

УДК 551.46

П.И. Бухарицин¹, С.А. Огородов², В.В. Архипов³**ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ДНО СЕВЕРНОГО КАСПИЯ В УСЛОВИЯХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ И ЛЕДОВИТОСТИ⁴**

Морские льды играют важную роль в динамике рельефа прибрежно-шельфовой зоны. Оценка интенсивности воздействий ледяных образований на берега и дно замерзающих морей — важное звено в обеспечении геоэкологической и геотехнической безопасности гидротехнических сооружений. Освоение нефтегазовых богатств Северного Каспия диктует необходимость тщательно исследовать ледовые воздействия. Рассмотрены особенности динамики ледяного покрова Северного Каспия и его воздействие на дно, отличающиеся большой межгодовой и вековой изменчивостью. Температурный режим холодного периода года определяет состояние и торосистость ледяного покрова и соответственно влияет на интенсивность воздействий ледяных торосистых образований на берега и дно. При прочих равных термических условиях ледообразования важный фактор, определяющий интенсивность ледово-эскарационного процесса, — текущее положение уровня моря. Колебания уровня Каспия, достигающие за расчетный период эксплуатации гидротехнических сооружений нескольких метров, способны приводить к существенному перераспределению глубин и перестройке рельефа дна и соответственно менять условия формирования ледяных торосистых образований и эскарации ими дна и берегов.

Ключевые слова: Северный Каспий, изменения климата, колебания уровня моря, рельеф дна, ледяной покров, торосистость, эскарация, подводные трубопроводы.

Введение. В последние два десятилетия на Северном Каспии активизировались работы по освоению запасов углеводородов, что сопровождается проектированием и строительством стационарных платформ, подводных трубопроводов и других объектов нефтегазовой инфраструктуры. При проектировании подводных трубопроводов в замерзающих морях необходимы достоверные оценки интенсивности воздействия ледяных торосистых образований на дно и глубины их внедрения в грунт. Недооценка степени эскарации дна может привести к повреждению инженерных сооружений. Так, подвижки и наслоение льдин, толщина которых достигала нескольких десятков сантиметров, привели к аварии на нефтепромысле «Кашаган» в казахском секторе Северного Каспия, где льдом были повреждены четыре нитки трубопровода, проложенного по дну без заглупления. В то же время излишнее заглупление объектов сильно удорожает их строительство [Buharitsin et al., 2013].

Морские льды способны оказывать прямое механическое, термическое и физико-химическое воздействие на берега и дно. Среди этих процессов наиболее опасна эскарация — деструктивное механическое воздействие льдов на грунт, связанное с динамикой ледяного покрова, торошением и стамухообразованием под влиянием гидрометеорологических факторов и рельефа береговой зоны

[Огородов, 2011]. В связи с этим оценка интенсивности ледовых воздействий, относящихся к категории опасных природных процессов, является ключевым звеном для обеспечения как геотехнической безопасности нефтегазовых объектов, так и экологической безопасности в акватории.

Исследования эскарации дна ледяными образованиями на Северном Каспии находятся в зачаточном состоянии. Игнорирование этого вопроса нефтегазовыми компаниями, позиция которых в значительной мере усилена представлениями о глобальном потеплении и грядущей полной деградации ледяного покрова на Каспийском море, привело к тому, что большинство проектов реализовано без должного учета ледовых воздействий на дно и подводные сооружения. Практически все подводные трубопроводы на Северном Каспии не заглуплены в грунт.

К настоящему моменту вопрос об интенсивности воздействия ледяного покрова на дно Северного Каспия остается открытым и требует решения. Сложность решаемой проблемы определяется, с одной стороны, слабой изученностью процессов взаимодействия ледяного покрова с грунтовым основанием дна Северного Каспия, а с другой — многогранностью решаемых задач в связи с чрезвычайно высокой изменчивостью положения уровня и ледовитости Каспийского моря.

¹ Институт водных проблем РАН, вед. науч. с., докт. геогр. н., профессор; *e-mail*: astrgo@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория геоэкологии Севера, вед. науч. с., докт. геогр. н.; *e-mail*: ogorodov@aha.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория геоэкологии Севера, вед. инж.; *e-mail*: vvarhipov@mail.ru

⁴ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-00408а).

Для достоверного определения необходимых науке и практике характеристик и детального понимания рассматриваемой в статье проблемы необходимо системное и упорядоченное исследование процессов экзарации дна Каспийского моря. Настоящее исследование является лишь первым шагом на пути к решению поставленных задач.

Материалы и методы исследований. Каспийское море относится к частично замерзающим морям. Ледовые условия Каспийского моря характеризуются большой сложностью и изменчивостью. Его северная мелководная часть замерзает ежегодно, в средней части лед появляется вдоль побережий лишь в суровые зимы, в южной части льда не бывает [Бухарицин, 1987, 1994]. Ледовый период на Северном Каспии продолжается с ноября по март. Полное замерзание и образование припая обычно происходят севернее линии о. Чечень — о. Кулалы (рис. 1). В холодные и экстремально холодные зимы припайный лед может устанавливаться до изобаты 20 м.

