

УДК 551.46.07

**ТЕХНОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО
ПРОФИЛИРОВАНИЯ НА ШЕЛЬФЕ КРЫМА В 124 РЕЙСЕ
НИС «ПРОФЕССОР ВОДЯНИЦКИЙ»****¹Римский-Корсаков Н.А., ¹Пронин А.А., ¹Хортов А.В.,****²Литвинюк Д.А., ³Коротаев В.Н., ³Поротов А.В., ¹Мутовкин А.Д.***¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва,
e-mail: nrk@ocean.ru;**²Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского Российской академии наук,
Севастополь, e-mail: ibss@ibss-ras.ru;**³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва,
e-mail: vlaskor@mail.ru*

В статье рассмотрены результаты изучения современного рельефа дна и сейсмоакустического зондирования шельфа, позволившие восстановить фрагменты положения древней гидрологической сети и определить связи береговых и субаквальных морфоструктур. В целом исследование выполнялось в течение трех лет в рамках проекта РФФИ № 20-05 00384_A, целью которого являлось познание современных механизмов формирования Крымского шельфа. Рассматриваемый фрагмент исследований в 2022 г. включал морские экспедиционные натурные работы на внешнем шельфе Южного Крыма с борта НИС «Профессор Водяницкий» (124 рейс) с использованием сейсмоакустической аппаратуры профилирования донных отложений, а также эхолотирования и гидролокации бокового обзора. Опыт предыдущих исследований показал высокую эффективность применения аппаратуры акустического профилирования АП-5Т, разработки Лаборатории гидролокации дна ИО РАН, включающей буксируемый носитель акустических антенн, электронный блок и программное обеспечение. В результате были получены данные позволившие сформировать новые представления о строении континентальной окраины Крыма в виде региональных и сводной геоморфологических карт шельфа Крыма, а также профилей строения осадочной толщи. Выполненные исследования Южного шельфа Крыма позволяют существенно дополнить существующие представления о структурно-тектоническом и геолого-литологическом строении шельфа Крыма и восстановить палеогеографические события позднейшей истории его формирования.

Ключевые слова: шельф, Крым, осадочная толща, субаквальные морфоструктуры, затопленная гидрологическая сеть, эхолот, акустический профилограф, гидролокатор

Представленные исследования проводились в соответствии со сводным Планом морских экспедиций на научно-исследовательских судах РАН, по темам Государственного задания ИО РАН № FMWE-2021-0010, № FMWE-2021-0004, а также в рамках проекта РФФИ № 20-05 00384_A.

**TECHNOLOGY AND RESULTS OF SEISMOACOUSTIC
PROFILING AT CRIMEA SHELF DURING
R/V «PROFESSOR VODYANITSKY» 124 CRUISE****¹Rimskiy-Korsakov N.A., ¹Pronin A.A., ¹Khortov A.V.,****²Litvinyuk D.A., ³Korotaev V.N., ³Porotov A.V., ¹Mutovkin A.D.***¹Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Science, Moscow,
e-mail: nrk@ocean.ru;**²Kovalevsky South Seas Biology Institute Russian Academy of Sciences, Sevastopol,
e-mail: ibss@ibss-ras.ru;**³Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: vlaskor@mail.ru*

The article discusses the results of studying the modern bottom relief and seismic acoustic sounding of the shelf, which allowed us to restore fragments of the position of the ancient hydrological network and determine the connections of coastal and subaqueal morphostructures. In general, the study was carried out for three years within the framework of the RFBR project No. 20-05 00384_A. The project purpose was to study the modern mechanisms of Crimean shelf formation. The fragment of research under consideration in 2022 included marine expeditionary field work on the outer shelf of the Southern Crimea from the R/V "Professor Vodyanitsky" (cruise 124) using seismic acoustic equipment for profiling bottom sediments, as well as echo sounding and side-scan sonar research. The experience of previous studies has shown the high efficiency of AP-5T acoustic profiling equipment use. Equipment was designed at IO RAS Bottom Sonar Laboratory. It includes a towed body with acoustic antennas, an electronic unit and software. As a result, data were obtained that made it possible to form new ideas about the structure of the continental margin of the Crimea in the form of geomorphological map of the Crimean shelf, as well as profiles of the structure of the sedimentary strata. The performed studies of the Southern Shelf of the Crimea allow us to significantly supplement the existing ideas about the structural-tectonic and geological-lithological structure of the shelf of the Crimea and to restore the paleogeographic events of the later history of its formation.

