

## ЛЕДОВО-ЭКЗАРАЦИОННЫЙ РЕЛЬЕФ НА ДНЕ КАСПИЙСКОГО И АРАЛЬСКОГО МОРЕЙ

© С. А. ОГОРОДОВ\*,<sup>1</sup>, С. В. МАЗНЕВ\*,<sup>2</sup>, П. И. БУХАРИЦИН\*\*,<sup>3</sup>

\* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

\*\* Институт водных проблем РАН

E-mail: <sup>1</sup>ogorodov@aha.ru

<sup>2</sup>svmaznev@gmail.com

<sup>3</sup>astrgo@mail.ru

Ледовое выпахивание или экзарация — деструктивное механическое воздействие льдов на грунт, связанное с динамикой ледяного покрова, торшением и стамухообразованием под влиянием гидрометеорологических факторов и рельефа прибрежно-шельфовой зоны. Следы воздействия льдов на дно Северного Каспия известны с 1950-х гг., но приниматься во внимание стали лишь после аварии на нефтегазовом месторождении Кашаган в Казахстане в 2012 г. Недавно обнаружены следы таких воздействий на осушенном дне Аральского моря. Микрорельеф дна Каспийского моря изучен геофизическими методами при помощи гидролокатора бокового обзора и эхолота. На осушенном дне Аральского моря есть уникальная возможность изучать следы ледового воздействия прямыми методами, но на настоящий момент они изучены преимущественно дистанционно. Выявлено, что наиболее интенсивная экзарация в Каспийском море происходит при колебаниях уровня моря на глубинах от 2 до 5 м. Так как уровень Каспийского и Аральского морей сильно изменялся в XX в., то следы экзарации распространены на обширных территориях. Показано, что климатические и антропогенные изменения приводят к изменению условий формирования ледово-экзарационного рельефа. Изучение параметров такого рельефа на бывшем дне Аральского моря имеет большое фундаментальное и прикладное значение для понимания условий и интенсивности экзарации дна на мелководных замерзающих морях и крупных озерах.

Ключевые слова: Каспийское море, Аральское море, экзарация ледяными торосистыми образованиями, рельеф дна, экзарационные борозды.

**Введение.** Ледовое выпахивание или экзарация (рис. 1) — деструктивное механическое воздействие льдов на грунт, связанное с динамикой ледяного покрова, торшением и стамухообразованием под влиянием гидрометеорологических факторов и рельефа прибрежно-шельфовой зоны [13]. Экзарация дна ледяными образованиями (торосами и айсбергами) имеет место не только в Арктике: это явление характерно для большинства замерзающих морей и крупных озер. Ледово-экзарационные формы микрорельефа, встречающиеся на дне замерзающих водоемов, прежде всего — борозды ледового выпахивания, в настоящее время достаточно хорошо известны и описаны в современной научной литературе [13, 17]. В Арктике (Печорское и Карское моря) и на Дальнем Востоке (шельф о. Сахалин) ледовые воздействия на берега и дно хорошо изучены и принимаются во внимание при строительстве и эксплуатации объектов на шельфе. В то же время, применительно к морям и озерам умеренного климатического пояса (например, Каспийскому), эти вопросы долгое время оставались без должного внимания и оценки в нашей стране.

На фоне глобального потепления и сокращения площади и мощности ледяного покрова хозяйствующие субъекты, осваивающие акваторию Северного Каспия, вплоть до первой крупной аварии, игнорировали ледовый фактор (рис. 2). Внимание к проблеме привлек случай, когда подвижки и наслоение льдин, толщина которых достигала нескольких десятков сантиметров, привели к аварии на нефтепромысле «Кашаган» в казахстанском секторе Северного Каспия в 2012 г., где льдом были повреждены четыре нитки трубопровода, проложенного по дну без должного заглубления.

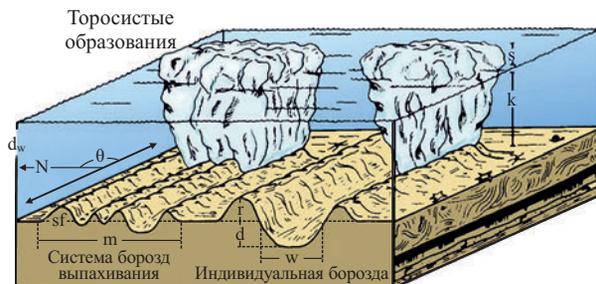


Рис. 1. Экзкарация дна ледяными торосистыми образованиями [17]:  $k$  — осадка тороса;  $s$  — высота тороса;  $d$  — глубина борозды;  $w$  — ширина борозды;  $r$  — высота бортика обваловки;  $m$  — ширина системы борозд;  $sf$  — ширина бортика;  $\theta$  — ориентировка борозды;  $d_w$  — глубина моря;  $N$  — направление на север.

Fig. 1. Ice gouging process [17]:  $k$  — keel depth;  $s$  — sail height;  $d$  — gouge depth;  $w$  — gouge width;  $r$  — ridge (side berm) height;  $m$  — multiplier width;  $sf$  — ridge (side berm) width;  $\theta$  — gouge orientation;  $d_w$  — water depth;  $N$  — true North.

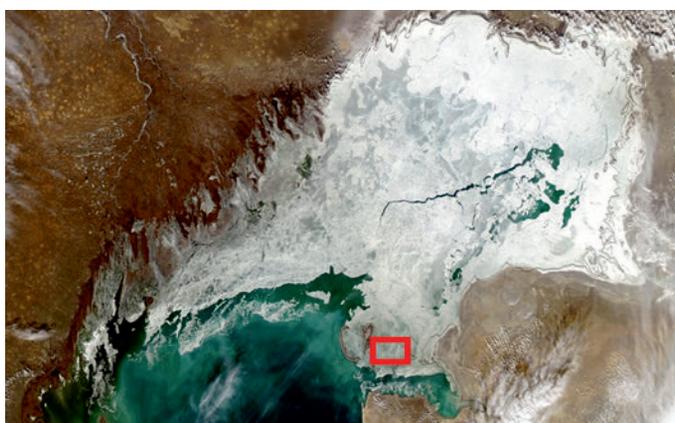


Рис. 2. Каспийское море: *вверху* — борозды ледового выпахивания на фрагменте снимка Landsat 8 [20], размер фрагмента  $10 \times 16$  км; *внизу* — местоположение фрагмента (район Тюленьих островов) на обзорном снимке Северного Каспия ИСЗ AQUA от 5.02.2015 г.

