

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.345

**МОРФОЛИТОДИНАМИКА БЕРЕГОВ И ДНА БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ  
НА ТРАССЕ ПЕРЕХОДА МАГИСТРАЛЬНЫМИ ГАЗОПРОВОДАМИ**

**А.М. Камалов, С.А. Огородов, В.Ю. Бирюков\*, Г.Д. Совершаева\*, А.С. Цвезинский\*,  
В.В. Архипов, Н.Г. Белова, А.И. Носков, В.И. Соломатин**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,  
119992, Москва, Ленинские горы, Россия, kamalov-msu@mail.ru*

*\*Государственный океанографический институт,  
119034, Москва, Кропоткинский пер., 6, Россия, ecosys@orc.ru*

Приведены основные результаты исследований морфо- и литодинамики берегов и дна Байдарацкой губы Карского моря, полученные коллективом авторов по данным многолетнего мониторинга в районе проектируемого перехода ее магистральными газопроводами. Получены достоверные величины абразии берегов и деформаций поперечного профиля береговой зоны. Проведено районирование побережья по степени устойчивости берегов к размыву. Изучено геоморфологическое строение рельефа дна. Основное внимание уделено микрорельефу дна, сформированному из борозд ледового выпаживания. Проанализированы их морфологические и морфометрические характеристики. Выполнена оценка встречаемости борозд в зависимости от глубины моря и типа донных осадков.

*Байдарацкая губа, трубопровод, береговая зона, термоабразия, деформации профиля, рельеф и микрорельеф дна, борозды выпаживания*

**COASTAL AND SEABED MORPHOLITHODYNAMICS  
OF THE BAYDARATSKAYA BAY AT THE ROUTE OF GAS PIPELINE CROSSING**

**A.M. Kamalov, S.A. Ogorodov, V.Yu. Birukov\*, G.D. Sovershaeva\*, A.S. Tsvetsinsky\*,  
V.V. Arkhipov, N.G. Belova, A.I. Noskov, V.I. Solomatn**

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography,  
119992, Moscow, Leninskie Gory, Russia, kamalov-msu@mail.ru*

*\*State Oceanographic Institute, 119034, Moscow, Kropotkinskii per., 6, Russia, ecosys@orc.ru*

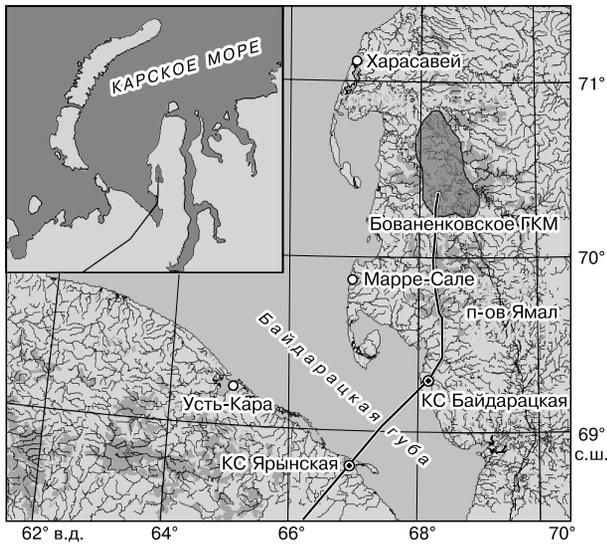
The article presents the main results of morpho- and lithodynamics research of the coasts and seabed of Baydaratskaya Bay (Kara Sea), which have been obtained by the working group on the basis of long-term monitoring at the gas pipeline crossing design. Reliable values of coastal erosion and deformations of the coastal zone cross profile have been achieved. Coastal zoning based on the differences in coastal stability to erosion process has been carried out. Also, the geomorphological structure of seabed relief has been investigated. Appreciable attention has been given to the seabed microrelief formed by ice gouging. Their morphological and morphometrical characteristics have been analyzed. The gouge's frequency depending on the sea depth and bottom sediments has been estimated.

*Baydaratskaya Bay, pipeline, coastal zone, thermo-abrasion, deformations of the profile, seabed relief and microrelief, ice gouging*

**ВВЕДЕНИЕ**

Освоение шельфа и побережья Карского моря с целью добычи природного газа требует строительства морских портов, подходных каналов, искусственных островов, буровых платформ, терминалов, наземных и подводных трубопроводов (рис. 1). Знание природных процессов и, в частности, морфолитодинамики берегов и дна необходи-

мо с точки зрения безопасности сооружения и эксплуатации техногенных объектов. Это особенно актуально в условиях Арктики, где именно природные факторы диктуют правила освоения шельфа и побережья. Природные морфолитодинамические процессы, такие как размыв берегов, термоабразия, термоденудация, дефляция, водная и



**Рис. 1. Трасса перехода Байдарацкой губы Карского моря магистральными газопроводами.**

термоэрозия, ледовая экзарация, могут привести к значительным материальным потерям, свести на нет рентабельность добычи сырья.

Береговая зона моря – область взаимодействия литосферы, гидросферы и атмосферы, отличается исключительно высокой динамической активностью. Морфолитодинамические характеристики этой зоны являются одним из главных факторов, определяющих выбор места выхода трубопроводов с подводного склона на сушу, а также величины их заглубления и способ укладки.

По определению, границы береговой зоны лимитируются воздействием на дно и берега основного берегоформирующего фактора – волнения. Верхняя граница ее устанавливается достаточно четко и соответствует линии максимального штормового заплеска, нижняя соответствует глубине, равной половине длины штормовой волны, способной вызвать массовое перемещение наносов. Однако термин „береговая зона”, как правило, используют более широко: в эту область включают ту часть прибрежной суши, где море еще оказывает влияние на развитие наземных, прежде всего рельефообразующих, процессов. Береговая зона моря отличается наибольшими деформациями берегов и дна, поскольку в ее пределах высвобождается значительное количество энергии волн и течений.

Более половины протяженности береговой линии Байдарацкой губы Карского моря охвачено абразионным процессом, причем на ряде участков скорость разрушения берегов достигает в естественных условиях 1–3 м/год. С учетом возможных техногенных воздействий, сопутствующих освое-

нию новых территорий, в условиях прогнозируемого на XXI в. глобального потепления климата скорости разрушения берегов могут существенно возрасти. В случае прокладки трубопровода через активно разрушающиеся участки берегов возникает опасность его повреждения в результате возможного „оголения”, провисания и механических деформаций. Заглубление объектов, отсыпка грунта и другие защитные меры часто оказываются малоэффективными, так как для активно разрушающихся абразионных участков характерно не только отступление береговых уступов в сторону суши, но и направленная абразия области пляжа и подводного берегового склона. Кроме того, оголившиеся в результате абразии участки трубопровода могут оказаться открытыми для непосредственного динамического воздействия морских льдов. Выдавливание припайного льда на берег, приводящее к формированию навалов льда, может стать причиной разрушения береговых сооружений и трубопроводов.

Таким образом, в береговой зоне моря геологическая безопасность трубопровода в значительной мере может быть обеспечена грамотным выбором, во-первых, наиболее динамически стабильного участка берега, во-вторых, величины расчетного заглубления трубы, учитывающей прогноз динамики берега на период строительства и эксплуатации трубопровода.

