Научные статьи

УДК 550.837.6 DOI: 10.31431/1816-5524-2022-4-56-5-18

ПРИМЕНЕНИЕ ДОННОЙ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ МОРСКИХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОДВОДНЫХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ

© 2022 В.В. Глазунов[1], А.А. Букатов[1], В.В. Панченко[1], Н.Н. Ефимова[2]

[1]ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия, 299053
[2]ФГБУ ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия, 199148; e-mail: vvglazounov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2022 г.; после доработки 14.11.2022 г.; принята к публикации 26.12.2022 г.

Представлены результаты морских геофизических исследований древней портовой территории Херсонеса, расположенной в районе Карантинной бухты, которая в результате подтопления находится на глубине около 2–4 м под уровнем моря. Комплекс методов наряду с археологическими и гидроакустическими видами работ включает донную электротомографию, которая до настоящего времени не применялась в практике подводной археологии для картирования остатков построек, скрытых в донных отложениях. На основании результатов съемок, выполненных с помощью локатора бокового обзора и профилографа, выявлены и прослежены древние береговые линии бухты, сформировавшиеся в результате морских трансгрессионно-регрессионных циклов и застройки береговой линии в различные исторические эпохи. Метод донной электротомографии обеспечил получение геоэлектрических карт и разрезов, отражающих строение морских отложений, на которых проявились геоэлектрические аномалии, предположительно связанные с остатками застройки затопленной территории порта Херсонеса.

Ключевые слова: подводная археология, гидроакустика, донная электротомография, древний порт Херсонеса.

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционные методы подводной археологии, широко применяемые в настоящее время, обеспечивают получение информации о размещении археологических объектов, расположенных на дне водоемов (Вахонеев, 2020). Ведущая роль принадлежит гидроакустическим системам наблюдений, к которым относятся локаторы бокового обзора, профилографы и многолучевые эхолоты (Фирсов, 2010; Шалаева, Старовойтов, 2010). Современная гидроакустика обладает высокой производительностью и высоким пространственным разрешением, что делает ее незаменимой для детального обследования значительных площадей дна водоемов при минимальных временных затратах. Информация, полученная с помощью гидроакустических наблюдений, незаменима для обнаружения и картографирования расположенных на дне археологических объектов (Вахонеев, 2020).

На основании гидроакустических данных намечаются места проведения водолазных работ по фотофиксации, в том числе с применением методов фотограмметрии, обнаруженных археологических объектов (Вахонеев, 2020; Ольховский и др., 2011; Таскаев, 2009). Главным условием успешного проведения визуальных наблюдений является прозрачность воды, которая не всегда свойственна мелководной береговой зоне.

Основной недостаток, ограничивающий возможность полноценного изучения подводных археологических памятников с помощью гидроакустики связан с тем, что она не всегда позволяет обнаруживать объекты, расположенные под поверхностью дна, в толще морских отложений.

Эти недостатки метода обусловлены высокой акустической жесткостью границы вода – песчаные донные отложения, которая обуславливает формирование интенсивных кратных отражений от дна, затрудняющих при небольшой глубине прибрежья изучение поддонных отложений.

Для изучения скрытого в поддонных отложениях археологического памятника приходится выполнять дорогостоящие подводные раскопки. В методическом отношении, подводные раскопки представляют собой сложный, долговременный процесс, состоящий из нескольких, последовательно проводимых операций, ставящих своей задачей точную фиксацию всех найденных под водой предметов с помощью картографирования и фотограмметрии, а также проведение поэтапного изучения памятника с учетом геологического строения и стратиграфии донных отложений (Басс, 2003).

Для наземных археолого-геофизических исследований в настоящее время широко применяются методы электроразведки в модификации электротомографии (ЭТ) (Ерохин, 2012). Этот метод позволяет изучать строение культурного слоя на требуемую глубину с высоким пространственным разрешением.

Применение метода ЭТ для решения задач подводной археологии представляется также актуальным в связи с возможностью детального изучения строения донных отложений (Бобачев, 2021).

Практическая значимость применения технологии ЭТ связана с возможностью оптимизировать выбор участков для проведения подводных раскопок и, тем самым, существенно сократить затраты на их проведение.

Перспективными археологическими объектами для изучения методом ЭТ являются прибрежные морские территории Гераклейского полуострова, которые были застроены в период существования Херсонеса и позднее подтоплены в результате трансгрессии моря (Букатов и др., 2019; Зеленко, 2008; Окороков, 2016). Остатки стен затопленных построек обладают необходимым для применения электроразведки контрастом электрических свойств. Главным образом, это относится к археологическому изучению остатков каменных портовых, оборонительных и плантажных сооружений (Окороков, 2016).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве объекта геофизических исследований выбран прибрежный участок акватории Карантинной бухты, расположенной в пределах г. Севастополя (Крым) (рис. 1).

Очертания берегов бухты претерпевали значительные изменения еще в период жизни этого древнего города, на протяжении около 2000 лет. К настоящему времени, часть территории портового района Херсонеса находится на дне Карантинной бухты, включая участок приморской оборонительной линии (Букатов и др., 2019; Золотарев, 2004).

Основание города пришлось на период так называемой Фанагорийской регрессии (Дикарев, 2011). Существует предположение, основанное на подводных исследованиях, что во время Великой греческой колонизации уровень Черного моря был предположительно на 3.5–4 м ниже современного, что продолжалось весь античный период, с последующим резким подъемом и дальнейшим понижением к началу II тысячелетия (Блаватский, 1961;Золотарев, 2004).

При исторической реконструкции затопленной морем территории Херсонеса необходимо принимать во внимание не только трансгрессионные и регрессионные циклы изменения уровня моря за период в 2500 лет. Для прибрежной акватории Карантинной бухты должны учитываться тектонические причины погружения суши, изменявшие очертания берега и глубину, а также активность процесса аккумуляции наносов. Этот процесс, в свою очередь, зависит от изменений уровня моря, климатических и антропогенных факторов. Причальные сооружения порта и подтапливаемые наступающим морем оборонительные стены города должны были способствовать накоплению песка и ила в прибрежной зоне и формированию террас. Кроме того, проводившиеся, по крайней мере, в современное время дноуглубительные работы стали причиной перераспределения отложений по всей бухте.

До сих пор неясным остается точное место расположения городского порта в античный и средневековый периоды существования Херсонеса. Требует уточнения оценка изменения уровня моря и динамика наступления моря на берега Херсонеса. При определении изменения глубины моря не учитывалась толщина накопившихся к настоящему времени донных наносов. Непонятно назначение находящихся на дне Карантинной бухты затопленных строительных остатков, не вписывающихся в конфигурацию известных городских стен.

Для обнаружения и изучения древних сооружений предполагаемого порта Херсонеса в 2021 г. были проведены комплексные геофизические исследования прибрежной акватории Карантинной бухты методами гидроакустики и донной электротомографии (рис. 1).

