## О динамике вод в заливе Кара-Богаз-Гол (спутниковая информация)

# А.И. Гинзбург<sup>1</sup>, А.Г. Костяной<sup>1,2</sup>, Н.А. Шеремет<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru <sup>2</sup> Московский университет им. С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия

Залив Кара-Богаз-Гол (КБГ) — гипергалинный водоём (солёность вод меняется в диапазоне от 40 до 270 ‰), являющийся эффективным испарителем поступающей в него через одноимённый пролив воды из Каспийского моря. В конце 2020 г. уровень воды в заливе, по данным системы HYDROWEB, LEGOS (Франция), опустился до отметки 29,25 м БС, что на 0,75 м ниже уровня Каспия. Площадь и объём залива при этом составили примерно 17 300 км<sup>2</sup> и 60 км<sup>3</sup>. Глубина залива не превышала 5–7 м. Для выявления структуры трансформированных каспийских вод на выходе из пролива, их проявления в поле температуры, путей дальнейшего распространения потока из зоны смешения и возможности вихреобразования на акватории залива использованы оптические спутниковые изображения Sentinel-2 с разрешением 10 м (четыре изображения с 16 по 31 июля 2021 г. и изображение 9 октября 2021 г.), ИК-изображение OLI-Landsat-8 (20 июля 2021 г., разрешение 100 м), все доступные за 2021 г. оптические изображения MODIS\_Terra\_Corrected Reflectance\_True Color (разрешение 250 м), ИК-изображения спутников NOAA-15, -16, -18 в 2001-2005 гг. (разрешение 1 км) и изображение MODIS-Aqua (комбинация RGB-каналов 1, 4, 3) 2 октября 2005 г. Показано, что вода в залив через многочисленные рукава дельты пролива поступает струями, границы которых идентифицируются даже на расстоянии в несколько километров от дельты. Температурный контраст между водой в струях на выходе из пролива и в заливе в летний сезон, когда вода в заливе теплее воды в Среднем Каспии (особенно в период интенсивного апвеллинга у восточного побережья моря), может достигать 10-11 °C. Направление распространения потока с резкими фронтальными границами из области смешения вод моря и залива разнообразно: он может быть направлен (предположительно, в зависимости от направления ветра) вдоль берега на север или на юго-восток, иметь форму эллипсовидной линзы с чёткими фронтальными границами на фоне распространяющегося вдоль побережья потока или грибовидную форму, ориентированную перпендикулярно побережью. В заливе КБГ наблюдаются разномасштабные вихревые структуры (от ~7 до 50 км) в разных частях акватории как в видимом диапазоне спектра, так и на ИК-изображениях (трассерами являются различие в цвете вод залива и каспийских вод, мутность, температурные контрасты). Рассмотрено проявление на поверхности залива циркуляции Ленгмюра 9 октября 2021 г. с расстоянием между линиями конвергенции 50–100 м при северо-восточном ветре со скоростью 3,3 м/с и температуре воздуха 14,5 °С.

**Ключевые слова:** залив Кара-Богаз-Гол, Каспийское море, уровень залива, уровень моря, вихри, вихревые диполи, фронты, спутниковые данные, оптические изображения, циркуляция Ленгмюра

Одобрена к печати: 10.08.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-265-279

#### Введение

Кара-Богаз-Гол (КБГ) — гипергалинный залив, примыкающий к восточной части Каспийского моря, расположенный на территории Туркменистана ( $40^{\circ}31'-42^{\circ}29'$  с.ш.,  $52^{\circ}43'-54^{\circ}46'$  в.д.) и представляющийся одним из самых крупных гипергалинных водоёмов на Земле (Выручалкина, 2020; Kosarev, Kostianoy, 2005; Kosarev et al., 2009). Он отделён от Среднего Каспия двумя песчаными косами, простирающимися в меридиональном направлении более чем на 90 км (*рис. 1*, см. с. 266). Эти косы образуют пролив длиной 7–9 км, шириной 120–800 м и глубиной 3–6 м, по которому воды Каспийского моря из-за разности уровней моря и залива поступают в КБГ со скоростью до 50–100 см/с, где они полностью испаряются со скоростью 800–1000 мм/год при годовой сумме атмосферных осадков не более 110 мм (Kosarev, Kostianoy, 2005; Kosarev et al., 2009; Kostianoy et al., 2011, 2014).



Рис. 1. Фрагмент спутникового изображения MODIS-Aqua, комбинация RGB-каналов 1, 4, 3 (R — англ. red, красный; G — англ. green, зелёный; B — англ. blue, синий). 2 октября 2005 г., 09:10 GMT (англ. Greenwich Mean Time)

Поэтому Кара-Богаз-Гол является естественным испарителем морской воды. Солёность вод залива в последнее столетие достигала 300 ‰ и более (при солёности вод Каспийского моря 12-13 ‰ (Kosarev, Yablonskaya, 1994)), и в его солевых отложениях найдено до 20 минералов, считающихся ценным сырьём для промышленности, сельского хозяйства, медицины и других отраслей экономики. История изучения залива русскими исследователями в XVIII-XX вв., состава его осадконакоплений на дне и освоения его солевых ресурсов рассмотрены в ряде работ (см., на-

пример, (Выручалкина, 2020; Карпычев, 2007; Kosarev et al., 2009, 2013)).