Многогранность и сложность взаимодействия факторов динамики береговой зоны юго-западной части Карского моря, их слабая изученность и новизна постановки задачи потребовали особых методических подходов к ее решению. Основные исходные данные были получены в ходе экспедиционных работ, которые проводились в течение 1988–2005 гг. В отдельные годы исследования осуществлялись в два этапа: в весенний период работы были посвящены изучению морских льдов, стамух, торосов и их воздействия на береговую зону, в осенний штормовой период исследовалась динамика берегов, пляжей и подводного берегового склона.

Для определения скорости отступления берегов под воздействием динамических, термических и ледовых факторов в пределах расчетных литодинамических систем установлены постоянные реперные профили сети мониторинга динамики берегов: 29 на Уральском и 22 на Ямальском берегах Байдарацкой губы.

### **ЭВОЛЮЦИЯ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ В ГОЛОЦЕНЕ**

Береговая зона юго-западной части Карского моря за период голоцена претерпела существенные изменения, вызванные, с одной стороны, затоплением прибрежных территорий в ходе трансгрессии моря, с другой – термоабразией и отступанием берегов.

В начале голоцена береговая линия в юго-западной части Карского моря располагалась на современных глубинах порядка 30 м [Бирюков, Совершаев, 1985]. Учитывая, что современные глубины в Байдарацкой губе и на материковой отмели Западного Ямала составляют менее 30 м, можно сделать вывод, что эта область шельфа Карского моря на начало голоцена являлась сушей и развивалась, прежде всего, под воздействием криогенных факторов.

Трансгрессия моря, сопровождавшаяся затоплением низких приморских равнин и разрушением береговых уступов, происходила неравномерно: этапы быстрого наступления моря сменялись замедлением повышения уровня и даже стоянием его на определенных отметках.

В периоды стабилизации уровня моря волны вырабатывали серии береговых форм (подводные бары, пересыпи, косы), которые по мере последующего повышения уровня затоплялись и выходили (или частично выходили) из зоны волнового воздействия. При быстрой трансгрессии моря и значительной ледовитости происходила относительно слабая (по сравнению с морями умеренных широт) переработка затопляемых береговых форм.

В пользу быстрого подъема уровня моря свидетельствует сохранение многолетнемерзлого состояния пород на дне Байдарацкой губы и прилегающей акватории Баренцева моря. Здесь в ряде скважин буровых профилей при глубинах моря около 20 м и в 15–20 м от морского дна вскрываются залежи пластовых льдов и опесчаненные суглинки со слоисто-сетчатой толстошлировой криогенной текстурой (рис. 2). Подобное криогенное

строение разреза [Природные..., 1997] могло сформироваться только при промерзании в субаэральных условиях, т. е. мерзлые массивы на дне моря – это остатки континентально-погруженного (или континентально-абразионного) типа мерзлых пород, сохранившиеся после трансгрессии и затопления прибрежных участков суши, сложенных многолетнемерзлыми породами [Григорьев, 1966, 1987]. Переход их в субаквальное состояние должен был произойти достаточно быстро. При этом фаза пребывания затопляемой суши в зоне волноприбойной деятельности моря и погружения до глубин 7–10 м, где прогревание воды максимальное, длилась достаточно недолго, мерзлые породы успевали оттаять лишь на некоторую глубину, ниже которой температура пород оставалась отрицательной. На больших глубинах (свыше 10–20 м) температура придонной воды арктических морей имеет стабильно отрицательные значения [Жуигарев, 1997], деградация континентальной мерзлоты здесь существенно замедляется и может происходить только за счет внутриземного теплового потока.

Голоценовая трансгрессия в юго-западной части Карского моря, как и в других арктических морях, происходила на фоне колебаний ледовитости [Совершаев, 1983]. Вследствие этого волновая переработка затопляемой суши была крайне ослабленной и неравномерной. Периоды относительной литодинамической активности сменялись периодами консервации акватории губы морскими льдами.

Древние береговые линии на глубинах 32–34 м относятся к периоду раннего голоцена (примерно 10 тыс. лет назад), а последняя линия на

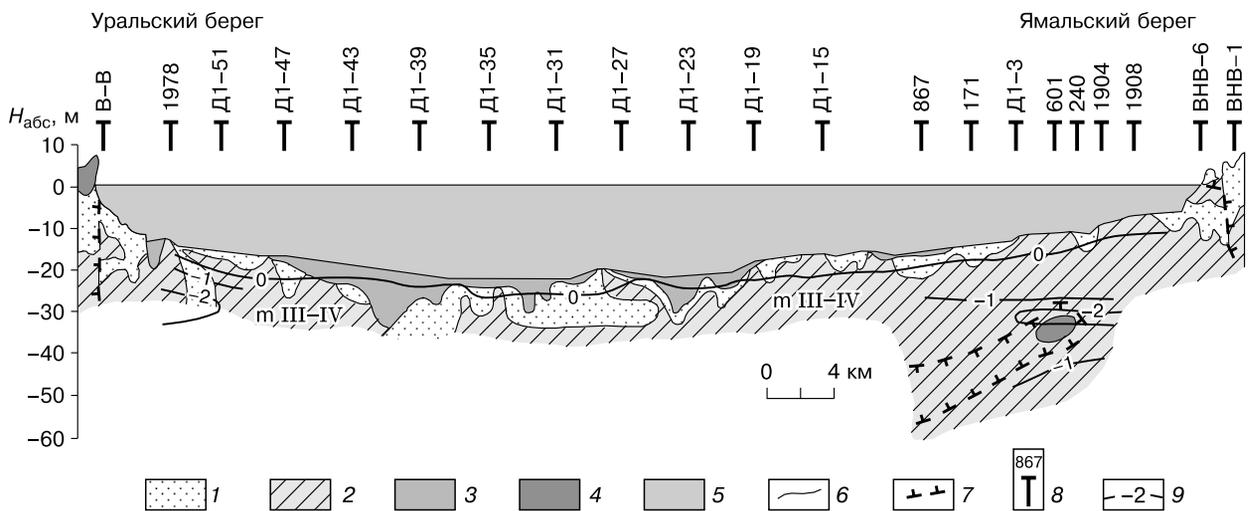


Рис. 2. Схематический инженерно-геокриологический разрез через Байдарацкую губу в полосе перехода [Природные..., 1997]:

1 – пески мелкие сортированные и пылеватые; 2 – глина тощая; 3 – глина жирная; 4 – лед и ледогрунт; 5 – вода; 6 – границы литологические; 7 – границы мерзлых грунтов; 8 – скважина; 9 – изотерма.

глубине 25 м соответствует значительному потеплению около 9 тыс. лет назад. В период 6–5 тыс. лет назад уровень Мирового океана, вероятно, достиг отметок, близких к современным. Геоморфологическим выражением стояния этого уровня могут служить древние береговые аккумулятивные формы и прибрежные морские террасы, абсолютные отметки которых превышают на 1,5–2,5 м современный средний уровень Карского моря.

