

УДК 551.46.07

## ТЕХНОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В 116 РЕЙСЕ НИС «ПРОФЕССОР ВОДЯНИЦКИЙ»

<sup>1</sup>Римский-Корсаков Н.А., <sup>2</sup>Бурдиян Н.В., <sup>1</sup>Пронин А.А.,

<sup>1</sup>Мутовкин А.Д., <sup>1</sup>Лесин А.В., <sup>1</sup>Тихонова Н.Ф.

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, e-mail: nrk@ocean.ru;

<sup>2</sup>Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, e-mail: ibss@ibss-ras.ru

В статье рассмотрены результаты внедрения технических средств геолого-геофизических исследований на шельфе Восточного Крыма в условиях использования научно-исследовательского океанологического судна ИНБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН «Профессор Водяницкий». Ранее в 2020 г. подобные исследования были выполнены для шельфа Южного Крыма с использованием широкого спектра приборов, использующих различные частотные диапазоны геоакустического зондирования. Опыт исследований показал наибольшую эффективность применения среднечастотной сейсмоакустической аппаратуры, разработки компании «ГеонтШельф», представляющей собой электронисковой излучатель – спаркер – с энергией 600 Дж и короткую сейсмокоу с 20 пьезоприемниками. Отлаженная методика позволила за короткий промежуток выделенного в экспедиции 2021 г. времени выполнить значительный объем работ по сейсмоакустическому зондированию на востоке Крымского шельфа и черноморского шельфа Таманского полуострова. Получен большой объем современных данных по пространственному распределению микро- и мезоформ современного рельефа дна и строению верхней (современной) части донных отложений на участке Феодосия – Керчь. Установлена граница фациальных зон и мощность накоплений терригенного материала в результате зондирования донного грунта с помощью сейсмоакустического профилографа на широтных и меридиональных маршрутах. На основании обработки полевых материалов и анализа опубликованных и фондовых материалов составлена геоморфологическая карта-схема Восточного шельфа полуострова Крым (от Феодосии до Анапы). Получены сейсмоакустические профили отражающих границ в осадочной толще и профили рельефа дна на участках внешнего шельфа от мыса Меганом до Анапы.

**Ключевые слова:** шельф, Крым, осадочная толща, эхолот, сейсмоакустический профилограф, спаркер, подводная разгрузка, углеводороды, пресные воды, затопленная гидрологическая сеть

## TECHNOLOGY AND RESULTS OF GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL RESEARCH AT R/V «PROFESSOR VODYANITSKY» 116 CRUISE

<sup>1</sup>Rimskiy-Korsakov N.A., <sup>2</sup>Burdiyan N.V., <sup>1</sup>Pronin A.A.,

<sup>1</sup>Mutovkin A.D., <sup>1</sup>Lesin A.V., <sup>1</sup>Tikhonova N.F.

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru;

<sup>2</sup>Kovalevskiy Institute of Southern Seas Biology, Russian Academy of Science, Sevastopol, e-mail: ibss@ibss-ras.ru

The article considers the results of the introduction of technical means of geological and geophysical research on the shelf of the Eastern Crimea in the conditions of using the scientific ocean research vessel (R/V) «Professor Vodyanitsky» ruled by the A.O. Kovalevsky Institute of the Russian Academy of Sciences. Earlier in 2020, similar studies were carried out at Southern Crimea shelf by using a wide range of instruments using different frequency ranges of geo-acoustic sounding. Research experience has shown the greatest efficiency of using medium-frequency seismic acoustic equipment developed by GEONTSHELF, which is an electric spark emitter with an energy of 600 J and a short seismic hydrophone with 20 piezo receivers. The well-established methodology made it possible to carry out a significant amount of work on seismic and acoustic sounding in the east of the Crimean Shelf and the Black Sea shelf of the Taman Peninsula in a short period of time allocated in the 2021 expedition. A large volume of up-to-date data on the spatial distribution of micro- and meso-forms of the modern bottom relief and the structure of the upper (modern) part of the bottom sediment strata at the Feodosiya-Kerch site has been obtained. The boundary of facies zones and thickness of the accumulations of terrigenous material as a result of sounding the bottom soil using a seism-acoustic profiler on latitudinal and meridional routes have been established. Based on the processing of field materials and analysis of published and stock materials, a geomorphological map-scheme of the Eastern shelf of the Crimean Peninsula (from Feodosiya to Anapa) was compiled. Seism-acoustic profiles of reflecting boundaries in the sedimentary column and bottom relief profiles on the outer shelf sections from Cape Meganom to Anapa were obtained.