Fig. 2. Caspian Sea: ice gouges on a Landsat 8 satellite image [20], area  $10 \times 16$  km (*top*); zoomed area location (The Tyuleniy Archipelago) on the general overview space image of Northern Caspian, ISZ AQUA from February 5, 2015 (*bottom*).

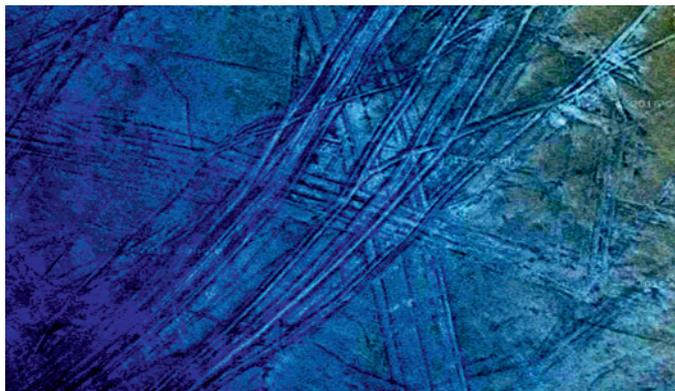


Рис. 3. Аральское море: *вверху* — борозды ледового выпаживания на космическом снимке современного побережья, размер фрагмента  $1.5 \times 3$  км [22]; *внизу* — местоположение фрагмента на обзорном космическом снимке 2010 г.

Fig. 3. Aral Sea: ice gouges on a satellite image of the modern Aral Sea coast, the size of the fragment is  $1.5 \times 3$  km [22] (*top*); zoomed area location on the general overview space image, 2010 (*bottom*).

В последнее время были обнаружены следы ледовых воздействий на бывшее дно Аральского моря (рис. 3). Следы обнаружены нами при анализе космических и аэрофотоснимков северо-восточного побережья Аральского моря. Они также отчетливо дешифрируются на всем восточном побережье Большого Арала. Такие формы микрорельефа могут иметь различную интерпретацию,

но нами они тракуются как результат ледовых воздействий при прежнем, более высоком уровне Аральского моря.

**Климатические и ледовые условия.** Северный регион Каспийского моря имеет континентальный климат с теплым летом (в июне-августе температуры в среднем составляют 24—25 °С) и холодной зимой (с декабря по февраль в среднем -5÷-6 °С). До определенного момента считалось, что в результате глобального потепления происходит сокращение площади и мощности ледяного покрова Каспийского моря. Вместе с тем, анализ межгодовой изменчивости суммы отрицательных температур показал, что на Северном Каспии уже с начала 2000-х гг. вслед за заметным зимним потеплением отмечена стабилизация температурного режима холодного сезона и, соответственно, режима формирования ледяного покрова [3].

Каспийское море относится к частично замерзающим морям. Ледовые условия 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 [4]. Ледовый период на Северном Каспии продолжается с ноября по март. Полное замерзание и образование припая обычно происходит севернее линии о. Чечень—о. Кулалы. В холодные и экстремально холодные зимы припайный лед может устанавливаться до изобаты 20 м.

Ледообразование на Северном Каспии при характерной солёности вод от 2 до 11 ‰, в отличие от вод арктических и дальневосточных морей, имеет место при температуре замерзания в диапазоне от -0.2 до -0.6 °С. Плотность не содержащего включений морского льда здесь ниже, чем в Арктике, и составляет около 920 кг/м [10].

Максимальная толщина ровного льда на Северном Каспии даже в очень суровые зимы не превышает 60—70 см, припая — 90—120 см [4]. Однако значительную часть акватории может занимать так называемый наслоенный лед. Наслоение льда в Каспийском море наблюдается практически ежегодно в результате надвигов одной ледяной пластины на другую. Максимальная толщина наслоенного льда может достигать здесь 3 м [1].

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 сгонно-нагонные колебания уровня. Существенно влияют на процессы торошения мелководность, извилистость береговой линии и сложный рельеф дна с большим количеством подводных банок и кос [1] (рис. 4).

Максимальное количество торосов при всех типах зим наблюдается в полосе контакта припая и дрейфующего льда. В результате того, что положение кромки припая в течение холодного сезона постоянно изменяется, полоса активного торошения захватывает большую площадь. Следствием этих процессов является формирование как на границе устойчивого, так и в зоне неустойчивого припая гряд торосов, перпендикулярных направлению ветра, а также появление стамух, сидящих на грунте.

Наибольшее число торосов и стамух формируется в умеренные (средние по ледовитости) зимы. В суровые зимы припай оказывается более устойчивым, соответственно и ширина зоны торосов — меньше. В мягкие зимы торосистость также низка вследствие слабого развития ледяного покрова. В со-



Рис. 4. Стамуха, образовавшаяся рядом с фарватером Волго-Каспийского морского судоходного канала.

Fig. 4. Ice hummock grounded near Volga-Caspian main ship channel.

ответствии с данными статистической обработки положения торосов и стамух, опубликованных в диссертации П. И. Бухарицина в 1987 г. [2], в период высокой степени торосистости наибольшее количество ледяных образований группируется в пределах глубин моря от 2 до 5 м (рис. 5).

При прочих равных термических условиях ледообразования важный фактор, определяющий интенсивность ледово-экарационного процесса на Каспийском море, — текущее положение его уровня. Колебания уровня Каспия, амплитуда которых достигала в XX в. 3.5 м, в общем случае заметно влияют

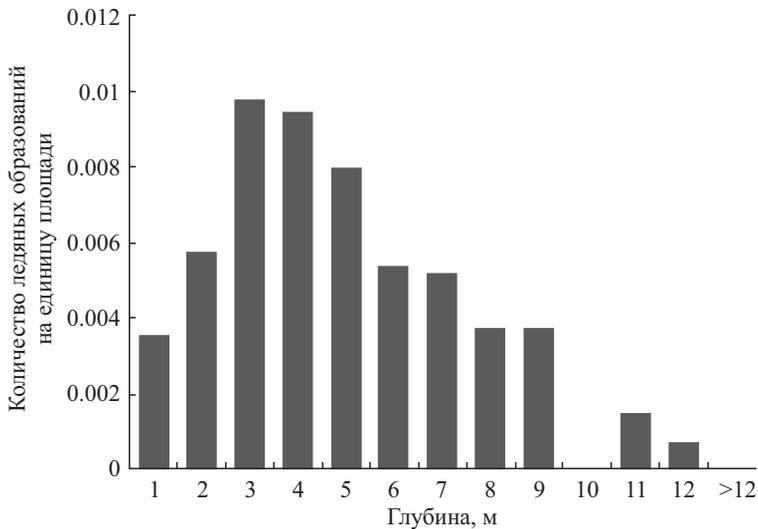


Рис. 5. Распределение ледяных торосистых образований Северного Каспия по глубинам.