Ледообразование на Северном Каспии при солености вод от 2 до 11‰, в отличие от вод арктических и дальневосточных морей, происходит при температуре замерзания в диапазоне от $-0,2$ до $-0,6$ °C [Жигарев, 1997]. Плотность не содержащего включений морского льда здесь ниже, чем в Арк-

тике, и составляет ~ 920 кг/м³ [Лукьянова, 1965]. Температурный режим льда сильно зависит от температуры окружающего воздуха. В типичных условиях она составляет от -1 до -2 °C с гомотермическим распределением, а при продолжительных 20-градусных морозах температура в приводном слое льда может понижаться до $-4...-8$ °C со значительным градиентом распределения [Гидрометеорология..., 1992].

Максимальная толщина дрейфующего ровного льда на Северном Каспии даже в очень суровые зимы не превышает 60–70 см, припая — 90–120 см [Бухарицин, 1987]. Однако значительную часть акватории может занимать так называемый наслоенный лед [Бородачев и др., 1994]. Наслоение льда в Каспийском море наблюдается практически ежегодно в результате надвигов одной ледяной пластины на другую. В наслоении, как правило, участвует молодой лед толщиной < 30 см. Максимальная толщина наслоенного льда может достигать здесь 3 м [Бухарицин, 1987].

Специфика ледовых условий Северного Каспия — относительно тонкий и «теплый» лед, короткий по сравнению с Арктикой период ледообразования — обуславливает относительно низкие прочностные характеристики ровного льда, а на фоне сильных ветров — условия, особенно благоприятные для его взлома и торошения. Наиболее характерно для Северного Каспия ветровое торошение, которому способствуют подледные течения и стонно-нагонные колебания уровня. Существенно влияют на процессы торошения мелководность, извилистость береговой линии и сложный рельеф дна с большим количеством подводных банок и кос [Бухарицин, 1984, 1987].

Максимальное количество торосов при всех типах зим наблюдается в зоне контакта припая и дрейфующего льда. В результате того что положение кромки припая в течение холодного сезона постоянно меняется, зона активного торошения захватывает большую площадь. Следствие торосообразования — формирование на границе устойчивого (как и в зоне неустойчивого) припая гряд торосов, перпендикулярных направлению ветра, который вызывает торошение. Для активного торосообразования характерно возникновение торосов, а также появление стамух, сидящих на грунте.

На Северном Каспии различают стамухи осеннего и зимнего происхождения [Бухарицин, 1984, 1987]. Стамухи осеннего происхождения образуются в ноябре–декабре из ниласа и серого льда толщиной 5–15 см. Они имеют, как правило, небольшие размеры в поперечнике и высоту 1–3 м над поверхностью ровного льда. Такие стамухи образуются повсеместно в прибрежной полосе до глубины 2 м. Стамухи зимнего происхождения обычно образуются из серо-белого и белого льда толщиной 20–70 см. Они могут достигать в поперечнике 100–300 м (иногда до 500 м) и высоты 10–15 м. Максимальная зарегистрированная высота

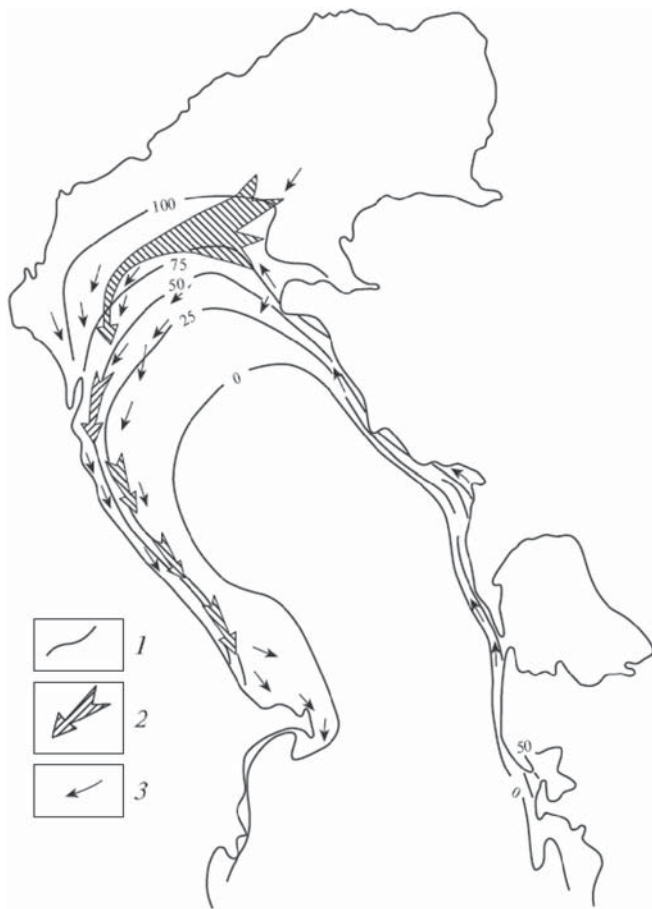


Рис. 1. Вероятность ледообразования и дрейф льда [Гидрометеорология..., 1992]: 1 — изолиния вероятности, %; 2–3 — направление дрейфа (2 — генеральное, 3 — преобладающее)

паруса стамухи составила 20 м. Максимальная глубина, до которой документально зафиксировано образование стамух на Каспийском море, — 12 м [Бухарицин, 1984]. Помимо стамух на Северном Каспии также широко распространены навалы льда, погребаящие под собой многочисленные острова и банки, находящиеся выше и ниже текущего положения уровня моря. Они имеют происхождение, аналогичное таковому у стамух, и весной, после очищения акватории ото льда, могут еще достаточно долго сохраняться в рельефе.

