

СТАТЬЯ

УДК 551.46.07

**МЕТОДИКА РАБОТ И РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ В 131 РЕЙСЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
СУДНА «ПРОФЕССОР ВОДЯНИЦКИЙ»****¹Римский-Корсаков Н.А., ¹Пронин А.А., ¹Хортов А.В., ¹Мутовкин А.Д.,****²Литвинюк Д.А., ³Дерюшкин Д.В., ³Щербаченко С.В., ⁴Коротаев В.Н.**¹*ФГБУН Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук,
Москва, e-mail: nrk@ocean.ru;*²*ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского
Российской академии наук», Севастополь, e-mail: ibss@ibss-ras.ru;*³*ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт Российской академии наук»,
Севастополь, e-mail: secretary@mhi-ras.ru;*⁴*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
Москва, e-mail: vlaskor@mail.ru*

В статье представлены результаты работ по изучению шельфа и континентального склона юго-восточной части Крыма с помощью сейсмоакустического профилирования, выполненного в 131 рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» в 2024 г. Эти экспедиционные исследования являются продолжением цикла многолетних работ, связанных с комплексным применением современных средств гидроакустики для изучения геолого-геоморфологического строения шельфа и верхней части материкового склона. Опыт предыдущих исследований показал высокую эффективность применения аппаратуры сейсмоакустического профилирования типа «спаркер» в Институте океанологии Российской академии наук. В статье приведены сведения об изменениях в методике работ, которые пришлось сделать ввиду изменившихся внешних условий. Эти изменения касаются, прежде всего, области навигационного обеспечения работ в современных условиях, а также технической обработки и вида представления полученных геофизических данных. В результате проведенных экспедиционных исследований авторами был получен большой объем новых данных, позволивших существенно уточнить и расширить представления о строении юго-восточной континентальной окраины Крыма в области знаний о ее структурно-тектоническом и литолого-стратиграфическом строении. Выделение трансгрессивно-регрессивных комплексов с типичным набором сейсмофаций позволило получить дополнительные сведения о колебаниях уровня моря в плейстоцен-голоценовое время. Также были выделены ранее неизвестные газовые скопления в придонной части разреза, отвечающей четвертичным отложениям. Полученные результаты имеют также практическое значение с точки зрения обнаружения на шельфе газовых скоплений, представляющих определенную опасность для судоходства и инженерного строительства.

Ключевые слова: шельф, Крым, непрерывное сейсмоакустическое профилирование, сейсмокомплекс, бровка шельфа, отражающий горизонт, каньон, палеорусло, плейстоцен

Исследования проведены в рамках государственного задания по теме № FMWE-2024-0024, экспедиционные исследования выполнены в Центре коллективного пользования «Научно-исследовательское судно “Профессор Водяницкий”».

**METHODOLOGY OF WORKS AND RESULTS OF SEISMOACOUSTIC
RESEARCHES IN CRUISE 131 OF THE RESEARCH VESSEL
“PROFESSOR VODYANITSKY”****¹Rimskiy-Korsakov N.A., ¹Pronin A.A., ¹Khortov A.V., ¹Mutovkin A.D.,****²Litvinyuk D.A., ³Deryushkin D.V., ³Scherbachenko S.V., ⁴Korotaev V.N.**¹*Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Science, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru;*²*Kovalevsky South Seas Biology Institute Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, e-mail: ibss@ibss-ras.ru;*³*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, e-mail: secretary@mhi-ras.ru;*⁴*Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: vlaskor@mail.ru*