**Keywords:** shelf, Crimea, sedimentary strata, echo sounder, seismoacoustic profiler, sparker, underwater unloading, hydrocarbons, fresh water, flooded hydrological network

Континентальные окраины являются областями накопления огромной массы осадочного материала, сносимого с прилегающей суши. В их пределах выделяются три основные геоморфологические зоны: шельф, континентальный склон и континентальное

подножие. С палеогеографической точки зрения наибольший интерес представляет шельф. К настоящему времени геолого-геоморфологическая изученность материковой отмели Черного моря очень неоднородна. Особенно актуальным является изучение ге-

ологической истории развития речной сети на морских мелководьях и продолжающих ее подводных каньонов, тектонического строения шельфа и глубоководной чаши Черного моря, а также закономерностей литологической дифференциации вещества.

Фрагменты затопленной гидрологической сети на шельфе, часто представляющие собой подводные продолжения заливов побережья, нуждаются в специальном изучении. Как правило, к этим древним руслам рек, а также участкам развития закарстованных и трещиноватых пород приурочены источники субмаринной разгрузки пресных подземных инфильтрационных вод. К тому же ряд проблем трансформации речных долин Крыма может быть решен лишь при использовании результатов изучения их шельфовых продолжений.

В настоящее время существуют общие представления о происхождении шельфа Крыма. Однако многие особенности этого процесса и отдельных явлений пока не ясны и представляют собой крупную научную проблему. Так среди разрывных нарушений шельфа и его обрамления есть сейсмогенерирующие, к которым приурочены места подводной разгрузки углеводородов. В отдельных районах, в том числе на восточном шельфе, сформировались залежи песков, имеющие промышленное значение. При решении этих проблем наряду с традиционными необходимо применять новые методы, а именно высокочастотное акустическое профилирование, сейсмозондирование и гидролокационную съемку.

Таким образом, актуальны детальные геоморфологические и геолого-геофизические исследования шельфа Крыма современными методами, которые позволят решить многие ключевые вопросы развития этого региона.

Главная цель исследований – это познание фундаментальных геологических и океанологических процессов формирования континентальной окраины и их проявлений в современном формировании морских шельфов, в том числе шельфа полуострова Крым [1, 2].

Задачи исследования включают: во-первых, развитие технологии инструментальных океанологических наблюдений для исследования физических полей, подводных объектов и экологии в гидросфере, в том числе разработку методов и технических средств многопараметрического сканирования дна и подводных объектов буксируемыми необитаемыми подводными аппаратами (БНПА), в частности гидролокаторами бокового обзора, акустическими и сейсмоакустическими профилографами,

во-вторых, получение новых геолого-геоморфологических данных по истории развития шельфа полуострова Крым, необходимых для восстановления малоизученных этапов палеогеографической истории формирования континентальной окраины Крыма в новейшее время, которые позволят уточнить существующие представления об изменении уровня Черного моря, в-третьих, получение новых геолого-геоморфологических данных по палеогеоморфологии шельфа полуострова Крым, которые позволят уточнить положение древней гидрографической сети и установить связи береговых и субаквальных морфоструктур.

Технически выполнение задач исследований включало: эхолотный промер и сейсмоакустическое зондирование шельфа, для промера глубин и получения изображений структуры верхнего слоя осадочных отложений в виде разрезов вдоль маршрута движения судна.

#### Материалы и методы исследования

На втором этапе исследований в 2021 г. было запланировано проведение экспедиционных океанографических и геофизических работ на участке материковой отмели Восточного Крыма от мыса Меганом до Керченского пролива и составление палеогеоморфологической карты-схемы дна на участке материковой отмели восточного Крыма.