Fig. 5. Frequency of ice hummocks formation according to depths of the Northern Caspian.

на рельеф мелководий, в значительной мере определяющий торосистость Северного Каспия [1].

Колебания уровня Каспия, достигающие за расчетный период эксплуатации гидротехнических сооружений нескольких метров, способны приводить к существенному перераспределению глубин и перестройке рельефа дна и, соответственно, изменять условия формирования ледяных торосистых образований и экзарации ими дна и берегов [13]. Так, в настоящее время, после периода стабилизации уровня моря в 1993—2005 гг., начался период достаточно быстрого снижения уровня Каспия: всего за 7 лет он упал почти на 1 м.

Аральское море расположено к востоку от Каспийского, в зоне пустынь умеренного пояса, что обуславливает резкую континентальность климата. Лето здесь сухое и жаркое, зима холодная с неустойчивой погодой. Обширная область Приаралья и само море находятся в сфере деятельности зимнего Сибирского антициклона и летней Южно-Азиатской барической депрессии. В течение всего года и в холодный период преобладают северные и северо-восточные ветры со средними скоростями 5—6 м/с, максимальными до 20—25 м/с. В северной части моря температура воздуха уже в ноябре имеет отрицательные значения и в январе в среднем равна  $-11\div-13$  °С, но над морем воздух заметно теплее. В южной части моря средняя температура января составляет  $-6\div-8$  °С. Продолжительность периода с отрицательными температурами составляет 120—150 дней [5]. Зимой резкие понижения температуры связаны с холодными северными и северо-западными вторжениями. В теплые сезоны отрог Сибирского антициклона разрушается, и окружающие Арал пространства оказываются под воздействием Южно-Азиатского минимума, поэтому сохраняется преобладание ветров восточных направлений. Температура воздуха весной быстро повышается до 5—10 °С в марте.

В результате понижения уровня Аральского моря существенно возросла соленость воды. Если до 1961 г. средняя соленость вод Арала составляла около 10 ‰, то к 1990 г. она возросла до 30 ‰. В 2006 г. соленость западной части Большого Арала превышала 90 ‰, а восточной — 130 ‰ [7].

До начала падения уровня Аральского моря в 1961 г. ледообразование в прибрежных районах на севере и северо-востоке моря обычно начиналось 19—23 ноября. К концу этого месяца первичные формы льда появлялись у южных берегов, припай, как правило, вставал 10 декабря. В открытом море льды наблюдались со второй декады декабря, а у западного побережья лед образовывался в среднем в первой декаде января. Наибольшего развития ледяной покров достигал в середине февраля. Прибрежную зону моря покрывал припай (на севере — шириной 20—30 км), а в открытых районах были распространены дрейфующие льды, представленные мелко- и крупнобитым льдом и ледяными полями, но в наиболее суровые зимы припай занимал всю акваторию. Мощность ровного льда колебалась в пределах 65—70 см в северной части и 35—45 см на юге. При сильных ветрах и в период ледостава наблюдался неоднократный взлом припая с последующим выносом дрейфующего льда от берега в открытое море. Благодаря доминировавшим в холодный период сильным северо-восточным ветрам (повторяемость 35 %), ледяной покров был сильно наслоен и восторошен. Под влиянием северных и восточных ветров было возможно большое скопление льда в южной части моря [8].

Весеннее разрушение льда обычно начиналось во второй половине февраля на юге и в первой половине марта на севере. Однако при холодной весне на отдельных участках северного и восточного побережий припай мог сохраняться до 20—25 апреля. Обычно же таяние льда шло интенсивно. В середине

марта ледовитость сокращалась на 25 %, а к концу апреля лед повсеместно исчезал [5].

Вследствие понижения уровня ледовый режим стал более суровым. Водоем вместе с уменьшением площади водного зеркала стал быстрее и на несколько дней раньше замерзать, а таяние льда начинаться позже и проходить за более длительный период [11]. Существенные изменения в температурном режиме Аральского моря по сравнению с условно-естественным (до 1961 г.) периодом подтверждаются результатами спутникового мониторинга 1982—2009 гг. [6, 25], показавшего, что эти изменения обусловлены, главным образом, уменьшением его глубин и теплозапаса. Исследования показали, что осенняя и весенняя температурные фазы оказываются сдвинутыми примерно на месяц в сторону их более раннего наступления. Также увеличился годовой размах температуры приповерхностного слоя моря и понизились его среднезимние температуры, что, несомненно, ужесточает и ледовые условия.

**История и методы исследований.** Первым обратил внимание на следы деятельности подвижных льдов на поверхности дна Северного Каспия Б. И. Кошечкин [9]. При аэрогеологических работах с применением материалов аэрофотосъемки и аэровизуальных наблюдений в пределах восточного побережья Каспийского моря выявлен специфический рисунок поверхности морского дна. Б. И. Кошечкин предположил, что образование борозд и шрамов связано с выпахающей деятельностью льда в период его весенних подвижек; длина «шрамов выпахивания» достигает 2—3 км.

Многочисленные попытки документально зафиксировать микроформы ледовой экзарации с применением сейсмоакустических профилографов, эхолотов и гидролокаторов бокового обзора (ГБО) на Каспийском море не приводили к успеху. Основная причина — проведение съемок в летний период, т. е. когда с момента образования борозд выпахивания 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 [4]. 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, в рамках совместной экспедиции Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова и МГУ им. М. В. Ломоносова по трассе трубопровода от месторождений им. Филановского и Корчагина сразу после очищения акватории ото льдов была проведена гидролокационная (сонарная) съемка с одновременным эхолотированием. При съемке применялись двухчастотный гидролокатор бокового обзора C-MAX (CM2), работающий на частотах 102, 325 и 780 кГц, и эхолот-профилограф Knudsen 3214 Chirp. Пространственное положение галсов съемки определялось с высокой точностью с помощью современного GPS-приемника [12].

Гидролокационная съемка позволяет дешифровать на дне количество ледово-экзарационных микроформ, их ширину и ориентировку, а эхолотный промер дает поперечный профиль, ширину и глубину борозд выпахивания и высоту бортиков обваловки.

На настоящий момент борозды выпаживания Аральского моря исследованы в основном аэровизуальными методами. На спутниковых снимках выделялись участки наибольшего скопления борозд, определялись их преобладающие ориентировки, ширина и протяженность.

