СТАТЬИ

УДК 551.46.077(477.75)

**ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ ПОЛУОСТРОВА КРЫМ**^{1,2}**Римский-Корсаков Н.А., ¹Пронин А.А., ¹Анисимов И.М.**¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: nrk@ocean.ru;*²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

В работе исследованы аспекты комплексирования и применения современных технических средств для региональных исследований строения континентальной окраины Черного моря в районе западного побережья полуострова Крым. Поскольку исследования шельфа полуострова Крым и публикации на эту тему были сделаны более 25–30 лет назад и направлены на изучение глубокой части геологического разреза шельфа и нефтегазовых аспектов, в настоящее время необходимо проводить изучение шельфа современными методами и повышенное внимание уделить последним этапам его развития, запечатленным в рельефе, донных отложениях и верхней части геологического разреза. Нуждаются в специальном изучении фрагменты затопленной гидрологической сети на шельфе, часто представляющие собой подводные продолжения заливов побережья. Некоторые вопросы развития речных долин Крыма могут быть решены лишь при использовании результатов такого изучения. Методология исследования морфологии современного рельефа шельфа Крымского полуострова основана на использовании новейшей инструментальной технологии морских исследований, разработанной в Институте океанологии им. Ширшова РАН в Лаборатории гидролокации дна. Данная технология включает методы, основанные на комплексном использовании таких технических средств, как сейсмоакустический профилограф (AP / ChirpSonar), гидролокатор бокового обзора (SeaFox / YellowFin), GPS-приемник (Sigma G3T) и др.

Ключевые слова: шельф, морфология рельефа, гидрологическая сеть, Крым, гидролокатор, эхолот, сеймопрофилограф, космическая навигация

**WESTERN CRIMEAN SHELF GEOLOGICAL-GEOMORPHOLOGICAL
INSTRUMENTAL RESEARCH TECHNOLOGY**^{1,2}**Rimskiy-Korsakov N.A., ¹Pronin A.A., ¹Anisimov I.M.**¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru;*²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

The paper studies the aspects of the integration and application of modern technical equipment for regional studies of the continental margin structure of the Black Sea near the western coast of the Crimean peninsula. Crimean peninsula shelf studies and publications on this topic were made more than 25–30 years ago and were aimed at studying the deep part of the geological section of the shelf and oil and gas aspects. Though it is currently necessary to study the shelf using modern methods and pay more attention to the last stages of its development, captured in relief, bottom sediments and the upper part of the geological section. Fragments of a flooded hydrological network on the shelf, often representing underwater extensions of coastal bays, need special study. Some issues of the development of Crimean river valleys can be resolved only by using the results of such a study. The methodology for the Crimean peninsula shelf modern topography research is based on the use of newest instrumental marine research technology developed at the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences in the Bottom Sonar Research Laboratory. This technology includes methods based on the integral use of such technical means as acoustic seismic profiler (AP/ChirpSonar), side-scan sonar (SeaFox/YellowFin), GPS-receiver (Sigma G3T), etc.

Keywords: shelf, relief morphology, hydrological network, Crimea, sonar, echo sounder, seismic profiler, satellite navigation

Исследования шельфа полуострова Крым и публикации были сделаны более 25–30 лет назад [1, 2]. В их основе лежит большой фактический материал, но они в основном были направлены на изучение достаточно глубокой части геологического разреза шельфа и преимущественно носили нефтегазовый поисковый характер. При этом использовались технологии глубинного сейсмозондирования и отбор проб гравитационными отборниками кернов. С одной стороны, достигались внушительные глубины зондирования, но при этом терялась

информация о тонкой структуре поздних четвертичных отложений и современной морфологии поверхности дна. В этой связи актуально изучение шельфа современными методами, причем особый интерес представляют последние этапы его развития, запечатленные в рельефе, донных отложениях и верхней части геологического разреза [3].

