

ОПЫТ КРУПНОМАСШТАБНОГО ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МОРСКОГО ДНА ПО ДАННЫМ МНОГОЛУЧЕВОГО ЭХОЛОТИРОВАНИЯ И ГИДРОЛОКАЦИИ БОКОВОГО ОБЗОРА (ПРОЛИВ ВЕЛИКАЯ САЛМА КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ)

Репкина Т.Ю.¹, Рыбалко А.Е.², Михайлюкова П.Г.¹,
Терехина Я.Е.³, Барымова А.А.⁴, Серета И.И.⁴,
Соловьева М.А.⁴, Исаченко А.И.⁵, Корост Д.В.⁴, Токарев М.Ю.³

Представления о рельефе морского дна до настоящего времени заметно уступают в детальности сведениям о строении поверхности суши. Современные геофизические методы, в частности многолучевое эхолотирование (МЛЭ) и гидролокация бокового обзора (ГЛБО), дают возможность «видеть» и интерпретировать подводный рельеф полигонов детальной съемки не менее, а иногда и более подробно, чем надводный.

Начиная с генетической классификации И.П. Герасимова и Ю.А. Мещерякова (1946), размеры (ранг) выделяемых форм рельефа связывают с преобладающей ролью в их возникновении эндогенного или экзогенного факторов. В формировании поверхности дна Белого моря, как и других гляциальных шельфов, важную роль сыграли особенности геологического строения, экзарационно-аккумулятивная деятельность ледниковых покровов, постгляциальные (тектонические и гляциоизостатические) движения, происходившие на фоне эвстатических колебаний уровня Мирового океана, и современные субаквальные процессы [Варейчук, Игнатов, 1989, Сафьянов, Соловьева, 2005, Никифоров и др., 2007, Госу-

¹ Репкина Т.Ю., Михайлюкова П.Г. — ООО «ЦМИ МГУ»; МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва.

² Рыбалко А.Е. — ООО «ЦАСД МГУ»; ООО «Арктический Научный Центр», Москва; СПбГУ, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург.

³ Терехина Я.Е., Токарев М.Ю. — ООО «ЦАСД МГУ им. М.В. Ломоносова»; МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва.

⁴ Барымова А.А., Серета И.И., Соловьева М.А., Корост Д.В. — ООО «ЦМИ МГУ», Москва.

⁵ Исаченко А.И. — ООО «Арктический Научный Центр», Москва.

дарственная..., 2012]. Поэтому рельеф дна неоднороден, часто является унаследованным или реликтовым, не прост для интерпретации и типизации, которые в значительной мере зависят от детальности исходной батиметрической и геологической информации. Наиболее крупные (более десятков км) формы рельефа, выражающиеся в поле глубин при съемках среднего и мелкого масштабов, традиционно соотносят с эндогенными факторам. Формы мезорельефа, протяженностью до 100 км (обычно десятки км) относят к «экзогенным, реже структурным, созданным субаэральными и/или современными субаквальными процессами»; а формы микрорельефа относительной высотой и протяженностью метры и сантиметры — к экзогенным, сформированным современными процессами под водой [Никифоров и др., 2007].

Геолого-геофизические данные высокого разрешения, полученные в проливе Великая Салма, позволили выделить на дне акватории формы мезо- и микрорельефа, предположить их генезис, оценить характер и направленность рельефообразующих процессов, провести детальное геоморфологическое картографирование и выявить факторы, определившие строение и дискретизацию рельефа дна.

Пролив Великая Салма длиной 25 км при ширине от 0,6 до 8 км и глубинах до 120 м, отделяет от материка о. Великий. Согласно [Никифоров и др., 2007] все формы рельефа дна пролива относятся к мезо- и микрорельефу. Геоморфологическая типизация и районирование проведены по морфогенетическому принципу. Генезис рельефа рассмотрен на четырех временных и глубинных срезах (поверхность архейского кристаллического фундамента, отложения последнего оледенения, ледниково-морские и морские послеледниковые отложения, современные донные осадки), отвечающих основным этапам формирования поверхности дна. По сейсмическим данным указанные поверхности выделяются как границы соответствующих сейсмостратиграфических комплексов [Старовойтов и др., 2018].

