в инверсию отмечено не было. Хотя уменьшенный шаг не имеет решающего значения при распознавании глубоко находящихся структур, он может быть полезен для идентификации небольших поверхностных структур, таких как входы в гробницы.

Для окончательной инверсии использовалась следующая конфигурация:

- однородная начальная модель на 5 000 Ом*м;
- оценка стандартного отклонения шума на уровне 3%;
- размер ячейки сетки 1 м × 1 м × 1 м.

Полная трехмерная инверсия кажущихся удельных сопротивлений была выполнена Фишанжером и др. [1] с использованием программы ERTLab64TM3D (разработанной компаниями Multi-Phase Technologies и Geostudi Astier), которая использует метод конечных элементов (МКЭ) для моделирования подземного пространства путем использования сетки из гексаэдров для правильного учета топографии местности. Эта процедура инверсии основана на подходе с ограничением гладкости по методу наименьших квадратов. На протяжении итераций инверсии влияние негауссовского шума должным образом регулируется с помощью надежного алгоритма взвешивания данных.

Ход инверсии представлен на рисунке 7. Для достижения сходимости процесса инверсии начиная с однородной модели потребовалось несколько итераций. Это типично для ситуаций, когда в подповерхностном пространстве ожидаются высокие контрасты удельного сопротивления (от нескольких сотен до десятков тысяч Ом-метров). Для получения окончательной модели, достаточно надежной и устойчивой по отношению к влиянию возможных артефактов, решающее значение имели контроль шума с помощью алгоритма повторного взвешивания стандартного отклонения для выбросов и ремодуляция коэффициента шероховатости.

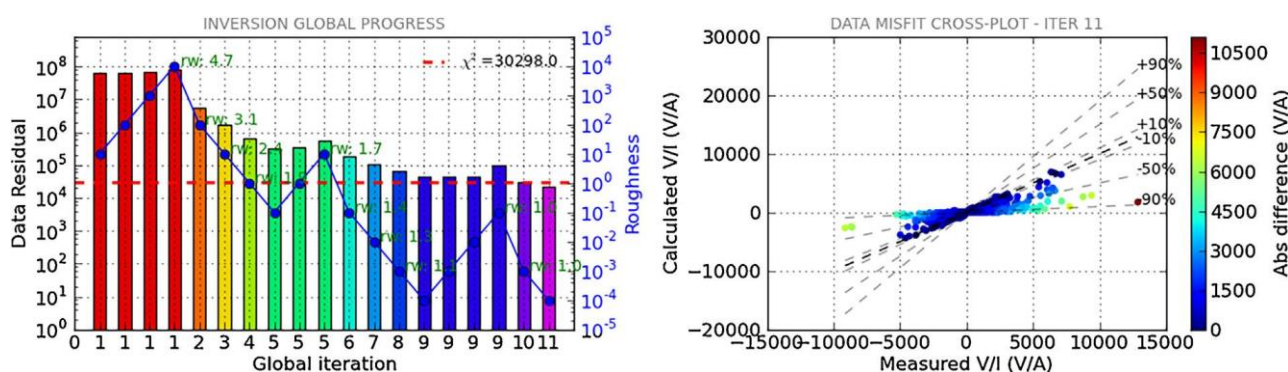


Рис. 7. Ход инверсии. Слева: остаточные данные и шероховатость на каждой итерации. Справа: перекрестный график измеренных и вычисленных данных [1]

Результаты и их обсуждение

Результаты электротомографических измерений, проведенных авторами работы [1] вокруг гробницы Тутанхамона и над ней, обобщены на рисунках 8 и 9. На рисунке 8 показано распределение удельного сопротивления, полученное на четырех абсолютных высотных отметках между крышей входа в KV9 (176 м над уровнем моря) и полом

погребальной камеры KV62 (162,4 м над уровнем моря). На рисунке 9 представлены два примера разрезов исследуемого трехмерного объема.

