НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 4, с. 59–69 http://www.izdatgeo.ru

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ШЕЛЬФЕ И ПОБЕРЕЖЬЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

УДК 551.341:550.814

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ КАРСКОГО МОРЯ В РАЙОНЕ МЕТЕОСТАНЦИИ МАРРЕ-САЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Л.Н. Крицук, В.А. Дубровин, Н.В. Ястреба

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО), 142452, Московская область, пос. Зеленый, Россия; lnkritsuk@mail.ru

Приведены результаты многолетних комплексных наблюдений за динамикой береговой зоны Карского моря в районе стационара ВСЕГИНГЕО Марре-Сале за 44-летний период. Наземное фиксирование отступания бровки берега на расстоянии 4,5 км совместно с разбуриванием береговой зоны и использованием дистанционных методов исследования позволило выявить основные закономерности проявления и динамики деструкционных и аккумулятивных процессов в районе стационара. На основе использования ГИС-технологий впервые получены объективные количественные данные по отступанию бровки и подножия береговых обрывов (средние и предельные значения) как за весь период наблюдений, так и за отдельные годы. Положение береговой линии в районе стационара и ее динамика во времени и пространстве четко фиксируются по крупномасштабным аэрофотоснимкам и видеофотоматериалам залетов разных лет. По данным дистанционного зондирования Земли на площади стационара выявлена активизация геодинамических процессов в устье реки Марре-Яха.

Береговая зона, материалы дистанционного зондирования Земли, ГИС-технологии, отступание бровки, термоабразия, подземные льды, устье реки

RESULTS OF COMPLEX STUDY OF THE KARA SEA SHORE DYNAMICS IN THE AREA OF THE METEOROLOGICAL STATION MARRE-SALE, USING GIS-TECHNOLOGIES

L.N. Kritsuk, V.A. Dubrovin, N.V. Yastreba

All-Russian Research Institute of Hydrogeology and Engineering Geology (VSEGINGEO), 142452, Moscow Region, pos. Zeleny, Russia; lnkritsuk@mail.ru

The results of 44-year integrated observations of the Kara Sea shore dynamics in the area of the VSEGINGEO Marre-Sale Station have been presented. The multi-year on-land registration of the sea shoreline retreat to the distance of 4.5 km in combination with detailed drilling of the shore zone and with the use of remote research methods enabled the authors to reveal the basic regularities in the manifestation and dynamics of destructive and accumulative processes within this area. The use of GIS-technologies have allowed one to obtain for the first time the objective qualitative data about the shoreline retreat and bottom areas of the shore cliffs (average and interval values) both for the total period of observation and particular periods. The real state of the shoreline in the station area and its dynamics are clearly registered by large-scaled aerial photos and video-images taken in different years. Data of the remote sounding of the Earth (RSE) in the station area demonstrate the active manifestation of the geodynamic processes in the mouth of the Marre-Yakha river.

Shore zone, materials of the remote sounding of Earth, GIS-technology, shoreline retreat, thermal abrasion, ground ice, river mouth

ВВЕДЕНИЕ

Активное освоение нефтегазовых месторождений полуострова Ямал сопровождается развитием широкого спектра экзогенных (в первую очередь криогенных) геологических процессов, способных ухудшить экологическую обстановку региона и резко увеличить затраты на добычу и транспортировку углеводородов. Важное место по сложности экологических проблем, связанных с разработкой месторождений нефти и газа, занимает шельф арктического моря и особенно его мел-

ководная прибрежная часть. Именно для этой узкой полосы акватории и береговой зоны характерны наиболее опасные криогенные, а также гидродинамические процессы, обусловленные штормами и вдольбереговыми течениями.

Наибольшую опасность для освоения прибрежных месторождений Западного Ямала представляют процессы, связанные с переработкой береговых отложений, отступанием береговой линии, спуском озер, новообразованием многолетнемерзлых пород (ММП) в днищах молодых хасыреев и формируемых элементах рельефа в устьях рек.

В комплекс деструкционных процессов разрушения берега Карского моря входят морозобойное растрескивание грунтов на бровке берега (откуда сдувается снежный покров), вытаивание ледяных тел, термосолифлюкция (как медленная, так и быстрая), термоабразия, термоэрозия, термокарст. Совместное их действие наряду с процессами некриогенной группы (абразионными и гравитационными) формирует своеобразный облик морского берега на Западном Ямале: чередование фестончатых обрывов мерзлых пород (осложненных термоэрозионными оврагами, термоцирками и термокарами, термотеррасами, волноприбойными нишами и байджерахами) с участками лайды, устьев рек и крупных ручьев.

Важная роль в переработке берега Карского моря принадлежит затяжным осенним штормам, которые удаляют с берега подготовленный за теплый период грунтовой материал, снесенный в основание склонов, и размывают обвалившиеся блоки мерзлого грунта, а также вскрывшиеся в летний период ледяные тела и льдистые ММП в обнажениях коренного берега. В результате в течение штормового периода в основании морского берега формируются крупные термоабразионные ниши глубиной от 1–2 м до нескольких метров, способствующие активному разрушению клифа на следующий год. Поэтому выявление закономерностей формирования и динамики этих процессов, изучавшихся авторами в районе метеостанции Марре-Сале, имеет не только теоретическое, но и большое практическое значение.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Метеостанция Марре-Сале – одна из трех первых полярных станций, организованных в начале XIX в. отделом торговых портов Министерства торговли и промышленности России, функционирует с сентября 1914 г. На станции получен длительный ряд метеонаблюдений и один из самых длинных рядов наблюдений за отступанием бровки берега на п-ове Ямал, сведения о которых сохранились в архивных документах и были опубликованы [*Романенко, 2008*].

Расстояние от домов, построенных в 1912 г., до бровки обрыва высотой 22–25 м, сложенного песчано-глинистыми отложениями, включавшими подземные льды, составляло в 1914 г. около 40 саженей (85,3 м). До 1937 г. полярники постоянно наблюдали за отступанием бровки, периодически перемещая в глубь берега различные сооружения (радиостанцию, радиомачту и жилые помещения). К 1938 г. все дома постройки 1912 г. (кроме бани, переделанной под жилье) были брошены, а возведенная в 1927 г. радиостанция в 1948 г. оказалась всего в 2 м от обрыва. В 1958 г. каменные дома постройки 1912 г. упали в море. Таким образом, бровка обрыва коренного берега в районе станции за 44 года отступала со средней скоростью 1,9 м/год.

По данным, полученным при анализе архивных материалов, скорость отступания бровки существенно различалась в разные годы. Так, в 1946–1953 гг. береговые уступы отступили на 8–35 м (1,0–4,4 м/год), а за одно лето 1950 г. – на 8 м [*Романенко, 2008*].

В 1952 г. на станции были построены новые здания, которые в 1969 г., судя по топографической карте м-ба 1:25 000, находились на расстоянии 200 м от бровки. В 2013 г. это расстояние уменьшилось до 117 м, т. е. средняя скорость отступания бровки напротив станции за 44 последних года также составила примерно 1,9 м/год.