Целью настоящей работы является формирование и обоснование современной комплексной технологии для эффективного исследования морфологии рельефа поверхности дна и детальной структуры верхнего

слоя рыхлых осадочных отложений. Разработка такой технологии и принципов ее построения определяется необходимостью решения фундаментальной научной проблемы океанологии и морской геологии по изучению строения и истории формирования континентальной окраины, в частности шельфа полуострова Крым.

Для достижения цели исследования требуется решить такие основные задачи, как эхолотный промер материковой отмели Крыма, гидролокационное картирование дна и сейсмоакустическое зондирование шельфа, что позволит в том числе восстановить положение древней речной сети и определить связи береговых и субаквальных морфоструктур.

Материалы и методы исследования

В процессе исследований на шельфе полуострова Крым в 2017–2019 гг. группой сотрудников ИОРАН и МГУ выполнялись три основных вида инструментальных наблюдений: эхолотный промер глубин, гидролокационная съемка поверхности дна и сейсмоакустическое зондирование верхней толщи осадочных отложений.

Основная задача эхолотного промера – регистрация регулярных форм рельефа дна и аномальных геоморфологических явлений, выраженных в деформациях поверхности донного грунта. Регулярные формы рельефа – песчаные гряды, волны и рифели, а также гравийные и песчаные полосы – свидетельствуют о наличии придонных течений и позволяют наблюдать и оценивать интенсивность процессов переноса осадков на шельфе и мелководье. Перенос осадков, в свою очередь, позволяет судить о характере ветрового и внутреннего волнения, сгонно-нагонных явлений и других, в том числе суточных, перемещений водных масс. Локальные формы рельефа, как правило, связаны либо с выходами коренных пород, либо с проявлением глубинных тектонических нарушений в структуре поверхностных осадочных пород. Таким образом, эхолотный промер является основным инструментом геолого-геофизических и геолого-геоморфологических исследований.

Для исследований на шельфе Крыма в 2017–2019 гг. использовались цифровые эхолоты фирмы Lawrence Mark 4 Chirp и LMS-350 американской фирмы Lawrence. Mark 4 Chirp – современная модель портативного (шлюпочного) эхолота с рабочими частотами 50, 83 и 200 кГц, максимальным рабочим диапазоном 300 м, со встроенным приемником GPS и функцией карт-плоттера, процессором для онлайн-корреляционной

обработки частотно-модулированных посылок и последовательным интерфейсом, позволяющим транслировать данные промера глубин и навигационной привязки в формате NMEA для ввода в ПЭВМ. Несложные действия в рамках программного обеспечения MS XL позволяют преобразовать последовательность строк формата NMEA к табличному виду X, Y, Z, T, где столбцы содержат соответственно значения широты, долготы, глубины и времени ее измерения для каждого момента излучения зондирующего сигнала эхолота. Файлы с табличными данными используются для построения батиметрических карт и профилей поверхности дна, например с помощью программного обеспечения Surfer Golden Software. На рис. 1 представлена схема маршрутов геолого-геофизической инструментальной съемки (ГБО, АП, эхолот) на шельфе Западного Крыма в 2019 г., а на рис. 2 – профиль поверхности дна, снятый вдоль маршрута 1, проложенного в западном направлении от устья канала, соединяющего озеро Донузлав с морем. На профиле видно резкое уменьшение глубин, связанное с выходами коренных скальных пород в южной части полуострова Тарханкут.

Эхолотный промер позволяет с большой точностью измерять глубины, но для детального отображения морфологии рельефа дна требует проведения съемок по сгущенной сетке галсов, что влечет за собой огромные затраты судового времени.

Проблема решается с помощью обзорной площадной съемки поверхности дна методом гидролокации бокового обзора (ГБО), при которой за один проход имеется возможность обозреть полосу шириной до 1000 м с детальностью до 10–50 см, чего вполне достаточно для понятия природы происхождения форм мезорельефа. Таким образом, ГБО позволяет определить характер рельефа и пространственное положение форм рельефа, а эхолот – определить вертикальные размеры форм.