**Результаты.** Результаты обработки данных ГБО и эхограмм, полученных на Северном Каспии, показали наличие четко выраженных в рельефе дна, в том числе и на глубоководном участке (глубина до 12 м), борозд и систем борозд выпаживания, образованных дрейфующими одно- и многокилевыми торосистыми образованиями, вмержшими в ледяные поля [12]. 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, оставшиеся от стамух.

Было выявлено, что некоторые борозды на дне Каспийского моря представляют собой кривые или ломаные линии, что свидетельствует о постепенном или резком изменении направления дрейфа льда. Борозды оканчиваются валами, образованными из выпажанного донного грунта. Высота некоторых валов превышает глубину моря, и они выходят на дневную поверхность в виде небольших эфемерных островков, 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 [3].

На бывшем дне Аральского моря ширина дешифрованных линий составляет от 3 до 90 м, большинство шириной 10—15 м, протяженность от 100 м до нескольких километров, в среднем 1.0—1.5 км. Большинство дешифрованных на Арале борозд приурочено к интервалу глубин 15—25 м (применительно к базовой отметке 53 м над уровнем моря в Балтийской системе высот, соответствующей квазистационарному уровню Аральского моря до 1961 г. (рис. 6). Описанные формы рельефа изначально были выявлены в зоне наибольшей ледовитости — северо-восточной части Большого Арала, а затем встречены и по всему восточному и на южном его побережьях. Вследствие отсутствия растительности и широкого развития эоловых процессов борозды выпаживания имеют различную сохранность, теряя выраженность с возрастом. На некоторых участках поля развития борозд частично перекрыты плащом эоловых отложений.

По результатам анализа спутниковых снимков проведена оценка покрытия дна бороздами (рис. 6). Проведенная оценка показала, что наибольшая концентрация борозд наблюдается в центральной части Восточного Арала и в южной части Западного Арала; в окраинных частях моря борозды встречаются реже.

**Дискуссия.** Различными экспертами высказываются предположения о возможном формировании борозд на дне Аральского моря в результате траления во время рыболовецкого промысла, а также дрейфующими брошенными судами или якорями. Вместе с тем, если проанализировать природные условия высыхающего бассейна Арала, а также особенности морфологии и распространения борозд, то всякое сомнение в генезисе этих следов пропадает, и большинство из них интерпретируются как борозды ледового выпаживания.

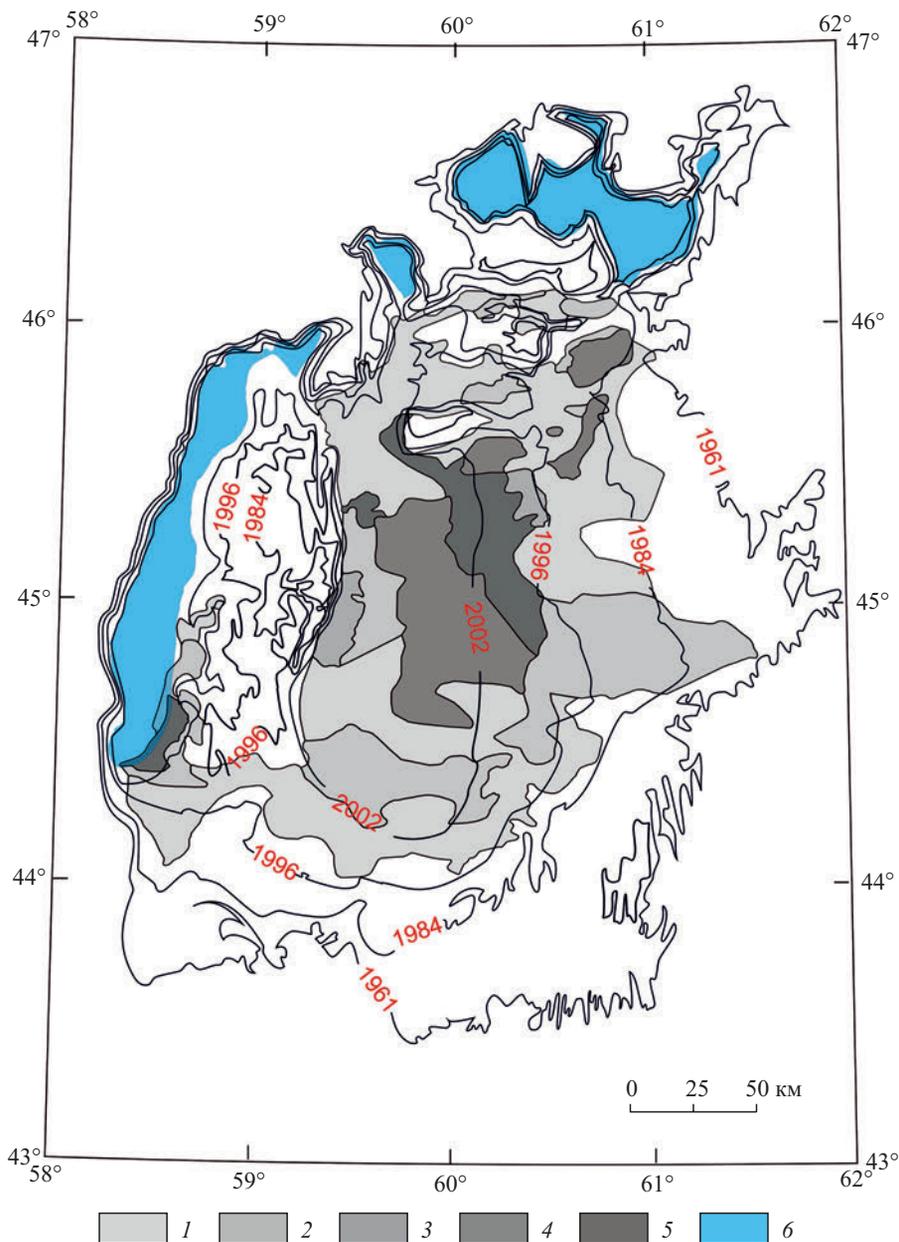


Рис. 6. Схема распространения ледово-эскарпационного рельефа, наложенная на схему береговых линий (по [6]). Условные обозначения: 1 — покрытие дна бороздами менее 10 %, 2 — 10—20 %, 3 — 20—30 %, 4 — 30—50 %; 5 — более 50 %; 6 — современное положение Аральского моря.

Fig. 6. Estimated coverage of the Aral Sea bottom by ice scours on the background of contours of the former shorelines (after [6]): 1 — <10% of ice scour coverage, 2 — 10—20 %, 3 — 20—30 %, 4 — 30—50 %; 5 — >50%, (6) modern Aral Sea water area.