Keywords: shelf, Crimea, sedimentary strata, subaqueal morphostructures, submerged hydrological network, echo sounder, acoustic profiler, sonar

В России и за рубежом научно-исследовательские центры, занимающиеся изучением шельфа морей и океанов, как правило, применяют примерно одинаковый комплекс экспедиционных работ. Это, прежде всего, эхолотный промер глубин, позволяющий получать рельефную картину поверхности дна, а также гидролокационное картирование, которое дает представление об ареалах донных грунтов и пространственное распределение элементов донного рельефа. Непрерывное сейсмоакустическое зондирование позволяет получить данные о литологическом строении осадочной толщи, накопленной за последние 20 тыс. лет.

Исследования шельфа полуострова Крым и соответствующие публикации были сделаны около 40 лет назад. Большой фактический материал тех лет в основном приурочен к юго-восточной части Крыма и связан с геолого-разведочными работами на нефть и газ в районе Керченского полуострова. Мало исследован вопрос положения древней гидрологической сети и связи береговых и субаквальных морфоструктур, а также генезиса и истории формирования долинных заливов полуострова.

Исследования, проведенные группой специалистов Института океанологии РАН, географического факультета МГУ и Института биологии южных морей РАН на шельфе Крыма, в последние годы дополнялись данными берегового бурения, дававшими возможность абсолютного датирования некоторых слоев осадочной толщи и расшифровки колебательных движений уровня моря в Азово-Черно-

морском бассейне. Уникальные материалы, полученные в ходе морских экспедиционных исследований на южном, восточном и западном шельфе Крыма в 2020–2022 гг. (эхолотный промер глубин, непрерывное сеймопрофилирование и гидролокационное картирование), дали возможность детализировать палеогеографическую историю формирования шельфа Черного моря.

Цель исследования, проводившегося в 2022 г., связана с необходимостью решения фундаментальной научной проблемы океанологии и морской геологии по изучению строения и истории формирования континентальной окраины, в частности шельфа полуострова Крым, в том числе восстановление фрагментов положения древней гидрологической сети и определение связи береговых и субаквальных морфоструктур. При этом решались следующие задачи:

- анализ опубликованного и фондового материала по строению шельфа Черного моря;
- анализ данных берегового бурения;
- проведение экспедиционных океанографических и геофизических исследований на участках материковой отмели Крыма, в том числе
 - эхолотный промер,
 - акустическое профилирование верхней осадочной толщи,
 - сейсмоакустическое зондирование шельфа,
 - гидроакустическая геоморфологическая съемка поверхности дна;
- составление региональных и сводной геоморфологических карт шельфа Крыма.



Рис. 1. Общая схема маршрутов сейсмоакустического профилирования, эхолотирования и гидролокации на шельфе Крыма в 2022 г.



Рис. 2. Научно-исследовательское судно НИС «Профессор Водяницкий»

На третьем этапе исследований в 2022 г. основные экспедиционные океанографические и геофизические работы велись на участке материковой отмели полуострова Крым от м. Сарыч (б. Ласпи) до м. Чауда (восточная граница Феодосийского залива). Исследования выполнялись в 124 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» [1] в период с 27 сентября по 22 октября 2022 г. (26 суток).

Схема района работ и маршрутов съемки приведена на рис. 1.

В экспедиции 124 рейса НИС «Профессор Водяницкий» было выполнено одиннадцать профилей акустического профилирования, общей протяженностью более 118 м. миль. Из них три профиля получены в районе Феодосийского залива, два вдоль береговых профиля на участке Алушта – Меганом, четыре в районе Ялта – Аю-Даг, три – у южной оконечности Крыма, от м. Сарыч до Ялты. Частично профили дублируют друг друга. Одновременно с акустическим профилированием проводилось эхолотирование, протяженность которого превышает 75 м. миль. В результате выполнения полевых исследований составлены описания сеймопрофилей дна и сейсмогеологических разрезов для шельфа полуострова Крым и создана общая палеогеоморфологическая карта-схема дна материковой отмели Крыма.