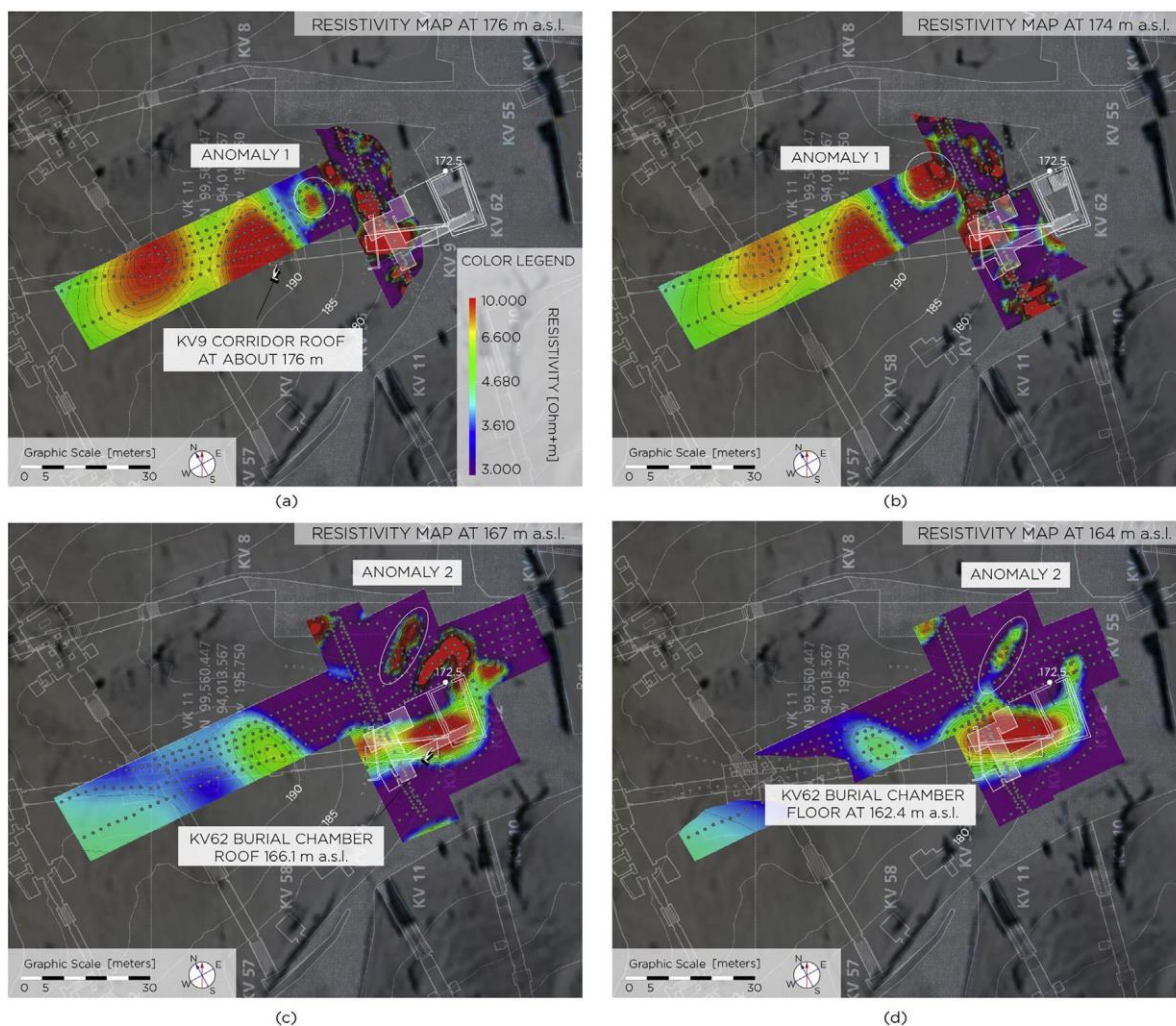
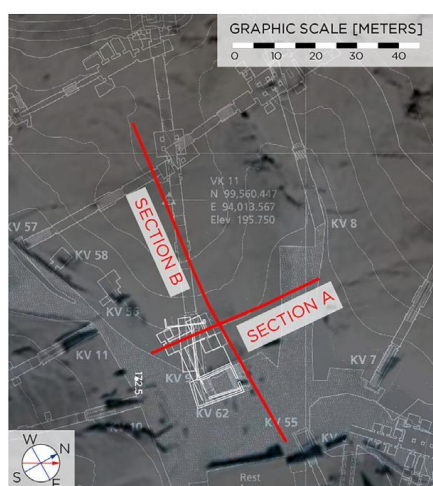
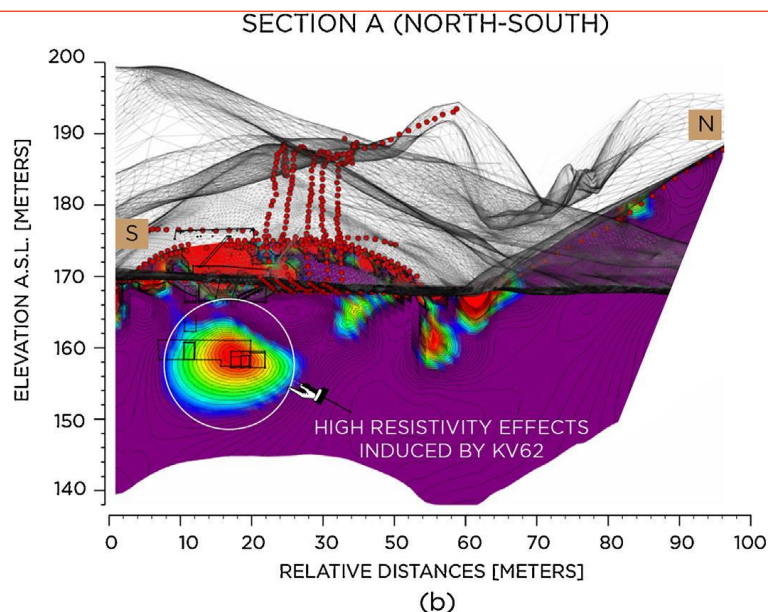