The article presents the results of the work on studying the shelf and continental slope of the southeastern part of Crimea using seismoacoustic profiling performed during the 131st cruise of the research vessel Professor Vodyanitsky in 2024. These expeditionary studies are a continuation of a cycle of long-term works related to the integrated use of modern hydroacoustics to study the geological and geomorphological structure of the shelf and the upper part of the continental slope. The experience of previous studies has shown the high efficiency of using seismoacoustic profiling equipment of the Sparker type at the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. The article provides information on changes in the work methodology that had to be made due to the changed external conditions. These changes concern, first of all, the area of navigation support for work in modern

conditions, as well as technical processing and the type of presentation of the obtained geophysical data. As a result of the expeditionary research, the authors obtained a large volume of new data that allowed them to significantly clarify and expand their understanding of the structure of the southeastern continental margin of Crimea in the field of knowledge of its structural-tectonic and lithological-stratigraphic structure. The identification of transgressive-regressive complexes with a typical set of seismic facies provided additional information on sea level fluctuations in the Pleistocene-Holocene period. Previously unknown gas accumulations were identified in the bottom part of the section corresponding to Quaternary deposits. The results obtained are also of practical importance in terms of detecting gas accumulations on the shelf, which pose a certain danger to shipping and engineering construction.

Keywords: shelf, Crimea, continuous seismoacoustic profiling, seismic complex, reflecting horizon, shelf edge, canyon, paleochannel, Pleistocene

The research was conducted within the framework of the state assignment on topic No. FMWE-2024-0024, the expeditionary research was carried out at the Center for Collective Use «Research Vessel “Professor Vodyanitsky”».

Введение

Район исследований находился между м. Сарыч и м. Чауда, располагаясь вдоль Южного берега Крыма, который относится к единой крупной тектонической структуре – Крымскому мегантиклинорию внешней зоны альпийского складчатого пояса. Основным элементом ядра мегантиклинория является Главная гряда Крымских гор, а Южная часть ядра мегантиклинория и его южное крыло находятся на дне Черного моря [1]. Этот район неоднократно изучался и ранее, в том числе и авторами, в ходе 115, 116, 124 и 126 рейсов НИС «Профессор Водяницкий» [2–4]. Такой большой интерес к данному району объясняется как его сложным строением, так и многообразием различных геолого-геоморфологических объектов и процессов, а также их взаимодействием. На первоначальном этапе работ, в первых экспедициях на южном шельфе Крыма, целью и наиболее интересным объектом исследований представлялась древняя речная сеть и древние береговые линии [5], сохранившиеся следы которых искали с помощью гидролокации и акустического профилирования. По результатам этих экспедиционных исследований была построена палеогеоморфологическая карта – схема дна участка материкового склона Южного Крыма (схема расположения древней гидрографической сети). В ходе камеральной обработки данных этой экспедиции (115 рейс) стало ясно, что этих технических средств недостаточно, и есть необходимость иметь более полные данные о глубинном строении осадочной толщи.

С этой целью к следующему сезону экспедиционных работ была подготовлена аппаратура для непрерывного сейсмического профилирования толщи донных отложений с электроискровым возбуждением сигнала и специально изготовленной приемной косой, с оптимальными для района исследований характеристиками [2, 6]. Применение этой аппаратуры сразу показало свою

эффективность, и она стала интенсивно использоваться в последующих экспедициях. В ходе этих экспедиций совершенствовалась методика и технология проведения работ, также крупным положительным фактором явилась возможность обследовать выявленные природные объекты, представляющие интерес планомерно, с учетом данных, полученных в предыдущих экспедициях. В этом отношении материалы НСП, полученные в 131 рейсе НИС «Профессор Водяницкий», являются наиболее полными и качественными. Кроме объектов, непосредственно связанных с древней гидрографической сетью, на профилях сейсмоакустического профилирования хорошо читаются разрывные нарушения, связанные с сейсмоактивными разломами, которые, в свою очередь, имеют непосредственное отношение к зонам субаквальной разгрузки углеводородов [7, 8].

Целью экспедиционных работ 131 рейса НИС «Профессор Водяницкий» было получение новой сейсмоакустической информации, которая бы существенно дополнила данные, полученные в предыдущих рейсах, и позволила уточнить характер и последовательность геолого-геоморфологических процессов на шельфе и континентальном склоне Крыма в плейстоцене.