В 1978 г. в районе метеостанции Марре-Сале институтом ВСЕГИНГЕО был создан геокриологический стационар. Поскольку метеостанция Марре-Сале имеет длинный ряд метеонаблюдений, стационар является фоновым объектом мониторинга для всей центральной части Западного Ямала, интенсивно осваиваемой в настоящее время.

Основной задачей функционирования стационара являлось изучение динамики температурного режима мерзлых пород и криогенных процессов, из которых важнейшими являются процессы, связанные с разрушением и отступанием коренного берега.

Целью организации режимных наблюдений за береговыми процессами было накопление фактических данных по скорости отступания берега моря, изучение ее межгодовой изменчивости, а также оценка влияния геокриологических условий в прибрежной зоне на темпы и механизм разрушения берегов. Комплекс наблюдений за отступанием бровки берега включал: 1) измерения на жестко закрепленных на местности створах, оборудованных в 1978 г. Ю.Л. Шуром; 2) описание и фотографирование береговых обнажений; 3) аэровизуальные наблюдения; 4) периодические видеофотосъемки береговой зоны; 5) обработку аэрофотоснимков (АФС) залетов разных лет, в том числе и стереофотограмметрическую [*Гельман, 1994*].

В наземных наблюдениях за отступанием бровки берегового обрыва в разные годы участвовали сотрудники ВСЕГИНГЕО и ИКЗ СО РАН. Результаты этих наблюдений обрабатывались и периодически публиковались в разных источниках [*Васильев, Сауткин, 1992; Васильев и др., 2011; и др.*]. Согласно представлением авторов этих работ, средние многолетние величины отступания бровки по 60 створам, закрепленным на расстоянии 4,5 км между устьями рек Марре-Яха и Явар-Яха, могут соответствовать величине отступания подошвы берега, а следовательно, и величине термоабразии. Среднее значение скорости отступания бровки берега за 30 лет (1978–2008) было оценено в 1,7 м/год [*Васильев и др., 2011*]. В графической или табличной форме эти данные отражают величину отступания бровки по дискретным точкам, расположенным в среднем на расстоянии порядка 70 м, поэтому результаты, приведенные в указанных работах, не могут считаться достоверными.

С конца прошлого века основным методом получения количественных данных о динамике рельефа стало сравнение космических снимков со старыми аэрофотоснимками и топографическими картами. Одним из первых этот метод для района Марре-Сале применил В.А. Троицкий [*1977*]. В отличие от наземных наблюдений дистанционные позволяют получать объективное представление о непрерывной динамике процесса в пространстве, а повторные наблюдения – и во времени.

В настоящей работе авторам удалось с помощью высокоинформативных ГИС-технологий получить объективные количественные данные по скорости отступания бровки и подошвы коренного берега, а также выявить особенности динамики процессов в пределах устьевой зоны р. Марре-Яха за 44 года.

Для определения динамики береговой зоны Карского моря в районе стационара были использованы разновременные и разномасштабные материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ): топографическая карта м-ба 1:25 000, составленная по АФС м-ба 1:35 000 залетов 1969 г., АФС 1978 г. (м-бов 1:6 000 и 1:12 000), выполненных Л.И. Вейсманом, космические снимки (КС) высокого разрешения 2009 г. и данные некоторых повторных видеофотосъемок м-ба ~1:3 000, проводимых периодически В.А. Дубровиным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По характеру протекания береговых процессов на площади стационара выделяются два типа участков морского берега, типичных для всего побережья Западного Ямала. К первому типу относятся террасовые поверхности (с абс. отметками от 10–15 до 20–25 м), ко второму – устьевые части рек Марре-Яха и Явар-Яха (с абс. отметкой 1–3 м). По данным многолетних наземных наблюдений, скорость отступания бровки коренного берега в районе стационара Марре-Сале изменяется в широких пределах как во времени, так и по простиранию. При средней скорости примерно 1,7 м/год [*Васильев и др., 2011*] максимальные значения этой величины за отдельные годы превышали 10 м, а минимальные равнялись нулю.

На рис. 1 приведены результаты наблюдений за изменением береговой зоны Карского моря (длиной свыше 5 км) на стационаре Марре-Сале за 44 года (1969–2013) по данным дешифрирования разновременных и разномасштабных материалов ДЗЗ. В основу дешифрирования был положен космический снимок 2009 г. с разрешением 1–2 м. На него путем пространственной привязки (программа ArcGIS) были наложены все остальные снимки берега и топографическая карта м-ба 1:25 000 (1969 г.). С целью увеличения наглядности рисунка и создания удобства для его цифровой обработки он был разделен на две части разных масштабов с демонстрацией динамики бровки и подножия берегового обрыва соответственно.

В табл. 1 приведены значения отступания бровки и подошвы на междуречьи Марре-Яхи и Явар-Яхи, длиной около 4,5 км, за разные периоды времени по 22 трансектам (профилям), выбранным авторами с учетом максимального охвата участков с разной скоростью развития процессов (с расстоянием по берегу в среднем через 200 м). Величина отступа определялась с помощью программы ArcGIS между линиями берега в разные годы.

В табл. 1 (строки 1 и 3) приведены результаты всех измерений с привязкой к трансектам, что позволяет выявлять особенности динамики процессов как во времени, так и в пространстве.

Из табл. 1 прежде всего следует, что скорость отступания бровки берега значительно превышает скорость отступания подножия и в разные периоды наблюдений, и за весь цикл и, следовательно, не может служить показателем скорости морской термоабразии.

Очевидно, что временная динамика процесса разрушения береговой зоны и скорость отступания бровки берега зависят от климатических условий в разные годы. Повышенные значения этой величины отмечались при наземных исследованиях в годы с более теплым летним периодом или большей суммой летних атмосферных осадков, а максимальные – при наличии обоих компонентов климата. Наибольшие относительные величины отступания бровки за период наблюдений фиксировались в 1989, 2000, 2005 и 2012 гг. (рис. 2).

В табл. 2 приведены обобщенные метеоданные за разные периоды наблюдения. В табл. 2 отражен существенный рост суммарного значения среднелетних температур воздуха и количества ат-