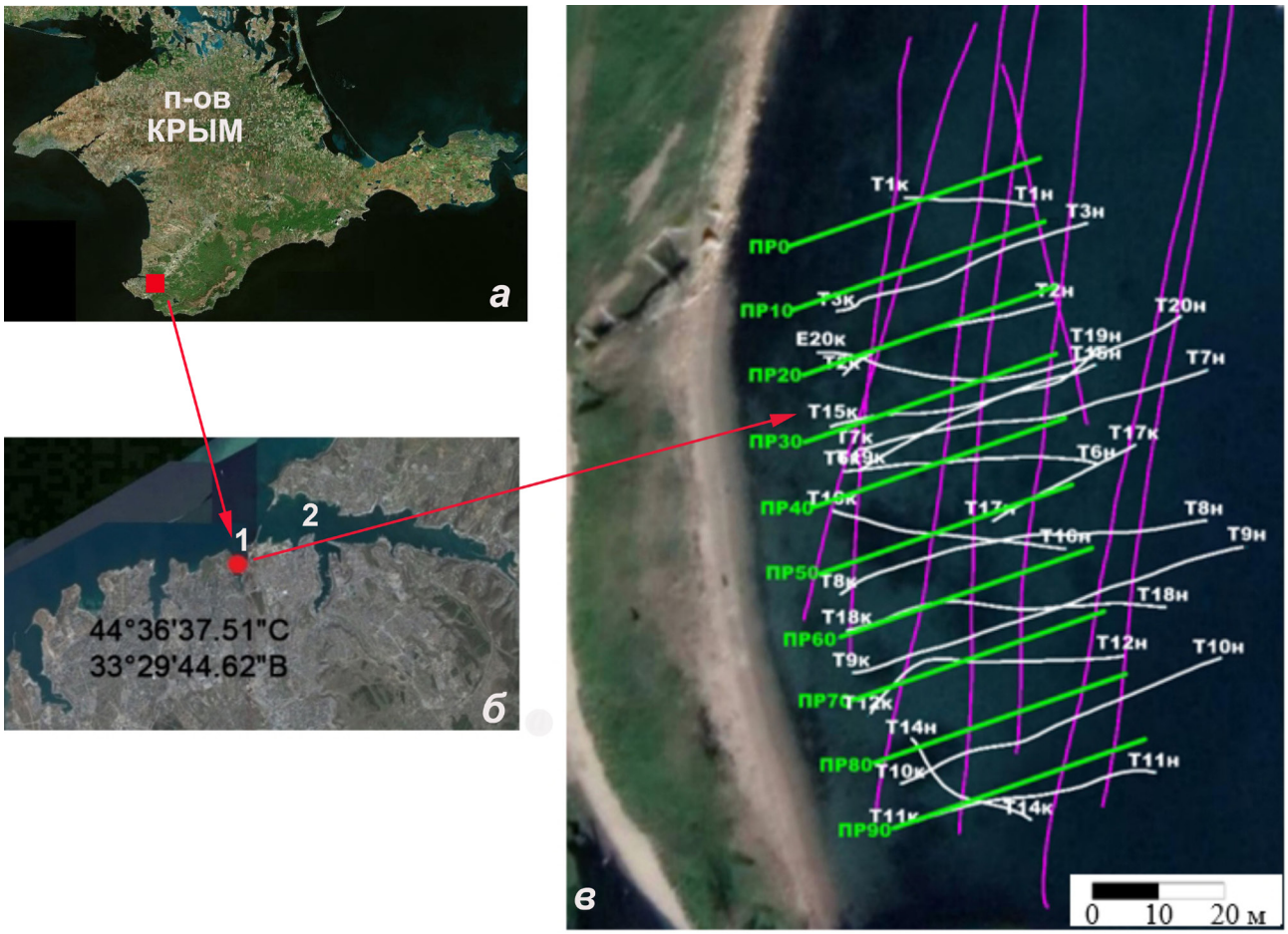


Рис. 1. Положение участка работ в Карантинной бухте, примыкающей к Севастопольской бухте (п-ов Крым) (https://yandex.ru/maps) (*а*, *б*) и линии профилей гидроакустических и электротомографической съемок (*в*) на космоснимке (ресурс Google Earth). Цвет линий профилей: ГБЛО — фиолетовый; НСП — белый; ДЭТ — зеленый.

Fig. 1. The position of the work site in the Karantinnaya Bay near the Sevastopol bay (Crimea Peninsula) (https://yandex.ru/maps) (*a*, *б*) and the profile lines of hydroacoustic and electrotomographic surveys (*в*) on the satellite image (Google Earth resource). The color of the profile lines: side-scan sonar — purple; continuous seismoacoustic profiling — white; bottom electrotomography — green.

МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования подводных морских террас Карантинной бухты и археологических памятников в прибрежной зоне Херсонеса отделом подводной археологии ФГБУК «Государственный историко-археологический музей-заповедник «Херсонес Таврический» проведены подводные исследования методами гидроакустики и электротомографии. Каждый из выбранных методов предназначался для решения конкретной задачи. Совместный анализ результатов, полученных этими методами, обеспечивал получение наиболее полных и всесторонних представлений о геоморфологии морских террас и расположении археологических объектов.

Выбранный для решения поставленных задач комплекс исследований включал следующие виды гидроакустических и электротомографических работ: съемка дна с гидролокатором бокового обзора (ГЛБО), непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) с высокочастотным профилографом и донную электротомографию (ДЭТ).

В пределах исследуемой части акватории бухты съемка этих видов геофизических исследований выполнялась по заданной системе профилей (рис. 1*в*). Гидроакустические съемки проводились с маломерного судна. В условиях мелководья и наличия камней на дне бухты траекторию движения судна приходилось постоянно корректировать в процессе съемки (рис. 1*в*). Высокая точность спутниковых привязок и достаточная плотность наблюдений позволили получить карты, отражающие рельеф дна с детальностью, достаточной для выявления его основных геоморфологических форм и

определения местоположения археологических объектов.

Съемка дна ГЛБО проводилась аппаратурным комплексом,включавшим гидролокатор бокового обзора, модель H5se7 «Гидра» обладающий сверхвысоким разрешением и совмещенный с промерным эхолотом. Комплект ГНСС (глобальная навигационная спутниковая система) оборудования в составе двухантенного приемника NovAtel PwrPak7D в конфигурации: GPS+ГЛОНАС+BeiDou обеспечивали субдециметровую точность определения координат. Рабочая частота 700 кГц ГЛБО позволила в реальном времени получать высококачественное изображение дна с фотографическим качеством в полосе обзора до 190 м. Заглубление акустической приемо-передающей системы составляло 0.5 м. Съемка проводилась по профилям, проложенными вдоль берега, с учетом безопасных для судна глубин (рис. 1*в*).

Съемка методом непрерывного сейсмоакустического профилирования осуществлялась в пределах западной прибрежной полосы бухты по профилям, обозначенным индексами от T1 до T20 (рис. 1*в*). Наблюдения выполнялись с помощью донного параметрического профилографа «Гидра» на частоте 29 кГц при заглублении сейсмоакустического датчика на глубину 0.5 м (модель H5p1) (Изготовитель ООО «Экран», РФ).

Отметим, что технология НСП, в отличие от гидролокации, позволяет изучить не только рельеф дна, но и верхнюю часть строения донных отложений. Глубина зондирования поддоных отложений при проведенииНСП варьировалась в пределах 0.5–1.5 м. Топографическая привязка профилей НСП осуществлялась непрерывно в процессе движения с помощью комплекта двухантенного ГНСС приемника NovAtel PwrPak7D в конфигурации GPS+ГЛОНАС+BeiDou (изготовитель NovAtel, Канада).

Электроразведочные наблюдения методом ДЭТ выполнялись для изучения строения морских террас и выявления локальных неоднородностей, которые могут быть связаны с остатками застройки берега Карантинной бухты в различные исторические эпохи.

Выбор ДЭТ, с методической точки зрения, обусловлен тем, что для выявления планировки остатков стен необходимо выполнять площадную съемку по регулярной сети с точной, почти архитектурной топографической привязкой точек наблюдений, и размещением профилей на минимальных расстояниях от остатков стен.

Технология ДЭТ до настоящего времени не применялась для решения задач подводной археологии, поэтому на начальном этапе работ отрабатывалась оптимальная для решения поставленных задач методика полевых наблюдений и камеральной обработки полученных данных.

Площадная съемка методом ДЭТ проведена в прибрежной части Карантинной бухты с целью построения геоэлектрических разрезов и карт, характеризующих строение поддонных отложений, а также наличие и расположение локальных неоднородностей в грунтовом массиве морских террас.

Наблюдения ДЭТ осуществлялись в пределах западной прибрежной полосы бухты по 10 профилям (рис. 1*в*). Сеть наблюдений ДЭТ образует регулярную систему параллельных профилей, расстояние между которыми составляет 10 м. Пикеты по линиям профилей размещались с шагом 2 м. Межпрофильное расстояние и азимуты профилей, равные 80°, определялись инструментально.

Методика наблюдений ДЭТ базировалась на стандартной и принятой для проведения наземной электротомографии технологии наблюдений. Измерения выполнялись с многоэлектродной электроразведочной аппаратурой «Скала 48К12», разработанной в ООО «Конструкторское бюро электрометрии».

Электроразведочная 48-электродная коса с усиленной кевларом оболочкой кабеля и повышенной гидроизоляцией контактов, изготовленная в ООО «Геодевайс», допускала возможность работы на глубине до 10 м. В качестве электродов на косе размещены с шагом 2 м медные трубки диаметром 15 мм. Разъемы расположены с одной стороны косы на расстоянии 15 м от последнего электрода, а начало косы было тщательно гидроизолировано. Буфер косы обеспечивал возможность размещения аппаратуры на берегу. Для проведения подводных наблюдений коса с электродами прокладывалась на морском дне с помощью лодки и аквалангистов.