Интересно, что Кара-Богаз-Гол превратился из озера в залив Каспийского моря лишь с наступлением Голоцена. По анализу кернов донных отложений, взятых у берега КБГ, установлено (Ферронский и др., 2003; Leroy et al., 2006), что в первую фазу Голоцена с 9200 по 8500 лет назад в КБГ поступали воды текущих с севера рек Карын-Жарик и Кайдак и он был пресноводным водоёмом, не связанным с Каспием. С 8500 по 2200 лет назад при интенсивном речном стоке вода из КБГ поступала в Средний Каспий, уровень которого тогда был ниже современного. И лишь с 2200 лет назад и до настоящего времени воды Каспия поступают в залив.

На протяжении последнего столетия физические, химические и морфометрические характеристики залива, зависящие от поступления воды из Каспия и, соответственно, от уровня моря, претерпевали значительные изменения (Leroy et al., 2006; Kosarev et al., 2009). В первые декады XX в. при уровнях Каспия и КБГ -26,0 и -26,5 м в Балтийской системе высот (БС) площадь залива составляла примерно 18 300 км<sup>2</sup> (что превышает площадь крупнейшего озера Европы — Ладоги с площадью 17 870 км<sup>2</sup>), объём — 130 км<sup>3</sup>, глубина — в основном 8-10 м (максимальная — 13 м), поток каспийских вод в залив — 18-25 км<sup>3</sup>/год. С падением уровня Каспия сначала на 2 м в 1930-х гг., затем до уровня -29 м БС к 1977 г. (абсолютный минимум за последние 400 лет) уровень КБГ опустился до -32 м БС, площадь залива и его объём сократились до 10 тыс. км<sup>2</sup> и 20-22 км<sup>3</sup> соответственно, поток каспийских вод в залив уменьшился до 5-7 км<sup>3</sup>/год, а солёность его вод возросла до 270-300 ‰. С возведением в марте 1980 г. в проливе дамбы, изолировавшей залив от моря, началось его быстрое усыхание: к марту 1983 г. максимальные глубины уменьшились до 0,2-0,5 м, а солёность вод увеличилась до 290-320 ‰; к концу 1983 г. площадь, объём и глубина КБГ уменьшились соответственно до 1000 км<sup>2</sup>, 0,2 км<sup>3</sup> и 0,1–0,3 м при увеличении солёности до 330–380 ‰. В июне 1992 г. на фоне роста уровня Каспийского моря и разности уровней моря и залива примерно в 6,9 м дамба была разрушена и началось наполнение залива каспийской водой со скоростью 37-52 км<sup>3</sup>/год (после наполнения его чаши поток уменьшился до 17 км<sup>3</sup>/год). В течение 1992–1996 гг. уровень КБГ, по данным спутниковой альтиметрии (Лебедев, Костяной, 2005; Kosarev et al., 2009; Kostianoy et al., 2011, 2014, 2019), рос со скоростью 168 см/год и к середине 1996 г. достиг отметки – 27 м БС. В дальнейшем характер временной изменчивости уровня залива — тот же, что и в Каспии, с уровнем примерно на 0,5 м ниже, чем в море (Гинзбург, Костяной, 2018; Kostianoy et al., 2019).

Работы (Булатов, 2021а; Leroy et al., 2006) дают представление о пространственном распределении солёности по акватории залива после его заполнения каспийской водой и в начале 2000-х гг. По данным исследования (Leroy et al., 2006), солёность в заливе изменялась от 40 до 100 ‰ в зоне смешения его вод с водами моря, от 170 до 250 ‰ — в северо-западной и юго-западной частях моря и была выше 272 ‰ на мелководье. Близкое распределение солёности представлено на карте-схеме в работе (Булатов, 2021а): солёность вод в заливе меняется в диапазоне от 40 до 270 ‰ со значениями менее 60‰ на выходе из пролива, от 60 до 180 ‰ — в зоне смешения вод, 222 и 260 ‰ — в юго-западной и северо-западной прибрежных областях залива соответственно, в пределах 240–250 ‰ — в центре залива и более 270 ‰ — на его северном, восточном и юго-восточном мелководье.

Характер изменения температуры поверхности воды (ТПМ) в КБГ также известен. Внутригодовое изменение ТПМ находится в диапазоне от -3,5 °C зимой до +33 °C летом со среднегодовой температурой 12–15 °C (Leroy et al., 2006). На основе данных NASA JPL PO.DAAC AVHRR MCSST (NASA — *англ*. National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США; JPL — *англ*. Jet Propulsion Laboratory; PO.DAAC — *англ*. Physical Oceanography, Distributed Active Archive Center; AVHRR — *англ*. Advanced Very-High-Resolution Radiometer; MCSST — *англ*. Multichannel Sea Surface Temperature) в работах (Гинзбург и др., 2004; Ginzburg et al., 2005) были получены сезонные распределения ТПМ, средние для периода с 1994 г. (стадия заполнения залива каспийской водой) по 2000 г. Было показано, что зимой и осенью (весной и летом) наиболее тёплые (холодные) воды в заливе сосредоточены вблизи пролива Кара-Богаз-Гол. Летние максимумы ТПМ наступают преимущественно в августе, зимние минимумы — в январе — феврале. Среднегодовое значение ТПМ равно 16,1 °C. По данным GHRSST (*англ*. The Group for High Resolution Sea Surface Temperature), тренд среднегодовой TПМ в заливе КБГ в 1982–2015 гг. составил +0,04 °C/год (Kostianoy et al., 2019).