Второй (но не менее важной) задачей экспедиционных работ было развитие и совершенствование методологии и технологии инструментальных морских геофизических наблюдений для исследования физических полей, подводных объектов и экологии в гидросфере.

Материалы и методы исследования

В 131 рейсе научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Водяницкий» были проведены экспедиционные сейсмоакустические работы методом непрерывного сейсмического профилирования (НСП) на участке материковой окраины юго-восточного Крыма. Схема выполненных сейсмоакустических профилей представлена на рис. 1. Их общая протяженность составляет более 337 морских миль.

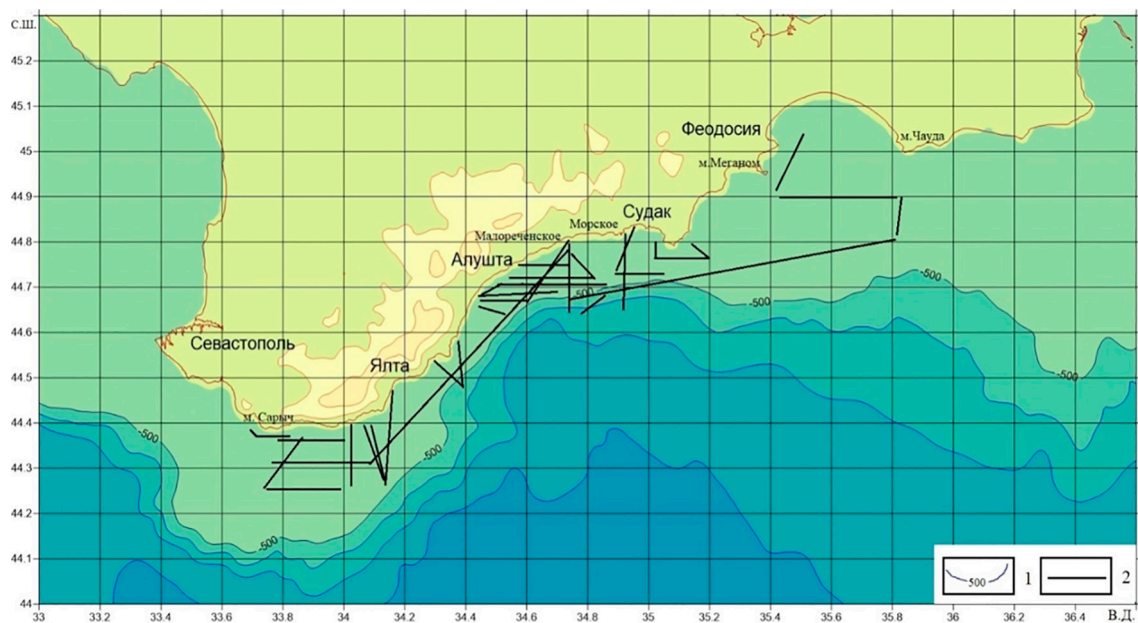


Рис. 1. Схема сейсмоакустических профилей 131 рейса НИС «Профессор Водяницкий»: 1 – изобаты; 2 – линии сейсмоакустических профилей

Метод НСП с применением электроискрового источника хорошо известен и неоднократно описан в литературе [2, 6], в том числе в виде, применяемом авторами в работах на НИС «Профессор Водяницкий» [3], поэтому нет нужды описывать его еще раз. Следует отметить, что условия проведения морских экспедиционных работ летом 2024 г. в прибрежных водах Крыма существенно отличались от условий работы, которые были ранее. Прежде всего, это относится к методике навигационного обеспечения исследований. Если раньше отсутствие корректного приема сигнала средствами космических навигационных систем (КНС) было редким исключением, то в 131 рейсе отсутствие навигационных данных от КНС стало скорее правилом. Это обстоятельство потребовало коренного изменения организации процесса фиксации навигационных данных.