Положение профилей на берегу закреплялось колышками, координаты которых определялись с помощью GPS навигатора, а межпрофильное расстояние промерялось мерной лентой. В море конечная точка профиля помечалась с помощью буя. Кабель с электродами закреплялся на поверхности дна с помощью пригрузов.

Измерения осуществлялись с электроразведочной установкой Шлюмберже (AMNB), N-фактор которой не превышал 5 для уменьшения влияния индукции на результаты гальванических наблюдений. Значения тока при измерениях изменяются в пределах 1.6–1.8 А, а разности потенциалов — 7–233 мВ, т.е. являются кондиционными для расчета кажущегося удельного электрического сопротивления (КУЭС).

Как известно, эффект индукции должен проявляться увеличением измеряемых значений КУЭС на больших разносах в виде индукционной

асимптоты (Каринский, Шевнин, 2001). На полученных геоэлектрических разрезах этот эффект не наблюдается.

Для обработки данных и определения КУЭС использовались стандартные вычислительные процедуры, реализованные в сертифицированной программе «Херис», которая прилагается к электроразведочной аппаратуре «Скала 48К12».

Камеральная обработка осуществлялась посредством инверсии данных подводных наблюдений с помощью программы Res2Dinv (Ltd. Geotomo Software). Инверсия данных ДЭТ выполнена в двух вариантах. Упрощенный вариант инверсии осуществлен без дополнительной априорной информации о параметрах слоя воды, а второй вариант выполнен с учетом значений удельного электрического сопротивления (УЭС) воды и рельефа дна.

Упрощенный вариант инверсии представляет методический интерес и опробован для оценки возможности применения программы на этапе предварительного анализа данных ДЭТ, когда информация о рельефе дна и УЭС воды отсутствует.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обработки данных ГБЛО полученные сонограммы объединены в виде акустической карты-мозаики дна, увязанной с координатами участка работ (рис. 2).

Для идентификации обнаруженных на дне объектов проводилось визуальное обследование дна и подводные раскопки.

На карте-мозаике ГЛБО проявились акустические эффекты всех частично обследованных археологических объектов, названия которых перечислены в подписи к рисунку 2.

Местоположение раскопа «ромбовидной башни» четко выделяется на карте в виде локальных зон интенсивных возмущений волнового поля, связанных с остатками стен, выступающими над поверхностью дна (рис. 2).

Шурф 1 был заложен в 2020 г. на месте скопления камней. В результате подводных раскопок выявлено несколько обработанных каменных блоков. Отдельные выступавшие из песка камни прослеживаются и за границей этого раскопа, в сторону берега, где ранее в 2019 г. был заложен шурф 2. В нем выраженные остатки кладки стен не обнаружены, а вскрыты были скопления каменного материала и отдельных глыб.

Участок 4 площадью около 100 м^2, расположенный восточнее «Ромбовидной башни», соответствует развалу строительных блоков и каменного материала. На карте-мозаике ГЛБО он приурочен к малоамплитудным локальным возвышениям дна. Аналогичная структура волнового поля проявилась и на участке 3, где также обнаружены каменные руины и фрагменты архитектурных деталей.

Данные наблюдений НСП отображены в виде профилограмм, которые характеризуют пространственное распределение мгновенных амплитуд отраженных сейсмоакустических волн вдоль линии профиля (рис. 3).

Сейсмоакустические разрезы отражают рельеф дна и строение верхней части поддонных отложений (рис. 3).

Приповерхностный слой 1, кровлей которого является поверхность дна, непрерывно прослеживается на всех разрезах. Толщина придонного слоя колеблется от 20 до 40 см (рис. 3). Характер волнового поля в пределах слоя указывает на

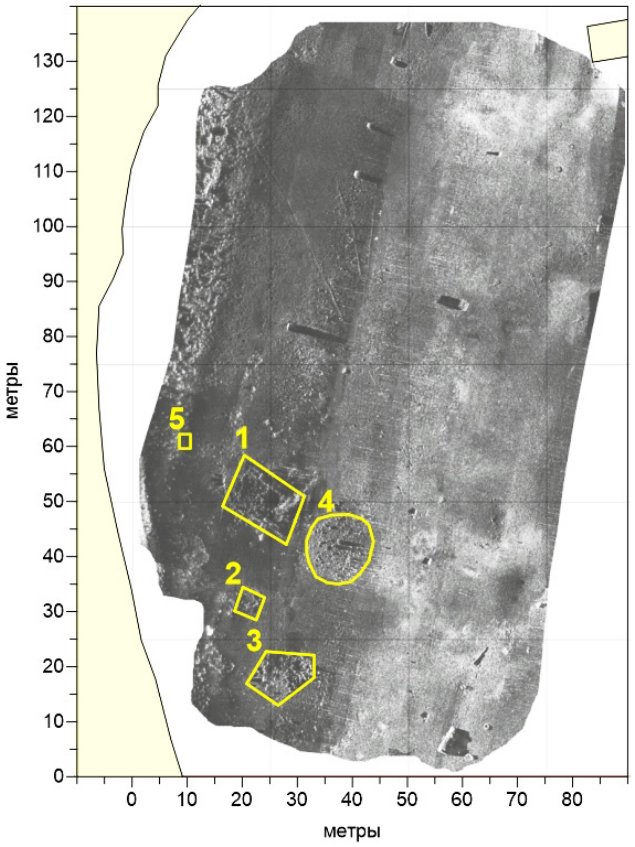


Рис. 2. Карта-мозаика ГЛБО дна Карантинной бухты с указанием археологических объектов: 1 — «Ромбовидная башня»; 2 — шурф 1 (раскопки 2020 г.); 3 — строительные остатки «объект 2019 г.»; 4 — развал каменного материала и обработанных блоков восточнее «Ромбовидной башни»; 5 — прибрежный шурф 2 (раскопки 2019 г.).

Fig. 2. Map of the SSS mosaic of the bottom of the Karantinnaya Bay with an indication of archaeological sites: 1 — «Diamond—shaped tower»; 2 — pit 1 (excavation of 2020); 3 — construction remains «object 2019»; 4 — ruins of stone material and processed blocks east of the «Diamond-shaped tower»; 5 — coastal pit 2 (excavation of 2019).