На втором этапе голоцена (5 тыс. лет назад) уровень моря колебался у современных отметок, что обусловило более интенсивную и глубокую переработку верхней части подводного берегового склона. В ледовом отношении самые благоприятные условия отмечались в период голоценового оптимума (6–4 тыс. лет назад). Этот период характеризуется максимальной литодинамической активностью и, соответственно, более глубокой волновой переработкой дна. Последнее подтверждается особенностями строения подводного склона на разных глубинах Карского моря. Так, у берегов п-ова Ямал до глубин 10–15 м дно хорошо выработано волнами и течениями, изобаты повторяют очертания линии берега. Глубже 15 м дно слабо переработано, изобаты неупорядочены, имеют петлеобразные очертания.

Таким образом, береговая линия Карского моря на протяжении голоцена прошла путь от отметок –30 м до современного положения, что обусловлено как повышением уровня Мирового океана, так и разрушением и отступанием берегов, сложенных тонкодисперсными высокольдистыми породами.

### РЕЛЬЕФ ДНА

Рельеф дна Байдарацкой губы имеет достаточно сложное геоморфологическое строение. На дне хорошо сохранились древние формы, соответствующие субаэральному этапу развития. Субаквальный рельеф более выражен в пределах подводного берегового склона в диапазоне глубин от 0 до 15 м. Это зона наиболее активного гидродинамического и ледового воздействия на дно, где формируются вдольбереговые валы и ложбины, отмели и экзарационные ледовые микроформы.

Рельеф глубоководной части губы формировался на фоне крупной долины реки Пра-Оби, которая, вероятно, была заложена еще в неогене и возобновлялась в позднем плейстоцене [Бирюков, Совершаев, 1985]. В соответствии с изменениями уровня Мирового океана Карское море претерпело несколько циклов трансгрессий и регрессий и, возможно, испытало воздействие ледников, спускавшихся с Урала и Новой Земли.

В современном рельефе дна Байдарацкой губы зафиксированы две генерации долин. Наиболее древняя имеет ширину 25–45 км. Вместе с терра-

сами она занимает практически все дно губы и ориентирована по ее оси. В рельефе дна эта долина читается с глубины 12–15 м. В ее пределах сохранились серии террас с относительным превышением 7–10 и 14–16 м. Рельеф дна долины осложнен грядоувалами, длинные оси которых ориентированы вдоль губы. Они образуют две группы: одну – с мористой стороны Байдарацкой губы, другую – между о. Левдиев и зал. Мутный. Увалы имеют длину от 7–13 до 24–26 км, ширину около 5 км, относительное превышение над поверхностью дна 3–6 м. Возможно, они являются краевыми образованиями ледника, спускавшегося с предгорий Урала.

Вторая генерация долин относительно молода и приурочена к местам расположения грядоуvalов. Ширина дна этих долин изменяется от 4 до 12 км. В их рельефе сохранились тальвеги многочисленных водотоков, примыкающих в основном к Ямалскому берегу. В вершине Байдарацкой губы долина теряет морфологическую выраженность, поскольку рельеф дна в сильной степени изменен аквальные процессами. В ходе послеледниковой трансгрессии субаэральный рельеф подвергся здесь некоторым изменениям, сформировались преимущественно абразионные и абразионно-аккумулятивные поверхности, осложненные отдельными аккумулятивными формами.

Здесь выявлено две группы аккумулятивных форм, сложенных мелкопесчано-алевритовыми фракциями. Одна группа аккумулятивных форм существует на глубинах 11–14 м в виде валообразных и косовидных образований, дистальные концы которых направлены навстречу друг другу, а длинные оси форм ориентированы нормально осевой линии губы. Вторая группа приурочена к глубинам 8–9 м, в отличие от первой группы, дистальные концы ее кос развернуты в противоположные стороны, что соответствует зоне дивергенции, выявленной здесь аналитическими методами. У юго-западного побережья Байдарацкой губы между устьем р. Байдарата и о. Левдиев на глубинах 5–8 м отмечаются клювовидные аккумулятивные формы, дистальные концы которых ориентированы на северо-запад, что свидетельствует о преобладающем стоковом течении в этой части губы.

По периметру Байдарацкой губы расположены мелководные заливы, устья рек, мелкие водотоки, вблизи которых формируются обширные ветровые и приливные осушки, дельты и конусы выноса песчано-алевритового материала.

В современном рельефе дна Байдарацкой губы выделены крупные геоморфологические единицы (рис. 3) [Природные..., 1997]:

– непосредственно к берегу до глубин 5–10 м примыкает подводный береговой склон, рельеф которого относится к абразионному типу. Уклоны дна здесь максимальные (0,004–0,005). В услови-

ях интенсивных гидродинамических воздействий (волн, течений, льдов) этот участок дна подвержен наибольшим деформациям;

– абразионно-аккумулятивная равнина – поверхность дна до глубин 12–13 м с уклонами 0,006 (Уральский участок) и 0,001 (Ямальский участок). По сравнению с подводным береговым склоном рельефообразующие процессы здесь более спокойны;

– вторично расчлененная равнина – поверхность дна на глубинах 12–18 м с уклонами дна 0,001–0,005. В ее пределах отмечаются древние аккумулятивные формы, ориентированные по оси губы, а также эрозионные уступы на глубинах 15–16 м;

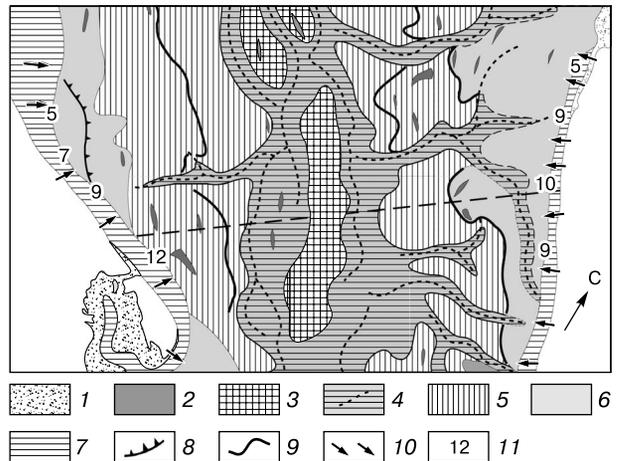
– днище древней речной долины и тальвеги – самая глубокая часть губы, с глубинами до 23 м и уклонами дна 0,001–0,003.

На основе анализа материалов опробований дна установлено, что характер распределения донных осадков в прибрежной зоне подчиняется гидродинамическим условиям, т. е. более крупный материал приурочен к прибрежному участкам активного волнового воздействия (волноприбойная зона), а мелкий – к глубоководной части губы. На западном участке до глубин 10–12 м отмечаются пески, которые с увеличением глубины сменяются супесью, суглинками, глинами. На восточном участке дно отличается многообразием и чередованием осадков разного состава.

На фоне крупных морфологических элементов в рельефе дна прослеживаются многочисленные микроформы – следы выпахивания дна торосистыми ледовыми образованиями. По материалам эхолотных промеров дна выполнен анализ донных микроформ. Профиль дна условно разделен на три участка: западная часть губы с глубинами 13–20 м, центральная часть губы между изобатами 20 м (с западной и восточной стороны) и восточная часть губы с глубинами 11–20 м.