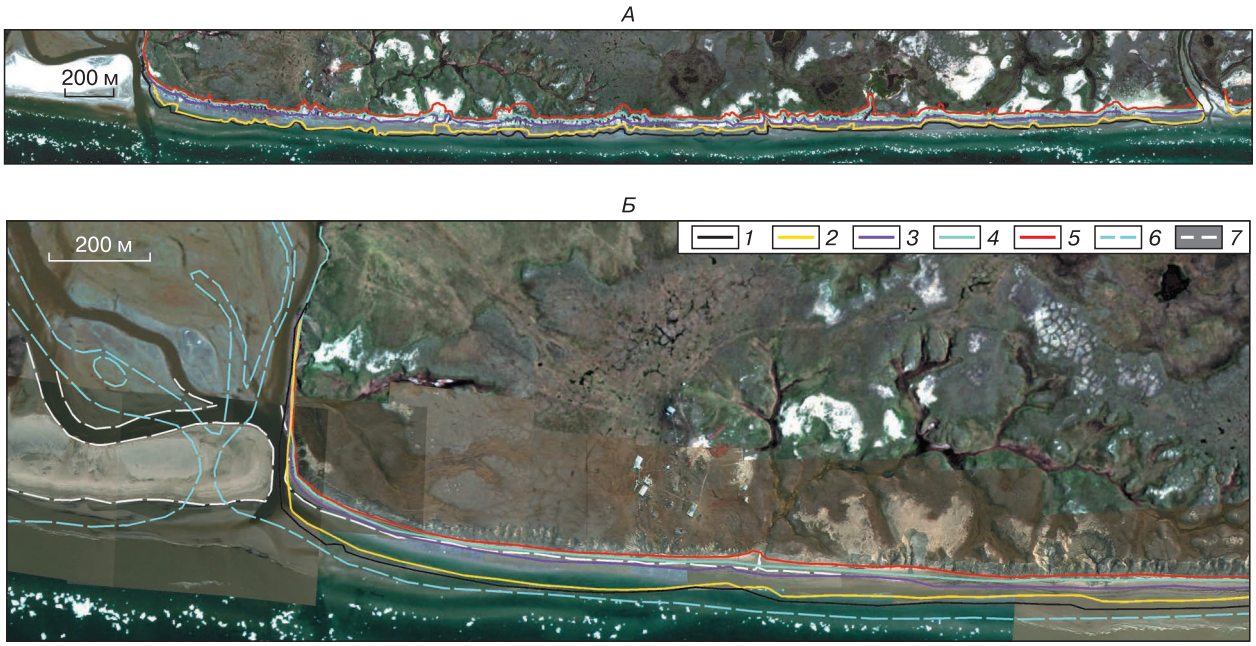

Рис. 1. Динамика берега Карского моря в районе стационара Марре-Сале на междуречье Марре-Яха–Явар-Яха за 44 года (1969–2013).

А – бровка берега (~4,5 км); *Б* – подножие склонов (~2,0 км); *1* – 1969 г.; *2* – 1978 г.; *3* – 1999 г.; *4* – 2009 г.; *5* – 2013 г. Береговая линия моря: *6* – 1969 г.; *7* – 2013 г.

Таблица 1. **Динамика коренного берега Карского моря в районе стационара Марре-Сале за 44-летний период**

№ п/п	Отступание*, м	1969–1978 (9 лет)	1978–1999 (21 год)	1999–2009 (10 лет)	2010–2013 (4 года)	1969–2013 (44 года)
1	Бровка берега	1–20; 2–20; 3–9; 4–12; 5–15; 6–9; 7–11; 8–41; 9–14; 10–18; 11–29; 12–13; 13–12; 14–20; 15–20; 16–10; 17–11; 18–13; 19–12; 20–12; 21–3; 22–5	1–45; 2–50; 3–53; 4–42; 5–44; 6–34; 7–36; 8–15; 9–70; 10–40; 11–38; 12–35; 13–30; 14–24; 15–29; 16–23; 17–19; 18–17; 19–14; 20–32; 21–42; 22–13	1–13; 2–12; 3–26; 4–27; 5–43; 6–15; 7–24; 8–32; 9–12; 10–5; 11–12; 12–5; 13–20; 14–25; 15–7; 16–27; 17–19; 18–7; 19–17; 20–23; 21–17; 22–20	1–10; 2–13; 3–17; 4–15; 5–15; 6–11; 7–21; 8–44; 9–3; 10–40; 11–56; 12–16; 13–6; 14–31; 15–12; 16–21; 17–18; 18–19; 19–13; 20–16; 21–6; 22–8	88; 95; 105; 96; 117; 69; 92; 132; 99; 103; 136; 69; 68; 100; 68; 81; 67; 56; 56; 83; 68; 46
2	Средние значения за период	329:22 = 14,9	745:22 = 33,9	411:22 = 18,7	411:22 = 18,7	1894:22 = 86,1
3	Скорость отступания, м/год	1,7	1,5	1,9	4,7	2,0
4	Подножие береговых обрывов	1–12; 2–20; 3–6; 4–4; 5–14; 6–15; 7–10; 8–8; 9–11; 10–6; 11–13; 12–5; 13–21; 14–13; 15–11; 16–16; 17–10; 18–14; 19–18; 20–20; 21–13; 22–8	1–46; 2–49; 3–48; 4–31; 5–30; 6–26; 7–40; 8–22; 9–14;10–27;11–21; 12–29; 13–18; 14–38; 15–33; 16–36; 17–17; 18–21; 19–17; 20–21; 21–18; 22–15	1–10; 2–7; 3–21; 4–15; 5–10; 6–15; 7–17; 8–12; 9–21; 10–12; 11–10; 12–22; 13–14; 14–5; 15–5; 16–15; 17–12; 18–9; 19–12; 20–16; 21–5; 22–12	1–6; 2–6; 3–9; 4–10; 5–11; 6–18; 7–9; 8–12; 9–17; 10–11; 11–9; 12–22; 13–22; 14–16; 15–16; 16–11; 17–17; 18–8; 19–6; 20–12; 21–17; 22–8	74; 82; 84; 60; 65; 74; 76; 54; 63; 56; 53; 78; 75; 72; 65; 78; 56; 52; 53; 69; 53; 43
5	Средние значения за период	268:22 = 12,18	617:22 = 28,0	277:22 = 12,6	273:22 = 12,4	1435:22 = 65,23
6	Скорость термоабразии, м/год	1,4	1,3	1,3	3,1	1,5

* Данные по 22 линейным трансектам между линиями на рис. 1, измеренные с помощью программы ArcGIS.

мосферных осадков за период с 1969 по 2009 г. В последний период (2010–2013 гг.) сумма среднелетних температур и количества осадков несколько уменьшились, тогда как именно в этот период (как следует из табл. 1) отмечаются самые высокие скорости отступания как бровки, так и подножия береговых обрывов. Судя по рис. 2, 2012 год был аномальным по сумме летних температур и количеству осадков в теплый период, благодаря чему резко возросли обобщенные показатели за этот период.

Средняя за 44 года величина отступания бровки составила 86 м, а подножие обрывов за этот период отступило в среднем на 65 м. Средняя за этот период скорость отступания бровки равна 2,0 м/год, подножия – 1,5 м/год.

В табл. 1 явно прослеживается различие величины отступания бровки по разным трансектам, как по периодам наблюдений, так и в разных точках за один период. Различия эти определяются криолитологическим строением ММП и прежде всего наличием и условиями залегания широко распространенных на стационаре подземных льдов и сильнольдистых грунтов. Суммарная максимальная величина отступания бровки за 44 года (в пределах термоцирков с вытаивающим льдом) составила 133–136 м, а суммарная минимальная на участках с нельдистыми грунтами равна 46 м. Вследствие этого вопрос о закономерностях распределения в пространстве ледяных тел имеет не только научное, но и большое практическое значение, поскольку до сих пор не существует инженерных решений по укреплению берегов высоких морских террас (равнин) на побережье арктических морей.