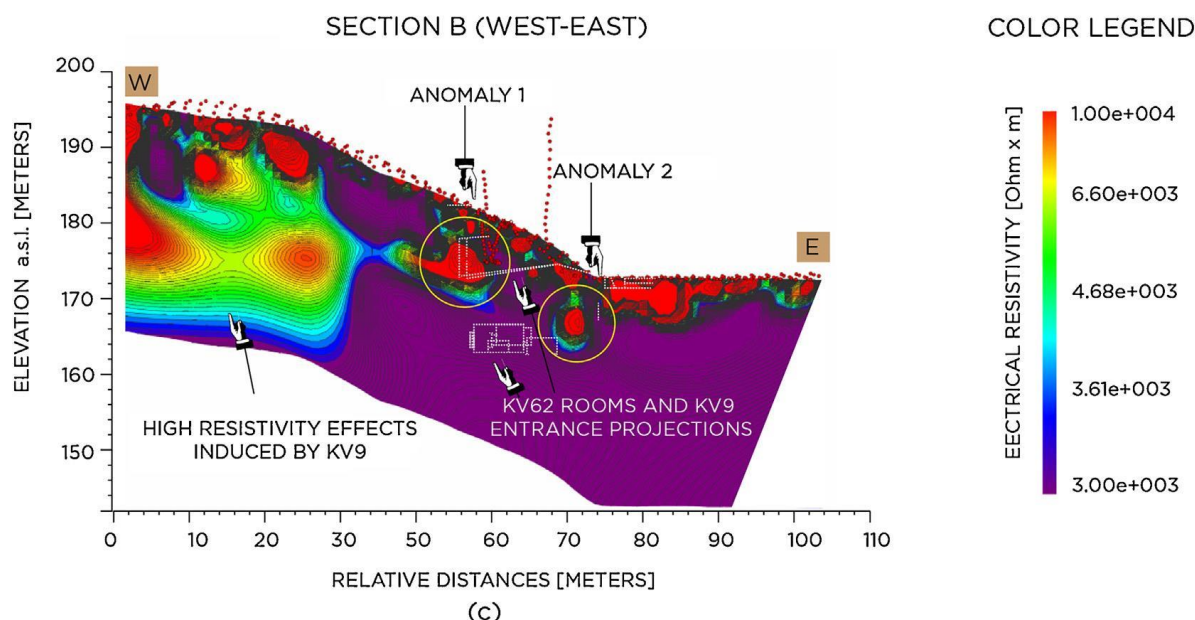
Рис. 8. Распределение удельного сопротивления на четырех уровнях (от а до d) между крышей входа в KV9 (176 м над уровнем моря) и полом погребальной камеры KV62 (162,4 м над уровнем моря) [1]