На западном участке в интервалах глубин 13–14 и 14–15 м на дне обнаружено всего по 1–2 борозды выпахивания, глубина которых не превышает 0,2 м относительно поверхности дна. Ширина борозд может достигать 40 м. На глубинах 15–16 м изрезанность дна возрастает, при этом встречаются как одиночные формы, так и серии из 2–3 ложбин и валиков, глубина их не превышает 0,2 м. В интервале глубин 16–17 м изрезанность дна увеличивается до 12 борозд на погонную длину 1 км. Максимальная изрезанность дна в западной части наблюдается на глубинах 18–20 м, где число борозд более 50 на погонную длину 1 км, а глубина их увеличивается до 0,5 м.

В центральной части Байдарацкой губы на протяжении 22 км на дне отмечается наибольшее количество микроформ. С западной стороны в интервале глубин 20–21 м выявлено 75 ложбин. Здесь отмечается наибольший показатель изрезанности дна – 67 ложбин на погонную длину 1 км.



**Рис. 3. Карта-схема геоморфологического строения дна Байдарацкой губы в районе перехода трубопровода:**

1 – осушки; 2 – аккумулятивные формы; 3 – краевые гляциальные образования; 4 – днища древних долин и тальвеги; 5 – вторично расчлененная равнина; 6 – абразионно-аккумулятивный рельеф; 7 – абразионный рельеф; 8 – абразионные уступы; 9 – эрозионные уступы; 10 – подводный береговой склон; 11 – глубина подножия подводного склона (м).

В самой глубокой части трассы подводного перехода (21–23–21 м) отмечается наибольшее число ложбин с шириной до 76 м и глубиной вреза в дно до 1 м. Участок дна на глубинах 20–21 м со стороны Ямальского берега относительно спокойный, с минимальной изрезанностью.

В интервале глубин 19–20 м со стороны Ямальского берега выявлено 63 ложбины шириной до 66 м, что с учетом небольшой протяженности дна дает сравнительно высокий показатель его изрезанности (82,4 %). На глубинах 17–19 м отмечено максимальное число ложбин, однако при небольших уклонах дна показатель изрезанности почти в 1,5 раза меньше, чем на западном участке дна. Незначительное увеличение числа ложбин отмечается в интервале глубин 14–15 м, что можно объяснить приуроченностью к этим же глубинам зимней кромки припая и формированием здесь поясов торосов и стамух. Ближе к берегу, на глубинах 11–14 м, отмечаются лишь одиночные ложбины глубиной не более 0,2 м.

Таким образом, многочисленные микроформы, обнаруженные в глубоководной части губы, свидетельствуют о том, что основным рельефообразующим фактором здесь являются динамические воздействия глубоководных льдин (стамух и несяков), а гидродинамические процессы ослаблены. На более мелководных участках (на глубинах 0–14 м в западной части и 0–16 м в восточной) эти формы практически отсутствуют вследствие сглаживания дна волнами и течениями.

## МОРФОЛИТОДИНАМИКА БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ

**Ямальский участок** предполагаемого строительства перехода газопровода через Байдарацкую губу расположен на западном побережье п-ва Ямал к югу от м. Мутный. Он относится к литодинамической системе с относительно слабыми вдольбереговыми потоками волновой энергии. Участок защищен от волновых и ледовых воздействий со стороны северного и северо-западного румбов. Существенное влияние на его устойчивость оказывает р. Яра-Яха, расположенная к югу от створа перехода.

Ямальское побережье от м. Мутный до устья р. Лы-Яха представляет собой аккумулятивную аллювиально-морскую равнину с высотами от 0 до 28 м, сложенную многолетнемерзлыми песками, супесями, суглинками.

По геоморфологическому строению исследуемое побережье можно разделить на три участка – южный, средний и северный (рис. 4,а).

Южный участок между устьями рек Яра-Яха и Лы-Яха представлен террасой высотой 22–28 м, сложенной морскими и прибрежно-морскими отложениями. В строении террасы выделяются три горизонта: верхний – преимущественно песчаный, средний – алевритово-глинистый и нижний – песчано-алевритовый. Местами вблизи уреза воды выходят вязкие оскольные суглинки.

С поверхности террасы, как правило, залегает 2–3-метровая толща желтовато-серых среднезернистых песков, подстилаемая серыми суглинками и супесями с включениями гальки и валунов. К берегу эта терраса выходит крутым откосом и сильно расчленена оврагами.

Непосредственно к устью р. Яра-Яха с юга примыкает первая морская терраса высотой 8–12 м, сложенная преимущественно разнозернистыми песками, подстилаемыми суглинками. Поверхность террасы скреплена растительностью, в западинах рельефа сохранились остаточные озера. Наличие в береговых откосах суглинистых льдистых отложений существенно понижает устойчивость берега. Суглинки при оттаивании приобретают текучепластичную консистенцию и, являясь относительным водупором, создают условия для широкого проявления термоденудационных и оползневых процессов. По поверхности мерзлых пород происходит сползание крупных грунтовых блоков.

Средний участок, через который проходит трасса газопровода, расположен к северу от устья р. Яра-Яха и представлен древней долиной этой реки. Прибрежная ее часть – валообразная аккумулятивная форма высотой 1,6–2,1 м, представляет собой береговой бар, сформированный в результате аккумуляции песчаного материала, поставля-

емого волнами со дна. Поверхность от вершины бара плавно понижается в сторону суши и переходит в сильно увлажненные и периодически затопливаемые приливами и нагонами лагуну и лайду.

Долина р. Яра-Яха ограничена с востока уступом террасы с отметками высот 5–7 м. В северной части этого участка выделяются останцы морских террас высотой 4–6 м, обрывающиеся уступом к пляжу, который на всем протяжении сохраняет ширину 40–60 м, а вблизи устья реки переходит в осушку шириной 300 м.

Третий участок расположен к северу от перехода газопровода и представлен первой морской террасой, прослеживающейся на протяжении 5 км вплоть до м. Мутный. Высота уступа террасы выдержана по ее простиранию и составляет 8–12 м. Литологическое строение этой террасы исследовано на примере участка м. Мутный, где в обрыве высотой 10 м сверху залегает слой торфа мощностью от 1,0 до 2,5 м, под ним – мелкозернистые пески и супеси мощностью 1,5–2,0 м. Ниже вскрывается слой тонкослоистых песков с прослоями органики мощностью 1,0–1,5 м, а низ разреза на высоту 3–4 м слагают супеси с прослоями серых плотных песков. Отличительной особенностью разреза является наличие ледяных жил в их верхней части. Серые тяжелые суглинки с включениями гальки и мелких валунов встречены в разрезе 1-й террасы к северо-востоку от м. Мутный. Со стороны моря к м. Мутный примыкает песчано-илистая аккумулятивная нагонная осушка (лайда) высотой 1,0–1,5 м, в настоящее время осваиваемая растительностью и частично предохраняющая берег от размыва.

На участке от м. Мутный до устья р. Лы-Яха формируются берега как абразионного, так и аккумулятивного типов. Протяженность абразионных берегов составляет 12,5 км, аккумулятивные участки представлены дельтовыми и лагунными берегами, на их долю приходится 3,5 км.

Дельтовые берега приурочены к устьям рек Яра-Яха и Лы-Яха. Они характеризуются авандельтами, выдвинутыми в море на расстояние до 1,5 км. В условиях преобладающего вдольберегового потока наносов, направленного к северу, авандельта р. Яра-Яха имеет асимметричное строение.