Широкое распространение мощных залежеобразующих подземных льдов в районе полярной станции Марре-Сале известно давно. Береговые обнажения, включавшие ледяные тела разной формы и размеров, изучались многими исследователями, по-разному трактовавшими происхождение пластовых льдов – от ледникового [*Каплянская, Тарноградский, 1982; Тарноградский, 1982; Гатауллин, 1992*] до морского [*Шполянская, 1993; Данилов, 1997; Васильев, Рогов, 2001*], тогда как мощные жилы льда считаются сингенетическими образованиями.

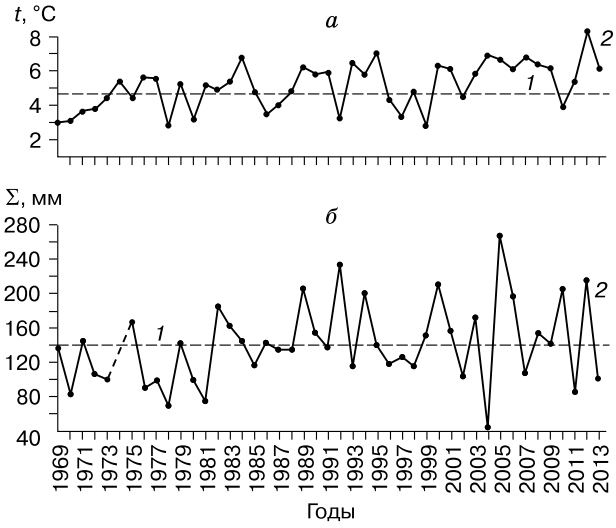

Рис. 2. Динамика климатических показателей за период 1969–2013 гг. (по данным метеостанции Марре-Сале).

а – среднелетняя температура воздуха; *б* – сумма атмосферных осадков за теплый период (июнь–сентябрь); *1* – среднемноголетние показатели; *2* – ход ежегодного значения.

С момента организации стационара ВСЕГИНГЕО в 1978 г. береговые обнажения подземных льдов здесь являются предметом пристального внимания авторов настоящей работы. В период наблюдений в береговых обрывах коренного берега Карского моря обнажались и вытаивали ледяные и ледогрунтовые тела разной морфологии и размеров [*Крицук, Дубровин, 2000; Крицук, 2010*]. Бурением многочисленных скважин на площади стационара (рекогносцировочных, разведочных и наблюдательных) было вскрыто большое количество дискретных ледяных тел (мощностью от долей метра до 10 м) в верхней 10–12-метровой части геологического разреза, связанных со специфическими криогидрогенными морфоструктурами (кольцевыми или линейно вытянутыми), которые

Таблица 2. **Динамика климатических параметров по данным метеостанции Марре-Сале**

Метеоданные	1969–1978 (10 лет)	1979–1986 (8 лет)	1987–1999 (13 лет)	2000–2009 (10 лет)	2010–2013 (4 года)
Сумма среднемесячных летних температур воздуха за период, °С	167,2	153,0	261,1	248,0	91,6
То же, за один сезон	16,7	19,5	18,6	24,8	22,9
Средневзвешенная сумма осадков за летний период, мм	1005*	921*	1863	1544	609
То же, за один сезон	111,7	131,6	143,3	154,4	152,3

* Неполный период – отсутствуют данные за один сезон.

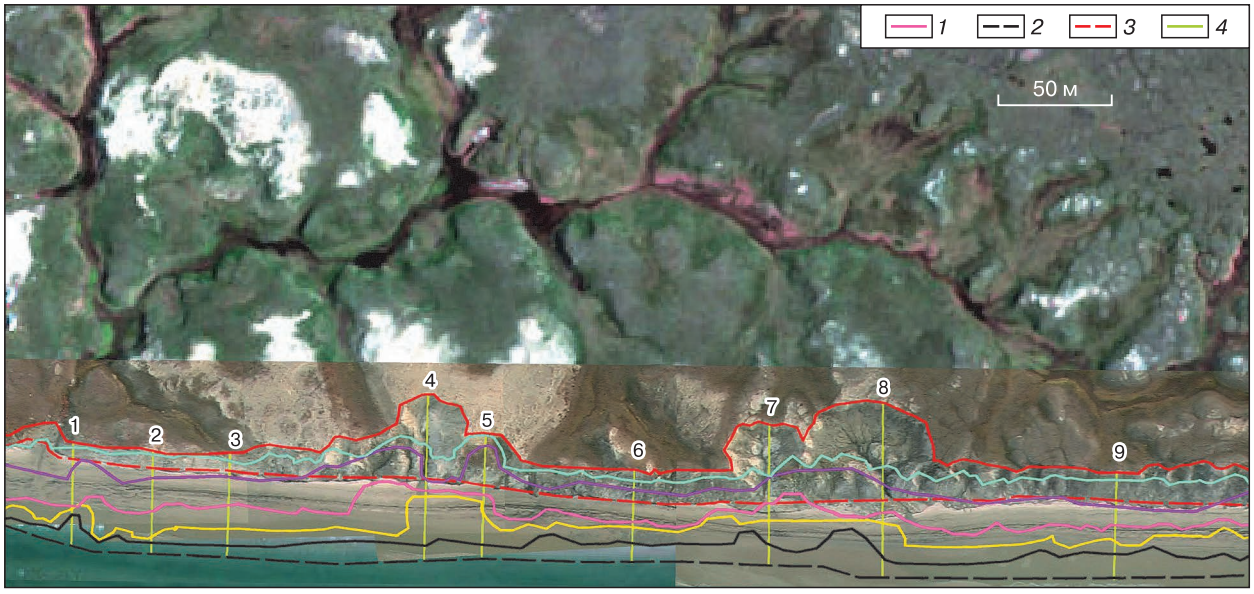

Рис. 3. Динамика коренного берега в пределах полукольцевой морфоструктуры.

1 – бровка берега, 1986 г.; *2* – подножие обрыва, 1969 г.; *3* – подножие обрыва, 2013 г.; *4* – линейные трансекты с номерами 1–9 (см. табл. 3). Остальные обозн. см. рис. 1.