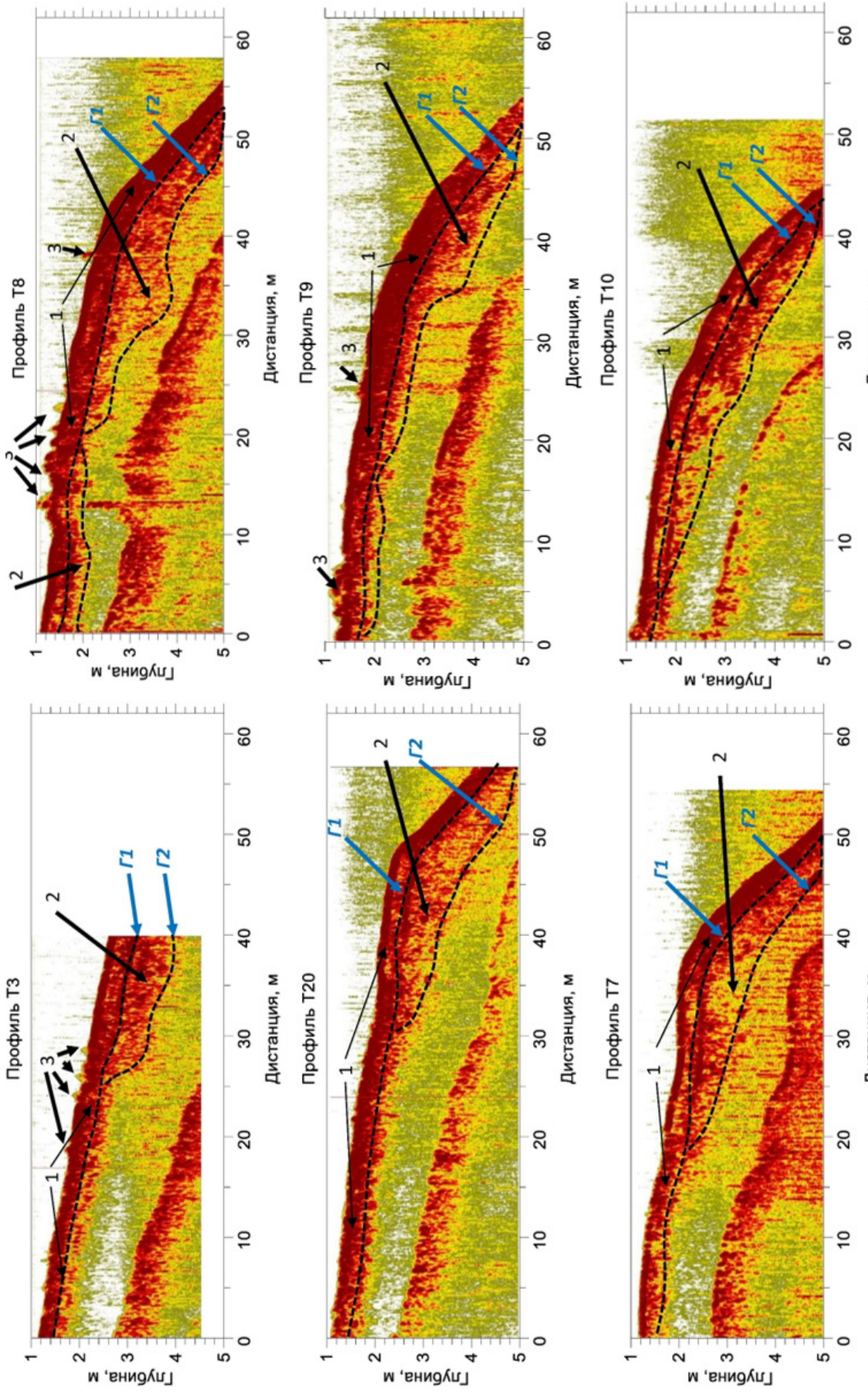


Рис. 3. Сейсмоакустические разрезы Карантинной бухты с указанием границ Г1 и Г2 и подлонных отложений: 1 — придонные песчано-илистые морские отложения; 2 — подлонные неоднородные, разуплотненные грунты; 3 — каменный материал. Местоположение профилей приведено на рис. 1.

Fig. 3. Seismoacoustic sections of the Karantinnaya Bay with indication of G1 and G2 boundaries and bottom sediments: 1 — bottom sandy-silty marine sediments; 2 — bottom heterogeneous unconsolidated sediments; 3 — rock material. The location of the profiles is shown in Fig. 1.

неоднородное строение и наличие крупнообломочного материала в приповерхностных морских отложениях. Толщина слоя увеличивается с возрастанием глубины моря, что свойственно процессам осадконакопления на пологих склонах дна в прибрежной части бухты.

Контакт «вода-песок» относится к категории «жестких» сейсмоакустических границ. За счет высокого коэффициента отражения этой границы, импульсы профилографа теряют энергию и проникающую способность проходящих волн. Этот эффект в совокупности с поглощением сейсмоакустических импульсов в консолидированных поддонных грунтах, приводят к тому, что строение отложений аккумулятивных террас не отражается на сейсмоакустических разрезах, в среднем, на глубину более 0.5 м (рис. 3).

Исключение составляют интервалы разрезов, примыкающие к уступу террасы, на которых глубина сейсмоакустического зондирования увеличивается до 1.5 м (рис. 3). На разрезах оконтурены дополнительной пунктирной линией зоны, в пределах которых проявляется волновая картина под нижней границей слоя 1.

Разрез по профилю Т20 наиболее четко и полно отражает структуру волнового поля, которая характерна для уступа террасы. На глубине 0.5 м, под поверхностью террасы четко прослеживается субгоризонтальная граница Г1. Ниже, на глубине 1–1.5 м под поверхностью дна прослеживается вторая граница Г2 (рис. 3). Между границей Г1 и Г2 наблюдаются спорадические локальные возмущения волнового поля, связанные с неоднородными и, возможно, разуплотненными грунтами.

Формирование такой структуры грунтов в районе уступа террасы может быть обусловлено оползневыми процессами, возникшими в результате морской гидродинамики и проведением дноуглубительных работ. Возможно, что оползневые процессы были спровоцированы сильными землетрясениями, которые наблюдались в различные исторические эпохи (Galanidou, Dellaporta 2020).

В рельефе дна отчетливо проявился прибрежный мелководный шельф, характеризующийся незначительным уклоном, в пределах которого проявились морские аккумулятивные террасы (Рычагов, 2020; Harff, Biley, 2016). Границы шельфа ограничены современной береговой линией и бровкой, за которой начинается резкое увеличение глубины (рис. 3).

На сеймоакустических разрезах с различной степенью четкости проявились 3 аккумулятивные террасы, обозначенные индексами **I**, **II** и **III**. Необходимо отметить, что на 1-м кратном отражении от дна признаки наличия террас проступают более отчетливо (рис. 4). Нумерация террас отражает последовательность их формирования, обусловленную циклами трансгрессии и регрессии моря и этапами застройки береговой линии, происходившими с античного времени до современности.

Полный спектр морфологических элементов этих террас включает поверхность террасы, уступ, бровку и тыловой шов. Эти элементы помечены разноцветными стрелками и номерами на разрезах (рис. 4).

Наиболее ярко проявилась терраса ***I***, бровка которой является границей шельфа. Ее высота достигает 3.7 м, а все морфологические элементы проявляется наиболее отчетливо. Необходимо отметить, что высота этой террасы могла быть увеличена в результате дноуглубительных работ, которые проводились в фарватере Карантинной бухты (рис. 4).

Терраса ***II*** имеет небольшую высоту 0.5–0.7 м. Ее профиль и элементы более рельефно проявляются на кратном отражении от дна. На поверхности террасы ***II*** встречаются камни, видимо, связанные со строительными остатками сооружений, что указывает на ее искусственное происхождение (рис. 4).

Высота террасы ***III*** также невелика. На этой террасе расположена «ромбовидная башня». Возникновение террасы также может быть связано со строительными работами.

Выявленные элементы террас характеризуют расположение древних береговых линий, датировка которых возможна на основании данных археологических раскопок.

Результаты наблюдений НСП в пределах всей площади обследования обобщены в виде карты изобат дна обследованного участка Карантинной бухты (рис. 5).

На карте изобат показаны линии уступов террас ***I***, ***II***, ***III*** и ***IV***, обозначенных на карте индексами 3/1, 3/2, 3/3 и 3/4, соответственно.

Линии уступов «микротеррас» рельефа дна прорисованы на картах не только по данным НСП, но и с учетом результатов визуальных подводных археологических исследований, проведенных аквалангистами. По результатам подводных работ формирование террас можно связать с остатками портовых сооружений, построенных в разные исторические периоды застройки порта.

В связи с подтоплением берега в результате трансгрессии моря жителям Херсонеса приходилось возводить портовые сооружения вдоль новых береговых линий. Поэтому возникновение этих террас связано с деятельность строителей, которая была обусловлена изменениями уровня моря. Линии уступов террас прорисованы пунктирной линий, как предполагаемые, так как на некоторых интервалах прослеживаются

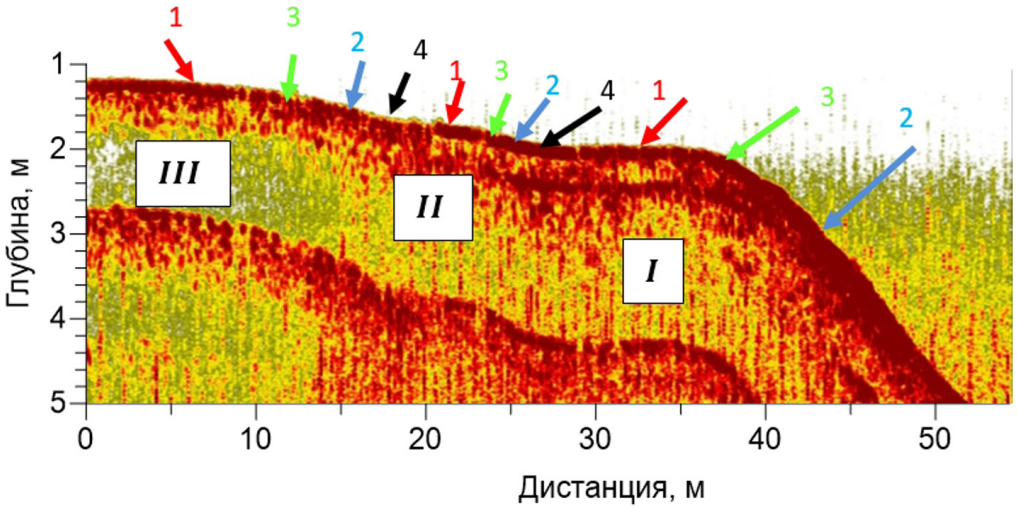


Рис. 4. Сейсмоакустический разрез по профилю Т7 с указанием морфологических элементов морских террас *I*, *II* и *III*. Карантинной бухты: 1 — поверхность террасы; 2 — уступ; 3 — бровка; 4 — тыловой шов. Местоположение профиля приведено на рис. 1.