Для исследований морфологии рельефа дна шельфа полуострова Крым использовался в основном трехчастотный (250, 300 и 600 кГц) ГБО «YellowFin» канадской фирмы Imagenex, с максимальной шириной общей полосы обзора до 600 м и тональным зондирующим сигналом длительностью 0,5/0,05 мс. Генерация зондирующих сигналов и первичная цифровая обработка информации ГБО осуществляется на борту подводного носителя; передача данных, электропитания и команд управления осуществляется по многожильному кабель-тросу (интерфейс Ethernet) с грузонесущим элементом из кремний-органического волокна.

Рис. 1. Схема движения судна в процессе геолого-геофизической инструментальной съемки на западном шельфе полуострова Крым в 2019 г.

Рис. 2. Профиль поверхности дна, снятый при прохождении маршрута 1 (рис. 1)

Сбор и представление информации осуществляется на ПЭВМ с использованием оригинального программного обеспечения YellowFin v2.015, а также с помощью оригинальной цифровой системы РАСТР [4], программ «ЭхоГраф», ВинРАСТР и DeepView. На рис. 3 приведено изображение поверхности дна, покрытого ракушей с выходами подстилающих глин в окрестности пересыпи озера Донузлав.

Таким образом были получены современные данные о рельефе и характере поверхности дна на шельфе полуострова Крым, в том числе в районе западного побережья.

Однако для полного понимания строения континентальной окраины требуются данные о структуре слоев осадочных пород и коренного фундамента. Поэтому сейсмоакустическому профилированию толщи донных отложений было уделено особое внимание. В процессе представленных исследований в 2017–2019 гг. для этих целей наиболее эффективно использовался комплекс геофизической аппаратуры, составленный из импортных и отечественных элементов. Для формирования и приема зондирующих сигналов использовался блок Chirp-II производства американской компании Datasonics, позволяющий из-

лучать частотно-модулируемые (ЧМ) сигналы в диапазоне от 12 до 3, 5 кГц. Блок был адаптирован для работы с буксируемой антенной АП-5 – акустического профилографа разработки ИО РАН. Буксируемая антенна АП-5 включает два кольцевых секционированных армированных пьезо-керамических преобразователя (изделие «Коршун»), установленных в «мягкие» конусные отражатели из пенопласта, которые помещены в обтекаемый корпус. Корпус оснащен рамным узлом подвески («водило»), носовым балансировочным грузом и кормовым стабилизатором, что вкупе со-

ставляет носитель, который может буксироваться на кабель-тросе до глубин 300 м. Фотография буксируемого антенного носителя представлена на рис. 4.

Для сбора информации сейсмоакустического профилирования в процессе зондирования осадочных отложений использовалось программное обеспечение (ПО) реального времени фирмы Datasonics, входящее в комплект блока «CHIRP-II». Подготовка данных для обработки стандартными пакетами осуществлялась с использованием ПО «KRAVCH-1», созданного в Лаборатории сейсмостратиграфии ИО РАН.

Рис. 3. Гидролокационное изображение поверхности дна, полученное на галсе 6 (рис. 1) при подходе к пересыпи озера Донузлав с запада на глубине 20 м с помощью гидролокатора бокового обзора «YellowFinn» (диапазон – 200 м на каждый борт). Выделяются темные пятна, соответствующие илистому грунту на светлом фоне, соответствующем грубозернистому осадочному дну, покрытому ракушей

Рис. 4. Акустический буксируемый носитель антенны профилографа АП-5Б

Рис. 5. Изображение проявлений тектонических и экзогенных рельефообразующих процессов, полученное с помощью акустического профилографа АП5/Chirp-II (Западный Крым, мыс Луккул): слева – выклинивание донных осадков, в центре – осадочные «карманы» и справа – разрывные нарушения осадочной толщи

В работах [5, 6] рассмотрены результаты использования гибридного АП, в составе буксируемой антенны, разработки Лаборатории гидролокации дна ИО РАН (рис. 4), и электронного приемно-передающего блока «CHIRP-II», использующего частотно-модулированные зондирующие сигналы, для исследования структуры осадочных отложений на полуострове Крым.