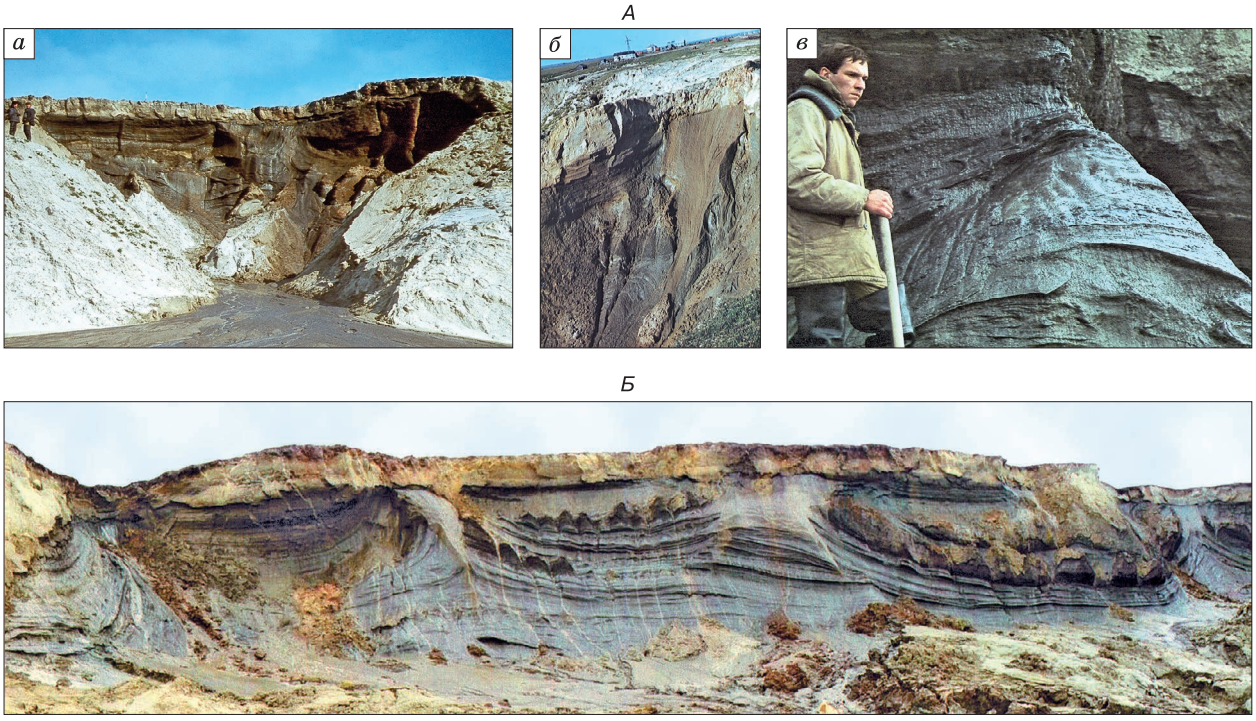

Рис. 4. Обнажения подземных льдов в термоцирках полукольцевой морфоструктуры на берегу Карского моря.

А – термоцирки с обнажившимися подземными льдами, 1986 г.; *а–в* – трансекты 4, 5, 7. *Б* – обнажение в термоцирке (трансект 8), 2011 г. [*Kurchatova et al., 2012*].

четко дешифрируются на материалах ДЗЗ (крупномасштабных АФС, видеоснимках и КС высокого разрешения) [*Крицук, 2001, 2010*].

В 1986 г. в пределах наиболее крупной из подобных морфоструктур (длиной по берегу около 1 км) сотрудниками ВСЕГИНГЕО были проведены комплексные геокриологические и геофизические исследования. Целью их было выявление закономерностей пространственного размещения мощных подземных льдов, обнажавшихся в береговых обрывах, их генезиса и влияния на динамику береговых процессов. Эти исследования позволили установить вторично-внутригрунтовую природу мощных подземных льдов, распространенных в районе стационара, генетическую связь подземных льдов с изучаемой морфоструктурой и криогидротектоническую природу самой морфоструктуры [*Крицук, 2001*]. По мнению Л.Н. Крицук [*2010*], эти подземные льды сформировались в суровую климатическую эпоху при промораживании различных природных вод: подземных (разных горизонтов, таликовых – подрусловых и подозерных, вод глубокой циркуляции) и поверхностных (речных и озерных). В процессе их замерзания в закрытых системах периодически создавалось сверхвысокое гидравлическое давление, приводившее к разрыву мерзлой толщи и внедрению в нее замерзающей воды. К выводу о повторно-инъекционной природе мощных ледяных жил в береговых обнажениях Марре-Сале позднее пришла Е.А. Слагода [*Слагода и др., 2010*].

В последующие годы наблюдения за ледяными телами, открывавшимися в пределах морфоструктуры, проводили А.А. Васильев, И.Д. Стрелецкая, М.З. Каневский и др.

На рис. 3 отражена специфика береговых процессов в пределах полукольцевой морфоструктуры на берегу Карского моря. Фотографии обнажений подземного льда, изучавшихся авторами в 1986 г., представлены на рис. 4, *А*. На рис. 4, *Б* приведена панорама гигантского обнажения мощных подземных льдов, активно вытаивавших с 2009 по 2012 г. в пределах молодого термоцирка (открывшегося только в 2000 г.).

Так же как и рис. 1, рис. 3 представляет собой КС высокого разрешения 2009 г., на который наложена панорама видеофотоснимков береговой зоны 2013 г. с четко дешифрируемыми термоцирками. На рис. 3 длинный период (1978–1999 гг.) удалось расчленить на два, так как у авторов имелись фотоснимки по площади морфоструктуры за 1986 г., сделанные с вертолета.

Для удобства проведения количественного анализа динамики береговой зоны, а также анализа данных других исследователей, наблюдавших за вытаиванием ледяных тел в обнажениях Марре-Сале, на рис. 3 были зафиксированы трансекты, по которым производился подсчет. Более крупный масштаб этого рисунка (в сравнении с рис. 1) позволил совместить на нем данные по отступанию бровки и положение подножия береговых обрывов в 1969 и 2013 гг. Результаты подсчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3. **Динамика коренного берега Карского моря в пределах полукольцевой морфоструктуры (район метеостанции Марре-Сале)**

№ п/п	Отступание, м*	1969–1978 (9 лет)	1978–1986 (8 лет)	1986–1999 (13 лет)	1999–2009 (10 лет)	2009–2013 (4 года)	1969–2013 (44 года)
1	Бровка берега	1–2; 2–7; 3–15; 4–42; 5–28; 6–14; 7–21; 8–30; 9–11	1–6; 2–21; 3–20; 4–6; 5–16; 6–5; 7–15; 8–9; 9–15	1–32; 2–29; 3–25; 4–10; 5–42; 6–28; 7–12; 8–26; 9–16	1–20; 2–21; 3–14; 4–30; 5–10; 6–8; 7–12; 8–15; 9–24	1–5; 2–3; 3–8; 4–45; 5–2; 6–8; 7–45; 8–56; 9–14	1–65; 2–81; 3–82; 4–133; 5–98; 6–63; 7–105; 8–136; 9–80
2	Средние значения за период	170 : 9 = 18,89	113 : 9 = 12,56	220 : 9 = 24,44	154 : 9 = 17,11	186 : 9 = 20,67	843 : 9 = 93,67
3	Средние значения за год, м/год	2,1	1,6	1,9	1,7	5,2	2,1
4	Подножие	1–16; 2–11; 3–15; 4–13; 5–11; 6–13; 7–16; 8–20; 9–16	1–9; 2–19; 3–15; 4–19; 5–17; 6–15; 7–12; 8–18; 9–13	1–19; 2–21; 3–23; 4–18; 5–16; 6–6; 7–5; 8–3; 9–4	1–18; 2–16; 3–13; 4–5; 5–6; 6–10; 7–15; 8–16; 9–13	1–14; 2–9; 3–11; 4–17; 5–15; 6–9; 7–6; 8–11; 9–13	1–76; 2–76; 3–77; 4–72; 5–65; 6–53; 7–54; 8–68; 9–59
5	Средние значения за период	131 : 9 = 14,56	137 : 9 = 15,22	115 : 9 = 12,78	112 : 9 = 12,44	105 : 9 = 11,67	600 : 9 = 66,67
6	Скорость термоабразии, м/год	1,6	1,9	1,0	1,2	2,9	1,5

Примечание. Номер трансекта указан в первой цифре перед значением отступа. В последнем столбце табл. 3 приведены суммарные величины отступания бровки и подошвы обрывов за 44 года для каждого профиля в той же последовательности, что и в предыдущих столбцах. Средневзвешенные значения и средняя за период скорость отступания бровки и подножия береговых обрывов приведены в соответствующих строках табл. 1.