Экспедиционные работы на этом этапе были выполнены в 116 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» в период с 22 апреля по 17 мая 2021 г. (26 суток). Маршрут экспедиции представлен на рис. 1. На маршруте точками с номерами обозначены места станций. На маршруте постоянно велась батиметрическая съемка с помощью судового эхолота. Общая протяженность эхолотного промера 434 морские мили. На выбранных участках маршрута движения судна велось акустическое и сейсмоакустическое профилирование верхней осадочной толщи. Профили геофизической съемки отмечены на схеме жирной красной линией. Их общая протяженность 235 морских миль.

Информация о структуре осадочной толщи и положении коренного фундамента позволяет понять строение современного шельфа [3–5]. Эту информацию наиболее эффективно получают с использованием технологий акустического и сейсмоакустического профилирования. В геолого-геофизических исследованиях 116 рейса НИС «Профессор Водяницкий» использовался комплекс геоакустической аппаратуры, оптимизированный для работ на шельфе с борта этого судна, состав и характеристики которого подробно рассмотрены в работах [6, 7].

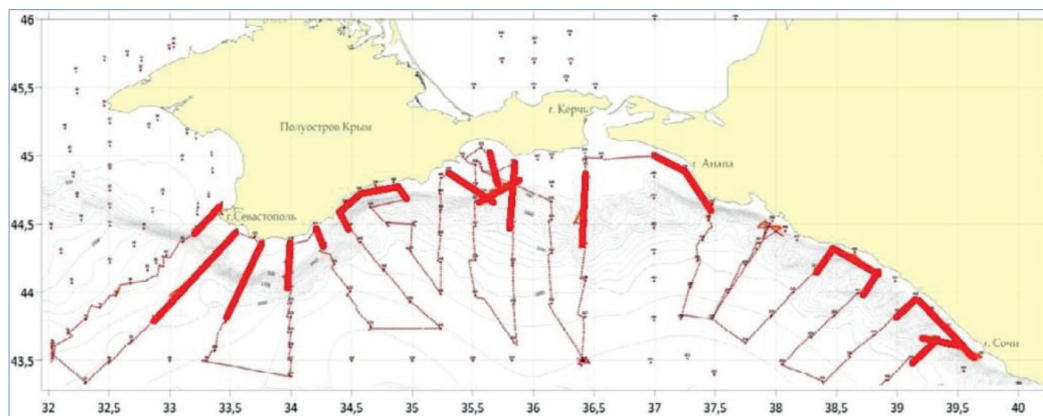


Рис. 1. Маршрут экспедиции 116 рейса НИС «Профессор Водяницкий». Жирными красными линиями выделены участки маршрута, на которых велось сейсмоакустическое профилирование

Ядром комплекса является сейсмоакустический профилограф «ГеонтШельф» – «спаркер» – с рабочим диапазоном частот 20–1200 Гц. Для промера глубин и получения профилей рельефа дна на маршруте используется судовая эхолот FURUNO-FCV-2100L. Для акустического профилирования верхней толщи рыхлых осадочных отложений – акустический профилограф АП-5Т с приемно-излучающим блоком «Chirp II» фирмы DATASONICS, имеющий центральную рабочую частоту 5 кГц. Для координатно-временной привязки собираемой информации на НИС «Профессор Водяницкий» используются две дублирующие друг друга навигационные системы: FURUNO GPS Navigator GP-80 и KODEN GPS/ГЛОНАСС навигатор KGP-925.

