

Кара-Богаз-Гол: динамика вод (спутниковая информация)

А.И. Гинзбург¹, А.Г. Костяной^{1,2}, Н.А. Шеремет¹

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru

² *Московский университет им. С.Ю. Витте, Москва, 115432, Россия*

Кара-Богаз-Гол (КБГ) – гипергалинный залив, примыкающий к восточной части Каспийского моря, расположенный на территории Туркменистана (40°31' – 42°29' с.ш., 52°43' – 54°46' в.д.) и являющийся одним из самых крупных гипергалинных водоемов на Земле [5, 6, 7, 2]. Он отделен от Среднего Каспия двумя песчаными косами, простирающимися в меридиональном направлении более чем на 90 км. 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 залив, где они полностью испаряются со скоростью 800–1000 мм/год при годовой сумме атмосферных осадков не более 110 мм. Поэтому Кара-Богаз-Гол является естественным испарителем морской воды.

На протяжении последнего столетия физические, химические и морфометрические характеристики залива претерпевали значительные изменения [8, 6]. В первые декады XX века при уровнях Каспия и КБГ –26,0 и –26,5 м в Балтийской системе высот (БС) площадь залива была примерно 18300 км², объем – 130 км³, глубина в основном – 8–10 м. С падением уровня Каспия до отметки –29 м БС к 1977 г. уровень КБГ опустился до –32 м БС, площадь залива и его объем сократились до 10 тыс. км² и 20–22 км³ соответственно, а соленость возросла до 270–300‰. С возведением в марте 1980 г. в проливе дамбы, изолировавшей залив от моря, началось быстрое усыхание залива: к концу 1983 г. площадь, объем и глубина КБГ уменьшились соответственно до 1000 км², 0,2 км³ и 0,1–0,3 м при увеличении солености до 330–380‰. К середине 1996 г., когда после разрушения дамбы в июне 1992 г. залив полностью заполнился водой, его уровень достиг отметки –27 м БС. С этого времени происходит, за исключением некоторого подъема летом 2005 и 2006 гг., практически непрерывное падение уровня КБГ. К концу 2020 г., согласно данным системы HYDROWEB, LEGOS (Франция) (https://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L_kara_bogaz_gol?lang=fr#) (рис. 1), он опустился до отметки –29,25 м БС, что примерно на 0,75 м ниже уровня моря (–28,5 БС, см. [3]). При таком уровне, по нашим оценкам, с использованием данных HYDROWEB, LEGOS и результатов работы [2], его площадь и объем составили примерно 17300 км² и 60 км³ соответственно. Глубина залива не превышает 5–7 м. Соленость вод в заливе меняется в диапазоне от 40 до 270‰ [8, 1].

О динамике вод залива до настоящего времени практически ничего не известно. 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. В данном исследовании использованы доступные через интернет оптические изображения высокого разрешения (10 м) со спутника Sentinel-2 (4 изображения района дельты канала в КБГ с 16 по 31 июля 2021 г. и изображение 9 октября 2021 г.), ИК-изображение OLI Landsat-8 (20 июля 2021 г.) с разрешением 100 м, изображения залива КБГ с MODIS_Terra_Corrected Reflectance_True Color с разрешением 250 м за весь 2021 год, RGB (каналы 1,4,3) композит изображений MODIS-Aqua 2 октября 2005 г. и ИК-изображения спутников NOAA-15, -16, -18 с пространственным разрешением 1 км за 2001–2005 гг.