Источником информации о поле глубин служили цифровая модель рельефа (ЦМР) дна разрешением 2х2 м, составленная по данным МЛЭ, и производные карты: изобат (сечение через 5 м и 0,5 м глубины), углов наклона и экспозиции склонов. Карты углов наклона были составлены с диапазоном 5°, а также с неравным диапазоном (0–0,05°, 0,05–1°, 1–2,5°, 2,5–5°, 5–7,5°, 7,5–10°, 10–12,5°, 12,5–15° и далее через 5°), что позволило выделить субгоризонтальные поверхности и склоны, благоприятные и не благоприятные для развития гравитационных процессов разных типов. Карта экспо-

зиции склонов позволила оценить степень дискретности и упорядоченности рельефа. Информация о распределении современных донных осадков получена по данным ГЛБО, заверенным результатами геологического пробоотбора, фото- и видеоизображениями с телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА); о строении разреза — по данным непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) с использованием высокочастотного профилографа.

Близкое к поверхности дна положение кровли кристаллического фундамента, его раздробленность, интенсивные дифференцированные восходящие движения, темпы которых изменялись от 9–13 мм/год в конце раннего голоцена до 3–6 мм/год в последние столетия [Dreßler et al., 2009, Романенко, Шилова, 2012, Баранская, 2015, Репкина, Романенко, 2016], и современная сейсмичность [Балуев и др., 2009, Мараханов, Романенко, 2014] определяют наличие структурных и структурно предопределенных форм мезо- и микрорельефа.

Наиболее крупные структурно предопределенные формы — склоны и днище пролива. На севере, у берегов о. Великий, приподнятые блоки фундамента образуют узкую субгоризонтальную поверхность с глубинами до 20–25 м, а затем резко, ступенями, погружаются к днищу пролива, формируя крутой макросклон с подножием на глубинах 90–100 м. Значительные (5–20°) уклоны способствуют развитию на склонах гравитационных процессов. На южном, «материковом», макросклоне блоки фундамента образуют на глубинах 15–35, 40–50 м ступени шириной 0,5–1 км, разделенные короткими уступами. Поверхности ступеней, в зависимости от раздробленности блоков, мощности перекрывающих их осадков и характера современных субаквальных процессов, заняты структурно-денудационными, денудационно-аккумулятивными ледниковыми или денудационно-аккумулятивными и аккумулятивными морскими равнинами. Глубины 50–100 м занимают склоны, приуроченные к ступенчато погружающимся блокам фундамента. На СЗ пролив ограничен приподнятым блоком фундамента (Еремеевский порог). Небольшие структурные формы рельефа представлены грядами относительной высотой 1–2 м, отчетливо выраженными на ЦМР и мозаиках ГЛБО.

Морфологические признаки структурных форм рельефа всех рангов — прямолинейность или «угловатость» очертаний, упорядоченность простирания соседствующих форм и элементов рельефа, резкая, до 90°, смена простирания в зонах пересечения линеаментов [Авенариус, 2008]. Для донных осадков характерна контрастность

состава — от преимущественно грубых обломков в пределах локальных положительных структур до тонких — в депрессиях.