(a)



(b)



(c)

COLOR LEGEND

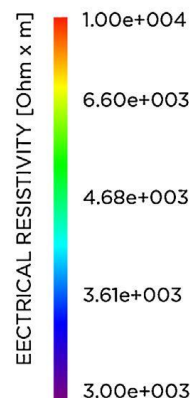


Рис. 9. Карта расположения участков вертикальной электротомографии (a); разрез удельных электрических сопротивлений в направлении с севера на юг (b); разрез удельных сопротивлений в направлении с востока на запад (c) [1]. Цветовая шкала – удельное электрическое сопротивление, Ом*м (увеличение – снизу вверх)

На рисунках 8 и 9 диапазон удельного сопротивления составляет примерно от 3 000 до 10 000 Ом*м (он был выбран авторами работы [1] для отсечки значений за его пределами). Аномалии высокого удельного сопротивления, превышающие 6 000 Ом*м (желто-красные цвета), могут быть связаны либо с пустотами в коренных породах, либо с мелкозалегающим аэрированным обломочным материалом. Известняковая коренная порода фиванской формации показывает более низкие значения удельного сопротивления (то есть ниже 3 500 Ом*м, пурпурно-синие цвета).

Некоторые из аномалий высокого удельного сопротивления, как отмечают авторы статьи [1], действительно связаны с хорошо известными подземными структурами:

- горизонтальные срезы на отметках 176 и 174 м над уровнем моря (рис. 8 а, b) ясно показывают влияние пустого объема, представленного коридором KV9;

- горизонтальные срезы на отметках 167 и 164 м над уровнем моря (рис. 8, с, d) охватывают объем пустоты, соответствующий гробнице KV62, показывая большую аномалию удельного сопротивления, которая вписывается в периметр, определяемый ее внешними стенами;
- наличие этих двух гробниц (KV9 и KV62) также хорошо видно на электротомографических разрезах (рис. 9): в частности, на рисунке 9, b аномалия, вызванная наличием гробницы Тутанхамона, показывает пик удельного сопротивления, точно сосредоточенный на погребальной камере KV62.

Хорошее соответствие высоких значений удельного сопротивления и известного местоположения двух указанных подземных сооружений (KV9 и KV62), по мнению Фишанжера и др. [1], обеспечивает уверенность в отношении качества данных и их интерпретации.

Другие неглубокие аномалии сопротивления, расположенные над входами в KV9 и в KV62, покрытые крупнозернистыми отложениями и обломочным материалом, по предположению авторов статьи [1], могут быть связаны с недавней деятельностью человека. Высокие значения удельного сопротивления также обнаружены под ровной площадкой, обращенной к внешнему входу в KV62 (рис. 9, с), и, вероятно, связаны с насыпным материалом, оставшимся от прошлых археологических раскопок.

Весьма интересны, с точки зрения Фишанжера и его коллег [1], две аномалии высокого удельного сопротивления, выявленные на полученных картах и разрезах. По-видимому, они не связаны с известными подземными полостями.

Аномалия № 1 (Anomaly1 на рисунках 8, a, b) определяет низкоомное «тело», простирающееся на высотной отметке 174 м над уровнем моря примерно на 5 м в СЗ направлении и примерно на 8 м в СЗ-ЮВ направлении. Средняя точка этой аномалии находится примерно на 6 м ниже уровня земли.

Аномалия № 2 (Anomaly2 на рисунках 8, с, d), имеет форму вытянутого эллипсоида с центром примерно на глубине 5 м ниже дна долины. Ее протяженность на отметке 167 м над уровнем моря составляет около 15 м в СВ-ЮЗ направлении и около 4 м в СЗ-ЮВ направлении.