Fig. 4. Seismoacoustic section along the T7 profile with indication of morphological elements of marine terraces *I*, *II* and *III* of the Karantinnaya Bay: 1 — terrace surface; 2 — terrace riser; 3 — crest; 4 — shoreline angle. The profile location is shown in Fig. 1.

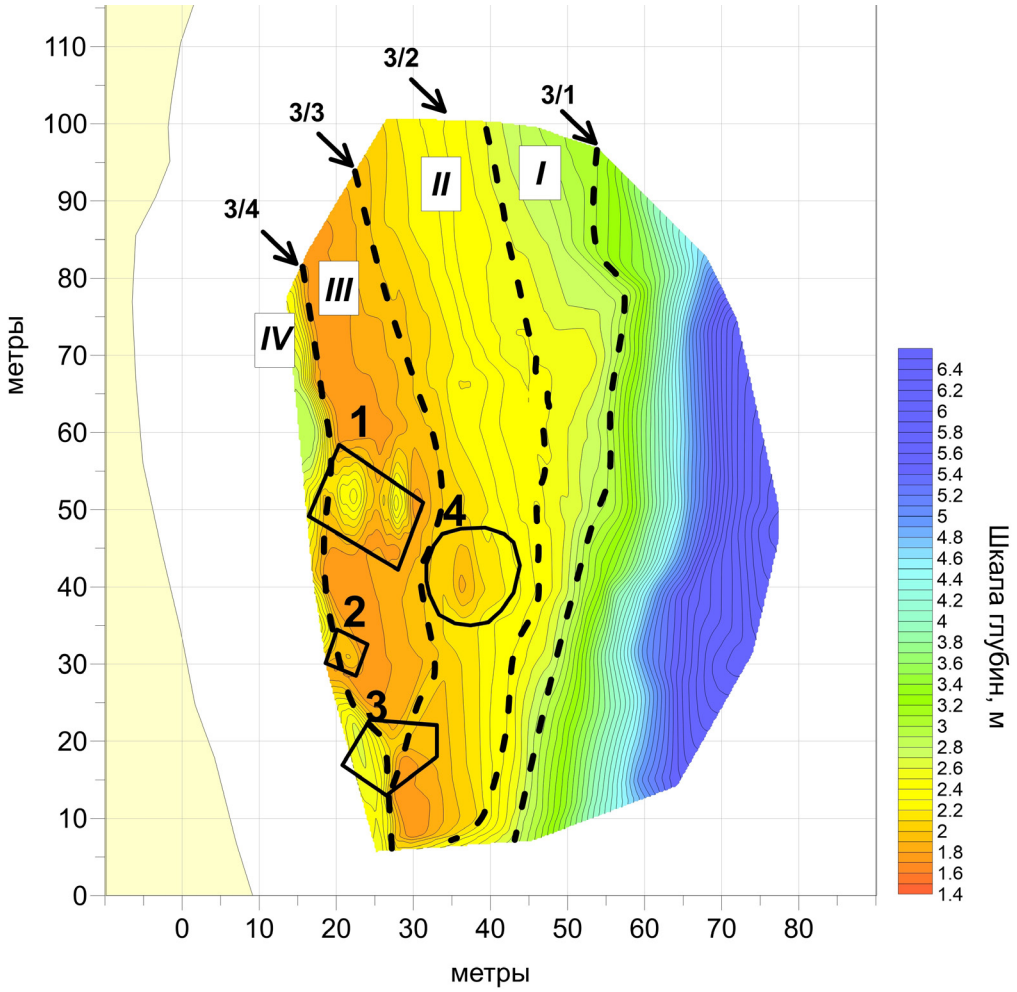


Рис. 5. Карта изобат с указанием линии уступов террас *I*, *II* и *III*: 3/1, 3/2, 3/3 и 3/4 и археологических объектов. Описание объектов 1–4 приведено в подписи к рис. 2.

Fig. 5. Isobath map showing the terrace risers *I*, *II*, *III*: 3/1, 3/2, 3/3 and 3/4 and archaeological sites. The description of the objects 1–4 is given in the caption to Fig. 2.

фрагментарно. Прибойная эрозия пологого берега в пределах замкнутой бухты практически не приводила к значительному разрушению техногенных террас.

На карту изобат вынесены обнаруженные и частично обследованные раскопками археологические объекты. Местоположение ромбовидной башни четко выделяется на карте в виде двух локальных зон, связанных с остатками стен и возвышающимися над дном. Шурфы и строительные остатки, обнаруженные на дне, находятся на краю зоны обследования, практически вне карты. Участок дна, соответствующий строительным блокам и каменному материалу, приурочен к малоамплитудному локальному возвышению дна (рис. 5).

Необходимо отметить, что ромбовидная башня находится на поверхности террасы ***III***, а участок расположения строительных блоков расположен на более ранней, расположенной глубже террасе ***III***.

Совместное рассмотрение данных НСП и ГЛБО позволяет делать более обоснованные выводы о связи геоморфологии морских террас с обнаруженными на дне обследованной части Карантинной бухты Херсонеса археологическими объектами.

В целом, результаты гидроакустических исследований характеризуют геоморфологию дна, но не позволяют решить археологические задачи, связанные с обнаружением скрытых объектов культурно-исторического наследия.

Электроразведочные исследования методом ДЭТ позволили получить представления о строении морских террас на глубину до 8–9 м и выявить относительно высокоомные локальные неоднородности, которые могут быть связаны с остатками застройки берега Карантинной бухты в различные исторические эпохи.

Результаты ДЭТ получены в виде геоэлектрических разрезов, рассчитанных с помощью двух вариантов инверсии, предусмотренных в программе Res2Dinv, — с учетом и без учета априорной информации о параметрах слоя морской воды.

Значение УЭС воды в прибрежной части бухты было выбрано исходя из общих сведений о распределении солености воды в Черном море, которая находится в пределах 17–18 промилле в районе Севастополя. На основании этих данных и номограммы зависимости УЭС от минерализации воды инверсия данных ДЭТ была выполнена со значением 0.4 Ом·м (Шевнин, 2021).

Опции программы Res2Dinv предусматривают отображение результатов инверсии данных ДЭТ как со слоем и без слоя воды. Геоэлектрические разрезы по профилю ПР40, вычисленные с учетом слоя воды, представлены в этих двух вариантах отображения (рис. 6, 7*а*).

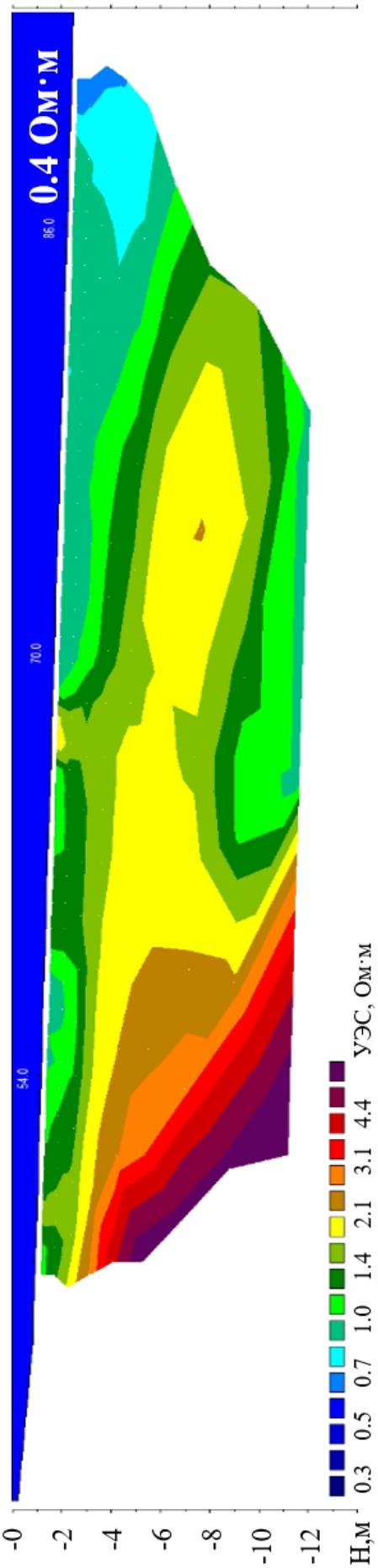


Рис. 6. Геоэлектрический разрез профиль ПР40 по данным 2D электротомографической инверсии данных донной электротомографии, выполненной с учетом рельефа дна и удельного электрического сопротивления морской воды. Местоположение профиля приведено на рис. 1.