Если данные об изменении уровня (с 1993 г.) и температурном режиме (с 1982 г.) залива со временем могут быть получены с использованием спутниковых данных с высоким пространственным и временным разрешением, то о динамике вод залива до настоящего времени практически ничего не известно. Очевидно, что в отсутствие гидрологических съёмок основой получения подобной информации могут быть только данные дистанционного зондирования. О том, что разнообразная мезомасштабная и субмезомасштабная динамика вод в КБГ существует, свидетельствует спутниковое изображение MODIS-Terra (*анел*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) от 20 марта 2013 г. (Kostianoy et al., 2014, Figure 17). Цель настоящей работы — анализ доступной спутниковой информации для выявления путей распространения воды из зоны смешения каспийских вод и вод залива, фронтов, вихревых структур, обеспечивающих горизонтальное перемешивание вод в заливе.

#### Данные

В настоящем исследовании использованы доступные через интернет оптические изображения высокого разрешения (10 м) со спутника Sentinel-2 (серия из четырёх изображений района дельты канала в КБГ с 16 по 31 июля 2021 г. и изображение 9 октября 2021 г.), одно инфракрасное (ИК) изображение OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8 (20 июля 2021 г.) с разрешением 100 м и информативные изображения (не закрытые облачностью) залива КБГ с MODIS\_Terra\_Corrected Reflectance\_True Color с пространственным разрешением 250 м за весь 2021 г. Использованы также ИК-изображения спутников NOAA-15, -16, -18 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration, Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США) с пространственным разрешением 1 км за 2001–2005 гг. и изображение MODIS-Aqua (комбинация RGB-каналов 1, 4, 3) 2 октября 2005 г. Временные серии среднемесячных значений уровня залива КБГ (с 17.10.1992 по 26.07.2022) получены из онлайн-базы данных HYDROWEB, LEGOS (Франция) (https://hydroweb.the-ia-land.fr/hydroweb/view/L\_kara\_bogaz\_gol?lang=fr#), основанной на альтиметрических измерениях. Значения площади и объёма залива в конце 2020 г. определены по временным сериям системы HYDROWEB, LEGOS и зависимостям этих параметров от уровня в заливе

в работе (Выручалкина, 2020), полученным с использованием цифровой модели рельефа дна. Информация о скорости и направлении ветра, а также температуре воздуха над заливом 9 октября 2021 г. получена из данных высокого разрешения NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр экологических прогнозов) GFS (*англ.* Global Forecast System) (https://www.ncdc.noaa.gov).

#### Современные уровень залива КБГ и его морфометрические параметры

Уровень залива КБГ с 1996 г., когда после разрушения дамбы он полностью заполнился водой, за исключением некоторого подъёма летом 2005 и 2006 гг. практически непрерывно падает (*puc. 2a*, см. с. 269). К концу 2020 г. уровень залива опустился до отметки –29,25 м БС, что примерно на 0,75 м ниже уровня моря (–28,5 м БС, см. (Гинзбург и др., 2021а), где обработка данных спутниковой альтиметрии проводилась с использованием программного обеспечения, разработанного в Геофизическом центре РАН (Лаврова и др., 2011; Лебедев, Костяной, 2005; Lebedev, 2018)).

Залив имеет размеры 151 км по параллели 41° с. ш. и 167 км по меридиану 53° 45′ в.д. (Выручалкина, 2020). Площадь залива, согласно *рис. 26*, в конце 2020 г. при уровне -29,25 м составила примерно 17 300 км<sup>2</sup>. Для определения объёма залива в конце 2020 г. по *рис. 2в* необходимо знать отсчётный уровень — значение объёма в августе 1993 г. В отсутствие такой информации определим по *рис. 2а* уровень КБГ в августе 1993 г. (примерно -31 м) и, используя зависимость объёма от уровня залива в работе (Выручалкина, 2020), получим соответствующее значение объёма 35 км<sup>3</sup>. С учётом увеличения объёма залива с августа 1993 г. до конца 2020 г., равного 25 км<sup>3</sup> (см. *рис. 2в*), получим значение объёма в конце 2020 г. — 60 км<sup>3</sup>. Можно определить площадь и объём залива по известному в конце 2020 г. уровню -29,25 м и непосредственно по зависимостям в работе Т. Ю. Выручалкиной (2020): примерно 19 000 км<sup>2</sup> и 65 км<sup>3</sup> соответственно. Расхождение в значениях площади залива, полученных разными методами, — в пределах 10 %.