Температурный режим Северо-Каспийского региона чрезвычайно неустойчив в зимний период и отличается большой межгодовой изменчивостью, особенно отчетливо выраженной на фоне глобальных изменений климата в последние десятилетия.

Отношение суммы положительных значений температуры в теплые и холодные годы может отличаться в 7 раз (рис. 2). Период роста суммы отрицательных значений температуры, имевший место вплоть до 2004 г., сменился ее снижением. Этот фактор непосредственно влияет на состояние и площадь распространения ледяного покрова, положение границы припая, толщину льда и соответственно на количество, размеры и местоположение торосистых образований.

При анализе количества гряд торосов и стамух в рассматриваемом регионе отмечается следующая закономерность (рис. 3): наибольшая торосистость наблюдается в годы со средней ледовитостью холодного периода; в суровые зимы большую часть акватории занимает устойчивый припай, препят-

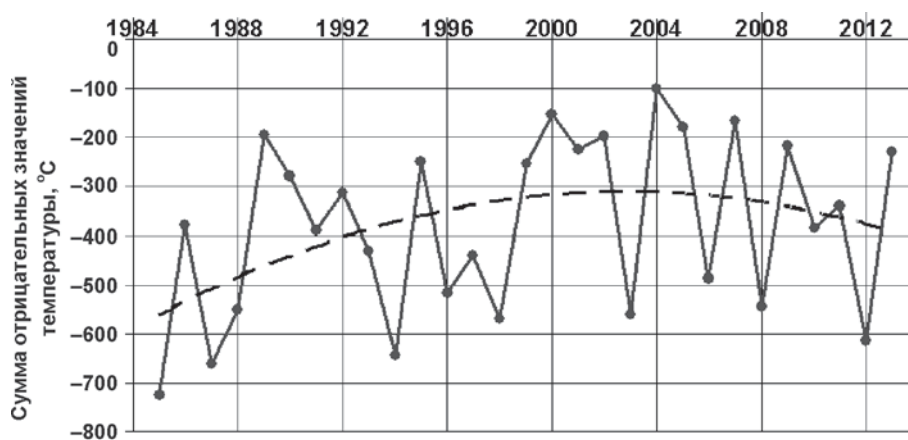


Рис. 2. Сумма отрицательных значений температуры за холодный период по данным ГМС Астрахань, сезон 1984/85 г. — сезон 2012/13 г.