На рис. 5 представлена запись изображения структуры осадочных отложений в районе м. Луккул на западном шельфе полуострова Крым. Качество записи и научные выводы в работе [6] свидетельствуют о высокой эффективности совместного использования электронного блока Chirp-II и современной акустической антенны, разработанной в ИО РАН.

Важной технологической частью работ являлось навигационное обеспечение эхолотного промера и геофизических съемок. Для этих целей использовался дифференциальный приемник космической навигации Javad SIGMA, функционирующий на базе спутниковых группировок GPS и ГЛОНАСС. Этот высококачественный приемник обеспечивает точность привязки данных до 2 м в радиусе действия региональных поправочных станций. Такие станции имеются, как правило, в крупных морских портах типа Севастополя, Феодосии и Керчи и имеют радиус действия до 200 км. Данные о местоположении судна из приемника поступают в комплекс сбора и обработки информации, где накапливаются и комплексуются, в соответствии с единым временем, с данными промера глубин,

гидролокационной съемки и зондирования донных отложений.

Результаты исследования и их обсуждение

За период 2017–2019 гг. временным коллективом ученых и инженеров Лаборатории гидролокации дна (ЛГД) Института океанологии им. П.П. Ширшова (ИО) РАН и географического факультета (геофак) МГУ им. М.В. Ломоносова в рамках проекта РФФИ № 17-05-41041_Рго, а затем № 20-05-00384 «А» был выполнен ряд исследований морфологии рельефа дна и поддонных структур шельфа полуострова Крым, а именно:

- организованы и проведены три морские экспедиции по исследованию внутреннего шельфа Крыма;
- составлены геоморфологические карты Восточного и Западного шельфов Крыма;
- составлены грунтовые карты Восточного и Западного шельфов Крыма;
- по материалам сейсмоакустического зондирования составлены геолого-литологические профили дна Восточного и Западного шельфов Крыма;
- по материалам эхолотных промеров составлены профили дна шельфа Крыма;
- по материалам полевых работ и научных публикаций составлены геолого-геоморфологические описания берегов и дна Восточного и Западного шельфов Крыма.

Для исследования геологического строения, в том числе рельефа дна и донных отложений шельфа Восточного Крыма, была разработана и обоснована современная комплексная технология инструменталь-

ных исследований морфологии рельефа поверхности дна и детальной структуры верхнего слоя рыхлых осадочных отложений. Применялись также традиционные картографические и геолого-геоморфологические методики.

В результате использования представленной технологии был накоплен большой массив натурных данных по пространственному распределению микро- и мезоформ подводного рельефа и строению современной (верхней) части толщи донных отложений внутреннего шельфа (до глубины 50 м) Восточного и Западного Крыма. Результаты обработки материалов натурных исследований изложены в работах [5, 6].

Так, для побережья Восточного Крыма характерной особенностью береговой линии является ее чрезвычайная изрезанность, приводящая к формированию обособленных абразионно-аккумулятивных систем, приуроченных к бухтам в устьях впадающих малых рек, ограниченных скалистыми мысами, которые не пропускают вдольбереговые потоки наносов.

Исследование Феодосийского залива и шельфа на его продолжении дало возможность проследить повсюду современные осадки четвертичного периода мощностью до 10 м. В центральной части залива, ограниченной изобатой 20 м, толщина осадочного покрова составляет 20–30 м.

На Керченском полигоне южнее одноименного пролива под слоем современных осадков, мощность которых составляет 5–10 м, наблюдается подвергшаяся абразии поверхность коренных пород, простирающихся в форме пластов с уклоном на север [7]. Геофизическое зондирование дна с помощью сейсмоакустического профилографа позволило установить, что верхние элементы этих наклонных пластов, образующих гряды, выровнены воздействием абразионных процессов и покрыты слоем рыхлых современных осадков, мощность которых составляет 10–20 м. Толща этих отложений разделена геоакустической границей, отчетливо регистрируемой на сейсмограммах.