Необходимо отметить, что в нашей стране и на территории бывшего СССР процессы экзарации дна крупных озер ледяными образованиями изучены слабо, их изучение начато лишь в последнее время [18]. Однако такие процессы давно известны и изучаются на Великих озерах в Северной Америке — как следы плейстоценовых [21] и современных ледовых воздействий [23]. Климат в районе озера Эри, например, значительно более мягкий по сравнению с климатом в районе Аральского моря: средняя температура января на несколько градусов выше, чем в южной части Аральского моря, а сумма отрицательных температур по модулю ниже [19].

Так, на озере Эри сильные ветра вызывают формирование гряд торосов с парусами высотой до 10 м. В результате воздействий таких торосистых образований на дно формируются борозды глубиной до 1.7 м, шириной до 100 м и длиной до нескольких километров. В то же время, как отмечается в [23], экзарация дна носит эпизодический характер и имеет большую пространственно-временную изменчивость.

Не вызывает сомнений, что и на Аральском море в историческое время имело место довольно интенсивное воздействие на берега и дно ледяных торосистых образований, которое может проявляться и в настоящее время. Сравнительный анализ очертаний и характера распределения следов экзарации на высохшем дне Аральского моря аналогичен современным, также обнаруживаемым на космических снимках, следах экзарации дна на Северном Каспии, а также в Арктических морях. Часть дешифрованных линий может относиться к результатам антропогенного воздействия: следам траловых досок, килей кораблей, якорей или дорогам на высохшем дне Аральского моря. Однако они имеют небольшую фиксированную ширину и отличную от следов ледовых воздействий морфологию, что позволяет легко выделить их из общего числа линий.

Зона наиболее интенсивной экзарации, исходя из сходных условий соседнего Каспия, должна находиться на глубине от 2 до 5 м. На меньших глубинах находится зона стабильного припая, торошения в которой незначительны. В то же время мощность ледяных образований на Аральском море не столь велика, и их кили не достигали дна на глубинах более 6 м. Учитывая интервал

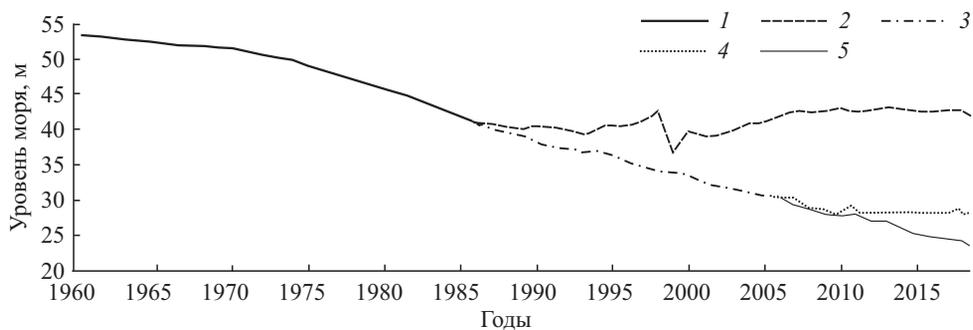


Рис. 7. Колебания уровня Аральского моря (построено по данным [14–16, 24]). Условные обозначения: 1 — Аральское море (1960—1986 гг.); 2 — Малый Арал (1986—2018 гг.); 3 — Большой Арал (1986—2006 гг.); 4 — Восточное море (2007—2018 гг.); 5 — Западное море (2007—2018 гг.).

Fig. 7. Fluctuations of the Aral Sea level (after [14–16, 24]). 1 — Aral Sea (1960—1986); 2 — North Aral Sea (1986—2018); 3 — South Aral Sea (1986—2006); 4 — East Aral Sea (2007—2018); 5 — West Aral Sea (2007—2018).

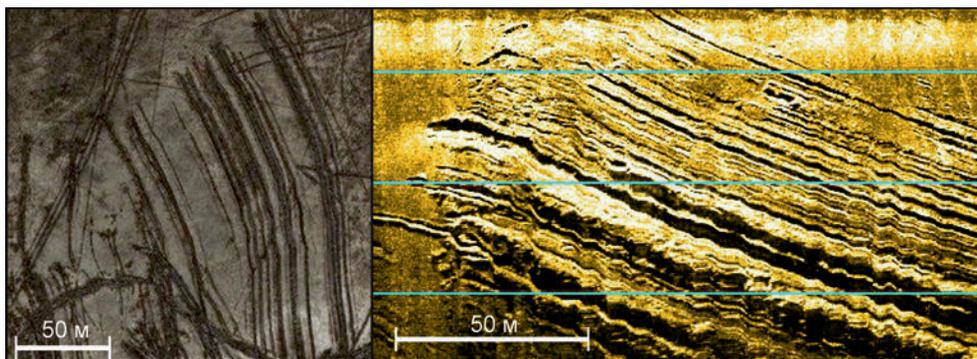


Рис. 8. «Гребенки» ледово-эскарационных борозд на дне Аральского моря (спутниковый снимок WorldView-3, *слева*) и Байдарацкой губы Карского моря (съемка ГБО, *справа*).

Fig. 8. «Combs» of ice scours at the bottom of the Aral Sea (WorldView-3, *left*) and at the bottom of the Baydaratskaya Bay (side scan sonar (SSS) survey, *right*).

глубин вероятных воздействий ледяных образований на дно, формирование большинства дешифрируемых борозд можно отнести к 1980—1997 гг. (рис. 7).

Так как борозды располагаются на обширной территории бывшего дна, и зона наиболее интенсивных воздействий приурочена к интервалу глубин 15—20 м, получается, что период их образования приурочен именно ко времени быстрого понижения уровня, когда интервал глубин 2—5 м смещался в целом на запад вместе с береговой линией. Падение уровня, достигавшее с середины