В этих условиях пришлось проводить сбор навигационных данных силами двух отрядов. Отряд гидрофизики Морского гидрофизического института, имеющий большой опыт морских экспедиционных работ у побережья Крыма в современных условиях, собирал навигационные данные от целой группы стационарных и мобильных (носимых) приемников КНС, которые располагались в различных частях судна. Периодически (через 15 мин) производился обход судна для контроля функционирования приемников КНС с фотофиксацией показаний приемников, имеющих дисплей

с индикацией текущих данных. Данные с приемников КНС, не имеющих индикации текущих координат, получали по завершении работ в виде текстового файла с привязкой координат по времени. Так же сохранялся сбор данных судовой навигационной системы в гидрофизической и геофизических лабораториях.

В случаях, когда ни один из приемников КНС не давал достоверных координат, использовалась привязка пути судна методом обратных засечек, с помощью репитеров навигационного судового гирокомпаса, штатно установленных на крыльях мостика НИС «Профессор Водяницкий». Если видимость береговых ориентиров была недостаточной, то использовалась штатная навигационная радиолокационная станция (РЛС) MDC 7012P (при удалении судна от береговой линии). РЛС MDC 7012P работает на частоте 9410 МГц и снабжена антенной RW 701A-06 с горизонтальной поляризацией и углом охвата $1.2^\circ \times 22^\circ$ соответственно в вертикальной и горизонтальных плоскостях.

В этих условиях необходимым элементом навигационного обеспечения съемочных работ является ведение прокладки пути судна на рабочем планшете (навигационной карте). В 131 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» для ведения прокладки пути судна и его архивирования авторами использовалась доступная программа Open CPN 5.2.4 с открытым доступом. Вид рабочего окна программы с примером прокладки выполненных галсов представлен на рис. 2.