Для морских научных исследований на шельфе использовалось океанское судно НИС «Профессор Водяницкий» (рис. 2) с неограниченным районом плавания, что позволило вести непрерывные работы на всем протяжении и простирании в глубину шельфа полуострова Крым при любом удалении от берега.

Для исследования строения верхней водонасыщенной толщи рыхлых осадочных отложений был применен метод непрерывного акустического профилирования на ходу судна акустическими импульсами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) несущей частоты, который был реализован с использованием акустического профилографа АП-5Т, разработанного в ИО РАН. АП-5Т включает буксируемое тело (носитель акустических антенн), кабельную буксирную линию, накопительную кабельную вьюшку, судовой электронный блок и персональный компьютер для отображения и регистрации данных с помощью оригинальной программы SonarControl. Программное обеспечение SonarControl управляет судовым блоком, обеспечивает обработку и визуализацию данных в реальном времени и осуществляет запись данных на жесткий диск компьютера в общепринятом формате хранения сейсмоакустической и гидролокационной информации ХТФ. Основные технические характеристики прибора приведены в табл. 1, а процесс функционирования комплекса подробно рассмотрен в работах [2, 3].

В ряде случаев для обеспечения бесперебойной работы по зондированию рыхлых осадочных отложений в акустическом диапазоне частот использовалось приемопередающее устройство «CHIRP-II». Приемопередающее устройство «CHIRP-II» является полноценным судовым блоком акустического профилографа с ЛЧМ сигналом, в одном корпусе которого объединены персональный компьютер, устройства генерации ЛЧМ сигнала, устройства обработки принятого сигнала и усилитель мощности. Назначение «CHIRP-II» – генерация и об-

работка зондирующих сигналов сложной формы. «CHIRP-II» не имеет собственного электроакустического преобразователя. В качестве буксируемой акустической антенны для «CHIRP-II» используется буксируемый носитель антенн АП-5Т. Основные характеристики приемо-передающего устройства «CHIRP-II» приведены в табл. 2. Структура и процесс функционирования устройства рассмотрен в работах [2, 4].

Таблица 1

Основные технические характеристики акустического профилографа АП-5Т

Характеристика	Значение
Максимальная рабочая глубина	100 м
Максимальная скорость буксировки	4 узла
Электропитание судового электронного блока	9 В 0,3 А, 80 В 0,1 А
Интерфейс связи с ПЭВМ	Ethernet 100 Mbit/s
Несущая частота зондирующего импульса	5 кГц
Девияция частоты ЛЧМ сигнала	Настраиваемая от 0 до 4 кГц
Длительность импульса	Настраиваемая от 1 до 9 мс
Пиковая электрическая мощность зондирующего импульса	4,1 кВт
Операционная система ПЭВМ	Windows 10

Таблица 2

Основные технические характеристики приемо-передающего устройства «CHIRP-II»

Характеристика	Значение
Питание	Сеть 220 В
Количество каналов	2
Центральная частота зондирующего импульса	4,5 кГц
Девияция частоты ЛЧМ сигнала	9 кГц
Длительность зондирующего импульса	5–20 мс
Разрешение устройства отображения данных	1024x768 точек

Для детальных исследований морфологии рельефа дна и конфигурации прирдных объектов использовался метод гидролокации бокового обзора. Метод был

реализован с использованием высокочастотного гидролокатора бокового обзора (ГБО) «YellowFin» производства канадской фирмы Imagenex. ГБО позволяет поставить в соответствие обследуемому участку поверхности дна его тоновое изображение, формируемое при перемещении антенны ГБО, построчно на ленте графического регистратора либо на экране видео монитора. Гидролокационные изображения собирались и архивировались, так же как и в случае АП, в общепринятом формате данных XTF. Основные технические характеристики ГБО приведены в табл. 3, а процесс функционирования ГБО подробно рассмотрен в работах [5, 3].

Таблица 3

Основные технические характеристики гидролокатора бокового обзора «YellowFin»

Характеристика	Значение
Рабочая глубина	До 300 м
Масса носителя	15 кг
Длина кабельной буксирной линии	15 или 100 м (по необходимости)
Рабочая частота	250, 300 и 600 кГц
Максимальная ширина общей полосы обзора	300 м
Зондирующий сигнал тональный длительностью	0,5/0,05 мс
Передача данных, электропитания и команд управления	По многожильному кабель-тросу (интерфейс Ethernet)

Для промера глубин и получения соответствующих профилей дна вдоль маршрутов геофизических съемок с борта НИС «Профессор Водяницкий» на шельфе полуострова Крым использовался судовая навигационный эхолот FURUNO-FCV-2100L.