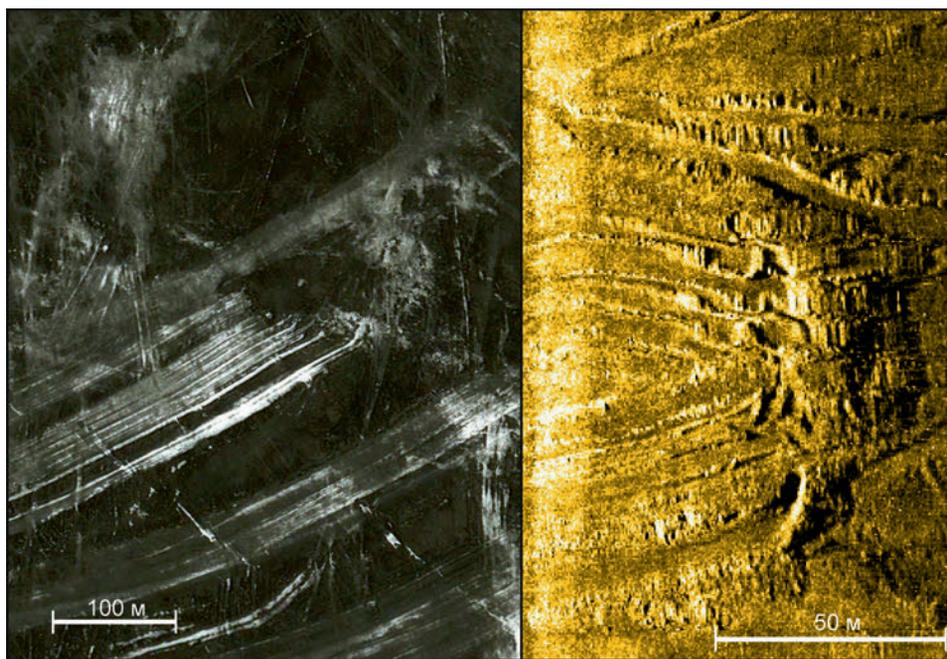


Рис. 9. Заканчивающийся валом «гребенки» на дне Аральского моря (спутниковый снимок WorldView-3, *слева*) и Байдарацкой губы Карского моря (съемка ГБО, *справа*).

Fig. 9. Front mounds at the ends of the «combs» at the bottom of the Aral Sea (WorldView-3, *left*) and at the bottom of the Baydaratskaya Bay (SSS survey, *right*).

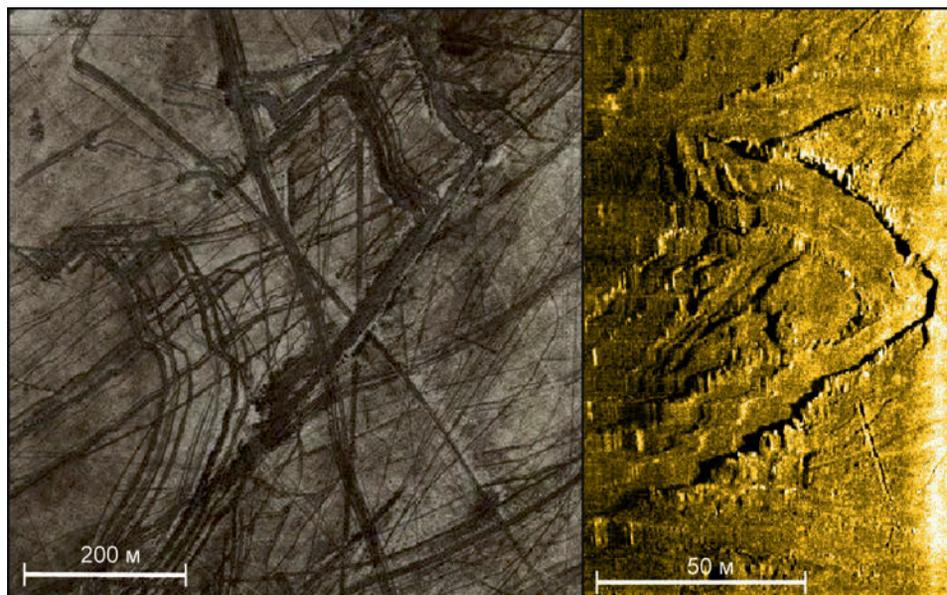


Рис. 10. Изгибающиеся ледово-эскарационные борозды на дне Аральского моря (спутниковый снимок WorldView-3, *слева*) и Байдарачкой губы Карского моря (съемка ГБО, *справа*).  
 Fig. 10. Bending ice scours at the bottom of the Aral Sea (WorldView-3, *left*) and at the bottom of the Baydaratskaya Bay (SSS survey, *right*).

1970-х до начала 1990-х гг. 70 см в год, происходило так быстро, что борозды выпаживания не успевали заполняться наносами.

Во время снижения темпов обмеления в 1990—2000-х гг. были сформированы обширные мелководья, и благоприятные для ледово-эскарационной деятельности условия (на глубинах 2—5 м) соблюдались на обширных территориях. При этом волновая переработка на восточном побережье практически отсутствовала в силу его от мелости и доминирования штормовых ветров, дующих с северо-востока. Хорошей сохранности борозд способствовал также и суглинистый характер грунта на дне, которое здесь существенно отличается

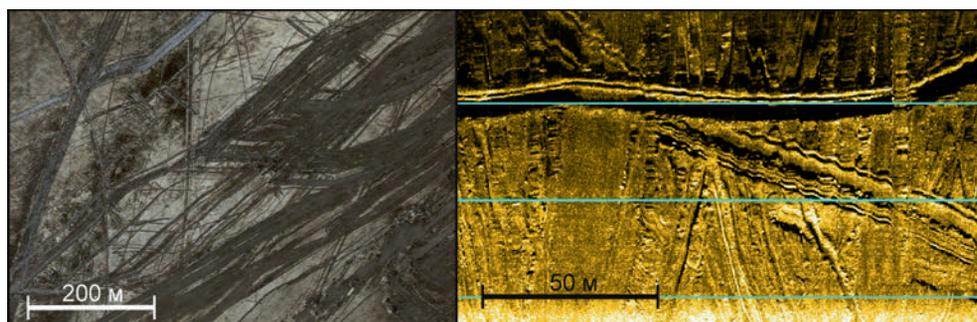


Рис. 11. Пересекающиеся ледово-эскарационные борозды на дне Аральского моря (спутниковый снимок WorldView-3, *слева*) и Байдарачкой губы Карского моря (съемка ГБО, *справа*).  
 Fig. 11. Imposition of ice gouging «combs» at the bottom of the Aral Sea (WorldView-3, *left*) and at the bottom of the Baydaratskaya Bay (SSS survey, *right*).

от Северного Каспия по составу донных осадков. Тем не менее, сохранность форм зависит от локальных условий и так или иначе снижается с годами.

Сравнение морфологии (рис. 8—11) и параметров ледово-экзарационного рельефа показывает, что ширина, длина и глубина форм в Каспийском и Аральском морях и Байдарацкой губе Карского моря представляют собой сопоставимые величины. Сохранность форм на дне Каспия на порядок ниже в силу наибольшего гидродинамического воздействия и состава донных грунтов. Глубины, на которых имеют место ледовые воздействия, в Байдарацкой губе в несколько раз больше, что объясняется местными ледовыми условиями.