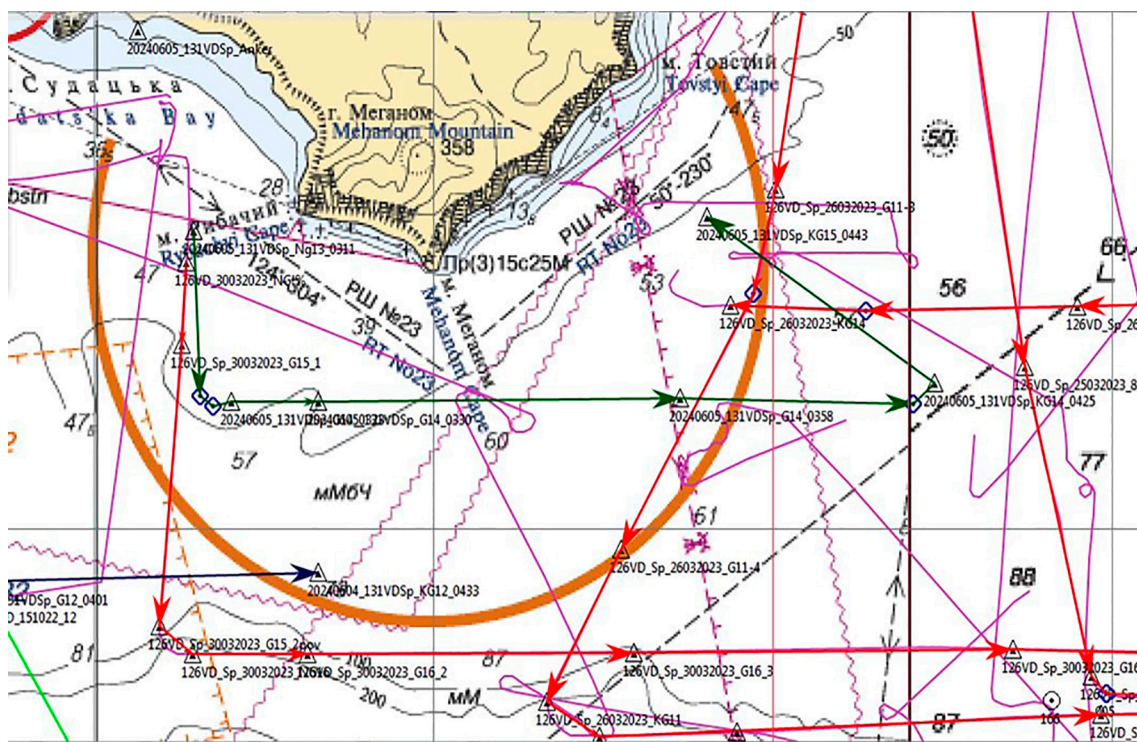


Рис. 2. Пример рабочей навигационной карты с построенной схемой расположения галсов 13–15, выполненных 05.06.2024 (темно-зеленый цвет) в районе м. Меганом. Красным цветом показаны профили, выполненные в предыдущих рейсах, фиолетовым – переходы судна с другими работами

Также возникла необходимость в коррекции вида профилей сейсмоакустического профилирования. В обычных условиях программа сбора и отображения данных выводит геофизический профиль вдоль верхней рамки которого указано время GMT и соответствующие ему координаты, полученные от приемника КНС. В случае если КНС не дает корректных данных, то на профиле будут отсутствовать координаты или они будут указаны неверно.

Для исправления этого недостатка был использован прием, известный в практике гидрографических работ прежних лет как «разноска координат». С помощью этого приема по эхограммам на бумаге определялись координаты характерных точек рельефа. Суть его заключается в интерполировании значений между известными точками определений. В нашем случае для каждого конкретного профиля вычислялись широта и долгота через определенные равные промежутки времени. Результаты этих вычислений наносились в виде соответствующих шкал на сейсмоакустические профили при постобработке данных в программе «Surfer».

На рис. 3 представлен один из полученных профилей с добавленными навигационными данными.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе морских научных исследований на участке от м. Сарыч от м. Чауда, с использованием технологии НСП, подробно рассмотренной в работе [3], были получены материалы, характеризующие строение шельфа и континентального склона. С помощью комплекса САП «Геонт-Шельф» получен большой объем данных, уточняющий уже имеющиеся представления о рельефе дна и строении верхней плейстоцен-голоценовой части осадочной толщи [4, 9, 10]. На сейсмоакустических профилях, выполненных в виде замкнутых полигонов, нашли отражение следующие седиментационные и эрозионные формы:

- аккумулятивные береговые валы;
- прибрежные бары;
- отложения дельт;
- эрозионные врезы и каньоны;
- грязевулканические образования;
- оползневые тела;
- конуса выноса палеорек.

На профиле на широте п. Морское, в интервале 80–120 м, соответствующем верхнеплейстоценовым отложениям, отчетливо выделяются бугристые сейсмофазии высокоэнергетических русловых потоков.