* Измерено с помощью программы ArcGIS по 9 трансектам на рис. 3.

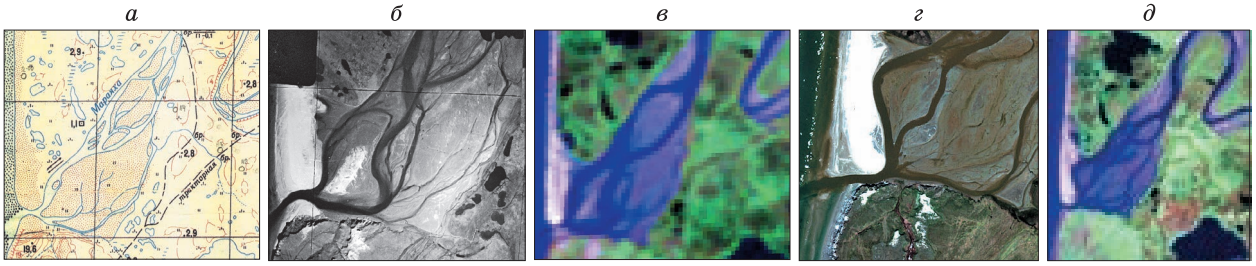

Рис. 5. Устье р. Марре-Яха в разные годы по материалам дистанционного зондирования Земли.

а – карта, 1969 г.; *б* – аэрофотоснимок, 1978 г.; космические снимки: *в* – 1986 г.; *г* – 2009 г.; *д* – 2013 г.

В отличие от табл. 1, в табл. 3 отсутствует явная зависимость средних значений отступания бровки берегового обрыва от осредненных климатических параметров, поскольку на протяжении всего периода в разных частях морфоструктуры открывались и вытаивали дискретные мощные ледяные тела. Средняя скорость отступания бровки в пределах термоцирка 1-86 (трансект 4) за 44 года составляет около 3 м/год, тогда как за четыре последних года (2009–2012) она равна 11 м/год. Еще больше оказалась скорость вытаивания льда за этот период в пределах молодого термоцирка (трансект 8) – 14 м/год. Средняя скорость отступания бровки берега на участках отсутствия мощных ледяных включений (трансекты 1–3, 6, 9) составляет 1,7 м/год. Суммарное за 44 года отступание бровки в пределах этих участков изменяется в интервале 63–82 м и зависит от литологии и льдистости ММП.

Скорость отступания подножия береговых обрывов в пределах морфоструктуры (см. табл. 3, рис. 3) выше, чем на всем междуречье Марре-Яхи и Явар-Яхи, однако значительно меньше скорости отступания бровки.

Внесение в табл. 3 данных за 1986 г. позволило уточнить особенности отступания коренного берега за 21-летний период. В 1986–1999 гг., когда отступание бровки изменялось от 10–12 до 32–42 м, отступание подножия по четырем трансектам составило 3–6 м. В результате средняя скорость отступания бровки увеличилась до 1,9 м/год, а подножия сократилась примерно до 1 м/год. Подобная картина наблюдается и в период 1999–2009 гг. В 2009–2013 гг. скорость отступания подножия, так же как и бровки, оказалась аномально высокой (2,9 м/год), причиной может быть скопление в подножие склонов большого количества оттаявшего за лето песчано-глинистого материала или более активная штормовая деятельность моря.

Средняя за 44-летний период скорость отступания бровки в пределах полукольцевой морфоструктуры равна 2,1 м/год, а подножия – 1,5 м/год. Суммарная величина отступания бровки за этот период в пределах морфоструктуры оказалась значительно больше, чем для всего берега – 93,7 м (против 86 м), а подножия составила 66,7 м, т. е. близка к средней величине для всего берега (65,2 м).

На рис. 1, *Б*, кроме термодеструкционных и термоабразионных процессов в пределах коренного берега Карского моря, четко видны геодинамические процессы в устьевой части поймы р. Марре-Яха. Наряду с наступанием моря (за счет “съедания” коренного берега) здесь происходит активное латеральное перемещение русла в пределах авандельты, изменение его изгиба и аккумуляция песчаных отложений, связанные как с деятельностью морских волн, так, вероятно, и с процессами наледеобразования. За период 1969–2013 гг. постоянно изменялся рисунок устьевой части долины р. Марре-Яха, количество и ширина проток и основного русла. Параллельно с этим изменялись форма и размеры косы, перегораживающей устье р. Марре-Яха, и разрушался левый (коренной) ее берег (рис. 5).

Таблица 4. **Динамика коренного берега реки Марре-Яха в устьевой части**

Отступ* бровки/подножия	1969–1978	1978–1999	1999–2009	2009–2013	1969–2013
Граница моря и реки	19/19	50/40	11/16	4/5	84/80
50 м от моря	20/10	26/39	9/20	8/5	63/74
100 м	14/12	5/28	9/20	4/6	32/66
150 м	19/11	4/4	3/11	0/1	26/27
200 м	5/13	1/2	1/4	1/2	8/21

* Расстояния определены по 5 трансектам.

В табл. 4 приведены данные измерений величины отступания бровки и подножия левого берега р. Марре-Яха в устьевой части на расстоянии 200 м от моря. Как следует из табл. 4, в прибрежной части устья р. Марре-Яха на расстоянии около 100 м за 44-летний период происходило активное отступание как бровки, так и подножия берегового обрыва, в результате чего левый берег реки отступил на 84–32 м по бровке и на 80–66 м по подножию. Максимальные величины отступания на границе реки и моря и в непосредственной близости, по-видимому, связаны с вытаиванием мощных ледяных залежей (отступание бровки) и с термоабразионными процессами моря и реки (подножия). На расстоянии 150 м от моря бровка берега после 1999 г. практически не отступает, тогда как подножие постепенно удаляется.

Перемещение русла р. Марре-Яха в устье с 1969 г. (топокарта) по 2013 г. (видеоснимок) составило около 160 м, т. е. в среднем 3,6 м/год. За 44 года резко изменилось очертание современной косы, отделяющей долину р. Марре-Яха от моря. Длина косы с 1969 по 1999 г. увеличилась на 140 м (~4,7 м/год), ширина ее (в самом узком месте) уменьшилась с 247 до 108 м, а в краевой (южной) части, наоборот, выросла с 150 до 181 м. С 1999 по 2013 г. длина косы не увеличивалась. Расстояния определялись по рис. 1, *Б* с помощью программы ArcGIS.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Основной причиной столь активного проявления криогенных и геодинамических процессов в районе стационара Марре-Сале, по нашему мнению, является расположение участка в геодинамически активной зоне на перекрестье двух разломов. На рис. 6 приведена топографическая карта побережья мыса Марре-Сале с четко выраженной полукольцевой неотектонической морфоструктурой, к южному краю которой приурочена локальная структура платформенного чехла по кровле мезозойских отложений, выявленная сейсмическими и гравиметрическими исследованиями [*Объяснительная записка..., 2000*].