**Заключение.** Ледово-экзарационный рельеф на дне Каспийского моря изучается уже в течение первых десятков лет. Текущее положение уровня моря является одним из важнейших факторов условий ледообразования, определяющих интенсивность ледово-экзарационного процесса на Каспии. Наиболее интенсивно воздействие ледяных торосистых образований на дно в интервале глубин от 2 до 5 м. Колебания уровня Каспия приводят к перераспределению глубин и перестройке рельефа дна, вместе с которыми изменяются условия формирования торосистых образований и экзарация ими дна. Таким образом, интервал глубин наиболее интенсивных воздействий не просто смещается вслед за колебаниями уровня, но и имеет локальные вариации, связанные с неоднородностями рельефа дна.

Аналогичный процесс наблюдался и в Аральском море, где вследствие климатических и антропогенных изменений произошла кардинальная перестройка природной среды и изменились условия рельефообразования и сохранности ледово-экзарационного рельефа на морском дне. На настоящий момент сложилась уникальная ситуация, когда свежий ледово-экзарационный рельеф оказывается открыт к изучению прямыми методами на суше — бывшем дне Аральского моря. Изучение его параметров имеет большое фундаментальное и прикладное значение для понимания условий и интенсивности экзарации дна на мелководных замерзающих морях и крупных озерах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 16-17-00034.

### Список литературы

- [1] Бухарицин П. И. Особенности процессов торошения ледяного покрова северной части Каспийского моря // Водные ресурсы. 1984. № 6. С. 115—123.
- [2] Бухарицин П. И. Особенности ледового режима и методы прогноза ледовых условий северной части Каспийского моря: Автореферат дис. на соискание уч. степ. канд. геогр. наук. Л.: ААНИИ, 1987. 20 с.
- [3] Бухарицин П. И., Огородов С. А., Архипов В. В. Воздействие ледяных образований на дно Северного Каспия в условиях колебаний уровня и ледовитости // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 2. С. 101—108.
- [4] Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IV. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 360 с.
- [5] Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. VII: Аральское море. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 195 с.
- [6] Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А., Кравцова В. И. Спутниковый мониторинг Аральского моря // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXIII. 2010. С. 150—193.
- [7] Зонн И. С., Гланц М. Г. Аральская энциклопедия. М.: Международные отношения, 2008. 256 с.

- [8] *Косарев А. Н.* Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во Московского университета, 1975. 272 с.
- [9] *Кошечкин Б. И.* Следы деятельности подвижных льдов на поверхности дна мелководных участков Северного Каспия // Тр. Лаборатории аэрометодов АН СССР. 1958. Т. 6. С. 227—234.
- [10] *Лукьянова Л. В.* Соленость и плотность каспийских льдов // Гидрометеорология Азербайджана и Каспийского моря. 1965. С. 197—201.
- [11] *Михайлов В. Н., Кравцова В. И., Гуров Ф. Н., Марков Д. В., Грегуар М.* Оценка современного состояния Аральского моря // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2001. № 6. С. 14—21.
- [12] *Огородов С. А., Архипов В. В.* Экзарация дна Каспийского моря ледяными торосистыми образованиями // Докл. РАН. 2010. Т. 432. № 3. С. 403—407.
- [13] *Огородов С. А.* Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Изд-во Московского университета, 2011. 173 с.
- [14] Aral Sea (East) / General Info / Database for Hydrological Time Series of Inland Waters (DAHITI): [сайт]. Munich, Germany, 2018. URL: <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/82/> (дата обращения: 12.11.2018).
- [15] Aral Sea (North) / General Info / Database for Hydrological Time Series of Inland Waters (DAHITI): [сайт]. Munich, Germany, 2018. URL: <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/81/> (дата обращения: 12.11.2018).
- [16] Aral Sea (West) / General Info / Database for Hydrological Time Series of Inland Waters (DAHITI): [сайт]. Munich, Germany, 2018. URL: <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/83/> (дата обращения: 12.11.2018).
- [17] *Barnes P. W., Rearic D. M., Reimnitz E.* Ice gouging characteristics and processes // The Alaskan Beaufort Sea: Ecosystems and Environments / Eds: P. W. Barnes, D. M. Schell, E. Reimnitz. Acad. Press Inc., Orlando, Florida. 1984. P. 185—212.
- [18] *Bukharitsin P. I.* Role of drifting ice in bottom relief formation of freezing shallow waters of the south of Eurasia // Proceedings of the 23rd IAHR International Symposium on Ice. Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR), Michigan, USA, 2016. P. 1—9.
- [19] *Eichenlaub V.* Weather and Climate of the Great Lakes Region. South Bend: University of Notre Dame Press, 1979. 440 p.
- [20] *Hansen K.* April Puzzler Answer: Ice Scours the North Caspian Sea // NASA Earth Observatory: [сайт]. USA, Merritt Island, 2016. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/blogs/earthmatters/2016/05/03> (дата обращения: 22.11.2018).
- [21] *Gilbert R., Handford K. J., Shaw J.* Ice Scours in the Sediments of Glacial Lake Iroquois, Prince Edward County, Eastern Ontario // Géographie physique et Quaternaire. 1992. Vol. 46. № 2. P. 189—194.
- [22] Google Maps: [сайт] USA, Mountain View, 2018. URL: <https://goo.gl/maps/mNptR1nHyZQ2> (дата обращения: 22.11.2018).
- [23] *Grass J. D.* Ice scour and ice ridging studies in Lake Erie // Proceedings of the 7th International Symposium on Ice. Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR). Hamburg, 1984. P. 221—236.
- [24] *Kostianoy A. G., Kosarev A. N.* The Aral Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. Vol. 7. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 335 p.
- [25] *Kouraev A. V., Kostianoy A. G., Lebedev S. A.* Ice cover and sea level of the Aral Sea from satellite altimetry and radiometry (1992—2006) // Journal of Marine Systems. 2009. Vol. 76. P. 272—286.