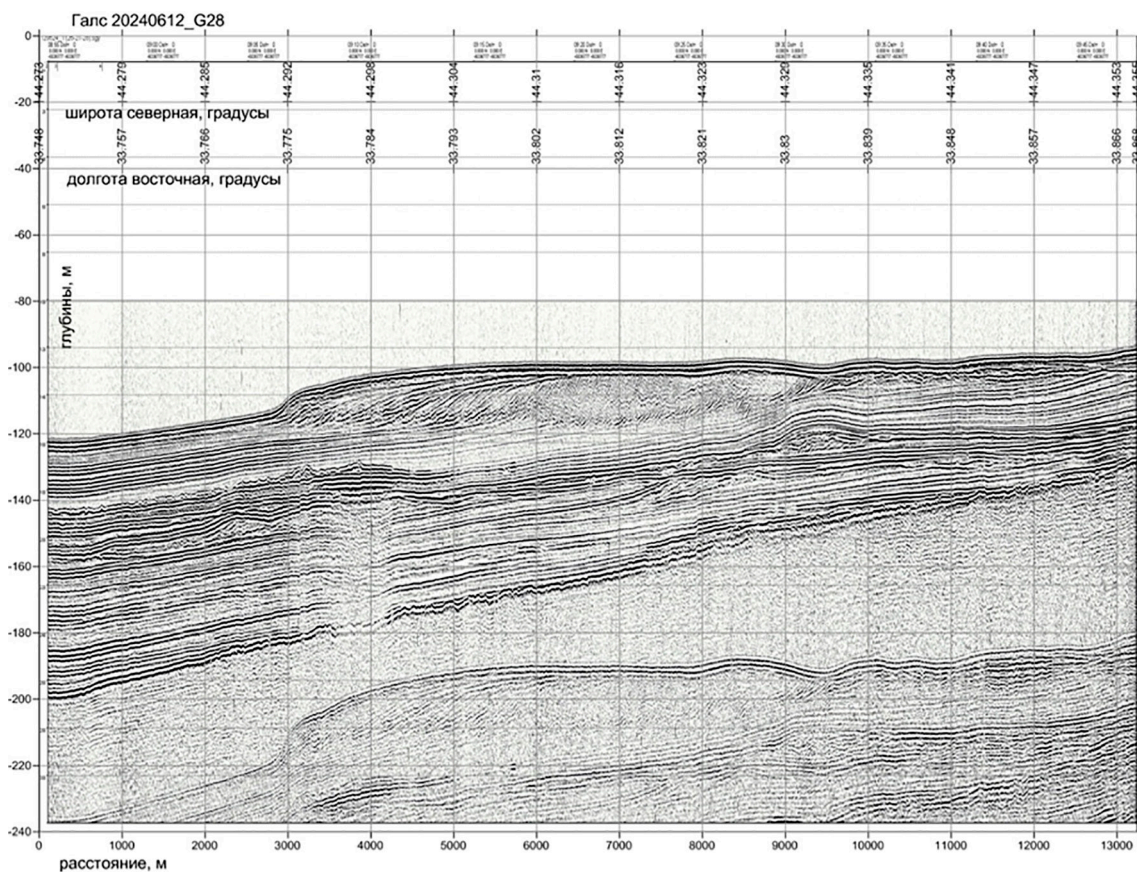


Рис. 3. Пример представления данных сейсмоакустического профилирования после технической постобработки

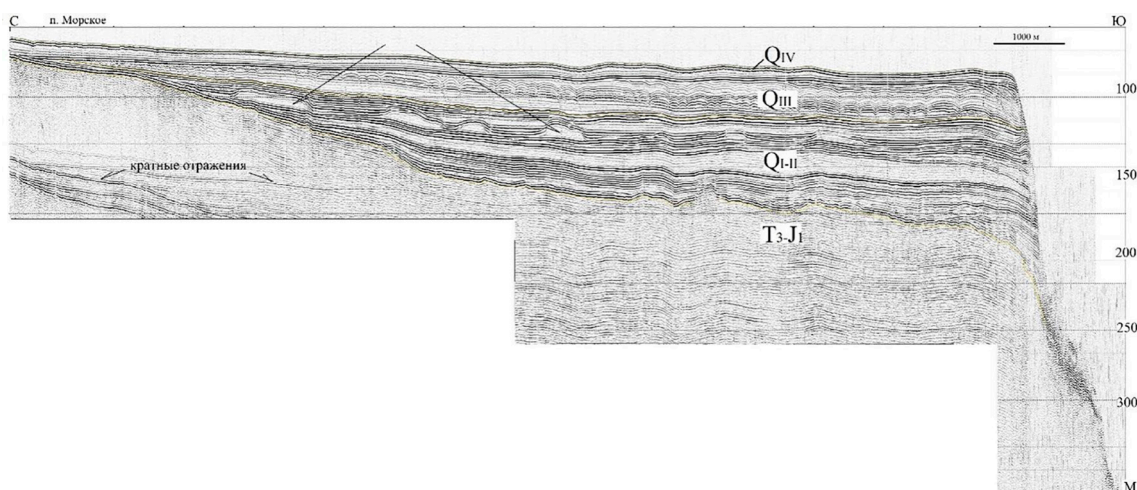


Рис. 4. Фрагмент сейсмоакустического разреза на трассе п. Морское

Ниже по разрезу, в интервале глубин 120–160 м, по характерной осветленной слабослоистой записи, выделяются песчаные скопления палеобаров, отлагавшихся в прибрежных районах среднеплейстоценового морского бассейна, что наглядно представлено на рисунке 4.