Для навигационного обеспечения исследований (координатно-временной привязки всех получаемых данных) использовались три источника, а именно:

– два дублирующих друг друга судовых приемника космических навигационных систем (КНС) навигационные системы FURUNO GPS Navigator GP-80 и KODEN GPS/ГЛОНАСС навигатор KGP-925;

– приемник данных КНС GPS и ГЛОНАСС «Sigma» производства компании Javad, входящий в состав геофизического аппаратного комплекса.

Наличие нескольких источников навигационных данных позволяло оперативно переключаться между ними в случае нестабильной работы КНС одного вида.

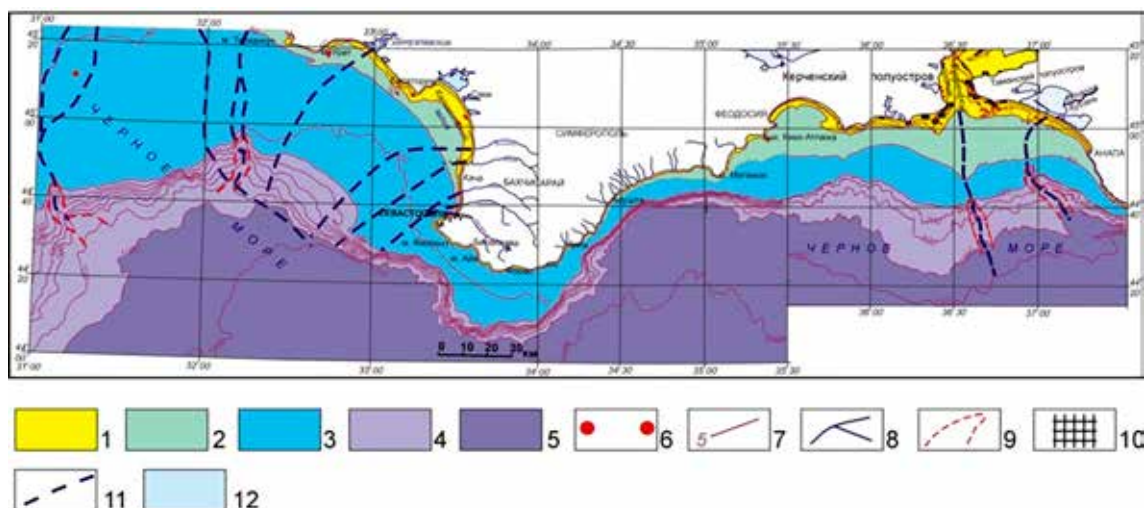


Рис. 3. Сводная геоморфологическая карта шельфа полуострова Крым:
 1 – прибрежная отмель (0–20 м), 2 – абразионно-аккумулятивная терраса (20–50 м),
 3 – внешний шельф (50–150 м), 4 – материковый склон (150–1000 м),
 5 – глубоководная впадина (более 1000 м), 6 – скальные рифы, 7 – изобаты (м),
 8 – гидрологическая сеть, 9 – подводные каньоны, 10 – рифы и скальные плиты,
 11 – палеоруслу рек, 12 – водные объекты. Карта построена В.Н. Коротаевым
 (географический факультет МГУ) по результатам исследований 2020–2022 гг. [2, 4]

Южный шельф расположен между мысами Ай-Тодор и Меганом вдоль южного берега Крыма, или Горного Крыма. Горный Крым располагается в пределах единой крупной тектонической структуры – Крымского мегантиклинория внешней зоны альпийского складчатого пояса [6, 7]. Основным рельефом ядра мегантиклинория является Главная гряда Крымских гор и ее южный склон – Южный берег Крыма. Южная часть ядра мегантиклинория и все ее южное крыло опущены на дно Черного моря. Южный берег Крыма весьма приглублен и интенсивно обрабатывается морем. На всем его протяжении нет ни одной аккумулятивной формы, за исключением песчано-галечных накоплений в вершинах некоторых бухт, куда впадают реки (например, Судакская), что проиллюстрировано картой на рис. 3.