Fig. 6. Geoelectric section of the PR40 profile according to 2D electrotomographic inversion of bottom electrotomography data, with bottom topohraphy and the electrical resistivity of seawater taken into account. The profile location is shown in Fig. 1.

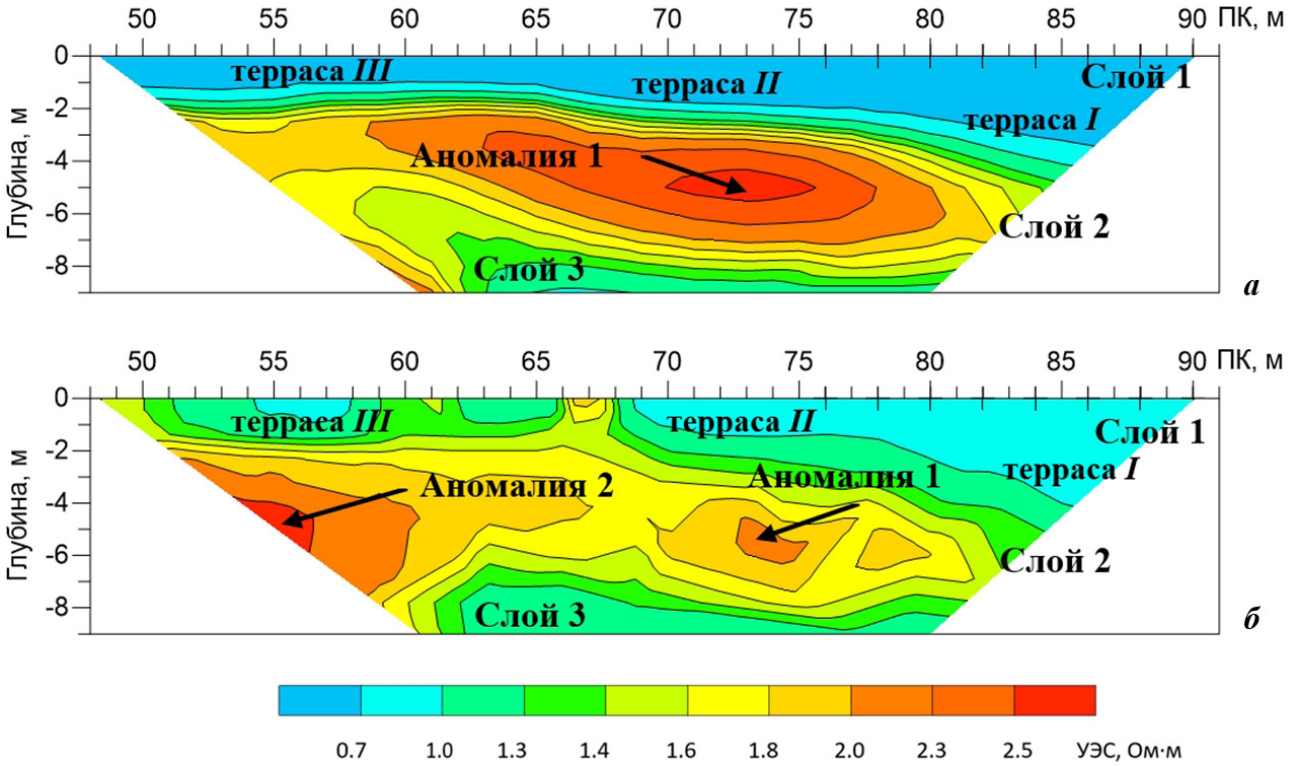


Рис. 7. Геоэлектрические разрезы по профилю ПР40, построенные с использованием двух вариантов инверсии данных донной электротомографии: *а* — без учета параметров слоя воды; *б* — с учетом рельефа дна и удельного электрического сопротивления морской воды.

Fig. 7. Geoelectric sections along the PR40 profile, constructed using two options for the inversion of the bottom electrotomography data: *a* — without considering the parameters of the water layer; *б* — considering the bottom topography and electrical resistivity of sea water.

Для оценки возможности использования упрощенного подхода к предварительной обработке данных ДЭТ, электротомографическая инверсия выполнена как с учетом, так и без учета априорной информации о параметрах слоя воды (рис. 7).

Структура полученных геоэлектрических разрезов трехслойна. Второй слой характеризуется повышенным значением удельного электрического сопротивления (рис. 7). Низкоомный слой 1 соответствует по данным подводных раскопок илистым пескам разнозернистым с включениями гальки. Ближе к берегу в этом слое наблюдается каменный материал, образовавшийся в связи с размывом строительных остатков культурного слоя городища. Увеличение объема каменного материала в прибойной зоне, выявленное раскопками обуславливает значительное увеличение УЭС слоя 1 в сторону берега (рис. 7*а*).

Слой 2 вероятно сформирован суглинками, которые были вскрыты в скважинах, пробуренных в 1960 г. на территории городища, примыкающей к Карантинной бухте[1]. В рельефе кровли этого слоя прослеживаются ступени, характерные для морских террас. На разрезе надписями отмечены плоскости предполагаемых трех террас, помеченных номерами ***I***, ***II***, ***III*** (рис. 7). Не исключено, по нашему мнению, что кровля слоя 2 характеризует палеорельеф дна Карантинной бухты.

Слой 3 пониженного сопротивления проявился лишь частично, наметилась только его верхняя граница. Данные о литологическом составе слоя отсутствуют.

Наибольший интерес для решения археологический задачи представляет локальная аномалия ***1*** повышенного УЭС, которая предположительно связана со скоплением каменного материала в слое 2. Эта аномалия проявилась отчетливо на геоэлектрических разрезах, полученных с использованием двух вариантов инверсии (рис. 7). На разрезе, синтезированном с помощью упрощенного варианта 1 инверсии, аномалия ***1*** характеризуется большими значениями УЭС (рис. 7*а*). На втором варианте разреза аномалия ***1*** имеет меньшую амплитуду,

[1] *Петров Л., Воробьев А., Федоров В. и др.* Краткий инженерно-геологический отчет по работам на территории городища Херсонеса. Центральные научно-реставрационные мастерские Академии строительства и архитектуры СССР. Москва. 1960. Архив ФГБУК, дело 770/I Ф.п.1. 55 с.

но проявилась с большей детальностью (рис. 7*б*). Положение максимумов локальных повышений УЭС на обоих разрезах в плане совпадают и находятся на глубине примерно 5 м.

Интенсивная аномалия ***2*** локализовалась более отчетливо на разрезе, полученном с учетом слоя воды (рис. 7*б*).

Сопоставление разрезов позволяет сделать вывод, что, в целом, общая геоэлектрическая структура разрезов, полученных с двумя различными вариантами инверсии, близка. Отличаются только значения УЭС и степень детальности разрезов (рис. 7).

Выводы, сформулированные в результате анализа результатов ДЭТ по профилю ***ПР40***, в целом, справедливы для всех остальных полученных геоэлектрических разрезов.

Совокупность рассчитанных геоэлектрических разрезов обобщена в виде 3D куба данных ДЭТ. На основании полученного цифрового массива построены геоэлектрические карты-срезы для глубины 5 м, на которых наблюдается максимум наиболее интересной с археологической точки зрения, аномалии ***1***, достаточно четко проявившейся на геоэлектрическом разрезе по профилю ПР40 и других разрезах (рис. 8).