На глубинах 20–50 м морфология мезо- и микрорельефа практически всех уплощенных участков и части склонов наследует облик рельефа кровли ледниковых отложений ругозерской стадии деградации последнего оледенения [Государственная..., 2012]. Морена образует на дне хорошо распознаваемые комплексы форм рельефа — сочетания гряд, холмов, западин и ложбин. Характерные особенности ледниковых форм и их комплексов — неровные плановые очертания, изменчивость по высоте, крутые (7,5–12,5, часто до 15–20°) склоны гряд и холмов. Положительные формы рельефа часто связаны с увеличением мощности ледниковых отложений, в том числе с «шапками» морены, «насаженной» на вершины или склоны выступов фундамента. Ледниковые формы, в зависимости от гидродинамических условий конкретных участков закрыты чехлом ледниково-морских и морских, в том числе перлювиальных, осадков. Бассейновые осадки залегают в понижениях морены (денудационно-аккумулятивные или аккумулятивно-денудационные равнины) или полностью перекрывают формы ледникового рельефа (аккумулятивные морские равнины). Выходы морены, как правило, сопровождаются увеличением крупности и ухудшением сортировки донных осадков, появлением даже на относительно затишных участках преимущественно реликтовых перлювиальных валунов, гальки, дресвы, щебня, которые были, вероятно, сформированы при более низком уровне моря [Рыбалко и др., 2017]. Там, где ледниковые отложения перемыты приливными течениями, формируются валунно-галечные отмостки. Формы ледникового рельефа и их сочетания, как правило, не являются уникальными для какого-либо участка полигона, однако имеют ряд морфологических и морфометрических особенностей, которые могут быть использованы в качестве признаков районирования.

Современные субаквальные процессы, моделирующие формы реликтового рельефа и создающие специфические денудационные и аккумулятивные формы на глубинах 20–50 м, относятся к группам гидрогенных (деятельность приливов, припайных льдов, выпадение взвеси из водной толщи), гравитационных (медленное сползание грунта, блоковые оползни, потоки малой плотности) и биогенных (деятельность роющих организмов и т.д.). Судя по составу наносов, в экстремальные штормы возможно «оттягивание» песков за пределы зоны волнового воздействия до глубин около 20 м. Однако, скорее всего, пески на этих глубинах можно считать реликтовыми.

Формы рельефа, связанные с деятельностью приливных течений, — узкие ложбины с V- или U-образным поперечными профилями, относительно протяженные или состоящие из продолжающих друг друга коротких врезов, отчетливо видны на ЦМР и изображениях ГЛБО. Они встречаются на разных глубинах и элементах рельефа, чаще всего у подножий склонов, на контакте уступов и локальных возвышенностей и относительно «мягких» осадков. Ложбины наиболее отчетливы и контрастны (относительная глубина до 3 м) в поле «мягких» осадков, однако видны и в пределах выходов морены.

Накопление взвеси, выпавшей из водной толщи, характерно для затишных участков дна, замкнутых и полузамкнутых понижений. Скорость биогенно-терригенной седиментации оценивается для открытой акватории Кандалакшского залива в 0,2–0,6 мм/г [Новигатский, 2013], а для прибрежных мелководий — 0,3–1,0 мм/г [Митяев, Герасимова, 2012]. Припой мобилизует на приливной осушке и разносит по акватории грануло-метрически разнородные осадки, включая валуны [Романенко и др., 2012, Репкина, Шевченко, Косевич, 2013]. Темпы поступления продуктов ледового разноса — грануло-метрически разнородных осадков, вплоть до валунов, на дно Кандалакшского залива оценивается в 0,006–0,007 мм/г, при доле крупных обломков 10–40% [Чувардинский, 1989], а в относительно замкнутой Великой Салме, скорее всего, достигает больших значений. Материал ледового разноса неравномерно рассеян по дну, его скопления, создающие специфические формы рельефа, не встречено. Таким образом, скорость накопления наносов в результате нефелоидной седиментации и ледового разноса в целом невелика и в несколько раз меньше, чем темпы поднятия берегов пролива и, возможно, его дна. Аккумулятивные морские равнины с пологоволнистой или пологонаклонной поверхностью дна, перекрытой непрерывным чехлом морских преимущественно тонкозернистых осадков, формируются в спокойных гидродинамических условиях на юго-западе пролива при входе у губу Кислая (глубины 25–40 м), в гидродинамической тени структурных и моренных гряд на юге пролива (глубины 15–30 м) и на днище пролива (глубины 90–120 м).