Выровненный аккумулятивный берег к северу от устья реки, в пределах которого находится участок перехода, характеризуется в поперечном разрезе следующими элементами: приливная осушка и пляж, нагонная осушка (лайда), береговой бар и отчлененная им от моря лагуна. Здесь коренной берег отстоит от современного уреза на 0,6–0,8 км и не подвержен абразионному воздействию моря.

Абразионные берега расположены к северу и югу от участка перехода. Основными факторами их развития являются субаэральные процессы – термоэрозия, денудация и дефляция. Активному

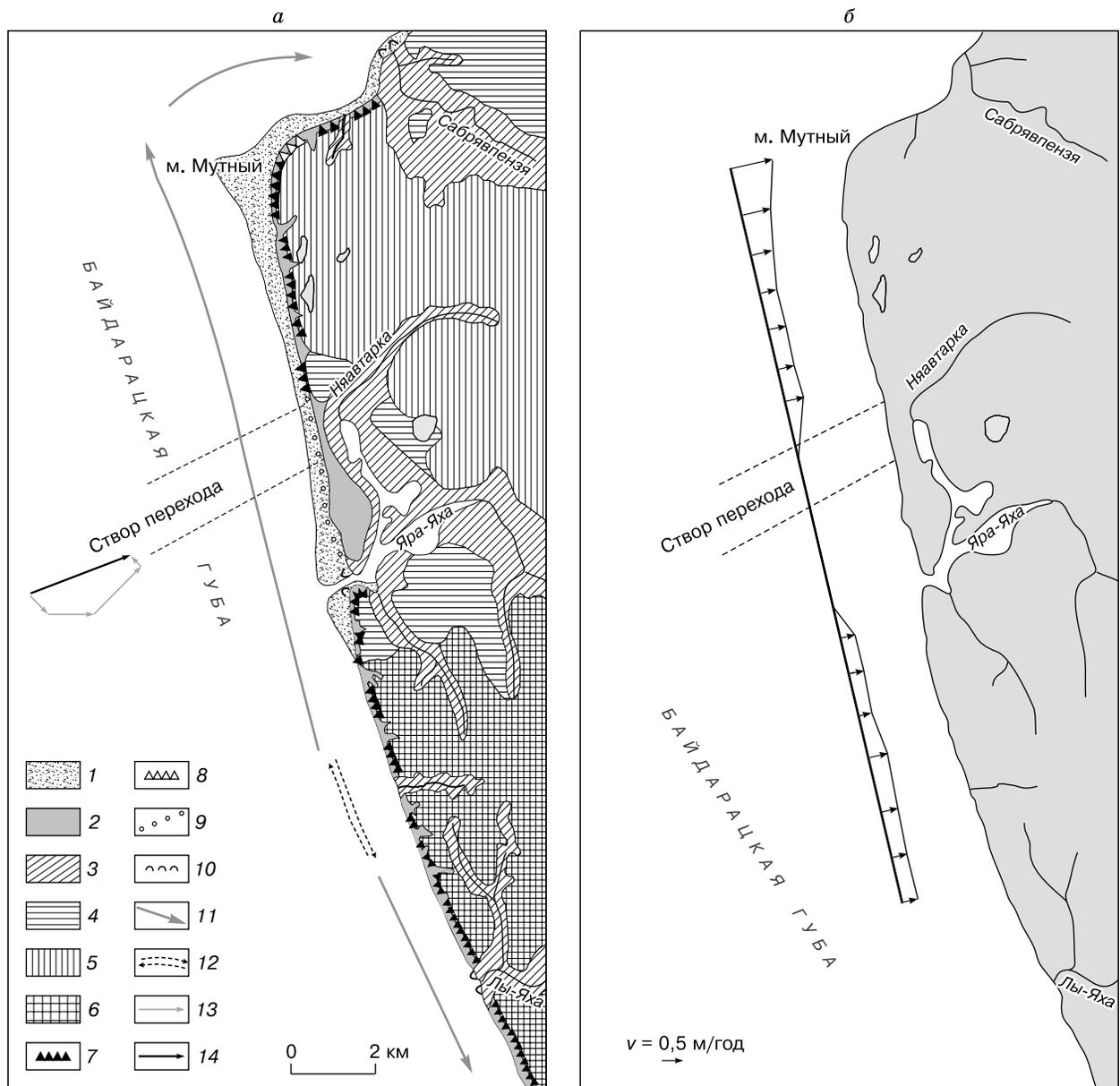


Рис. 4. Геоморфология и литодинамика (а) и эпора скоростей абразии (б) Ямального берега Байдаратской губы в районе перехода трубопровода.

Рельеф побережья: 1 – приливные осушки; 2 – береговые бары и пляжи; 3 – поймы рек и лайды. Морские террасы высотой: 4 – 4–7 м; 5 – 8–12 м; 6 – 15–25 м. Типы берегов: 7 – абразионно-термоденудационные; 8 – абразионные с отершим клифом; 9 – аккумулятивные пляжевые; 10 – аккумулятивные дельтовые. Волноэнергетические характеристики: 11 – вдольбереговые потоки наносов; 12 – участки двусторонних миграций наносов; 13 – вектор румбовых составляющих потоков волновой энергии; 14 – вектор равнодействующей румбовых составляющих потоков волновой энергии;  $v$  – среднегодовой величина отступления берегового уступа.

проявлению морской абразии препятствуют обширные осушки, переходящие вблизи подножия откосов в относительно высокие песчаные пляжи. Только вблизи м. Мутный берега приобретают ярко выраженный термоабразионный облик. В береговых откосах залегают более льдистые отложения, уходящие ниже их основания. Низкие пляжи в ос-

новании береговых откосов полностью не защищают берега от разрушения: в периоды высоких штормовых нагонов в нижней части откосов вырабатываются термоабразионные ниши глубиной до 1,2 м.

На южном участке между устьями рек Яра-Яха и Лы-Яха берега развиваются по абразионно-термоденудационному типу. Различия заключают-

ся здесь в механизме термоденудации. Вблизи устья р. Яра-Яха большую роль играют мощные оползневые процессы, когда по поверхности мерзлых суглинистых пород на пляж смещаются большие массы рыхлого материала. Южнее, на песчаных береговых откосах высотой 20–25 м, преобладают обвально-осыпные процессы. В обоих случаях продукты термоденудации поступают на пляж и подвергаются волновой сортировке. Тонкий материал, как правило, выносятся на глубину, а песчаный вовлекается во вдольбереговую поток наносов и расходуется на построение пляжей, осушек и других аккумулятивных форм.

Берег на Ямальском участке перехода закрыт островами Марресальские Кошки от воздействия северных и, частично, северо-западных ветров. Здесь в береговой зоне существенно проявляется эффект более слабых местных волн, возбуждаемых ветрами западного и юго-западного направлений, что и определяет наряду с геоморфологическими особенностями побережья интенсивность и направленность более слабых вдольбереговых потоков волновой энергии. В структуре энергетической равнодействующей волнения преобладают две румбовые составляющие – западного и юго-западного направлений, – которые в основном и определяют режим наносов на участке перехода. Абразионные берега, расположенные к северу и югу от участка перехода, наряду с твердым речным стоком являются одним из основных источников поступления обломочного материала в береговую зону. С северного участка в море ежегодно поступает  $2,6 \text{ м}^3$ , а с южного –  $7,2 \text{ м}^3$  песчано-алевритового материала с погонной длины берега 1 м.