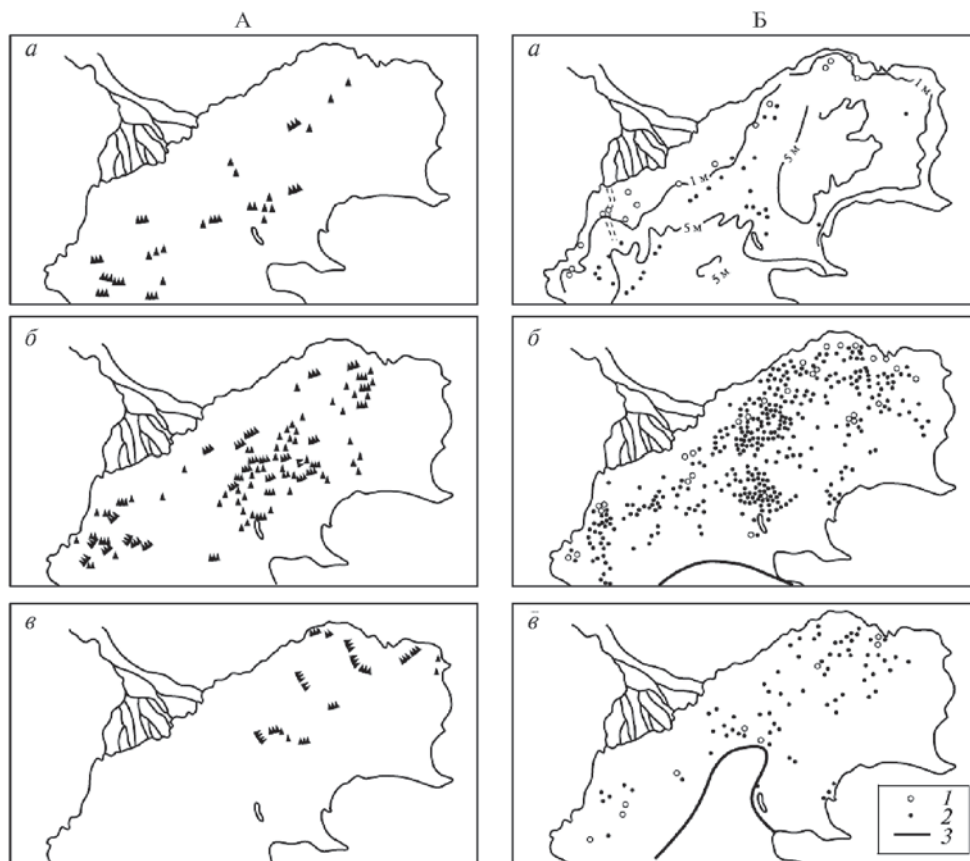


Рис. 3. Расположение гряд торосов (А) и стамух (Б) на Северном Каспии в суровые (а), умеренные (б) и мягкие (в) зимы; стамухи: 1 — осеннего, 2 — зимнего происхождения; 3 — максимальное положение кромки льда, по [Бухарицин, 1984, 1987]

ствующий слишком активному торошению; в годы с мягкими зимами процесс торошения также ограничен не полностью покрытой льдом акваторией и малой толщиной льда.

При прочих равных термических условиях ле- дообразования важный фактор, определяющий интен- сивность ледово-экзарационного процесса, — текущее положение уровня моря. Колебания уровня Каспия, амплитуда которых достигала в XX в. 3,5 м [Клиге, 1997] (рис. 4), в общем случае заметно влия- ют на рельеф мелководий [Игнатов и др., 1998], в значительной мере определяющий торосистость Северного Каспия [Бухарицин, 1984, 1987].

Колебания уровня Каспия, достигающие за рас- четный период эксплуатации гидротехнических сооруже- ний нескольких метров, способны приводить к существенному перераспределению глубин и перестройке рельефа дна [Игнатов, Огородов, 1998] и соответственно менять условия формиро- вания ледяных торосистых образований и экзараци- ии ими дна и берегов [Огородов, 2003, 2011]. Так, в настоящее время, после периода стабилизации уровня моря в 1993–2005 гг., начался период до- статочного быстрого снижения уровня Каспия: всего за 7 лет он упал почти на 1 м (рис. 4).

Современное весьма неравномерное распре- деление глубин на Северном Каспии (рис. 5) — ре- зультат развития рельефа в голоцене. В нем запеча- тлены периоды многочисленных трансгрессий, регрессий и стабилизаций положения уровня Кас- пийского моря [Бадюкова и др., 1996]. Очевидно, что в случае продолжительной трансгрессии (на 2 м и более) зона наиболее интенсивного ледово-экзарационного воздействия [Огородов, 2011], соот- ветствующая, по нашему мнению, интервалу глу- бины от 4 до 6 м, сместится на современные более мелководные участки, и напротив, в условиях регрессии эта область сместится вниз по современно- му подводному склону. Таким образом, в условиях трансгрессии область дна, подверженная ледово- экзарационному воздействию, заметно расширится, а в условиях регрессии резко сократится (рис. 5).

Результаты исследований и их обсуждение. Пер- вым, кто обратил внимание на следы деятельности подвижных льдов на поверхности дна Северного Каспия и опубликовал пионерную статью на эту тему, был выдающийся советский географ, геолог, а впоследствии этнолог и писатель Б.И. Кошечкин [1958]. Полученные им выводы и результаты пред- ставляли тогда несомненный интерес и внесли

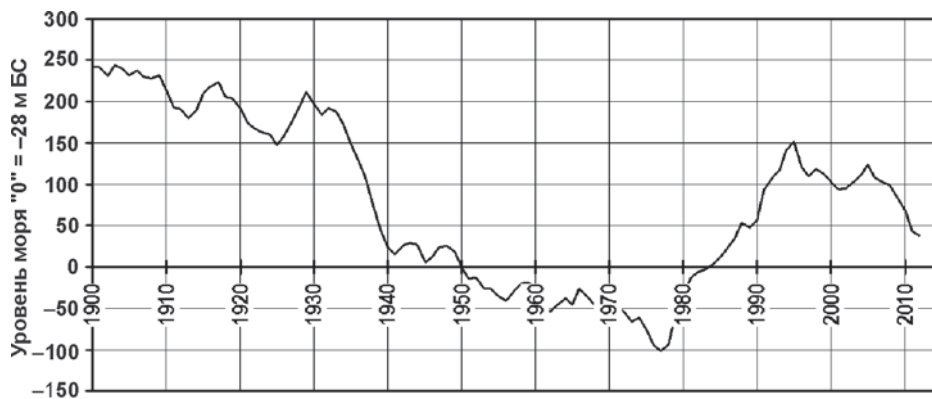


Рис. 4. Колебания уровня Каспийского моря (см), пост Махачкала, за 1900–2012 гг. (ноль соответствует –28 м БС)