Можно приблизительно оценить и глубину современного залива: если в первые декады XX в. при уровне КБГ -26,5 м БС его глубина была в основном 8-10 м (см. выше), то при отметке -29,25 м к концу 2020 г. она могла быть не более  $\sim 5-7$  м (с учётом неизвестной толщины слоя солевых отложений на дне залива).

#### Анализ спутниковых изображений

#### Структура стока из дельты канала и области смешения вод Каспия и залива

*Рисунки За*,  $\delta$  (см. с. 270) демонстрируют структуру стока трансформированных каспийских вод вблизи дельты канала, соединяющего море и залив. Вода струями через многочисленные рукава дельты пролива веером поступает в залив. Границы струй идентифицируются даже на расстоянии в несколько километров от дельты, и на расстоянии около 7 км от побережья отчётливо видна фронтальная граница области относительно «опреснённых» вод, распространяющихся на юго-восток (см. *рис. 36*). Разность температуры около 10 °C вод в заливе (30 °C) и на выходе из канала (примерно 20 °C) по мере распространения струй постепенно исчезает и неразличима уже на расстоянии примерно 6 км (*рис. 3в*).

Распространение потока из дельты канала на юго-восток и далее вдоль южного побережья 21 и 24 июля 2021 г. показано на *puc. 4a*,  $\delta$  (см. с. 271). Такое же распространение потока — и на изображении MODIS-Terra за 29 июля 2021 г. (не показано). Однако два дня спустя, 31 июля (*puc. 4b*), область смешения вод занимает полосу шириной до 7 км как к югу от дельты, так и к северу от неё, причём создаётся впечатление, что фронт прежней зоны смешения смещён к востоку и образована новая двухфронтальная зона, отличающаяся по цвету от вод залива.



*Рис. 2.* Изменение морфометрических параметров зал. Кара-Богаз-Гол (среднемесячные значения) по данным HYDROWEB, LEGOS (Франция): *а* — уровня и *б* — площади с 17.10.1992 по 26.07.2022; *в* — приращения объёма (относительно августа 1993 г.) с 14.08.1993 по 26.07.2022



a



б



*Рис. 3.* Изображения: *а* — видимый диапазон, Sentinel-2, разрешение 10 м, 16 июля 2021 г.; *б* — то же 21 июля 2021 г.; *в* — ИК-диапазон, OLI-Landsat-8, разрешение 100 м, 20 июля 2021 г.



a



б



в

*Рис. 4.* Изображения видимого диапазона: *a* — Sentinel-2, разрешение 10 м, 21 июля 2021 г.; *б* — MODIS-Terra, разрешение 250 м, 24 июля 2021 г.; *в* — Sentinel-2, разрешение 10 м, 31 июля 2021 г.





*Рис. 5.* Изображения MODIS-Terra с разрешением 250 м: *a* — 27 января; *б* — 30 мая; *в* — 1 декабря 2021 г.



*Рис. 6.* Фрагменты ИК-изображений: *a* — NOAA-15, 21 июня 2001 г., 18:21 GMT; *δ* — NOAA-18, 10 июня 2005 г., 23:43 GMT; *в* — NOAA-16, 26 июня 2003 г., 22:36 GMT; пространственное разрешение —1 км

Направление распространения потока из дельты разнообразно: он может быть направлен вдоль северной или южной кос на север (*puc. 5a*) или юго-восток соответственно, иметь форму эллипсовидной линзы с чёткими фронтальными границами на фоне распространяющегося вдоль побережья потока (*puc. 56, 66, e,* см. с. 272) или грибовидную форму с длиной структуры примерно 25 км, ориентированную перпендикулярно побережью (*puc. 5e, 6a*). ИК-изображения (см. *puc. 6*) дают представление о температурных контрастах вод в области смешения и в заливе при апвеллинге у восточного побережья Каспийского моря (Лаврова и др., 2011). На *puc. 6a* минимальная температура в «ножке» грибовидного потока из канала: 21-22 °C, в большей части залива ТПМ равна 26 °C с вариациями от 24 до 26,5 °C. На *puc. 66* при большей интенсивности апвеллинга минимальная ТПМ в зоне смешения — 14,5 °C, при максимальном прогреве в юго-восточной части — более 25 °C, на *puc. 66* минимальное и максимальное значения температуры — 15 и 24 °C соответственно.

#### Вихревые структуры

В заливе КБГ наблюдаются разномасштабные вихревые структуры в разных частях акватории как в видимом диапазоне спектра, так и на ИК-изображениях. На рис. 1 это вихревой диполь с размером вихревой части около 35 км, ориентированный в сторону восточного берега залива, на *рис. 56* в центральной части залива к северо-востоку от канала — диполи размером 7-14 км и циклонический вихрь с диаметром около 10 км. Диполь и несколько циклонических вихрей диаметром около 7 км видны в центральной части залива (см. рис. 66). Дипольную структуру с длиной струйной части между вихрями около 25 км имеет поток каспийских вод на выходе из канала на рис. ба. Характер поля ТПМ на рис. ба позволяет предполагать наличие диполя с размером около 55 км и фронтом вихревой части вдоль северо-восточного побережья (оранжевый цвет) и антициклонического вихря примерно 30 км в диаметре южнее (зеленоватый тон), а дипольная структура с размером примерно 35 км, направленная на северо-запад (в пределах наиболее прогретой белесоватой области), различается на рис. бб. Практически на каждом безоблачном изображении видимого диапазона (например, рис. 5а, 7а, см. с. 274) можно видеть волнообразный след северо-восточного направления в поле мутности за обнажением дна размером около 1 км севернее мыса на северо-западе залива.