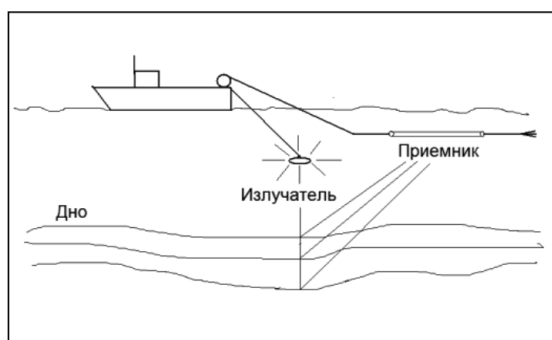


Рис. 2. Схема реализации метода отраженных волн (МОВ)

Сейсмоакустический профилограф (САП) ГЕОНТ-ШЕЛЬФ – «спаркер» – предназначен для получения сейсмической информации о стратификации донных осадков при геологических изысканиях на аквато-

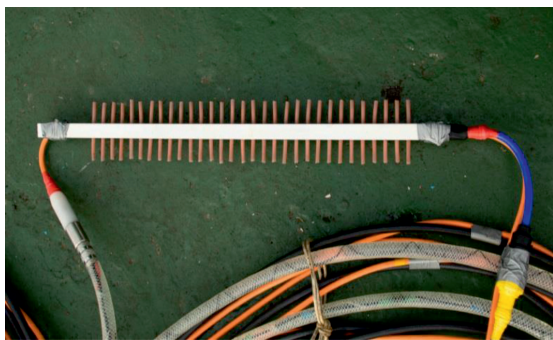
риях. Различают электроискровой источник НЧ сейсмических сигналов («спаркер») и сейсмоакустический источник «буммер» для ВЧ съёмки морского дна. Приемно-передающая аппаратура на борту судна периодически запускает источник сейсмических или акустических колебаний. Приемник (сейсмическая коса) принимает сейсмические сигналы, отраженные от дна и ниже лежащих осадочных слоев и передает данные для записи на борт в регистратор. Этот процесс иллюстрируется схемой на рис. 2.

Сейсмоакустические сигналы проникают в донный грунт на глубину, соответствующую излучаемой прибором мощности. Чем больше энергия сигнала, тем глубже сигнал проникает в грунт. При этом сигнал отражается от границ раздела осадочных слоев или твердого основания, которые сильно отличаются друг от друга по акустическому сопротивлению  $\rho c$  – произведению плотности пород на скорость распространения в ней звука. Метод изучения стратификации горных пород, основанный на этом свойстве, называется методом отраженных волн (МОВ). Важным понятием этого метода является сейсмическая трасса, которая представляет собой результат однократного излучения и цикла приема сигналов, отраженных от границ раздела в толще осадков дна акватории. В процессе регистрации на самописце или мониторе ПЭВМ сейсмотрассы в виде строк переменной яркости образуют изображение разреза осадочной толщи или сейсмический профиль. С борта НИС «Профессор Водяницкий» в 2021 г. использовался аппаратный комплекс САП, включающий многоэлектродный сейсмический излучатель МСИ-600, буксирруемая приемная сейсмическая коса СК-1-12, буксировочное устройство «выстрел», сейс-



мический накопитель энергии (СНЭ) SPES-600, модуль приема, отображения и регистрации данных.

На рис. 3 приведена фотография излучателя МСИ-600, который соединяется с силовым кабелем «спаркера» через высоковольтный разъем (на рис. 3 разъем изолирован серой клейкой лентой). Центральная жила высоковольтного кабеля (РК50 13-12) соединяется с 31 потенциальным электродом. Конструктивно они образуют 62 разрядные точки спаркера. Многоэлектродный излучатель монтируется рядом с головной муфтой сейсмокосы. Этим обеспечивается равенство ( $t = 0$ ) приемника и излучателя. ( $t = 0$ ) – начальный момент запуска сейсмотрассы. Дифференциальная схема входного каскада приемного усилителя с большим коэффициентом подавления синфазного сигнала позволяет избежать влияния сигнала высоковольтного кабеля излучателя на работу приемной антенны.