По-видимому, главная роль в блуждании русла р. Марре-Яха и активном осадконакоплении на лайде принадлежит ежегодному наледеобразованию при замерзании как речных и таликовых, так и высоконапорных глубинных подземных вод. Проявление наледного процесса в районе стационара Марре-Сале было установлено в конце прошлого века по результатам массового химического и изотопного анализа поверхностных и подземных вод и льдов района, в том числе по определению содержания трития [*Крицук, Поляков, 2003*]. Наиболее тяжелой по содержанию трития оказалась весенняя речная вода р. Марре-Яха (20,1 Т.Е.*), что дает основание предполагать поверхностную разгрузку сохранившихся после ядерных испытаний 1950-х гг. крупных объемов подземных вод (межмерзлотных либо глубинных подмерзлотных).

Сделанные выводы о проявлении на площади стационара процесса наледеобразования [*Крицук, 1989*] подтверждаются материалами повторного дешифрирования КС 2013 г. (рис. 7). Размеры наледного тела, определенные с помощью программы ArcGIS, составляют 1,5 км в длину и 600 м в ширину.

На рис. 8 приведены аэрофотоснимки разных лет, дающие представление об источниках наледных вод. Стрелками на снимках отмечено углубление в русле реки – своеобразное жерло “гидровулкана”, способного сформировать столь гигантскую наледь. При этом на снимке, сделанном в конце октября 2013 г. (см. рис. 8, *б*), оно представляет собой полынью среди замерзшего русла реки.

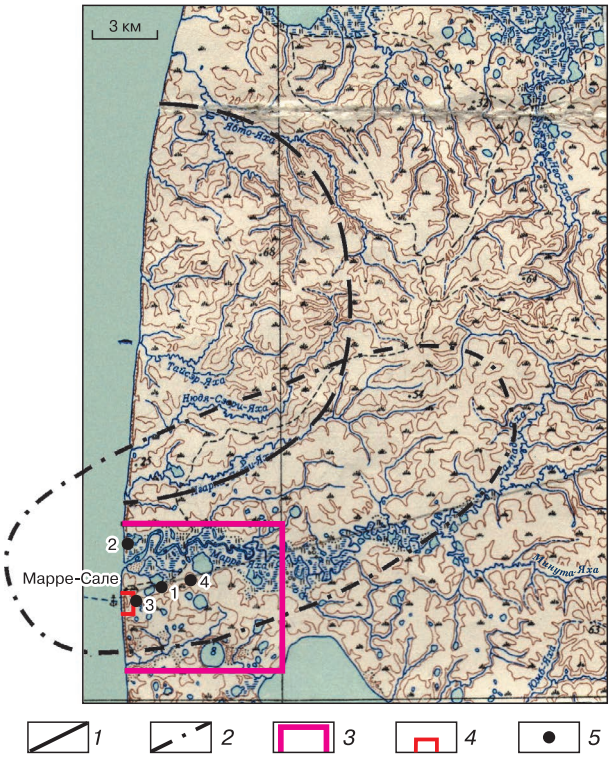

Рис. 6. Структурная схема района стационара Марре-Сале.

1 – неотектоническая морфоструктура; *2* – локальная структура платформенного чехла по кровле мезозойских отложений; *3* – контур площади геокриологического стационара Марре-Сале; *4* – площадь участка детальных комплексных исследований; *5* – глубокая скважина ВСЕГИНГЕО и ее номер.

* Т.Е. – тритиевая единица.

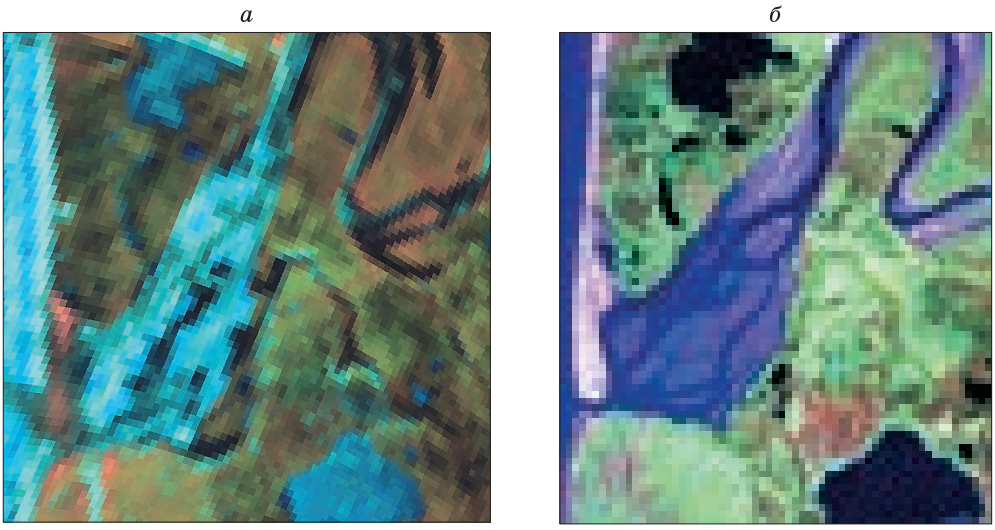

Рис. 7. Тело крупной наледи в устье р. Марре-Яха.

Космические снимки Landsat: *а* – 10.06.2013 г.; *б* – 19.07.2013 г.

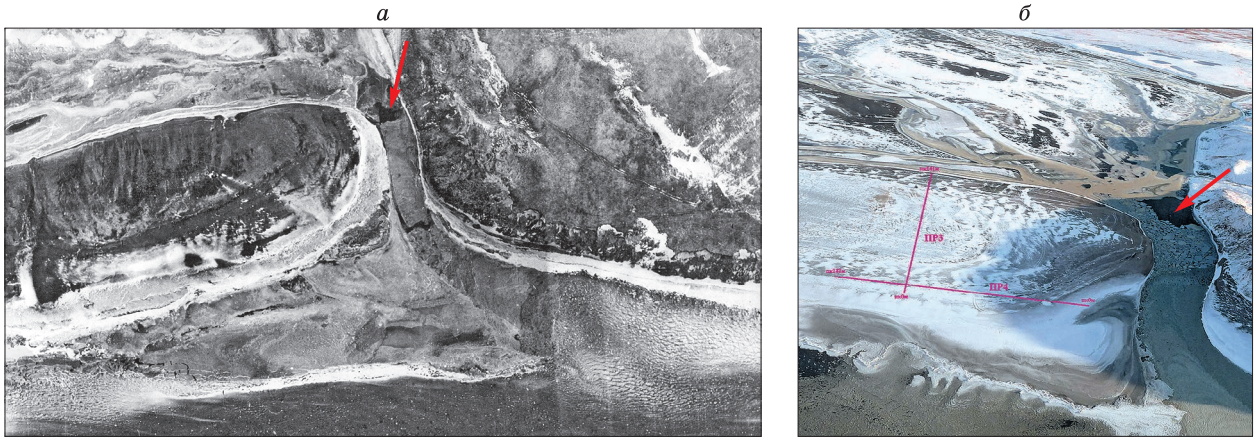

Рис. 8. Устье р. Марре-Яха.