## Ice gouging topography on the Caspian and Aral seas bottom

© S. A. Ogorodov<sup>\*1</sup>, S. V. Maznev<sup>\*2</sup>, P. I. Bukharitsin<sup>\*\*3</sup>

\* Lomonosov Moscow State University

\*\* Water Problems Institute of RAS

E-mail: <sup>1</sup>ogorodov@aha.ru

<sup>2</sup>svmaznev@gmail.com

<sup>3</sup>astrgo@mail.ru

Ice gouging is a destructive mechanical impact of ice on the underlying ground surface associated with ice cover dynamics, ice hummocking (ridging) and formation of grounded hummocks (stamukhas) under hydrometeorological factors and coastal topography. Ice scours in the Northern Caspian Sea were discovered in 1950s, but ice gouging processes were taken into consideration only in 2012, when the accident on Kashagan gas field (Kazakhstan) occurred. Recently we found ice scours on the dried bottom of the Aral Sea. Ice gouging microrelief on the Caspian seabed was researched using specialized geophysical equipment — side-scan sonar and multibeam sounding. We have a unique opportunity to study ice scours on the Aral Sea dried bottom by direct methods, but now they are observed only by remote sensing technologies. When sea level is not stable the most intensive gouging takes place on the depths from 2 to 5 m. Ice scours are widespread on the Caspian and Aral seabed because their level was significantly changing during XX century. Climatic changes and anthropogenic influence can cause changes in conditions of ice scour formation. Studying of the ice scours parameters on the Aral Sea dried bottom has a great economic and fundamental importance for comprehension of ice gouging conditions and intensity in shallow freezing seas and big lakes.

Keywords: Caspian Sea, Aral sea, ice gouging, bottom topography, ice scours.

### References

- [1] *Bukharitsin P. I.* Osobennosti processov torosheniya ledyanogo pokrova severnoj chasti Kaspijskogo morya // *Vodny'e resursy*. 1984. № 6. S. 115—123.
- [2] *Bukharitsin P. I.* Osobennosti ledovogo rezhima i metody' prognoza ledovy'kh uslovij severnoj chasti Kaspijskogo morya: Avtoreferat dis. na soiskanie uch. step. kand. geogr. nauk. L.: AANII, 1987. 20 c.
- [3] *Bukharitsin P. I., Ogorodov S. A., Arkhipov V. V.* Vozdejstvie ledyan'y'kh obrazovaniy na dno Severnogo Kaspiya v usloviyakh kolebanij urovnya i ledovitosti // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2015. № 2. C. 101—108.
- [4] *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morej. T. IV. Kaspijskoe more. Vy'p. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992. 360 s.
- [5] *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morej SSSR. T. VII: Aral'skoe more. L.: Gidrometeoizdat, 1990. 195 s.*
- [6] *Ginzburg A. I., Kostyanov A. G., Sheremet N. A., Kravczova V. I.* Sputnikovy'j monitoring Aral'skogo morya // *Problemy' e'kologicheskogo monitoringa i modelirovaniya e'kosistem*. T. XXIII. 2010. S. 150—193.
- [7] *Zonn I. S., Glancz M. G.* Aral'skaya e'nciklopediya. M.: Mezhdunarodny'e otnosheniya, 2008. 256 s.
- [8] *Kosarev A. N.* Hidrologiya Kaspijskogo i Aral'skogo morej. M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1975. 272 s.
- [9] *Koshechkin B. I.* Sledy' deyatel'nosti podvizhny'kh l'dov na poverkhnosti dna melkovodny'x uchastkov Severnogo Kaspiya // *Tr. Laboratorii aerometodov AN SSSR*. 1958. T. 6. S. 227—234.
- [10] *Luk'yanova L. V.* Solenost' i plotnost' kaspijskikh l'dov // *Gidrometeorologiya Azerbajdzhana i Kaspijskogo morya*. 1965. S. 197—201.
- [11] *Mikhaïlov V. N., Kravczova V. I., Gurov F. N., Markov D. V., Gregoire M.* Ocenka sovremennogo sostoyaniya Aral'skogo morya // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2001. № 6. S. 14—21.
- [12] *Ogorodov S. A., Arkhipov V. V.* E'kzaraciya dna Kaspijskogo morya ledyan'y'mi torosisty'mi obrazovaniyami // *Dokl. RAN*. 2010. T. 432. № 3. S. 403—407.

- [13] *Ogorodov S. A.* Rol' morskikh l'dov v dinamike rel'efa beregovoj zony'. M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2011. 173 s.
- [14] Aral Sea (East) / General Info / Database for Hydrological Time Series of Inland Waters (DAHITI): [sajt]. Munich, Germany, 2018. URL: <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/82/> (data obrashheniya: 12.11.2018).
- [15] Aral Sea (North) / General Info / Database for Hydrological Time Series of Inland Waters (DAHITI): [sajt]. Munich, Germany, 2018. URL: <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/81/> (data obrashheniya: 12.11.2018).
- [16] Aral Sea (West) / General Info / Database for Hydrological Time Series of Inland Waters (DAHITI): [sajt]. Munich, Germany, 2018. URL: <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/83/> (data obrashheniya: 12.11.2018).
- [17] *Barnes P. W., Rearic D. M., Reimnitz E.* Ice gouging characteristics and processes // *The Alaskan Beaufort Sea: Ecosystems and Environments* / Eds: P. W. Barnes, D. M. Schell, E. Reimnitz. Acad. Press Inc., Orlando, Florida. 1984. P. 185—212.
- [18] *Bukharitsin P. I.* Role of drifting ice in bottom relief formation of freezing shallow waters of the south of Eurasia // *Proceedings of the 23rd IAHR International Symposium on Ice*. Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR), Michigan, USA, 2016. P. 1—9.
- [19] *Eichenlaub V.* Weather and Climate of the Great Lakes Region. South Bend: University of Notre Dame Press, 1979. 440 p.
- [20] *Hansen K.* April Puzzler Answer: Ice Scours the North Caspian Sea // *NASA Earth Observatory*: [sajt]. USA, Merritt Island, 2016. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/blogs/earthmatters/2016/05/03/> (data obrashheniya: 22.11.2018).
- [21] *Gilbert R., Handford K. J., Shaw J.* Ice Scours in the Sediments of Glacial Lake Iroquois, Prince Edward County, Eastern Ontario // *Géographie physique et Quaternaire*. 1992. Vol. 46. № 2. P. 189—194.
- [22] Google Maps: [sajt] USA, Mountain View, 2018. URL: <https://goo.gl/maps/mNptR1nHyZQ2> (data obrashheniya: 22.11.2018).
- [23] *Grass J. D.* Ice scour and ice ridging studies in Lake Erie // *Proceedings of the 7th International Symposium on Ice*. Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR). Hamburg, 1984. P. 221—236.
- [24] *Kostianoy A. G., Kosarev A. N.* The Aral Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. Vol. 7. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 335 p.
- [25] *Kouraev A. V., Kostianoy A. G., Lebedev S. A.* Ice cover and sea level of the Aral Sea from satellite altimetry and radiometry (1992—2006) // *Journal of Marine Systems*. 2009. Vol. 76. P. 272—286.

Поступила в редакцию 26.11.2018 г.  
 После доработки 24.01.2019 г.  
 Принята к публикации 14.02.2019 г.