*Рис. 3. Многоэлектродный сейсмический излучатель МСИ-60 с электроразъемом (синий кабель). Внизу справа сейсмокоса (светлый шланг), высоковольтный кабель излучателя (черный) и кабель косы (оранжевый) уложенные шлагами на палубе судна*

Приемная коса СК-1-12 с кабелем закрепляется через короткий поводок к концевому блоку сейсмического «выстрела». Концевой блок «выстрела» позволяет перемещать буксировочный кабель (точку подвески) излучателя и приемной антенны к борту для подъема косы на борт судна или спуска для сейсмической съемки. Коса состоит из полиуретанового шланга диаметром 25 мм (рис. 3) и 20 пьезоприемников, расположенных через 40 см друг от друга в средней части антенны. Длина косового шланга 12 м. Головная и концевая муфты герметизируют содержимое косы (пьезоприемники), залитой жидким медицинским вазелиновым маслом. Буксировочный стабилизатор длиной 8 м скреплен с концевой муфтой и сделан из капронового фала с па-

русом (пустая пластиковая бутылка) на конце. Помимо облегчения спуско-подъемных операций «выстрел» по правому борту необходим для отвода сейсмокосы из турбулентного потока в кильватерной струе и уменьшения шумов буксировки. Длина его отвода от борта 6 м. «Выстрел» сварен из трубы диаметром 57 мм. Устойчивое положение устройства, в том числе при буксировке косы, достигается тремя оттяжками из капронового фала. Такие оттяжки наиболее эффективно гасят вибрацию судовых конструкций.

Накопитель (СНЭ) SPES-600, входящий в состав бортовой аппаратуры комплекса САП, состоит собственно из накопителя и контрольно-управляющей схемы. СНЭ предназначен для накопления на конденсаторах высоковольтной электрической энергии и последующего быстрого ее разряда в электроискровой или электродинамический излучатель, которые в свою очередь формируют в водной среде упругие колебания и волны для сейсмических исследований на акваториях, в том числе методом МОВ.

В регистрирующем тракте Комплекса САП ключевым звеном является устройство PSA-1, которое предназначено для ввода сейсмических сигналов в персональный компьютер и для управления работой сейсмического источника при одноканальных исследованиях методом НСП. Вместе с ПЭВМ, подключаемой через интерфейс USB и специализированным программным обеспечением, устройство представляет собой систему сбора данных комплекса САП. Устройство PSA-1 выполняет: усиление сейсмического сигнала, поступающего с сейсмической косы в соответствии с законом ВАРУ; частотную фильтрацию сигнала с помощью программируемых ФНЧ и ФВЧ, программную регулировку усиления, формирование импульса запуска сейсмического источника, контроль работоспособности тракта регистрации с помощью встроенного генератора, аналого-цифровое преобразование сигнала, передачу данных в ПЭВМ по интерфейсу USB.

Методически процесс морских геолого-геофизических исследований протекает следующим образом. В зависимости от задачи исследования выбирается направление галсов маршрута сеймопрофилирования. Если стоит задача поиска и исследования погребенных форм древней гидрологической сети и каньонов, то галсы закладываются вдоль берега параллельно изобатам. Если ведется поиск и исследование тектонических структур и древних береговых линий и если исследуются механизмы гравитаци-

онного переноса терригенного материала, то направление галсов выбирается в крест береговой линии поперек изобат. Далее подбирается оптимальная глубина буксировки источника и приемника сейсмических сигналов. Эта глубина должна равняться четверти длины волны излучаемого импульса давления при выбранной постоянной скорости движения судна. Практически скорость судна на галсе постоянно меняется, поэтому периодически необходимо контролировать форму сигналов, наблюдая их на экране осциллографа, и подправлять скорость буксировки через вахтенного штурмана. Для приемной сейсмической антенны скорость движения выбирается по минимальным шумам буксировки. В нашем варианте излучатель «спаркера» и кабель у головной муфты сейсмокосы были сведены практически в одну точку, кабели приемника и излучателя были соединены параллельно и буксировались на одной глубине. На буксировочном кабеле выбирается только точка подвески к «выстрелу» для получения неискаженной синусоидальной формы импульса излучения и отраженных сигналов. В нашем случае для глубин не более 200 м и скорости судна не более 8 узлов, после выполнения пробной записи НСП, были приняты следующие параметры сейсмопрофилирования: энергия излучения не более 600 Дж, диапазон фильтрации 60–1200 Гц, период излучения 1 с, усиление 2000, время регистрации 600 мс.