Электротомографические разрезы на рисунках 9, b, с позволяют дополнительно оценить горизонтальные протяженности и вертикальные положения этих двух аномалий. Аномалия № 1 расположена на расстоянии около 12 м по горизонтали от северной стены погребальной камеры KV62 (рис. 8, b). В разрезе, идущем в направлении с востока на запад и показанном на рисунке 9, с, ее высота составляет от 170 до 178 м над уровнем моря. Таким образом, самый нижний уровень этой аномалии немного выше высотной отметки потолка KV62 (166 м над уровнем моря), а самый высокий уровень находится примерно на 12 м выше него. Аномалия № 2 находится под плоским участком между подножием утеса и современным входом в KV62.

Если эти аномалии имеют антропогенное происхождение, их высокое удельное сопротивление, с точки зрения авторов работы [1], может указывать на объемы потенциально интересных для археологов пустот. Эти аномалии близки к гробнице KV62, но, по-видимому, не связаны с ней напрямую.

Авторы отмечают, что центроид объема, соответствующего аномалии № 1, по-видимому, расположен примерно вдоль того же СЮ направления передней камеры и погребальной камеры KV62 (см., в частности, рис. 9, с). При этом глубина и размер аномалии № 1 соответствуют пустоте, имеющей протяженность, сравнимую с глубиной и размером KV62.

Аномалия № 2, по мнению Фишанжера и его коллег [1], тоже может быть очень интересной. Она расположена к северо-востоку от погребальной камеры KV62 примерно

на 5 м ниже уровня земли и немного продолжается дальше холма – до плоского участка между современным входом в KV62 и солнцезащитным навесом. Варианты интерпретации этой аномалии в настоящее время пока сомнительны, так как она расположена в районе предыдущих археологических раскопок. На данном этапе авторы статьи [1] пока исключают, что аномалия № 2 может быть напрямую связана с KV62.

Выводы

Обширные электротомографические измерения в районе гробницы Тутанхамона (KV62), проведенные в 2017 году итальянскими исследователями [1], были весьма непростыми из-за сложных условий в Долине Царей (г. Луксор, Египет). Это и пересеченный рельеф, и высокое сопротивление контактных электродов из-за аэрированного обломочного материала, и сложное распределение удельного сопротивления под землей, в том числе из-за нескольких антропогенных структур.

Принятые авторами работы [1] установки электродов, несмотря на логистические ограничения, позволили надежно построить полную трехмерную модель удельного сопротивления исследуемой области. В рамках этой модели было выявлено две компактных высокоомных аномалии в непосредственной близости от KV62. Эти две аномалии особенно интересны тем, что они, по-видимому, не связаны напрямую с известными подземными высокоомными полостями KV62 и KV9.

Аномалия № 1 находится ниже холма, в котором были высечены гробницы KV62 и KV9. Судя по ее расположению и глубине ниже уровня земли, маловероятно, что занимаемый ею объем интересовал археологов при недавних раскопках (или представителей другой недавней деятельности). Следовательно, если эта аномалия является антропогенной, то, по мнению авторов статьи [1], ее следует связывать с Древним Египтом. Ее повышенное удельное сопротивление может указывать на наличие пустоты.

Аномалия № 2 также может представлять большой интерес, но, с точки зрения авторов работы [1], пока следует быть осторожными с выводами, поскольку она расположена недалеко от территории предыдущих археологических раскопок.

Фишанжер с коллегами [1] указывают, что для однозначных выводов о происхождении обнаруженных аномалий недостаточно выполненных ими электротомографических исследований. Нужны дальнейшие электротомографические измерения по ряду новых профилей, а также сравнение и поиски взаимных корреляций с георадарными данными, полученными изнутри гробницы Тутанхамона и с пола входа в KV9. Но это будет сделано и опубликовано позже.

Источник для обзора

1. Fischanger F., Catanzariti G., Comina C., Sambuelli L. Geophysical anomalies detected by electrical resistivity tomography in the area surrounding Tutankhamun's tomb // Journal of Cultural Heritage. Elsevier: March–April 2019. Vol. 36. P. 63–71. URL: [researchgate.net/publication/327939123_Geophysical_anomalies_detected_by_electrical_resistivity_tomography_in_the_area_surrounding_Tutankhamun's_tomb](https://www.researchgate.net/publication/327939123_Geophysical_anomalies_detected_by_electrical_resistivity_tomography_in_the_area_surrounding_Tutankhamun's_tomb).