Литологическое строение донных отложений и рельеф Южного шельфа были изучены при помощи сейсмоакустического профилирования на участке побережья от мыса Сарыч до мыса Чауда. В разрезе плейстоцен-голоценовых отложений юго-восточной части крымского шельфа предварительно были выделены три сейсмокомплекса. Верхний сейсмокомплекс (QIV) толщиной 1,5 м связан с современными отложениями. Подстилающий его сейсмокомплекс (QIII) приурочен к новоэвксин-

ским отложениям. Его толщина меняется в среднем от 6 до 10 м. Нижележащий нерасчлененный карагат-чаудинский сейсмокомплекс (QIII–II) меняется в толщине от 5 до 9 м. В пределах выделенных комплексов выявляются палеоруслу, эрозионные и аккумулятивные формы рельефа. Отмечаются неотектонические поднятия.

Таким образом, в пределах крымского южного шельфа выделяются три основных сейсмокомплекса, отождествляемых с голоценовыми (древнечерноморскими и новочерноморскими –Q IVdc-nc) отложениями, новоэвксинскими (QIIIne) и карангатско-узуларскими (Q III kg-QIIIuz) отложениями. В склоновой части эти отложения размывы и на поверхность дна выходят более древние таврической серии или апшеронские отложения (рис. 4, 5).

Анализ сейсмоакустических данных показал повсеместное присутствие горизонта размыва, пересекающего весь шельф и подстилающий толщу голоценовых преимущественно алевро-пелитовых илов. В строении залегающей ниже толщи отложений прослеживаются врезы, залегающие на подводном продолжении современных речных долин, а также комплекс форм рельефа, маркирующих положение уровня моря в периоды стабилизации подъема уровня моря в ходе послеледникового наступления Черного моря на сушу.

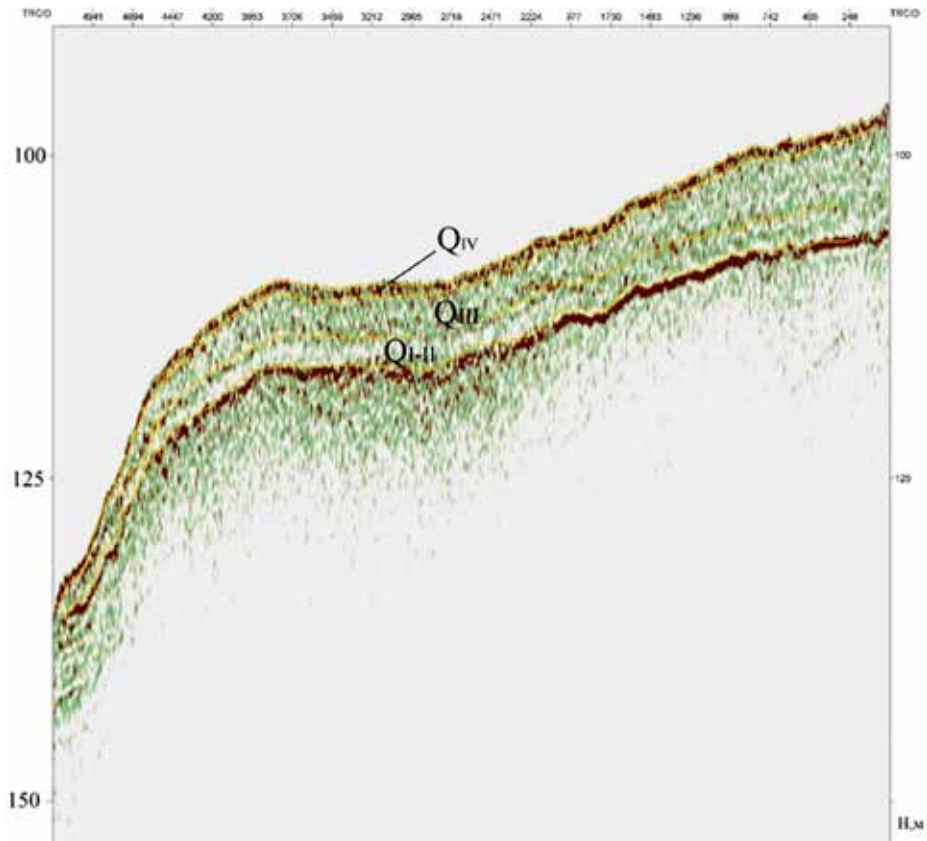


Рис. 4. Фрагмент сейсмоакустического разреза на Ялта-Аюдагском профиле, показывающий особенности строения плейстоцен-голоценовых отложений в присклоновой части