В процессе морских научных исследований на участке материковой отмели Восточного Крыма от мыса Меганом до Керченского пролива и далее до Анапы с использованием рассмотренной технологии сейсмопрофилирования были получены важнейшие материалы и результаты, характеризующие строение шельфа. Были проведены экспедиционные океанографи-

ческие и геофизические работы на Восточном шельфе полуострова Крым (рис. 1–2), при этом получен большой объем современных данных по пространственному распределению микро- и мезоформ современного рельефа дна и строению верхней (современной) части толщи донных отложений на участке Феодосия – Керчь, которые позволяют уточнить существующие представления об изменении уровня Черного моря, генезисе и истории образования заливов полуострова Крым и в конечном счете восстановить малоизученные этапы палеогеографической истории формирования континентальной окраины Крыма в новейшее время. Далее, была установлена граница фациальных зон и мощность накоплений терригенного материала в результате зондирования донного грунта с помощью акустического профилографа на маршрутах (рис. 1) и установлены поверхностные границы песчаных и илистых донных отложений, обнаружены выходы коренных пород и локальные понижения рельефа, заполненные илами в процессе геофизической съемки на маршрутах (рис. 1). По данным сейсмоакустического зондирования на Восточном шельфе полуострова Крым получены сейсмоакустические профили отражающих границ в осадочной толще и профили рельефа дна на участках внешнего шельфа. На рис. 4 представлено изображение разреза осадочных отложений внешнего шельфа на меридиональном маршруте в сторону Керченского пролива (см. схему на рис. 1), полученное с помощью комплекса САП «Геонт-Шельф». На рис. 5 представлена геоморфологическая карта-схема Восточного шельфа полуострова Крым (от Феодосии до Анапы), составленная на основании обработки полученных в экспедиции полевых материалов и анализа опубликованных и фондовых материалов.

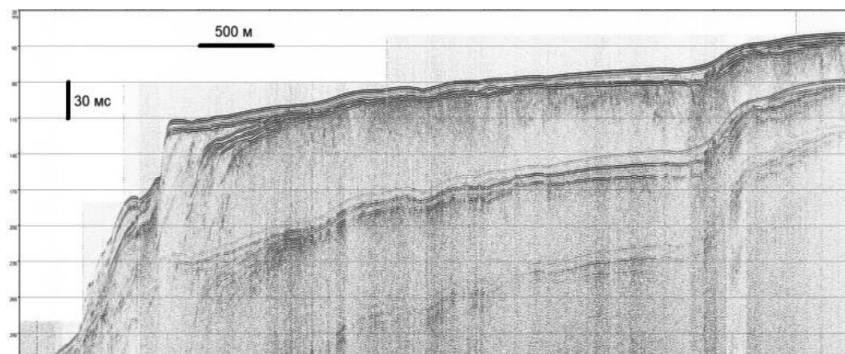


Рис. 4. Изображение разреза осадочных отложений внешнего шельфа на меридиональном маршруте в сторону Керченского пролива (см. схему на рис. 1), полученное с помощью комплекса САП «Геонт-Шельф»