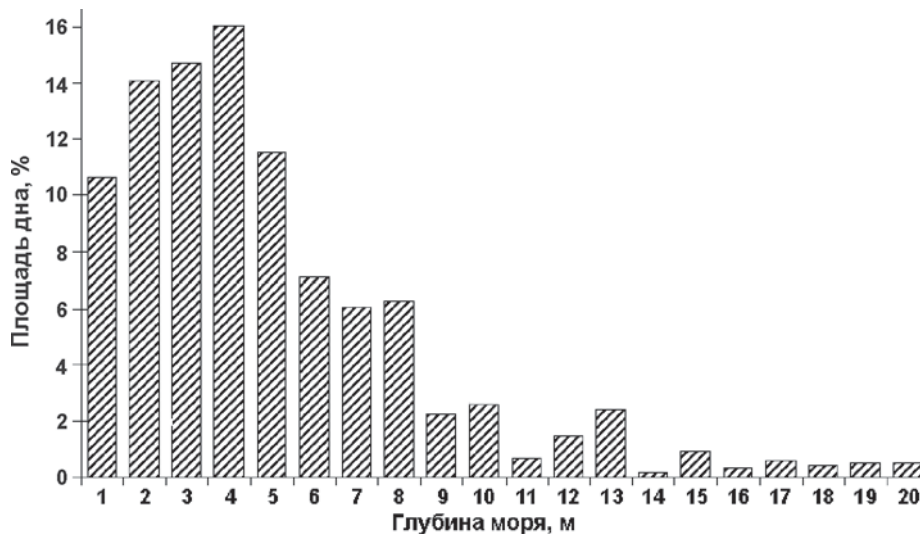


Рис. 5. Распределение глубины в Северном Каспии

значительный вклад в интенсивно развивавшуюся теорию геоморфологии и динамики берегов [Лентьев, 1961].

При аэрогеологических работах с применением материалов аэрофотосъемки и аэровизуальных наблюдений в пределах восточного побережья Каспийского моря выявлен специфический рисунок поверхности морского дна [Кошечкин, 1958], на первый взгляд это лишённые закономерности взаимно пересекающиеся светлые борозды и шрамы на фоне более темной поверхности дна (рис. 6). Иногда отмечаются серии таких борозд, строго параллельных и имеющих в плане вид «гребенки». Как правило, такой рисунок поверхности приурочен к мелководным участкам акватории, которые в зимнее время покрываются льдом. Наиболее характерно и четко он выражен в пределах мелководной зоны Мангышлакского залива до глубин, ограниченных 3-метровой изобатой.

Б.И. Кошечкин [1958] предположил, что образование борозд и шрамов связано с выпахивающей деятельностью льда в период его весенних подвижек. Глыбы льда, оторвавшись от края ледяного поля, двигаются в направлении господствующих ветровых течений. При этом они сдирают поверхностный слой илистых отложений и покров водорослей и образуют за собой «шрамы выпахивания», длина которых достигает 2–3 км. По мере таяния глыбы льда ее масса и как следствие способность механически воздействовать на грунт уменьшаются, а затем глыба всплывает. Этот процесс отражается в морфологии борозд: каждая борозда имеет четко выраженное начало — резкую границу в месте отрыва льдины от края неподвижного ледяного поля, причем чем дальше от места отрыва, тем больше борозда сужается и постепенно выклинивается.

Некоторые борозды представляют собой кривые или ломаные линии, что свидетельствует о постепенном или резком изменении направления дрейфа льда. Борозды оканчиваются валами, образованными из выпаханного донного грунта. Высота некоторых валов превышает глубину моря, и они выходят на дневную поверхность в виде небольших эфемерных островков [Бухарицин, 1987], которые обычно разрушаются после первого весеннего шторма. Анализ распределения основных направлений шрамов и сопоставление этих направлений с направлением преобладающих ветров показали, что движение масс нагроможденного льда подчиняется господствующим ветрам и возбуждаемым ими течениям.

Позднее В.В. Андреевым с соавторами [1971] в ходе эхолотных и водолазных обследований Кулалинской банки (район нефтегазоконденсатных месторождений имени Владимира Филановского и Юрия Корчагина) были обнаружены серии подводных валов и бороздин, вытянутых в юго-восточном направлении, генезис которых они не ре-



Рис. 6. Шрамы выпахивания на морском дне к востоку от о. Кулалы [Кошечкин, 1958]: аэрофотоснимок 1954 г., масштаб ~1:20 000

шились определить однозначно. Валу имели превышение над бороздинами до 40–60 см и прослеживались до глубины 15–16 м, наиболее четко они были выражены на глубине 11–12 м. В настоящее время, когда представления об экзарации дна и сохранности форм ледового выпахивания существенно продвинулись, последнее обстоятельство хорошо объясняется тем, что на глубине до 7–8 м имела место значительная волновая переработка ледово-экзарационных форм [Огородов, Архипов, 2010], образовавшихся в предшествующий холодный период, а на глубине свыше 15–16 м такие формы на Каспии в принципе формироваться не могут, так как кили дрейфующих торосистых образований здесь не так велики, чтобы достигать столь большой глубины.