Поскольку энергетическая равнодействующая ориентирована к берегу под углом, близким к нормали, на подводном береговом склоне преобладает процесс абразии и происходит перемещение донных наносов к берегу, что было подтверждено экспериментальными работами.

К северу от устья р. Яра-Яха результирующий вдольбереговой поток энергии волн направлен к м. Мутный, где отмечается резкое его падение. К дельте р. Яра-Яха приурочена локальная зона двусторонних миграций наносов. При этом большая часть (примерно 2/3) выносимых рекой наносов аккумулируется с северной стороны дельты, о чем свидетельствуют сформированные здесь обширные осушки.

Южнее устья р. Яра-Яха выявлена зона дивергенции вдольбереговых потоков волновой энергии, разделяющая исследуемый берег на два самостоятельных литодинамических участка: северный – с тенденцией перемещения наносов к м. Мутный, и южный, где более мощный вдольбереговой поток энергии направлен к югу и продолжается до устья р. Юрибей.

Для долговременных наблюдений за динамикой берегов на 16-километровом участке берега от м. Мутный до устья р. Лы-Яха установлены контрольные реперные профили. Разбивка профилей осуществлялась с таким расчетом, чтобы они охватывали разновысотные террасы с различными литологическими и криогенными характеристиками берегов.

Результаты наблюдений за 17-летний период показывают, что среднемноголетние скорости отступления берегов на северном участке достигают значений  $v = 0,3\text{--}0,9 \text{ м/год}$  (см. рис. 4,б).

Берег в пределах древней долины р. Яра-Яха подвержен слабым знакопеременным деформациям с тенденцией к аккумуляции. Абразионные берега на южном участке высокой морской террасы разрушаются и отступают со средней скоростью  $0,3\text{--}0,7 \text{ м/год}$ , самые неустойчивые берега приурочены к зоне дивергенции потоков волновой энергии.

Деформации поперечного профиля береговой зоны обычно вызываются воздействием на дно и берега сильных штормовых волнений, сопровождаемых высокими нагонами. В такие кратковременные периоды волновая энергия у берегов может возрасти в несколько раз по сравнению с обычными условиями. Высокие уровни, обусловленные прохождением над акваториями морей глубоких циклонов, продолжаются обычно 2–3 суток.

Другого рода деформации пляжей и подводного берегового склона носят односторонний необратимый характер и вызваны долговременными процессами разрушения берегов, смещения и углубления профиля дна. Они обусловлены взаимодействием гидродинамических, тепловых и мерзлотно-геологических процессов и продолжаются в течение всего безледного периода.

Установлено, что на всем участке перехода в период наиболее интенсивных штормов преобладают процессы размыва пляжей и осушек. Наибольшие отрицательные их деформации (до 50 см) происходят в зоне 2-го подводного вала, за счет его миграции в плане. В ложбине и на 1-м валу вертикальные деформации составляют 20–25 см. При этом вершина вала может мигрировать в плане до 50 м.

Наибольшие деформации дна (до 1,2 м) за период шторма 5%-й обеспеченности фиксируются в зоне подводных валов и ложбин, что объясняется их миграцией в период шторма. Глубже этой зоны (в интервале 3,5–6,5 м) отмечается аккумуляция наносов до 30–50 см. Далее в море, на глубинах 7–9 м, выявлены слабые (до 10 см), знакопеременные деформации дна.

Следует отметить, что величины деформаций дна зафиксированы в период не самых сильных штормовых нагонов, которые нельзя отнести к экстремальным. При других гидродинамических

ситуациях возможны более существенные вертикальные изменения пляжей и дна.

**Уральский участок** перехода газопровода характеризуется относительно сильными вдольбереговыми потоками волновой энергии. Берег открыт со стороны Карского моря для ветроволновых и ледовых воздействий. Подводный склон в его пределах отличается сложным морфологическим строением.

Побережье Байдарацкой губы на участке от о. Торасовэй до о. Левдиев представлено разновысотными поверхностями, сложенными пестрой по литологическому составу толщей четвертичных отложений (рис. 5,а).

На значительном протяжении побережья как к западу, так и к востоку от устья р. Ою-Яха к морю выходят береговые откосы высотой до 20–30 м, которые имеют двучленное строение: мощная (10–15 м) песчаная толща с редкими небольшими торфяными линзами подстилается плотными суглинками. Они содержат крупнообломочный материал – гальку и валуны диаметром до 1,5 м, которые встречаются на пляже под обрывами.

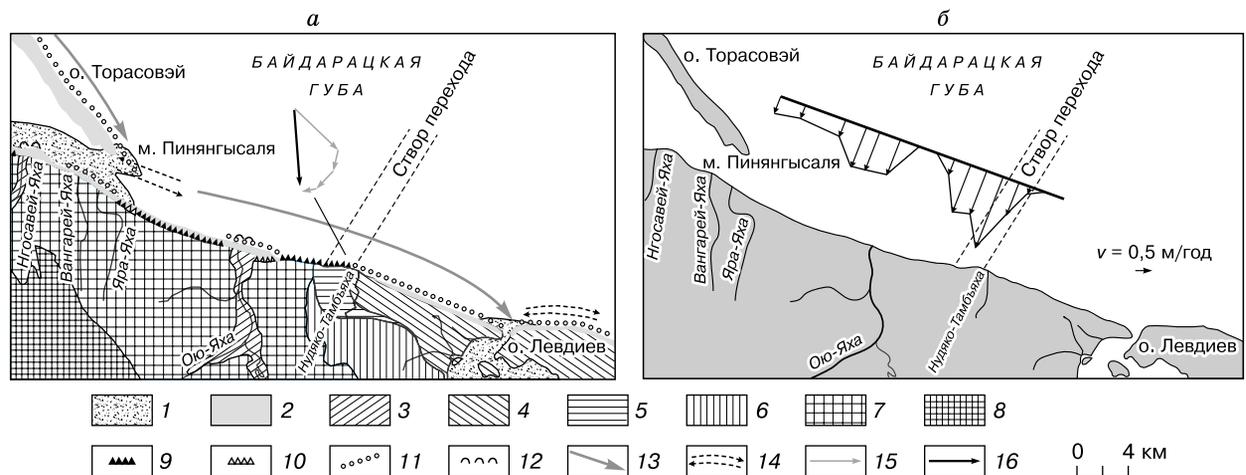
Более низкие поверхности имеют морское происхождение и сформировались в голоцене. В обрывах 4–8-метровой террасы на участке перехода обнажаются в основном средне- и мелкозернистые пески с прослоями легких суглинков, супесей, с органическими включениями. Льдонасыщенность пород, слагающих береговые откосы, изменяется в значительных пределах. Например, в 0,6–0,8 км к северо-западу от створа перехода в бе-

реговом уступе вскрываются высокольдистые болотные отложения. Кроме того, в береговых обнажениях вскрываются повторно-жильные льды, увеличивающие суммарную льдистость толщи. Песчано-супесчаные толщи, слагающие участок берега в восточной части перехода, характеризуются существенно более низкой льдистостью.