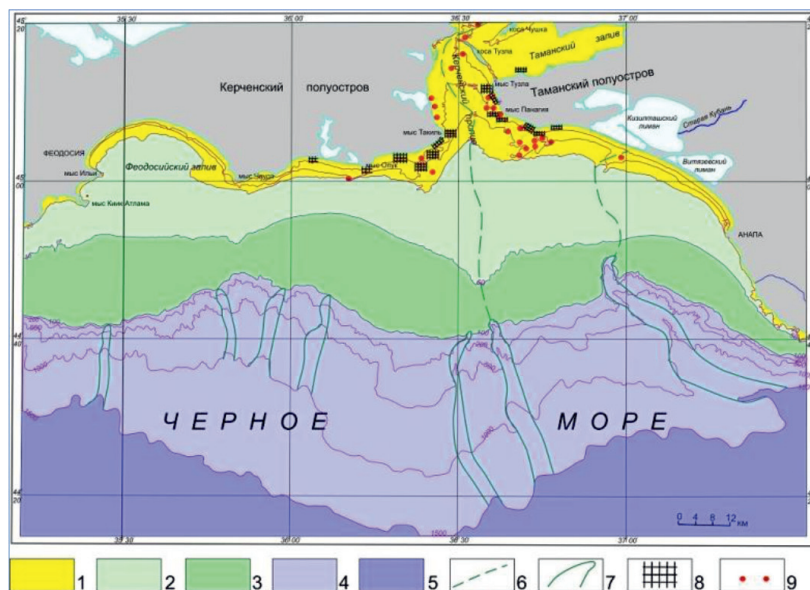


Рис. 5. Геоморфологическая карта-схема шельфа Восточного Крыма (составлена В.Н. Кортаевым). На рисунке обозначено: 1 – береговая отмель, 2 – подводная терраса (15 м, новозексинская), 3 – подводная терраса (40 м, еникальская), 4 – материковый склон (100–1500 м), 6 – реликтовые подводные долины, 7 – подводные каньоны, 8 – каменистые бенчи, 9 – скалистые выступы (банки)

### Заключение

В результате экспедиционных океанографических и геофизических работ на участке материковой отмели Восточного Крыма и частично на Кавказском побережье получены современные данные о геологическом строении этого района, а именно сейсмоакустические разрезы осадочной толщи и эхолотные профили рельефа дна, участков преимущественно глубоководной части шельфа. Таким образом, получена новая детальная информации о морфологии рельефа дна и геологическом строении современного осадочного чехла шельфа полуострова Крым и побережья Кавказа методами комплексного дистанционного геоакустического площадного зондирования, профилирования и эхолотирования. При этом продолжено совершенствование средств геофизических исследований на морском шельфе и методики их комплексного использования. Усовершенствованы сетевые решения передачи и хранения геофизических и навигационных данных.

Полученные данные позволят повысить эффективность планирования инженерных изысканий на шельфе Крыма, достоверно оценить воздействие процессов строительства техногенных морских объектов (причалов, морских платформ, дамб, траншей, карьеров, подводных кабелей и трубопроводов, намытых пляжей) на экологию шельфа,

а также эффективно ликвидировать негативные последствия таких процессов.

Работа выполнена в рамках государственных заданий (темы № 0128-2021-0010, № 0128-2021-0005, № 0128-2021-0004, № 0827-2021-0004 и № 0828-2021-0005) при поддержке РФФИ (проект № 20-05-00384 «А»).

### Список литературы

1. Шнюков Е.Ф., Иноземцев Ю.И., Лялько В.И., Дублянский В.Н., Сиденко О.Г., Митин Л.И. Геология шельфа УССР. Твердые полезные ископаемые. Киев: Наук. Думка, 1983. 200 с.
2. Зенкович В.П. Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Т. II (Северо-западная часть). М.: Изд-во АН СССР, 1960. 215 с.
3. Мысливец В.И. Динамика геоморфологических процессов в западной части Южного берега Крыма и антропогенный фактор // Пространство и время. 2014. № 2. С. 244–253.
4. Порохов А.В., Мысливец В.И., Зинько В.Н., Зинько А.В., Гайнанов В.Г., Зверев А.С. Развитие рельефа побережья Керченского пролива в районе мыса Камыш-Бурун в позднем голоцене (по данным геологическим и сейсмоакустическим исследованиям) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. № 2. 2014. С. 41–48.
5. Сенин Б.В., Леончик М.И., Хортов А.В. Новые данные о глубинной структуре Черноморской впадины // Актуальные проблемы развития ТЭК регионов России и пути их решения: сборник трудов научной конференции. ГНЦ Южморгеология, Геленджик, 2013. С. 125–128.
6. Римский-Корсаков Н.А., Бурдяна 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.
7. Лесин А.В., Анисимов И.М. Судовое обеспечение геоморфологических исследований на шельфе полуострова Крым // Современные методы и средства океанографических исследований: матер. XVII Международ. научно-технической конференции. М.: Изд. ИО РАН, 2021. Т. 1. С. 232–236.