Побережье в районе Западного шельфа в основном обрывистое, абразионное. Исключение составляют места выхода на побережье балок. Прибрежная часть балок, как правило, подтоплена и отгорожена от моря пересыпями. При этом образуются бухты типа лиманов с озерами, такие как Ярылчакская, озеро Донузлав, Черноморская, Евпаторийская и Караджа.

Дно Евпаторийской бухты сложено плиоценовыми известняками, которые перекрыты тонким слоем кварцевых круп-

нозернистых и мелкозернистых песков, встречающихся до глубины 12 м. Гидрологическая съемка и геофизическое зондирование позволили обнаружить и проследить на глубинах порядка 10 м под песками в Каламитском заливе вдоль побережья древний береговой бар, сложенный литифицированными породами. Глубже за морской границей этого бара залегают илы.

На внутреннем западном шельфе Крыма, на траверзе впадения основных рек, таких как Булганак, Альма, Кача, Бельбек и Черная, с использованием геофизической съемки были найдены погребенные в осадках формы рельефа, соответствующие древним долинам этих рек. Это формы типа «корыто», которые имеют крутые стенки и заполнены рыхлыми осадочными отложениями. Авторы предполагают, что подводные каньоны, наблюдаемые во внешней части шельфа и на континентальном склоне, являются продолжением таких форм рельефа, связанных с речными балками и устьями рек.

Заключение

Таким образом, сформирована и обоснована технология комплексных инструментальных исследований морфологии рельефа дна и детальной структуры рыхлых осадочных отложений, которая показала свою эффективность в ходе исследований на шельфе полуострова Крым в 2017–2019 гг. Результаты этих исследований являются вкладом в решение фундаментальной проблемы океанологии и морской геологии по изучению строения и истории формирования континентальной окраины Мирового океана.

Данные, полученные в процессе экспедиционных исследований с использованием разработанной технологии, позволят повысить эффективность регионального планирования инженерных изысканий, а также оценок воздействия на экологию шельфа Крыма процессов строительства морских и прибрежных объектов, таких как подводные части причальных сооружений, элементов берегозащиты, добычных и буровых и морских платформ, дамб, подводных продуктопроводов и кабелей, карьеров, траншей, намытых пляжей и массивов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0149-2020-0011) при поддержке РФФИ (проект № 17-05-41041 «РГО-а», проект № 20-05-00384 «А» и проект № 18-05-60070).

Авторы выражают признательность Я.И. Белевитневу, А.Д. Мутовкину и В.Ю. Кузьмину за помощь в подготовке экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Зенкович В.П. Берега Черного и Азовского морей. М.: Государственное изд-во географической литературы, 1958. 374 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. Бондарев И.П., Ломакин И.Э., Иванов В.Е. Особенности формирования и развития Севастопольской бухты // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015. Т. 42. № 4. С. 19–31.
4. Руссак Ю.С., Нафиков В.М., Тихонова Н.Ф. Система сбора и обработки гидроакустической информации // Современные методы и средства океанологических исследований: матер. XV Всерос. научно-технической конференции. М.: АПР, 2017. Т. 2. С. 355–357.
5. Римский-Корсаков Н.А., Коротаев В.Н., Мысливец В.И., Поротов А.В., Пронин А.А., Иванов В.В. Геоморфология и история развития Западного шельфа Крыма // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 4. С. 161–176.
6. Мысливец В.И., Римский-Корсаков Н.А., Коротаев В.Н., Поротов А.В., Пронин А.А., Иванов В.В. Морфоструктура и строение осадочного покрова внутреннего шельфа Западного Крыма // Океанология. 2019. Т. 59. № 6. С. 1063–1073.
7. Подымов И.С., Подымова Т.М. Статистические результаты исследований современных движений земной коры Азово-Черноморского побережья России // Современные методы и средства океанологических исследований: матер. XVI Всерос. научно-технической конференции. М.: ИД Академии Жуковского, 2019. Т. 1. С. 136–139.