В интервале глубин 100–120 м выделяются погребенные формы берегового палеорельефа. В ходе развития голоценовой трансгрессии эти барьерные формы распались на ряд локальных аккумулятивных образований, которые представляют собой серию верхнеплейстоценовых береговых валов.

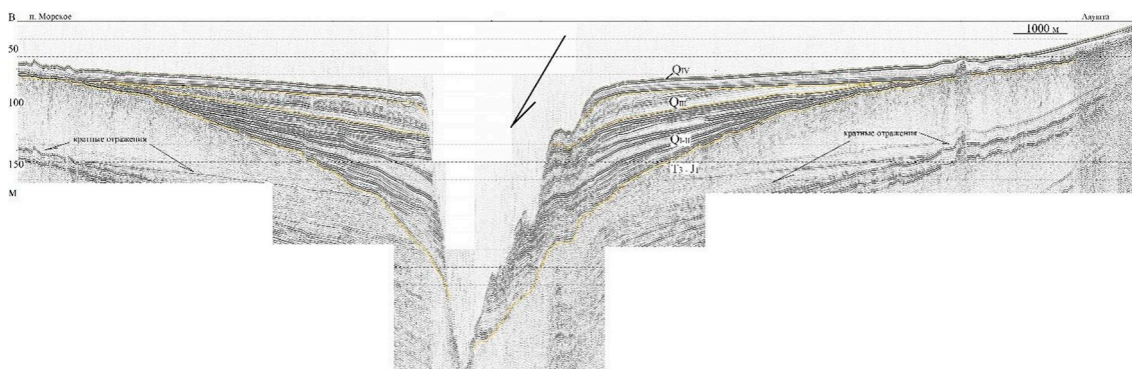


Рис. 5. Сейсмоакустический разрез по линии п. Морское – г. Алушта, пересекающий верховье каньона на траверсе п. Малореченское

На широтных профилях зафиксированы сейсмокомплексы погребенных речных долин, переходящие в русла каньонов с разветвленными верховьями. Русла каньонов пересекают континентальный склон и далее переходят в русла глубоководных долин, направленных на юго-восток в абиссальную котловину (рис. 5).

Изучение особенностей погребенной гидрографической сети и устьевых участков рек Крымского побережья, впадающих в Черное море, позволяет предположить, что их эрозивно-аккумулятивная деятельность претерпела существенные изменения в условиях неоднократных климатических изменений уровня Черного моря за последние 17000–20000 лет. Эволюционную историю бассейна Черного моря от раннего плейстоцена до современности можно проследить по вертикальной смене сейсмических фаций [11]. Аккумулятивные клиноформенные образования соответствуют регрессивным эпохам. Непрерывные протяженные отражения характерны для трансгрессивных межледниковых эпох.

В районе исследования по данным эхолотного, акустического и сейсмоакустического профилирования выделяются участки с интенсивными газопроявлениями [6, 12, 13]. На профиле по линии Судакская бухта – мыс Меганом в прибрежной части выделяется обширный участок около 10 км со скоплением метана. Газовая залежь приурочена к придонным отложениям, предположительно верхнеплейстоценового возраста. Не исключено, что такие скопления образуются вследствие горизонтальной миграции вверх по восстанию слоев из песчаных палеодельтовых отложений. Такие же аномалии фиксируются и в других районах юго-восточного шельфа Крыма, общей численностью более 40 газопроявлений.