При прочих равных условиях наибольшие интенсивность и глубина экзарации дна приурочены к области дрейфующих льдов, тяготеющей к кромке припая, где в течение всего холодного сезона происходит торошение и вдоль которой осуществляется дрейф ледяных полей с вмёрзшими в них и достигающими дна торосистыми образованиями [Огородов, 2011]. Вмёрзнув в дрейфующие ледяные поля, обладающие огромной массой, они создают наиболее глубокие и протяженные борозды выпахивания (рис. 7). В Каспийском море наблюдения за ледовой обстановкой ведутся постоянно,



Рис. 7. Экзарация дна торосом, вмёрзшим в дрейфующее ледяное поле, по [Marchenko et al, 2007]

вместе с тем специальных исследований, направленных на выявление форм ледовой экзарации, проводилось мало.

Многочисленные попытки документально зафиксировать микроформы ледовой экзарации с применением сейсмоакустических профилографов, эхолотов и гидролокаторов бокового обзора (ГБО) не приводили к успеху. Основная причина — проведение съемок в летний период, т.е. когда с момента образования борозд выпаживания прошло уже несколько месяцев, в том числе весенних, характеризующихся как интенсивным волнением, так и высоким содержанием взвеси в волжских водах. За этот период большинство борозд нивелируется и заносится наносами, которые характеризуются здесь относительно высокой подвижностью. Тем не менее навалы морских льдов на берега, стамухи, определенно сидящие на грунте, а также следы экзарации дна на малых глубинах (до 3 м) были документально зафиксированы здесь прямыми наблюдениями [Гидрометеорология..., 1992]. На больших глубинах из-за ограниченной прозрачности морских вод Северного Каспия и практически постоянного в переходный период года волнения формы ледовой экзарации документально вплоть до последнего времени зафиксированы не были.

В марте 2008 г., зимний период которого характеризовался умеренно-холодными условиями (рис. 3), в рамках совместной экспедиции Государственного океанографического института имени Н.Н. Зубова и Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по трассе трубопровода от месторождений имени Филановского и Корчагина сразу после очищения акватории ото льдов были одновременно проведены гидролокационная съемка (ГБО) и эхолотный промер [Огородов, Архипов, 2010]. Результаты обработки данных ГБО и эхограмм показали наличие четко выраженных в рельефе дна, в том числе и на глубоководном участке (глубина до 12 м), борозд и систем борозд выпаживания (рис. 8), образованных дрейфующими одно- и многокилевыми торосистыми образованиями, вмерзшими в ледяные поля. Всего на трассе

трубопровода идентифицировано 238 борозд и систем борозд выпаживания. Длина наиболее крупных и четко выраженных борозд (большинство борозд полностью пересекает съемочный коридор), по видимому, превышает несколько километров; ширина единичных борозд достигает 5 м, систем борозд — 200 м; точную глубину борозд вследствие постоянного волнения установить не удалось, но, судя по данным ГБО и эхограммам, она составляет до 1 м. Помимо линейных форм были обнаружены локальные ямы (рис. 8), оставшиеся от стамух.

Таким образом, на Северном Каспии впервые документально зафиксированы формы ледовой экзарации на глубине от 3 до 12 м [Огородов, Архипов, 2010]. Вместе с тем вопросы определения предельной глубины моря, где возможно выпаживание дна ледяными торосистыми образованиями, так же как и глубина их внедрения в грунт, для Каспия остаются открытыми.

Выводы:

— состояние и динамика ледяного покрова Северного Каспия и его экзарационное воздействие на дно отличаются большой межгодовой и вековой изменчивостью;

— температурный и ветро-волновой режим холодного периода года определяет состояние и торосистость ледяного покрова и соответственно влияет на интенсивность воздействия ледяных торосистых образований на берега и дно;

— при прочих равных синоптических условиях ледообразования важный фактор, определяющий интенсивность ледово-экзарационного процесса в условиях мелководий Северного Каспия, — текущее положение уровня моря, влияющее на вероятность контакта ледяных торосистых образований с дном;

— колебания уровня Каспия, достигающие за расчетный период эксплуатации гидротехнических сооружений нескольких метров, способны приводить к существенному перераспределению глубин и перестройке рельефа дна и соответственно менять условия формирования ледяных торосистых образований и экзарации ими дна и берегов.