Карты построены для двух вариантов инверсии. Геоэлектрическая структура аномалий на этих картах подобна. На них с разной степенью детальности проявились две аномалии повышенных значений УЭС ***1*** и ***2*** (рис. 8). На карте, полученной без априорной информации (рис. 8*а*) аномалия ***1*** проявилась более отчетливо, но менее локализована, чем на карте, синтезированной с учетом слоя морской воды.

Аномалия ***1*** простирается на картах вдоль береговой линии бухты, на удалении примерно 40–50 м от уреза воды. Форма аномалии преимущественно линейновытянутая. Ось аномалий почти прямолинейна (рис. 8). Наибольшие значения аномалии ***1*** наблюдаются в интервале между ПР20 и ПР50. Значения УЭС уменьшаются в обе стороны от максимума вдоль ее простирания. При этом простирание оси аномалий изменяется незначительно.

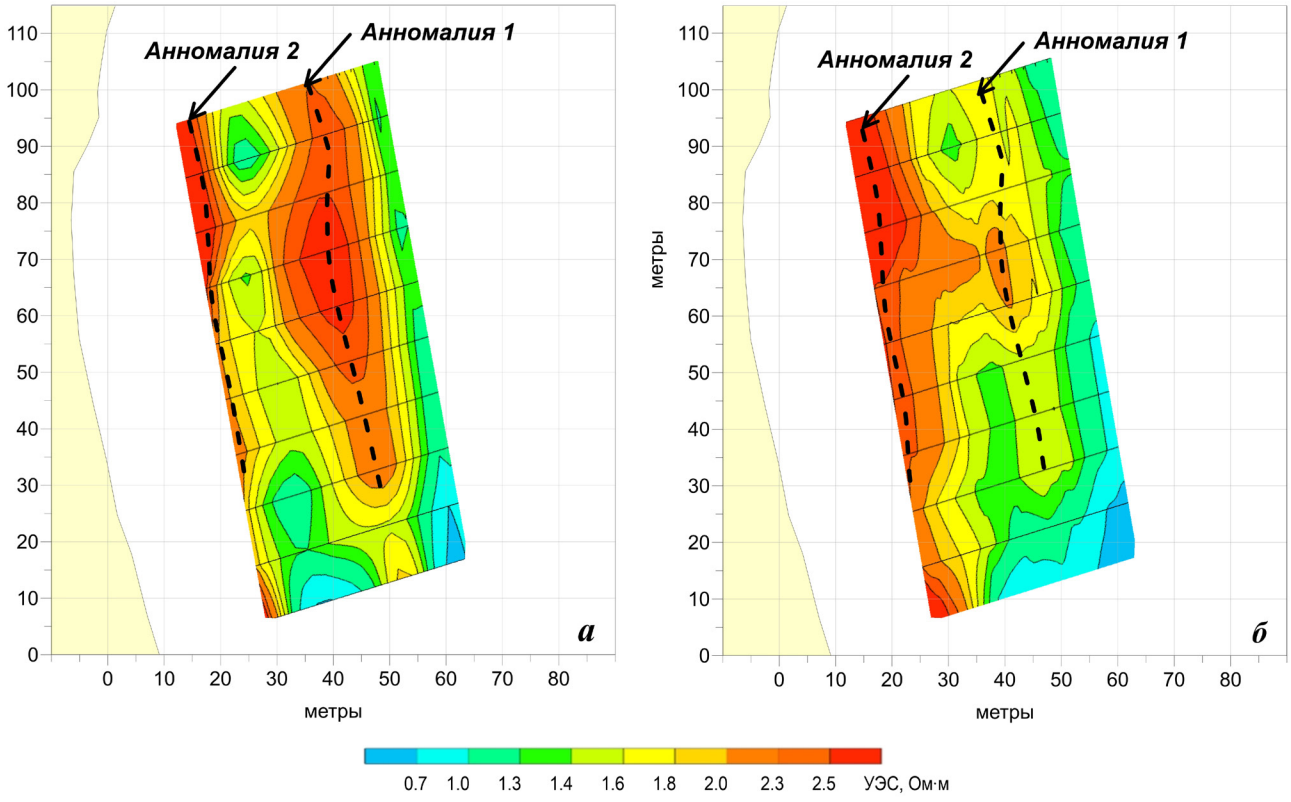


Рис. 8. Геоэлектрические карты-срезы на глубине 5 м, построенные с использованием двух вариантов двумерной инверсии данных донной электротомографии: *а* — без учета параметров слоя воды; *б* — с учетом рельефа дна и удельного электрического сопротивления морской воды. Штриховые линии — оси аномалий повышенных значений удельного электрического сопротивления.

Fig. 8. Geoelectric slice maps on a slice at a depth of 5 m, constructed using two variants of two-dimensional inversion of bottom electrotomography data: *a* — without considering the parameters of the water layer; *б* — with the bottom topography and the electrical resistivity of the seawater. Dashed lines are the axes of anomalies of elevated values of electrical resistivity.

Необходимо отметить, что на геоэлектрических разрезах аномалия ***1***, расположена под плоскостью террасы ***II*** (рис. 6). Если источник аномалии связан с искусственным сооружением, являющимся источником аномалии ***1***, то терраса могла сформироваться в результате строительных работ по его возведению.

Совокупность геометрических свойств аномалии ***1***, включающая прямолинейность, значительную протяженность (60–70 м) и вытянутость относительно береговой линии указывают на искусственное происхождение ее источника. Эти признаки позволяют предположить, что аномалия ***1*** может быть связана с остатками крупного каменного сооружения, возможно, наиболее ранним античным причалом или оборонительной стеной Херсонеса. Конечно, истинную природу источника аномалии ***1*** можно установить только с помощью раскопок, которые целесообразно провести в области максимальных значений аномалии ***1***, отчетливо проявившейся на карте, полученной с учетом слоя воды.

Большая часть аномалии ***2*** расположена ближе к берегу, и распространяется за границы карты (рис. 8*б*). Аномалия простирается вдоль береговой линии, а ширина ее увеличивается в интервале от профиля ПР30 к ПР90. Наличие этой аномалии можно связать крупнообломочным каменным материалом, вымытым прибоем из культурного слоя городища. Аномалия на карте, полученной без априорной информации, практически не проявилась, так как сместилась ближе к берегу (рис. 8*а*). Данный эффект возможно обусловлен особенностями упрощенного варианта инверсии.

ВЫВОДЫ

Полученные археолого-геофизические результаты демонстрируют оптимальность выбранного комплекса морских геофизических исследований Карантинной бухты. Геофизические карты и разрезы характеризуют морфологию рельефа дна, строение морских террас и наличие в поддоннных отложениях каменного материала, вероятно связанного с застройкой порта Херсонеса.

Предлагаемый комплекс методов исследований, на наш взгляд, является оптимальным, так как информация, полученная отдельными методами, дополняет и уточняет представления о геоморфологии морского дна и вероятном расположении скрытых археологических подводных объектов.

Метод НСП обеспечивает получение детальной информации о геоморфологии дна и позволяет, совместно с данными подводных археологических исследований, проследить террасы, сформировавшиеся в результате изменений уровня моря и застройки изменяющихся берегов бухты, происходивших за длительное время существования Херсонеса. Выявление морфологических элементов этих террас является основой для последующей реконструкции расположения древних береговых линий в различные исторические эпохи.

На основании совместной интерпретации данных НСП и ГЛБО установлена связь обнаруженных на дне археологических объектов с геоморфологией выявленных морских террас обследованной части Карантинной бухты Херсонеса.

Результаты донной ДЭТ обеспечили получение информации о строении морских террас Карантинной бухты и наличии локальных высокоомных неоднородностей в поддонных отложениях. Местоположение и форма неоднородностей указывает на их вероятную связь, с остатками портовой застройки Херсонесского порта. Таким образом, технологию ДЭТ, которая до настоящего времени не применялась для решения задач подводной археологии, можно расценивать в качестве перспективного инструмента обнаружения скрытых в морских отложениях остатков древней застройки.

Выполненные исследования показали, что применение упрощенного варианта инверсии данных ДЭТ, потребность в котором возникает при отсутствии данных детальной батиметрии, возможно в условиях прибрежного мелководья при плоском рельефе дна. Такая методика обработки пригодна для построения предварительных геоэлектрических разрезов с целью выбора площадей перспективных для обнаружения скрытых в донных отложениях археологических объектов привлечением методов гидроакустики.