Формы рельефа гравитационного происхождения приурочены к крутым склонам и днищу депрессии пролива с глубинами 40–110 м. Крупные гравитационные формы чаще всего представлены оползневыми телами протяженностью до 100 м, сложенными смятыми морскими и ледниково-морскими осадками, и перекрытые современными морскими осадками [Рыбалко и др., 2013, Рыбалко и др.,

2017, Старовойтов и др., 2018]. Они формируют неровный волнисто-ступенчатый рельеф склонов на глубинах более 40 м и перекрывают днище пролива. На ЦМР оползневые тела распознаются по сочетанию уплощенных ступеней, часто с обратным уклоном, относительно крутых внешних склонов, западинам и ложбинам на контактах оползневых тел со стенками срыва. На северо-восточной границе участка детальной съемки, на глубинах 45–65 фиксируется запрокинутая к северо-востоку ступень крупного (длина ~800 м, ширина ~450 м), оползневого тела, закрытая в тыловой части относительно мощной толщей морских осадков. Склон, примыкающий к тыловому шву оползня, перекрыт морскими осадками, имеет дугообразные в плане очертания и вогнутый (2,5–7,5°) продольный профиль, и, вероятно, представляет собой стенку срыва оползня. Формирование крупных оползней связано с эпохами высокой сейсмической активности верхнего неоплейстоцена – раннего голоцена [Рыбалко и др., 2013]. Оползание возможно происходило в несколько этапов [Старовойтов и др., 2018].

Современные гравитационные формы представлены небольшими (первые метры) складками, созданными массовым сползанием грунта, и эрозионными ложбинами, выработанными зерновыми потоками. Гравитационные складки развиты в нижних частях склонов депрессии пролива, перекрытых тонкими осадками. Ложбины, выработанные зерновыми потоками, приурочены к стенке срыва оползня на северо-востоке участка. Они имеют U- или V-образные поперечные профили, отчетливые склоны крутизной 5–15°, выработанные в чехле морских осадков. Глубина вреза достигает 1,5–2 м. В подножии склона эрозионные ложбины практически не образуют морфологически выраженных конусов выноса, что может свидетельствовать об их редкой активизации и незначительных объемах перемещения наносов.

Линейные размеры форм биогенного микрорельефа меньше разрешения ЦМР.

Таким образом, мезо- и микрорельеф дна пролива полигенетичен. Наиболее крупные формы рельефа (сотни метров – километры, превышения метры – десятки метров) – чаще структурные или структурно predeterminedенные, но могут иметь ледниковое (крупные гряды) или гравитационное (крупные оползни) происхождение. Формы размерами десятки – сотни метров с превышениями метры – первые десятки метров – ледниковые, структурные, гравитационные и гидрогенные. Формы меньших размеров – ледниковые, структурные, гидрогенные и биогенные.

Типизация рельефа и крупномасштабное геоморфологическое картографирование дна пролива выполнено на основе выделения морфогенетических комплексов — закономерных сочетаний форм мезо- и микрорельефа, созданных типичными для гляциальных шельфов активными и пассивными факторами рельефообразования. На дне пролива выделены 8 морфогенетических комплексов (площадь 10^4 – 10^6 м²) — уплощенных структурных ступеней, занятых равнинами разного генезиса, и склонов; их положение предопределено структурными факторами, а особенности генезиса и морфологии рельефа — сочетанием рассмотренных выше факторов.

Исследования являются частью проекта, финансируемого ООО «Арктический научный центр». Авторы благодарят коллективы компаний «ЦМИ МГУ», «ЦАСД МГУ» и «СПЛИТ» за сбор полевых материалов и помощь в обработке и интерпретации данных; ББС МГУ им. Н.А.Перцова за поддержку исследований. Часть работ по обобщению данных выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (темы RFMEFI60717X0187, AAAA-A17-117111670044-9, AAAA-A16-11632810089-5).