Заключение

В результате экспедиционных геофизических работ в юго-восточной части материковой окраины Крыма получен большой объем новых данных о геологическом строении этого района, а именно сейсмоакустические разрезы осадочной толщи и соответствующие им эхолотные профили рельефа дна шельфа и склона. Эти данные органическим образом дополняют данные, полученные авторами в предыдущих рейсах НИС «Профессор Водяницкий». Таким образом, получена новая детальная информация о морфологии рельефа дна и геологическом строении современного осадочного чехла материковой окраины полуострова Крым методами сейсмоакустического профилирования и эхолотирования. При этом продолжено совершенствование средств геофизических исследований на морском шельфе и методики их комплексного использования.

Выполненное сейсмоакустическое профилирование и эхолотирование позволило проследить некоторые ранее не известные особенности реликтовой гидрографической сети, уточнить существующие представления об изменении уровня Черного моря, генезисе и истории формирования заливов Крымского полуострова.

Авторы выражают благодарность морякам НИС «Профессор Водяницкий» и научному составу ИнБЮМ и МГИ за постоянную помощь в работе.

Список литературы

1. Мысливец В.И. Динамика геоморфологических процессов в западной части Южного берега Крыма и антропогенный фактор // Пространство и Время. 2014. № 2 (16). С. 244–253.
2. 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. 2022. С. 295–298. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(1).13.

3. Римский-Корсаков Н.А., Бурдиян Н.В., Пронин А.А., Мутовкин А.Д., Лесин А.В., Тихонова Н.Ф. Технология и результаты геолого-геофизических исследований в 116 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 11. С. 81–86. DOI: 10.17513/mjrfi.13317.

4. Хортов А.В., Римский-Корсаков Н.А., Пронин А.А., Мутовкин А.Д. Сейсмостратиграфические исследования крымского шельфа методом непрерывного сейсмоакустического профилирования // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 512, № 2. С. 295–301. DOI: 10.31857/S2686739723601023.

5. Есин Н.И., Ляпин А.А., Есин Н.В., Шлезингер А.Е. Метод расчета эвстатического хода уровня моря в голоцене по локальным кривым // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение геологии. 2014. Т. 89. Вып. 23. С. 52–60.

6. Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю. Сейсмоакустические исследования при инженерных изысканиях на акваториях // Геофизика. № 3. 2018. С. 10–16.

7. Малахова Т.В., Малахова Л.В., Мурашова А.И., Будников А.А., Иванова И.Н., Краснова Е.А. Мониторинг мелководных сипов у мыса Фиолент (Черное море) // Океанология. 2023. Т. 63, № 1. С. 135–148. DOI: 10.31857/S0030157423010082.

8. Новиков И.С., Борисенко Д.А. Геоморфология и тектоника юго-западного Крыма // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 4. С. 498–513. DOI: 10.15372/GIG2019153.

9. Пасынков А.А., Вахрушев Б.А. Факторы и критерии морфоструктурного районирования и основные типы морфоструктур северо-запада Черного моря // Геоморфология. 2019. № 3. С. 68–82. DOI: 10.31857/S0435-42812019368-82.

10. Пасынкова Л.А. Каньоны континентального склона Черного моря. Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия «География». 2013. Т. 26 (65), № 3. С. 260–266.

11. Хлебникова О.А., Иванова А.А., Никишин А.М., Росляков А.Г., Старовойтов А.В. Анализ гравитационных отложений материкового склона и его подножия в северо-восточной части Черного моря // Вестник Московского университета. Серия «Геология». 2018. № 6. С. 29–36.

12. Шельтинг С.К., Шейков А.А., Прокопцева С.В. О механизмах формирования складчатости и грязевого вулканизма в прогибе Сорокина // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2023. Т. 8, № 3. С. 62–72. DOI: 10.51890/2587-7399-2023-8-3-62-72.

13. Подымов И.С., Подымова Т.М., Есин Н.В. Комплексные исследования геодинамической активности локальных территорий Азово-Черноморского побережья Краснодарского края и версии прогноза экстремальных ситуаций // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 31. С. 47–59. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-1-47-59.