#### Циркуляция Ленгмюра

Система параллельных полос в западной части залива, «упирающихся» в ограниченную резким фронтом зону смешения каспийских вод и вод залива, видна на *рис. 7a, б.* По данным NCEP, в этот день (9 октября 2021 г.) над акваторией залива дул северо-восточный (25–30°) ветер со скоростью 12 км/ч (3,3 м/с), температура воздуха над заливом — 14,5 °C. Увеличенный фрагмент изображения Sentinel-2 (*рис. 7e*) позволил определить расстояние между полосами (линиями конвергенции) — 50–100 м. Совпадение направления полос с направлением ветра, величина скорости ветра и расстояние между полосами позволяют полагать, что это проявление циркуляции Ленгмюра, часто наблюдающейся в реках, озёрах, на морской поверхности и являющейся эффективным механизмом перемешивания вод верхнего слоя водоёма (Монин, Красицкий, 1985; Рянжин и др., 2008). Индикатором линий конвергенции становится, наиболее вероятно, пена, которая часто образуется в гипергалинных водоёмах. Интересным представляется тот факт, что фронтальная граница области вод с существенно меньшей солёностью оказалась барьером для циркуляции Ленгмюра.







в

*Рис.* 7. Циркуляция Ленгмюра в заливе КБГ 9 октября 2021 г., изображения видимого диапазона: *a* — MODIS-Terra с разрешением 250 м; *б* — Sentinel-2 с разрешением 10 м; *в* — увеличенный фрагмент полос изображения Sentinel-2

#### Обсуждение и выводы

Залив Кара-Богаз-Гол — мелководный, с глубинами в настоящее время не более 5-7 м. Поэтому циркуляция вод в заливе управляется, наиболее вероятно, ветром, как и в Северном Каспии (Гидрометеорология..., 1992). По данным измерений в 1998—2002 гг. (Leroy et al., 2006), преобладающие направления ветров над заливом — от северо-восточных до юго-восточных осенью — зимой и от северо-западных до юго-западных весной — летом со скоростью в диапазоне 2-8 м/с. Воздействием ветра, по-видимому, объясняется разнообразие направления изменение направления их распространения с юго-восточного на северное в течение двух дней (см. *рис. 4*). Термохалинная стратификация вод в заливе неизвестна. Можно полагать, однако, что в придонном слое солёность вод залива выше, чем в поверхностном, что благоприятствует движению поверхностных вод под действием ветра и вихреобразованию. Даже в проливе на глубине от 1,0 до 1,5 м солёность в некоторых местах может достигать значений 134–159 ‰, что, возможно, стало следствием осаждения солей в период полного перекрытия пролива дамбой (Булатов, 2013, 20216).

Выявление в настоящем исследовании структуры современной дельты канала, соединяющего залив КБГ с Каспийским морем, структуры и изменчивости зоны смешения каспийских вод и вод залива, вихревых образований, циркуляции Ленгмюра в этом гипергалинном водоёме основано на анализе спутниковой информации разного пространственного разрешения (от 10 м до 1 км). Проявление вод зоны смешения на оптических изображениях MODIS-Terra (см. *рис. 46, 5, 7а*) обусловлено различием цвета вод залива КБГ (свинцово-голубой изза высокой концентрации солей) и трансформированных каспийских вод (более тёмный). Разномасштабные вихревые структуры (от ~7 до 50 км) в разных частях залива проявляются в поле взвеси (мутности) на оптических изображениях и температуры на ИК-изображениях. Отсутствие в заливе в изобилии таких трассеров на оптических изображениях, как фитопланктон и цисты (покоящиеся яйца) рачка артемии (Artemia parthenogenttica) — типичного обитателя гипергалинных водоёмов, в частности западного бассейна Большого Аральского моря (Гинзбург и др., 2021б), связано, по-видимому, с очень высокой солёностью вод залива (Булатов, 2021б). Можно полагать, что анализ ИК-изображений с более высоким пространственным разрешением, чем в настоящем исследовании (1 км), даст более чёткую и разнообразную картину вихревой динамики залива.

Залив Кара-Богаз-Гол мелеет, что хорошо видно как по альтиметрическим данным (см. *рис. 2*), так и из сопоставления оптических изображений на *рис. 1* (2005) и *рис. 5a* (2021): появление на изображениях 2021 г. нового «островка» у восточного побережья (отсутствие его на *рис. 56* — следствие сезонного повышения уровня залива), обнажение дна мористее мыса в северо-западной части залива и у мысов южного побережья. При понижении уровня Каспийского моря ниже отметки -30 м БС произойдёт, согласно топографической карте залива, его полное отделение от моря (Выручалкина, 2020), на сей раз по естественной причине, что приведёт к неизбежному высыханию залива. При уровне Каспийского моря в конце 2020 г. -28,5 м и средней за 1993–2020 гг. скорости его падения 5,37 см/с (Гинзбург и др., 2021а) такое отделение (при сохранении непрерывного падения уровня моря) может произойти через 28 лет.