К востоку от перехода значительную площадь непосредственно в прибрежной зоне занимает низкая морская терраса (лайда) высотой до 2,5 м, которая сложена в основном песками. С удалением от берега мощность и плотность мохово-осоковой дернины возрастают. Поверхность лайды уже в 100–150 м от берега сильно увлажнена и заболочена.

В развитии современных геоморфологических процессов на разновысотных террасах выявлены некоторые различия. Узкая полоса берега развивается в основном под действием термоабразии и термоденудации. На крутых (до 50°) береговых откосах развивается комплекс процессов термоденудации: оползни-сплывы (посткриогенные сплывы), солифлюкция, термокарст, осыпание, обваливание, делювиальный смыв. Все эти процессы перемещают значительные массы грунта к подножию склона, где сначала образуются подсклоновые шлейфы, а в период штормовых нагонов материал удаляется волнами и течениями.

К западу от устья р. Ою-Яха в толще береговых уступов высокой террасы вскрываются мощные пластовые льды, формируются крупные термоцирки, являющиеся индикатором развития одного из характерных криогенных процессов на



**Рис. 5. Геоморфология и литодинамика (а) и эпоха скоростей абразии (б) Уральского берега Байдарацкой губы в районе перехода трубопровода.**

Рельеф побережья: 1 – приливные осушки; 2 – береговые бары и пляжи; 3 – поймы рек; 4 – лайды. Морские террасы высотой: 5 – 5–10 м; 6 – 12–20 м; 7 – 20–50 м; 8 – 60–80 м. Типы берегов: 9 – абразионно-термоденудационные; 10 – абразионные с отмершим клиффом; 11 – аккумулятивные пляжевые; 12 – аккумулятивные дельтовые. Волноэнергетические характеристики: 13 – вдольбереговые потоки наносов; 14 – участки двусторонних миграций наносов; 15 – вектор румбовых составляющих потоков волновой энергии; 16 – вектор равнодействующей румбовых составляющих потоков волновой энергии;  $v$  – среднееголетняя величина отступления берегового уступа.

побережье арктических морей. За счет вытаивания вскрытой в береговом уступе ледяной залежи и обрушения перекрывающих отложений процесс термоабразионно-термоденудационного разрушения берегов затрагивает значительные площади, захватывающие десятки метров в сторону суши. Здесь формируются овальные и циркообразные в плане понижения с отвесными задними стенками из залежей льда и мерзлых пород, которые интенсивно оттаивают в теплое время года. Масса оттаявшего грунта мощным потоком поступает из термоцирка на пляж, а затем удаляется отсюда волноприбойной деятельностью и вдольбереговыми течениями. За короткое арктическое лето задняя мерзлая стенка термоцирка может отступить на несколько метров. Процесс продолжается до полного вытаивания ледяной залежи, после чего наступает стадия стабилизации задней стенки и преимущественного абрадирования перемычек между соседними термоцирками. После вскрытия следующей ледяной залежи цикл активизации термоабразии повторяется.

Участок абразионно-термоденудационного берега, примыкающий к створу перехода с северо-запада, представляет собой останец морской террасы с абсолютными высотами порядка 15 м. Останец пересекают три больших оврага, отстоящих друг от друга примерно на равных расстояниях. Заложение оврагов по ледяным жилам происходит и в краевой части террасы, которую условно можно разделить на несколько блоков, характеризующихся различными типами разрезов. Так, участок протяженностью 400–450 м, непосредственно примыкающий к низкой террасе, характеризуется небольшими (до 5 м) абсолютными высотами; он сложен с поверхности мощной торфяной пачкой, подстилаемой озерными сильнольдистыми суглинками. В торфе вскрываются маломощные ледяные жилы, хвосты которых залегают в суглинках.

Геоморфологическое строение берега на участке створа перехода отличается разнообразием. Около 2/3 этого участка в его юго-восточной части приходится на террасу (останец) высотой 4–5 м, сложенную преимущественно песками. Общим признаком, определяющим развитие геоморфологических процессов, является повсеместное распространение в толще террасы полигонально-жильных льдов, при вытаивании которых формируются термоэрозионные ниши в верхних частях разреза, а на поверхности террасы – термокарстовые просадки. Поэтому данный участок трассы перехода характеризуется в целом пониженной естественной устойчивостью, и при прокладке трубопровода через нее возможна интенсивная активизация термоэрозионных процессов.

К северо-западу от этой террасы берег, постепенно снижаясь, переходит в лайду (до 2,0–2,5 м), в разрезе которой отмечен тонкий слой опесчанен-

ного торфа мощностью до 0,3 м, подстилаемого супесчано-суглинистыми осадками. В пределах лайды термоденудационные процессы в целом приглушены. Отчасти это объясняется наличием в верхней части разреза слоя торфа, сдерживающего протаивание осадков. В то же время низкие уступы имеют малую потенциальную энергию склоновых процессов, их динамика существенно зависит от воздействия гидродинамических факторов.

На Уральском участке берега от о. Торасовэй до о. Левдиев формируются берега как аккумулятивного, так и абразионного типов, показанные на рис. 5,а. Первые приурочены к зонам разгрузки вдольберегового потока наносов – участки к югу от о. Торасовэй и вокруг о. Левдиев. Они характеризуются устойчивыми береговыми откосами, широкими песчаными пляжами и осушками, защищающими берега от волнового разрушения. Встречаются также локальные участки аккумуляции, приуроченные к устьям рек и мелких водотоков. Реки формируют на подводном склоне речные бары, а мелкие водотоки – конусы выноса песчано-го материала.

На участке высокой террасы, расположенной между о. Торасовэй и устьем р. Ою-Яха, преобладают термоденудационные берега. Здесь в результате оттаивания песчаных и суглинистых пород к подножию береговых откосов смещается большое количество обломочного материала, который в периоды штормовых нагонов выносятся в море. Самый неустойчивый 3-километровый участок берега, расположенный к северо-западу от устья р. Ою-Яха, приурочен к участкам выхода глинистых пород. Второй, интенсивно разрушающийся термоденудационный участок берега высокой террасы расположен в 2 км к северо-западу от створа перехода, где скорость отступления берега достигает 2,5–3,0 м/год.

Непосредственно на 2-километровом участке перехода берег термоабразионный в северо-западной части и аккумулятивный в юго-восточной, поэтому устойчивость берега к волновым и термическим воздействиям здесь неодинакова. Юго-восточная часть этого участка защищена широкой песчаной террасой и поэтому устойчива. К северо-западу эта терраса постепенно уменьшается по ширине и переходит в узкий пляж, который в периоды штормовых нагонов не защищает берег от разрушения.

Уральский берег протяженностью 21 км от о. Торасовэй до о. Левдиев характеризуется однонаправленным потоком волновой энергии, который, начинаясь у южного конца о. Торасовэй, постепенно увеличивается к юго-востоку. В соответствии с этим вдольбереговой поток наносов направлен к юго-востоку, он постепенно подпитывается обломочным материалом за счет абразии берегов и твердого стока рек. По ориентировочной

оценке на участке от о. Торасовэй до устья р. Ою-Яха вследствие разрушения берегов ежегодно в море поступает более 100 тыс. м<sup>3</sup> песчано-алевритового материала.