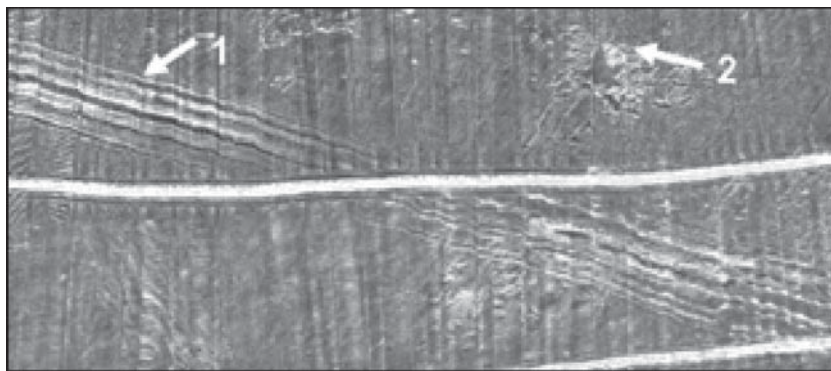


Рис. 8. Фрагмент мозаики ГБО (0,25×0,7 км) дна Северного Каспия с отчетливо выраженной системой борозд выпаживания (1) и локальной ямой со следами застамушивания (2), глубина моря ~10 м, по [Огородов, Архипов, 2010]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Андреев В.В., Добрынина Т.А., Игнатов Е.И., Маев Е.Г., Ширяев В.Н. Рельеф и донные отложения Мангышлакского порога // Комплексные исследования Каспийского моря. Вып. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. С. 75–89.
- Andreev V.V., Dobrynina T.A., Ignatov E.I., Maev E.G., Shiryayev V.N. Rel'ef i donnye otlozheniya Mangyshlaksogo poroga [Relief and bottom sediments of the Mangyshlak Bank], Kompleksnyye issledovaniya Kaspiyskogo morya. V. 2. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1971, pp. 75–89 (in Russian).
- Бадюкова Е.Н., Варущенко А.Н., Соловьева Г.Д. О генезисе рельефа дна Северного Каспия // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1996. Т. 71, вып. 5. С. 80–89.
- Badyukova E.N., Varushchenko A.N., Solov'eva G.D. O genezise rel'efa dna Severnogo Kaspiya [On the genesis of the bottom topography of the Northern Caspian], Byull. MOIP. Otd. geol., 1996, V. 71, no 5, pp. 80–89 (in Russian).
- Бородачев В.Е., Гаврило В.П., Казанский М.М. Словарь морских ледовых терминов. СПб.: Гидрометиздат, 1994. 127 с.
- Borodachev V.E., Gavrilov V.P., Kazanskiy M.M. Slovar' morskikh ledovykh terminov [Dictionary of sea ice terminology], St.-Petersburg: Gidrometizdat, 1994, 127 p. (in Russian).
- Бухарицин П.И. Особенности процессов торошения ледяного покрова северной части Каспийского моря // Водные ресурсы. 1984. № 6. С. 115–123.
- Bukharitsin P.I. Osobennosti protsessov torosheniya ledyanogo pokrova severnoy chasti Kaspiyskogo morya [Features of processes of ice hummocking in the northern part of the Caspian Sea], Vodnye resursy, 1984, no 6, pp. 115–123 (in Russian).
- Бухарицин П.И. Особенности ледового режима и методы прогноза ледовых условий северной части Каспийского моря: Автореф. канд. дисс. Л., 1987.
- Buharitsin P.I. Osobennosti ledovogo rezhima i metody prognoza ledovykh usloviy severnoy chasti Kaspiyskogo morya [Features of ice regime and methods of ice conditions forecasting in the northern part of the Caspian Sea]: Avtoref. kand. diss., Leningrad, 1987 (in Russian).
- Бухарицин П.И. Опасные гидрологические явления на Северном Каспии // Водные ресурсы. 1994. Т. 21, № 4–5. С. 444–453.
- Buharitsin P.I. Opasnye gidrologicheskie yavleniya na Severnom Kaspii [Dangerous hydrological phenomena in the Northern Caspian], Vodnye resursy, 1994, V. 21, no 4–5, pp. 444–453 (in Russian).
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 4. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф.С. Терзиева и др. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 360 с.
- Gidrometeorologiya i gidrohimiya morey. T. 4. Kaspiyskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya [Hydro-meteorology and hydrochemistry of seas. Vol. IV. Caspian Sea. N 1. Hydrometeorological conditions], Red. F.S. Terziev et al. St.-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 360 p. (in Russian).
- Жигарев Л.А. Океаническая криолитозона. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. 320 с.
- Zhigarev L.A. Okeanicheskaya kriolitozona [The oceanic cryolithozone], Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1997, 320 p. (in Russian).
- Игнатов Е.И., Огородов С.А. Морфодинамика берегов Каспийского моря в условиях колебаний его уровня // Изв. РГО. 1998. Т. 130, вып. 6. С. 27–38.
- Ignatov E.I., Ogorodov S.A. Morfodinamika beregov Kaspiyskogo morya v usloviyakh kolebaniy ego urovnya [Coastal morphodynamics of the Caspian Sea under the conditions of fluctuations of its level], Izv. RGO, 1998, Vyp. 130, no 6, pp. 27–38 (in Russian).
- Клиге Р.К. Варианты прогнозов положения уровня Каспийского моря: Геоэкологические изменения при колебаниях уровня Каспийского моря // Геоэкология Прикаспия. Вып. 1. М., 1997. С. 14–27.
- Klige R.K. Varianty prognozov polozheniya urovnya Kaspiyskogo morya: Geoekologicheskie izmeneniya pri kolebaniyakh urovnya Kaspiyskogo morya // Geoekologiya Prikaspiya, no 1, Moscow, 1997, pp. 14–27 (in Russian).
- Кошечкин Б.И. Следы деятельности подвижных льдов на поверхности дна мелководных участков Северного Каспия // Тр. лаборатории аэрометодов АН СССР. Т. 6. Л., 1958. С. 227–234.
- Koshechkin B.I. Sledy deyatel'nosti podvizhnykh l'dov na poverhnosti dna melkovodnykh uchastkov Severnogo Kaspiya [Traces of the action of the drifting ice on the sea bottom in shallow-water areas of the Northern Caspian], Tr. laboratorii aerometodov Akademii Nauk SSSR, V. 6, Leningrad, 1958, pp. 227–234 (in Russian).
- Леонтьев О.К. Основы геоморфологии морских берегов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1961. 214 с.
- Leont'ev O.K. Osnovy geomorfologii morskikh beregov [Basic geomorphology of sea coasts], Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1961, 214 p. (in Russian).
- Лукьянова Л.В. Соленость и плотность каспийских льдов // Гидрометеорология Азербайджана и Каспийского моря. Баку, 1965. С. 197–201.
- Luk'yanova L.V. Solenost' i plotnost' kaspiyskikh l'dov [The salinity and density of the Caspian ice], Gidrometeorologiya Azerbaydzhana i Kaspiyskogo morya. Baku, 1965, pp. 197–201 (in Russian).
- Огородов С.А. Роль морских льдов в динамике береговой зоны арктических морей // Водные ресурсы. 2003. Т. 30, № 5. С. 555–564.
- Ogorodov S.A. Rol' morskikh l'dov v dinamike beregovoy zony Arkticheskikh morey // Water Resources, 2003, V. 30, no 5, pp. 509–518 (in Russian).
- Огородов С.А. Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 173 с.
- Ogorodov S.A. Rol' morskikh l'dov v dinamike rel'efa beregovoy zony [The role of sea ice in coastal dynamics], Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 2011, 173 p. (in Russian).
- Огородов С.А., Архипов В.В. Экзарация дна Каспийского моря ледяными торосистыми образованиями // Докл. РАН. 2010. Т. 432, № 3. С. 403–407.
- Ogorodov S.A., Arhipov V.V. Caspian Sea Bottom Scouring by Hummocky Ice Floes // Doklady Earth Sci., 2010, V. 432, no 3, pp. 703–707.
- Бухарицин П., Аязбайев Е. The role of drifting ice in building the bottom landscape and sediment composition in the shallow waters of north Caspian Sea // Materials of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (June 9–13, 2013, Espoo, Finland). Finland, Helsinki, 2013, 4 p.
- Марченко А.В., Огородов С.А., Шестов А.В., Тsvetsinsky A.S. Ice gouging in the Baydaratskaya Bay: Field studies and numerical simulations // Recent development of Offshore Engineering in Cold Regions. Yue (ed.). AC-07. Dalian, China. June 27–30, 2007. Dalian University Press, Dalian. P. 747–759.