Исследование выполнено в рамках госзадания № FMWE-2021-0002 «Механизмы формирования циркуляционных структур Мирового океана: ключевые процессы в пограничных слоях и их роль в динамике океана на основе экспедиционных исследований, дистанционного зондирования, численного и лабораторного моделирования». Мы признательны за возможность использования снимков портала Worldview Snapshots (https://wvs.earthdata.nasa. gov), входящего в состав Системы данных и информации системы наблюдения Земли (*англ*. Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)).

### Литература

- 1. *Булатов С.А.* Диатомовые водоросли пролива, соединяющего Каспийское море и залив Кара-Богаз-Гол // Материалы 13-й Международ. конф. альгологов «Диатомовые водоросли: современное состояние и перспективы исследований». 24–29 авг. 2013. Борок, Россия: ООО «Костромской печатный дом», 2013. С. 29–30.
- 2. *Булатов С.А.* (2021а) Новые виды диатомовых (Bacillariophyta) для флоры залива Кара-Богаз-Гол (Каспийское море) // Ботан. журн. 2021. Т. 106. № 1. С. 52–60. DOI: 10.31857/S000681362101004X.
- 3. Булатов С. А. (20216) Artemia залива Кара-Богаз-Гол важнейший компонент гипергалинной аквакультуры каспийского региона // Каспий в цифровую эпоху: материалы Нац. научно-практич. корф. с международ. участием в рамках Международ. науч. форума «Каспий 2021: пути устойчивого развития». 27 мая 2021. Астрахань: Изд. дом «Астраханский ун-т», 2021. С. 355–359. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45769335.
- 4. Выручалкина Т.Ю. Создание цифровой модели рельефа залива Кара-Богаз-Гол // Тр. Карельского науч. центра Российской акад. наук. 2020. № 4. С. 139–144. DOI: 10.17076/lim1199.
- 5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6: Каспийское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия / ред. Терзиев Ф. С. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 358 с.
- 6. Гинзбург А. И., Костяной А. Г. Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е-2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
- 7. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* Сезонная и межгодовая изменчивость температуры поверхности Каспийского моря // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 645–659.
- 8. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А.* (2021а) Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 277–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
- 9. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А., Соловьев Д. М. (20216) Вихри в западном бассейне Большого Аральского моря (спутниковая информация) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 236–246. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-236-246.
- 10. Карпычев Ю.А. Изменчивость осадконакопления залива Кара-Богаз-Гол в связи с колебаниями уровня моря в новокаспийское время // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 918–926.
- 11. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 471 с.
- 12. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М., 2005. 366 с.
- 13. Монин А. С., Красицкий В. П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 376 с.
- 14. Рянжин С. В., Кочков Н. В., Карлин Л. Н. Загадочные циркуляции // Природа. 2008. № 4. С. 17–23.
- 15. Ферронский В. И., Поляков В. А., Брезгунов В. С., Власова Л. С., Карпычев Ю. А., Бобков А. Ф., Романовский В. В., Джонсон Т., Рикеттс Д., Расмуссен К. Изменение водного режима зал. Кара-Богаз-Гол, оз. Иссык-Куль и Аральского моря по данным изучения донных осадков // Водные ресурсы. 2003. Т. 30. № 3. С. 281–288.
- Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N.A. Sea Surface Temperature Variability // The Caspian Sea Environment. Ser.: The Handbook of Environmental Chemistry / eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005. V. 5P. P. 59–81. DOI: 10.1007/698\_5\_004.
- Kosarev A. N., Kostianoy A. G. Kara-Bogaz-Gol Bay // The Caspian Sea Environment. Ser.: The Handbook of Environmental Chemistry / eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005. V. 5P. P. 211–221. https://doi.org/10.1007/698\_5\_011.
- 18. Kosarev A. N., Yablonskaya E. A. The Caspian Sea. The Hague: SPB Academic Publ., 1994. 176 p.
- Kosarev A. N., Kostianov A. G., Zonn I. S. Kara-Bogaz-Gol Bay: physical and chemical evolution // Aquatic Geochemistry. 2009. V. 15. No. 1–2. Spec. Iss.: Saline Lakes and Global Change. P. 223–236. DOI: 10.1007/s10498-008-9054-z.
- Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S., Zhiltsov S. S. The Caspian Sea and Kara-Bogaz-Gol Bay // The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan. Ser.: The Handbook of Environmental Chemistry / eds. I. S. Zonn, A. G. Kostianoy. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. V. 28. P. 69–94. DOI: 10.1007/698\_2013\_228.
- 21. *Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Solovyov D. M.* Satellite monitoring of water resources in Turkmenistan // Intern. Water Technology J. 2011. V. 1. Iss. 1. P. 4–15.
- 22. *Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Solovyov D. M.* Satellite Monitoring of the Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol Bay, Sarykamysh and Altyn Asyr Lakes, and Amu Darya River // The Turkmen Lake Altyn Asyr and

Water Resources in Turkmenistan. Ser.: The Handbook of Environmental Chemistry / eds. I.S. Zonn, A.G. Kostianoy. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. V. 28. P. 197–231. DOI: 10.1007/698\_2013\_237.

- Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Sheremet N. A., Soloviev D. M. Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions // Remote Sensing of the Asian Seas / eds. V. Barale, M. Gade. Cham: Springer, 2019. P. 505–521. DOI: 10.1007/978-3-319-94067-0 28.
- 24. *Lebedev S.* Climatic variability of water circulation in the Caspian Sea based on satellite altimetry data // Intern. J. Remote Sensing. 2018. P. 4343–4359. DOI: 10.1080/01431161.2018.1441567.
- 25. *Leroy S.A. G., Marret F., Giralt S., Bulatov S.A.* Natural and anthropogenic rapid changes in the Kara-Bogaz Gol over the last two centuries reconstructed from palynological analyses and a comparison to instrumental records // Quaternary Intern. 2006. V. 150. P. 52–70. DOI: 10.1016/j.quaint.2006.01.007.

# On the dynamics of waters in the Kara-Bogaz-Gol Bay (satellite information)

# A. I. Ginzburg<sup>1</sup>, A. G. Kostianoy<sup>1,2</sup>, N.A. Sheremet<sup>1</sup>

#### <sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru <sup>2</sup> Moscow Witte University, Moscow 115432, Russia

The Kara-Bogaz-Gol Bay is a hypersaline reservoir (water salinity varies from 40 to 270 %), which is an effective evaporator of water from the Caspian Sea entering in the bay through the strait of the same name. At the end of 2020, the water level in the bay, according to the HYDROWEB, LEGOS (France) system, dropped to -29.25 m BS, which is 0.75 m below the Caspian level. The area and volume of the bay at the same time amounted to approximately 17,300 km<sup>2</sup> and 60 km<sup>3</sup>. The depth of the bay did not exceed 5-7 m. Sentinel-2 optical satellite images with spatial resolution of 10 m (4 images from July 16 to July 31, 2021, and image from October 9, 2021), OLI Landsat-8 IR image (July 20, 2021, 100 m resolution), all MODIS\_Terra\_Corrected Reflectance\_True Color optical images available for 2021 (250 m resolution), IR images of NOAA-15, -16, -18 satellites in 2001–2005 (resolution 1 km) and MODIS-Aqua image (combination of RGB channels 1, 4, 3) from October 2, 2005 were used to reveal the structure of the transformed Caspian waters at the exit from the strait, their manifestation in the temperature field, the ways of further propagation of the flow from the mixing zone and the possibility of vortex formation in the waters of the bay. It is shown that water flows into the bay through numerous branches of the strait delta in jets, the boundaries of which are identified even at a distance of several kilometers from the channel. The temperature contrast between the water in the jets at the exit from the strait and in the bay in the summer season, when the water in the bay is warmer than the water in the Middle Caspian (especially during the period of intense upwelling near the eastern coast of the sea), can reach 10-11 °C. The direction of flow propagation with sharp frontal boundaries from the area of mixing of sea and bay waters is diverse: it can be directed (presumably depending on the wind direction) along the coast to the north or southeast, to have the shape of an elliptical lens with clear frontal boundaries against the background of the flow propagating along the stream coasts or a mushroom shape oriented perpendicular to the coast. In the KBG Bay, eddy structures of different scales (from about 7 to 50 km) are observed in different parts of the water area both in the visible range of the spectrum and in IR images (tracers are the difference in the color of the waters of the bay and the Caspian waters, turbidity, and temperature contrasts). The manifestation of the Langmuir circulation on the surface of the bay on October 9, 2021, with a distance between convergence lines of 50-100 m at a northeast wind of 3.3 m/s and an air temperature of 14.5 °C is considered.

**Keywords:** Kara-Bogaz-Gol Bay, Caspian Sea, bay level, sea level, vortices, vortex dipoles, fronts, satellite data, optical images, Langmuir circulation