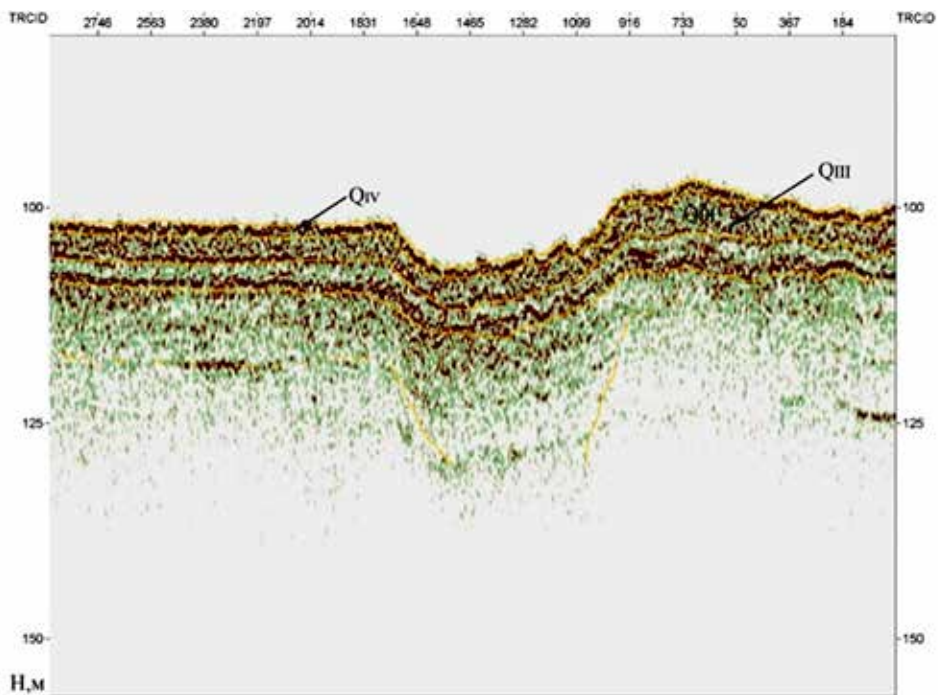


Рис. 5. Фрагмент сейсмоакустического разреза по Ялта-Аюдагскому профилю, показывающий унаследованный каньон в плейстоцен-голоценовых отложениях

Данные синхронного эхолотного промера и непрерывного сейсмоакустического профилирования, полученные в результате выполнения проекта, показали присутствие в зоне внешнего шельфа разнообразных типов древних береговых форм от абразионных террас до береговых валов и эоловых форм, а также приустьевых кос на участках, прилегающих к древним дельтам. В пределах южнокрымского шельфа по сейсмоакустическим материалам установлена древняя береговая линия максимума понижения уровня моря на глубинах от 110 до 85 м, что в целом соответствует средним значениям, возможно отражая условия слабого вздымания в плиоцен-четвертичное время (2,58 млн лет назад).

Новые данные в области морфологии и структуры отложений, слагающих древние береговые образования внешнего шельфа, показали различие их типов в пределах различных морфоструктурных зон: преобладание абразионных террас на участках более крутого и узкого шельфа и абразионно-аккумулятивных и аккумулятивных на участках широкого шельфа юго-восточной окраины.

Результаты исследования рельефа дна и строения осадочной толщи среднего и внутреннего шельфа подтверждают колебательный ход подъема уровня моря. Наиболее четкими индикаторами короткопериодных фаз стабилизации хода трансгрессии являются древнебереговые террасы и отдельные формы, имеющие практически непрерывное распространение на всем протяжении Крымского шельфа. Наряду с древней береговой линией на глубинах 85–90 м особенно хорошо выражена терраса на глубинах 50–60 м ширина которой местами достигает 3–4 км, а также комплекс затопленных пересыпей и кос на глубинах 30–35 м. Последняя береговая линия маркирует верхний предел развития трансгрессии перед началом поступления средиземноморских вод в Черноморский бассейн около 9,5 тыс. лет назад.