На устьевом баре р. Ою-Яха часть наносов, переносимых с северо-запада, перехватывается и расходуется на формирование аккумулятивной приклоненной террасы, защищающей береговой уступ от размыва. К юго-востоку от устья р. Ою-Яха вдольбереговой поток наносов увеличивается за счет интенсивной абразии высоких террас, примыкающих к участку перехода газопровода. По ориентировочной оценке на этом 3-километровом участке берега ежегодно вследствие термоабразии в море поступает около 50 тыс. м<sup>3</sup> песчано-гравийного и алевритового материала, который переносится в сторону проектируемого газопровода. Вдольбереговой поток наносов разгружается у о. Левдиев, где в результате аккумуляции формируются широкие отмели и осушки.

Непосредственно на участке перехода газопровода, в северо-западной его части, отмечается дефицит наносов и, соответственно, размыв берега, а в юго-восточной части, примыкающей к песчаной террасе, – аккумуляция песчано-галечного материала.

Вследствие накопления наносов у юго-восточной части участка перехода сформировалась широкая (60–80 м) аккумулятивная терраса, сложенная песчано-галечным материалом, надежно защищающая берег от волнового размыва. Объяснение такой литодинамической ситуации на относительно небольшом участке берега заключается, по нашему мнению, в изменении режима вдольберегового потока наносов, обусловленного локальными особенностями рельефа дна. В строении дна здесь отмечаются две субпараллельные аккумулятивные формы, вытянутые в длину на 2 км, возвышающиеся до 1,5–2,0 м над окружающим дном и ориентированные под углом 45° к линии берега. Они, по-видимому, играют роль подводной плотины, сужая поперечное сечение потока наносов, вследствие этого происходит потеря емкости потока наносов и, как результат, аккумуляция обломочного материала.

Наибольшее распространение на Уральском берегу имеют пляжи приклоненного типа, т. е. примыкающие к береговым откосам. Среди них различаются широкие пляжи, близкие по форме к примкнувшей аккумулятивной террасе (около 50 % протяженности берега), и сравнительно узкие, окаймляющие береговой уступ морской террасы (30 %), а также «пляжи-откосы», плавно переходящие в лайду (20 %).

По профилю пляжа отмечается чередование осадков разной крупности. В полосе миграции приливоотливного уровня преобладает мелкий галечник с заполнителем из среднезернистого песка. Содержание гравия и гальки в этой части пляжа

составляет от 40 до 80 %, а среднезернистого песка – от 10 до 40 %. В средней, субгоризонтальной части пляжа, включая вершину штормового вала, преобладает среднезернистый песок с примесью мелкозернистого. На поверхности террасы, примыкающей к основанию берегового откоса, прослеживается галечная отмостка.

Для организации многолетних наблюдений за динамикой берегов, пляжей и подводного берегового склона на участке от о. Торасовэй до о. Левдиев установлены контрольные профили, охватывающие разновысотные морские террасы, срезаемые морем (см. рис. 5,а). Результаты наблюдений за динамикой берегов представлены на рис. 5,б.

В соответствии с геоморфологическим строением побережья в его пределах мы выделили три береговых участка:

– 10-километровый участок высокой террасы от о. Торасовэй до устья р. Ою-Яха, где берег отступает со средней скоростью 1 м/год. При этом наименьшая скорость разрушения берега (0,1–0,4 м/год) установлена вблизи о. Торасовэй, который защищает берег от волнового воздействия. С наибольшей скоростью (до 1,8–2,5 м/год) отступает берег вблизи устья р. Ою-Яха, где, по-видимому, в летнее время сказывается тепловое воздействие речных вод;

– 3-километровый участок берега высокой террасы, расположенный к северо-западу от створа перехода; здесь средняя скорость отступления берегов составляет 1,7 м/год. Наибольшая скорость (3,0 м/год) приурочена к террасе, сложенной с поверхности сильнольдистой торфяной толщей;

– участок низкой морской террасы и лайды, где скорость абразии берегов составляет 0,4–0,6 м/год, при этом наиболее неустойчивым является северо-западный участок перехода.

Вертикальные деформации поверхности пляжа определялись путем повторных послештормовых нивелировок по постоянным профилям. Наибольшие вертикальные деформации берега и пляжа имеют место на участке к северо-западу от створа перехода. Вертикальные деформации пляжа до 1 м зафиксированы в основании берегового откоса, далее в сторону моря они постепенно уменьшаются, составляя на урезе до 0,5 м.

В строении подводного рельефа дна на рассматриваемом участке выявлены подводные валы и ложбины. Первая зона валов расположена субпараллельно берегу и прослеживается до глубины 4 м, вторая зона подводных валов приурочена к глубинам 6–9 м.

Сравнение результатов повторных промеров показывает, что наибольшие деформации рельефа дна приурочены к зоне прибрежных подводных валов и составляют от 0,5 до 1,5 м, при этом величина миграций подводных валов в плане может достигать 150 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на короткий динамически активный период, береговая зона Байдарацкой губы в районе перехода газопровода характеризуется достаточно интенсивной литодинамической активностью, что связано, с одной стороны, с относительной открытостью акватории к юго-западному сектору Карского моря, с другой – с низкой устойчивостью берегов, сложенных дисперсными мерзлыми породами.

Выполненные работы позволили оценить устойчивость берегов Ямальского и Уральского участков в районе перехода трубопровода на достаточно протяженном отрезке побережья (16 и 21 км соответственно). Установлено, что наименьшей устойчивостью обладают берега, сложенные сильнотальдыстыми суглинистыми отложениями, содержащие залежи пластовых льдов. Такие берега получили широкое распространение на Уральском участке, в том числе непосредственно в пределах северного сегмента створа перехода. Среднемноголетние величины термоабразии берегов могут достигать 2–3 м/год. В этой связи целесообразно перенесение створа перехода трубопровода на Уральском участке на 300–500 м к востоку, на динамически более устойчивый участок. Ямальский участок, наоборот, выбран весьма удачно с точки зрения безопасности трубопровода.

Восстановленная в 2005 г. опорная сеть мониторинга динамики берегов в зонах перехода трас-

сы магистральных газопроводов через Байдарацкую губу может служить надежной основой для своевременного выявления неблагоприятных тенденций развития береговых процессов (например, под влиянием изменения температурного режима и повышения уровня моря, вызванных прогнозируемым потеплением климата) и принятия соответствующих инженерных решений по местоположению, глубине и способу укладки трубопроводов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-05-64258).

## Литература

- Бирюков В.Ю., Совершаев В.А.** Рельеф дна юго-западной части Карского моря и история развития его в голоцене // Геология и геоморфология шельфов и материковых склонов. М., Наука, 1985, с. 89–95.
- Григорьев Н.Ф.** Криолитозона прибрежной части западного Ямала. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1987, 111 с.
- Григорьев Н.Ф.** Многолетнемерзлые породы Приморской зоны Якутии. М., Наука, 1966, 180 с.
- Жигарев Л.А.** Океаническая криолитозона. М., Изд-во МГУ, 1997, 320 с.
- Природные условия Байдарацкой губы.** Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал–Центр. М., ГЕОС, 1997, 432 с.
- Совершаев В.А.** Динамика морского оледенения и формирование береговых линий на шельфе арктических морей // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1983, вып. 1, с. 88–90.

*Поступила в редакцию  
15 ноября 2005 г.*