Accepted: 10.08.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-265-279

#### References

- 1. Bulatov S.A., Diatoms of the strait connecting the Caspian Sea and the Kara-Bogaz-Gol Bay, *Diatomovye vodorosli: sovremennoe sostoyanie i perspektivy issledovanii* (Diatoms: Current State and Research Prospects: Proc. XIII Intern. Conf. Algologists), 24–29 Aug. 2013, Borok, Russia: Kostroma Printing House, 2013, pp. 29–30 (in Russian).
- 2. Bulatov S.A. (2021a), Newly found diatom species for flora of Kara-Bogaz-Gol bay (Caspian Sea), *Botanicheskii zhurnal*, 2021, Vol. 106, No. 1, pp. 52–60 (in Russian), DOI: 10.31857/S000681362101004X.
- 3. Bulatov S.A. (2021b), *Artemia* of the Kara-Bogas-Gol Bay is the important component of the hypersaline aquaculture of the Caspian region, *Kaspii v tsifrovuyu epokhu* (Caspian in the Digital Age: Proc. National Scientific-Practical Conf. with Intern. Participation), 27 May 2021, Astrakhan: Astrakhan University Press, 2021 (in Russian), available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45769335.
- 4. Vyruchalkina T. Yu., Development of a digital elevation model of Kara-Bogaz-Gol bay, *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2020, No. 4, pp. 139–144 (in Russian), DOI: 10.17076/lim1199.
- 5. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. Tom 6. Kaspiiskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya* (The Sea project. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 6. The Caspian Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions), Terziev F.S. (ed.), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 358 p. (in Russian).
- 6. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Tendencies of changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990s 2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 195–207 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
- 7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Seasonal and interannual variability of the surface temperature of the Caspian Sea, *Okeanologiya*, 2004, Vol. 44, No. 5, pp. 645–659 (in Russian).
- 8. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A. (2021a), Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 277–291 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
- 9. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Soloviev D. M. (2021b), Vortices in the western large Aral Sea (satellite information), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 236–246 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-236-246.
- 10. Karpychev Yu.A., Variations in the sedimentation in Kara Bogaz Gol bay related to sea level fluctuations during the novocaspian time, *Oceanology*, 2007, Vol. 47, No. 6, pp. 857–864.
- 11. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 471 p. (in Russian).
- 12. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., *Sputnikovaya al'timetriya Kaspiiskogo morya* (Satellite altimetry of the Caspian Sea), Moscow: 2005, 366 p. (in Russian).
- 13. Monin A. S., Krasitskiy V. P., *Yavleniya na poverkhnosti okeana* (Phenomena on the surface of the ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 376 p. (in Russian).
- 14. Ryanzhin S. V., Kochkov N. V., Karlin L. N., Mysterious circulations, *Priroda*, 2008, No. 4, pp. 17–23 (in Russian).
- Ferronskii V. I., Brezgunov V. S., Vlasova L. S., Karpychev Yu.A., Polyakov V.A., Bobkov A. F., Romanovskii V. V., Jonson T., Ricketts D., Rasmussen K., Variations in the hydrological regime of Kara-Bogaz-Gol gulf, lake Issyk-Kul, and the Aral Sea assessed based on data of bottom sediment studies, *Water Resources*, 2003, Vol. 30, No. 3, pp. 252–259.
- Ginzburg A. I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A., Sea surface temperature variability, In: *The Caspian Sea Environment, Ser.: The Handbook of Environmental Chemistry*, A.G. Kostianoy, A.N. Kosarev (eds.), Berlin; Heidelberg: Springer, 2005, Vol. 5P, pp. 59–81, DOI: 10.1007/698\_5\_004.
- Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Kara-Bogaz-Gol Bay, In: *The Caspian Sea Environment, Ser.: The Handbook of Environmental Chemistry*, A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev (eds.), Berlin; Heidelberg: Springer, 2005, Vol. 5P, pp. 211–221, https://doi.org/10.1007/698\_5\_011.
- 18. Kosarev A. N., Yablonskaya E. A., The Caspian Sea, The Hague: SPB Academic Publ., 1994, 176 p.
- Kosarev A. N., Kostianov A. G., Zonn I. S., Kara-Bogaz-Gol Bay: physical and chemical evolution, *Aquatic Geochemistry*, 2009, Vol. 15, No. 1–2, Special Issue: Saline Lakes and Global Change, pp. 223– 236, DOI: 10.1007/s10498-008-9054-z.
- Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S., Zhiltsov S. S., The Caspian Sea and Kara-Bogaz-Gol Bay, In: *The Turkmen Lake AltynAsyr and Water Resources in Turkmenistan, Ser.: The Handbook of Environmental Chemistry*, I. S. Zonn, A. G. Kostianoy (eds.), Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, Vol. 28, pp. 69– 94, DOI: 10.1007/698\_2013\_228.
- 21. Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Solovyov D. M., Satellite monitoring of water resources in Turkmenistan, *Intern. Water Technol. J.*, 2011, Vol. 1, Iss. 1, pp. 4–15.

- Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Solovyov D. M., Satellite Monitoring of the Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol Bay, Sarykamysh and Altyn Asyr Lakes, and Amu Darya River, In: *The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan, Ser.: The Handbook of Environmental Chemistry*, I. S. Zonn, A. G. Kostianoy (eds.), Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, Vol. 28, pp. 197–231, DOI: 10.1007/698\_2013\_237.
- Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Sheremet N. A., Soloviev D. M., Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions, In: *Remote Sensing of the Asian Seas*, Barale V., Gade M. (eds.), Cham: Springer, 2019, pp. 505–521, DOI: 10.1007/978-3-319-94067-0\_28.
- 24. Lebedev S., Climatic variability of water circulation in the Caspian Sea based on satellite altimetry data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2018, pp. 4343–4359, DOI: 10.1080/01431161.2018.1441567.
- 25. Leroy S.A.G., Marret F., Giralt S., Bulatov S.A., Natural and anthropogenic rapid changes in the Kara-Bogaz Gol over the last two centuries reconstructed from palynological analyses and a comparison to instrumental records, *Quaternary Intern.*, 2006, Vol. 150, pp. 52–70, DOI: 10.1016/j.quaint.2006.01.007.