Аэрофотоснимки (с вертолета): *а* – 20.09.1999 г.; *б* – 23.10.2013 г.

В устье малой речки Явар-Яха, ограничивающей площадь стационара с юга, наблюдаются аналогичные криогенные и геодинамические процессы, но проявляющиеся с меньшей интенсивностью. Эта речка расположена в краевой части локальной структуры платформенного чехла, где (как и в центре) предполагается повышенная трещиноватость мерзлой толщи. Существование в июне 1999 г. наледи в ее устье было зафиксировано сотрудником ВСЕГИНГЕО Л.П. Харитоновым.

ВЫВОДЫ

Многолетние комплексные геокриологические исследования и использование материалов ДЗЗ разных лет позволили выявить особенности динамики береговой зоны Карского моря в районе Марре-Сале за последние 44 года. С использованием ГИС-технологий получены объективные количественные данные по отступанию бровки и подножия береговых обрывов (средние и предельные значения) как за весь период наблюдений, так и за отдельные периоды.

Установлено, что скорость отступания подножия береговых обрывов, а следовательно, и скорость термоабразии оказываются значительно меньше скорости отступания бровки берега. Средняя скорость отступания бровки коренного берега на водоразделе рек Марре-Яха и Явар-Яха за период наблюдений составляет 2,0 м/год, а средняя

скорость термоабразии (отступания подножия береговых обрывов) равна 1,5 м/год.

Величина отступания бровки берега и ее скорость изменяются в широких пределах как во времени, так и в пространстве. За 44 года бровка коренного берега отступила в среднем на 86 м при интервале значений от 46 до 136 м. Максимальная скорость оказалась равна 3,0 м/год, а минимальная составила 1,0 м/год. Средняя величина отступания подножия береговых обрывов равна 65 м при интервале 43–84 м, а интервал средних значений скорости отступа составляет 1,0–1,9 м/год.

Основной причиной неравномерности скорости отступания бровки является пространственная изменчивость криолитологического разреза и дискретное размещение крупных залежей подземных льдов в районе стационара. Максимальная величина отступания бровки (в пределах термоцирка с вытаивающим льдом) за четырехлетний период составила 56 м или в среднем 14 м в год. Средняя скорость отступания участков берега, не включающих ледяных залежей, равна 1,7 м/год.

Анализ разновременных материалов ДЗЗ позволил установить активное проявление геодинамических и криогенных процессов в долине р. Марре-Яха и связать его с геолого-структурными факторами. В устьевой части долины реки в июне 2013 г. установлено существование крупного наледного тела (длиной 1,5 км и шириной 0,6 км), латеральное перемещение русла реки со скоростью 3,6 м/год и активный рост песчаной косы, отделяющей устье реки от моря, со скоростью 4,7 м/год.

Авторы выражают искреннюю благодарность зав. лабораторией аэрокосмических методов Института проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН С.Г. Корниенко, предоставившему космические снимки Landsat 2013 г. и КС высокого разрешения 2009 г.

Литература

Васильев А.А., Рогов В.В. Пластовые льды в районе Марре-Сале. Западный Ямал // Материалы Второй конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, т. 1, с. 188–194.

Васильев А.А., Сауткин Е.В. Термоабразия морских берегов на Западном Ямале // Методы изучения криогенных физико-геологических процессов: Сб. науч. тр. М., ВСЕГИНГЕО, 1992, с. 71–77.

Васильев А.А., Широков Р.С., Облогов Г.Е., Стрелецкая И.Д. Динамика морских берегов Западного Ямала // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 72–75.

Гатауллин В.Н. Пластовые льды западного побережья полуострова Ямал: строение, состав и происхождение // Материалы гляциол. исслед., 1992, вып. 75, с. 50–57.

Гельман Р.Н. О съемке берегов и морского дна малоформатной камерой А-39 // Геодезия и картография, 1994, № 9, с. 26–31.

Данилов И.Д. Криогенная экосистема Арктического бассейна // Геоэкология, 1997, № 5, с. 3–15.

Каплянская Ф.А., Тарноградский В.Д. Ледниковые образования в районе полярной станции Марре-Сале на п-ове Ямал // Тр. ВСЕГЕИ, 1982, т. 319, с. 77–84.

Крицук Л.Н. Наледи полуостровов Ямал и Гыдан // Мерзлотно-гидрогеологические исследования зоны свободного водообмена. М., Наука, 1989, с. 86–92.

Крицук Л.Н. Криогидротектоника и подземные льды Западной Сибири // Материалы Второй конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, т. 3, с. 155–163.

Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири / Л.Н. Крицук. М., Науч. мир, 2010, 350 с.

Крицук Л.Н., Дубровин В.А. Подземные льды и криогенные процессы района Марре-Сале (Западный Ямал) // Гидрогеологические, инженерно-геологические и геокриологические исследования: Сб. статей ВСЕГИНГЕО. М., ЗАО "Геоинформмарк", 2000, с. 14–25.

Крицук Л.Н., Поляков В.А. Изотопный состав подземных льдов и поверхностных вод района Марре-Сале, Западный Ямал (Новые данные) // Материалы Междунар. конф. "Криосфера Земли как среда обитания". Пущино, 2003, с. 196–197.

Объяснительная записка к Государственной геологической карте РФ м-ба 1:1 000 000. Лист R–40–42. Остров Вайгач, п-ов Ямал. СПб., ВСЕГЕИ, 2000.

Романенко Ф.А. Интенсивность геоморфологических процессов на островах и побережьях морей Карского и Лаптевых (по материалам наблюдений полярных станций) // Геоморфология, 2008, № 1, с. 56–64.

Слагода Е.А., Мельников В.П., Опокина О.Л. Повторно-инъекционные льды в отложениях Западного Ямала // Докл. РАН, 2010, т. 432, № 2, с. 264–266.

Тарноградский В.Д. О происхождении залежей подземных льдов на Карском побережье полуострова Ямал // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1982, с. 80–88.

Троицкий В.А. Материалы по динамике юго-восточных берегов Карского моря // Геоморфология, 1977, № 1, с. 82–86.

Шполянская Н.А. Конвективная природа дислокаций в отложениях с пластовыми льдами на севере Западной Сибири // Геоэкология, 1993, № 3, с. 94–103.

Kurchatova A.N., Opokina O.L., Slagoda E.A. Ground ice of the Marre-Sale Cape (West Yamal) // Tenth Intern. Conf. on Permafrost TICOP. Tyumen, 2012, 40 p.

Поступила в редакцию
14 января 2014 г.