Научная новизна полученных результатов связана с повышением эффективности геофизических методов изучения археологических памятников, скрытых в толще морских отложений мелководных бухт Гераклейского полуострова, на базе применения донной электротомографии.

Практическая значимость обусловлена тем, что результаты комплексных исследований обеспечивают оптимизацию дорогостоящих раскопок, имеющих целью изучение археологических объектов, скрытых в донных отложениях.

Работа выполнена при поддержке программы Приоритет-2030 Севастопольского государственного университета (стратегический проект № 5).

Список литературы

Басс Дж. Подводная археология. Древние народы и страны. М.: ЗАО Центрполиграф, 2003. 202 с.

[*Bass Dzh.* Underwater archeology. Ancient peoples and countries. M.: ZAO Tsentrpoligraf, 2003. 202 p.].

Блаватский В.Д. Подводные раскопки в Фанагориив 1959 г. // Советская археология. 1961. № 1. С. 277–279 [*BlavatskiyV.D.* Underwate rexcavations in Phanagoriain 1959 // Sovetskaya arkheologiya. 1961. 1. P. 277–279 (in Russian)].

Бобачев А.А. Электротомография с погруженными установками // Материалы VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна. Москва: 2021. С. 284–289 [*Bobachev A.A.* Immersed Electrotomography // Materials of the VIII All-Russian school-seminar on electromagnetic sounding of the Earth named after M.N. Berdichevsky and L.L. Vanyana. M: 2021. P. 284–289 (in Russian)].

Букатов А.А., Бондарев И.П., Дюженко Т.В. Порт Херсонеса Таврического в Карантинной бухте и природные процессы // Херсонесский сборник. Вып. XX. Севастополь: Альбатрос, 2019. С. 7–12 [*Bukatov A.A., Bondarev I.P., Dyuzhenko T.V.* Port of Tauric Chersonese in Karantinnaya Bay and natural processes // The Chersonese Collection. Iss. XX. Sevastopol: Albatros, 2019. P. 7–12 (in Russian)].

Вахонеев В.В. Морская археология. Учебник для вузов // Севастополь: Редакционно-издательский центр СевГУ,2020. 260 с. [*Vakhoneyev V.V.* Maritimearcheology. Uchebnik dlya vuzov // Sevastopol: Editorial and Publishing Center SevGU. 2020. 260 p. (in Russian)].

Дикарев В.А. Проблема фанагорийской регрессии Черного моря // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2011. № 1. С. 35–40. [*Dikarev V.A.* Problem of the Fanagorian marin regression of Black Sea // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2011. № 1. P. 35–40 (in Russian)]

Ерохин С.А. Применение электротомографии при решении рудных, инженерных и археологических задач. Авторефератдисс. канд. геол-миннаук. Москва, 2012. 22 с. [*Erokhin S.A.* Application of electrical resistivity tomography for deposits of metal ores, engineering geology and archaeology problems solution. Phd thesis. Moscow, 2012. 22 p. (in Russian)].

Зеленко С.М. Подводная археология Крыма. Киев: ИД «Стилос», 2008. 272 с. [*Zelenko S.M.* Underwater archeology of Crimea. Kyev: ID «Stilos», 2008. 272 p. (in Russian)].

Золотарев М.И. Портовые сооружения Херсонеса Таврического в Карантинной бухте // Херсонесский сборник. Вып. XIII. Севастополь: ЧП «Стрижак-Пресс», 2004. С. 55–67 [*Zolotarev* M.I. Port facilities of Tauric Chersonese in Karantinnaya Bay // The Chersonese Collection. Iss. XIII. Sevastopol: CHP «Strizhak-Press», 2004. P. 55–67 (in Russian)].

Каринский А.Д., Шевнин В.А. Влияние индукции на результаты ВЭЗ на переменном токе // Геофизика. 2001. № 5. С. 50–56 [*Karinsky A.D., Shevnin V.A.* Vliyanie indukcii na rezul'taty VEZ na peremennom toke // Geofizika. 2001. № 5. P. 50–56 (in Russian)].

Окороков А.В. Свод объектов подводного культурного наследия России. Ч. 1. Черное иАзовское моря. М.: Институт наследия, 2016. 440 с. [*Okorokov A.V.* Code of objects of underwater cultural heritage of Russia. Pt. 1. Black and Azov seas. M.: Russian Heritage Institute, 2016. 440 p. (in Russian)].

Ольховский С.В., Мазуркевич А.Н. Методика подводных археологических исследований на затопленных поселениях. М.: Институт археологии РАН, 2011. 32 с. [*Olkhovskiy S.V., Mazurkevich A.N.* Procedures of underwater archaeological research on flooded settlements. M.: Institute of Archeology RAS, 2011. 32 p. (in Russian)].

Рычагов Г.И. Геоморфология. М.: изд-во Юрайт, 2020. 430с. [*Rychagov G.I.* Geomorphology. M.: Urainpublishinghouse, 2020. 430 p. (in Russian)].

Таскаев В.Н. Античная подводная археология Северного Причерноморья. М.: Изд-во Воронцовка, 2009. 175 с. [*Taskayev V.N.* Antique underwater archeology of the Northern Black Sea region. M.: Izd-vo Vorontsovka, 2009. 175 p. (in Russian)].

Фирсов Ю.Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров. СПб.: Нестор-История, 2010. 348 с. [*Firsov Yu.G.* Fundamentals of hydroacoustics and the use of hydrographic sonars. SPb.: Nestor-Istoriya, 2010. 348 p. (in Russian)].

Шалаева Н.В., Старовойтов А.В. Основы сейсмоакустики на мелководных акваториях. Учебное пособие. М.: изд-во МГУ. 2010. 256 с. [*Shalayeva N.V., Starovoytov A.V.* Fundamentals of seismoacoustics in shallow water areas. Uchebnoye posobiye. M.: Izd-vo MGU. 2010. 256 p. (in Russian)].

Шевнин В.А. Электрическое сопротивление и петрофизические параметры грунтов для малых глубин: учебное пособие / Под редакцией доц. Д.К. Большакова. М.: КДУУниверситетска якнига, 2021. 44 с. [*Shevnin V.A.* Elektricheskoe soprotivlenie i petrofizicheskie parametry gruntov dlya malyh glubin: uchebnoe posobie / Pod redakciej doc. D.K. Bol'shakova. M.: KDUUniversitetskayakniga, 2021. 44 p. (in Russian)]/

Galanidou N., Dellaporta K., Sakellariou D. Greece: Unstable Landscapes and Underwater Archaeology // The Archaeology of Europe's Drowned Landscapes. Ed. by Bailey G., Peeters H., Mennenga M. Coastal Research Library. V. 35. Springer Open, 2020. P. 370–392.

Harff J., Bailey G., Luth F. Geology and Archaeology: Submerged Landscapes of the Continental Shelf. Geological Society Special Publication 411. London: Geological Society, 2016. 294 p.

APPLICATION OF BOTTOM ELECTROTOMOGRAPHY FOR INCREASING THE INFORMATIVITY OF MARINE GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS OF UNDERWATER ARCHAEOLOGICAL SITES

V.V. Glazunov[1], A.A. Bukatov[1], V.V. Panchenko[1], N.N. Efimova[2]

[1]Federal State Educational Institution of Higher Education Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
[2]Federal State Budgetary Enterprise A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia, 199106

Received July 15, 2022; revised November 14, 2022; accepted December 26, 2022

The article presents the results of marine geophysical research of the ancient port area of Chersonesos located in the area of Karantinnaya Bay, which is now about 2–4 m below sea level. Set of methods along with archeological and hydroacoustic types of work includes bottom electrotomography, which has not been used until now in the practice of underwater archeology to map remains of structures buried by bottom sediments. Based on the results of side-scan sonar and profilograph surveys, the ancient shorelines of the bay, formed by marine transgression-regression cycles and shoreline development in different historical epochs, were identified and traced. Bottom electrical tomography provided geoelectric maps and sections reflecting the structure of marine sediments down to the 10-m depth, with geoelectric anomalies presumably associated with the remains of the submerged territory of the port of Chersonesos.

Keywords: underwater archaeology, hydroacoustics, bottom electrotomography, ancient port of Chersonesos.