Данные о строении и геохронологии донных отложений, сформировавшихся после последнего оледенения 11,7 тыс. лет назад и образующих переуглубленные долины Керченского полуострова, полученные в ходе исследований, показали, что глубины залегания кровли новоэвксинских отложений нигде не превышают отметок 30–35 м, что хорошо согласуется с материалами по литостратиграфии донных садков Черноморского шельфа [8, 9].

Проведенные сейсмоакустическое профилирование и эхолотный промер глубин позволили также охарактеризовать некоторые особенности реликтовой гидрографической сети на Крымском шельфе. Анализ данных позволяет предположить,

что в условиях неоднократных быстрых климатических изменений уровня Черного моря за последние 17 тыс. лет эрозионно-аккумулятивная активность малых рек Крымского побережья также испытывала существенные изменения. Это объясняет слабое присутствие в рельефе шельфа следов древней речной сети на глубинах свыше 40–50 м, которые оставались в условиях суши до временного рубежа 15–16 тыс. лет назад в период засушливых климатических условий. Отмеченное выше, по-видимому, в меньшей мере относится к крупным магистральным реками типа Дон и Кубань, которые имеют более сложную систему питания и разветвленную систему притоков.

Выполненные исследования внешней части шельфа Крыма позволяют существенно дополнить существующие представления о структурно-тектоническом и геологическом строении шельфа Крыма и восстановить палеогеографические события позднейшей истории его формирования.

Список литературы

1. «Профессор Водяницкий» ушёл в 124-й экспедиционный рейс. [Электронный ресурс]. URL: <https://ibss-ras.ru/News-IBSS/1953/> (дата обращения 13.02.2023).
2. Римский-Корсаков Н.А., Бурдян Н.В., Лесин А.В., Пронин А.А., Анисимов И.М. Геолого-геофизические исследования на шельфе полуострова Крым в 115-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 8. С. 38–43. DOI: 10.17513/mjprf.13260.
3. Римский-Корсаков Н.А., Тронза С.Н., Анисимов И.М. Развитие гидролокационных технологий глубоководных исследований рельефа дна и подводных объектов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 9. С. 85–90. DOI: 10.17513/mjprf.12856.
4. Мутовкин А.Д., Пронин А.А., Хортов А.В. Сейсмоакустические исследования плейстоцен-голоценовых отложений Крымско-Керченского шельфа // Геология морей и океанов: материалы XXIV Международной научной конференции (школы) по морской геологии. М.: Издательство ИО РАН, 2022. С. 295–298.
5. Селезнев И.А. Поисково-обследовательские гидроакустические системы разработки АО «Концерн «Океан-прибор» // Освоение морских глубин. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2018. С. 346–359.
6. Моргунов Ю.Г., Калинин А.В., Калинин В.В., Куркин П.Н., Лимонов А.Ф., Пивоваров Б.Л., Щербаков Ф.А. Основные элементы тектоники южного крыла Крымского мегантиклинория (Черное море) // Геотектоника. 1979. № 4. С. 90–97.
7. Yanchilina A.G., Ryan W.B.F., McManus J.F., Dimitrov P., Dimitrov D., Slavova K., Filipova-Marinova M. (Compilation of geophysical, geochronological, and geochemical evidence indicates a rapid Mediterranean-derived submergence of the Black Sea's shelf and subsequent substantial salinification in the early Holocene // Marine Geology. 2017. Vol. 383. P. 14–34.
8. Шнюков Е.Ф., Иванников А.В., Иноземцев Ю.И., Орловский Г.Н., Маслаков Н.А., Рыбак Е.Н., Луцив Я.К., Парышев А.А. Литолого-стратиграфическая характеристика донных отложений Крымского шельфа и глубоководной части Черного моря // Геологический журнал. 2003. № 1. С. 9–23.
9. Aksu A.E., Hiscott R.N., Yaltrak C. Early Holocene age and provenance of a mid-shelf delta lobe south of the Strait of Bosphorus, Turkey, and its link to vigorous Black Sea outflow // Marine Geology. 2016. No. 10. T. 380. P. 113–137. DOI: 10.1016/j.margeo.2016.07.003.