P.I. Bukharitsin, S.A. Ogorodov, V.V. Arkhipov

**IMPACT OF ICE BODIES ON THE SEABED OF THE NORTHERN CASPIAN SEA
UNDER SEA LEVEL FLUCTUATION AND ICE COVERAGE CHANGES**

The impact of sea ice on the coasts and bottom could be mechanical, thermal and physical-chemical. The most dangerous of these processes is ice gouging, i.e. mechanical destruction of the bottom grounds caused by the ice cover dynamics, hummocks and stamukhi formation under the influence of hydrometeorological factors and the topography of the coastal zone. During recent decades exploration of hydrocarbon reserves became more intensive within the Northern Caspian Sea region, including the design and construction of drilling platforms, underwater pipelines and other objects of oil and gas infrastructure. Reliable estimates of the impact of ice hummocks on the sea bottom and the depth of their penetration into the bottom grounds are necessary for designing underwater pipelines in freezing seas. Thus the assessment of ice impact (qualified as a natural hazard) is a key element of both geotechnical safety of oil and gas facilities and the environmental safety of marine areas. Underestimation of the glacial erosion could result in the damage of engineering constructions.

Highly variable dynamics of ice cover of the Northern Caspian Sea and its impact on the bottom are discussed. Temperature regime during the cold season determines the state of the ice cover and the number of hummocks, so it influences the intensity of their impact on the coasts and the seabed. Under the same thermal conditions of ice formation the sea level becomes an important factor governing the intensity of ice gouging processes. During the exploitation period of hydrotechnical facilities the fluctuations of the Caspian Sea level could reach several meters. Thus the considerable changes of depths and the transformation of bottom relief could be expected, leading to the changes in ice hummocks formation and ice gouging of the bottom and coasts. At present the intensity of the ice cover impact on the bottom of the Northern Caspian Sea is still an open question. The problem is difficult to solve because, on the one hand, the interactions of ice cover and the bottom grounds of the sea are insufficiently known and, on the other, the extreme variability of the sea level and the ice cover makes the investigations particularly complicated.

Key words: Northern Caspian Sea, climate change, sea level fluctuations, bottom topography, ice cover, ice hummocks formation, ice gouging, underwater pipelines.