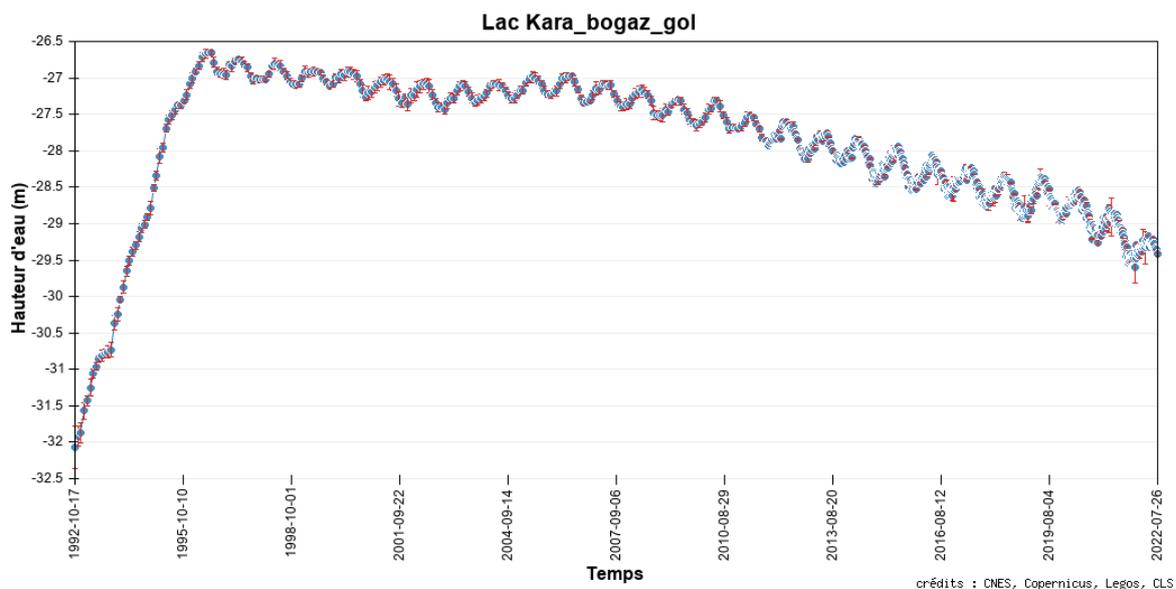
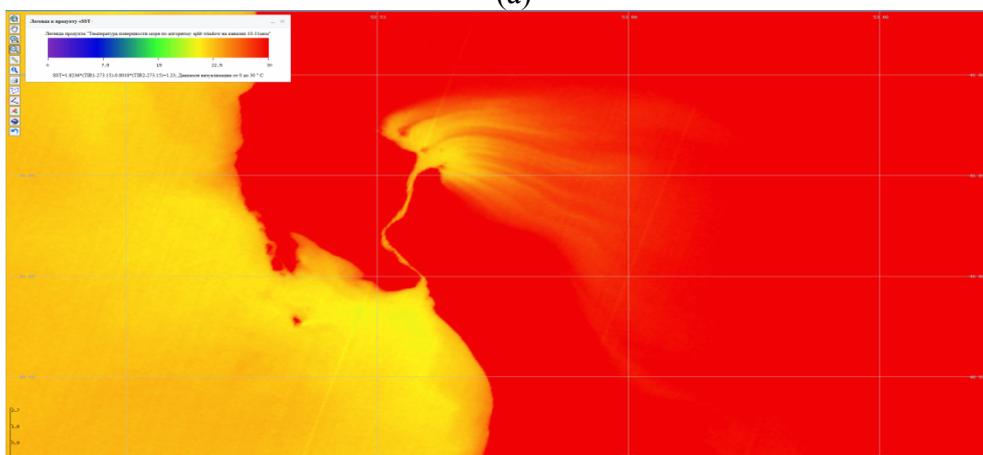


Рис. 1. Изменение уровня залива Кара-Богаз-Гол (среднемесячные значения) с 17.10.1992 по 26.07.2022 по данным HYDROWEB, LEGOS (Франция)

Установлено, что вода струями через многочисленные рукава дельты пролива веером поступает в залив. Границы струй идентифицируются даже на расстоянии в несколько километров от дельты, а разность температуры около 10°C вод в заливе (30°C) и на



(а)



(б)

Рис. 2. Изображения видимого диапазона Sentinel-2 16.07.2021 (а) и ИК-изображение OLI Landsat-8 20.07.2021 (б)

выходе из канала (примерно 20°C) летом по мере распространения струй постепенно исчезает и не различима уже на расстоянии примерно 6 км. Направление распространения потока из дельты разнообразно: он может быть направлен вдоль северной или южной кос на север или юго-восток соответственно (рис. 3), иметь форму эллипсовидной линзы с четкими фронтальными границами на фоне распространяющегося вдоль побережья потока или грибовидную форму, ориентированную перпендикулярно побережью.



(а)



(б)

Рис. 3. Изображения видимого диапазона Sentinel-2 21.07.2021 (а) и MODIS-Terra 27.01.2021 (б)

Циркуляция вод в мелководном заливе КБГ (в том числе и потока из зоны смешения) управляется, наиболее вероятно, как и в Северном Каспии, ветром. Граница относительно «опресненного» потока из зоны смешения имеет четко выраженную фронтальную границу. Разномасштабные вихревые структуры (вихри и вихревые диполи с размерами структуры от примерно от 7 до 50 км) в разных частях залива проявляются в поле взвеси (мутности) на оптических и температуры на ИК-изображениях (рис. 4): вихревой диполь с размером вихревой части около 35 км, ориентированный в сторону восточного берега залива (а); грибовидная форма потока из канала с длиной струи примерно 25 км (б); диполь и несколько циклонических вихрей диаметром около 7 км в центральной части залива (в). Характер поля температуры на рис. 4б 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).

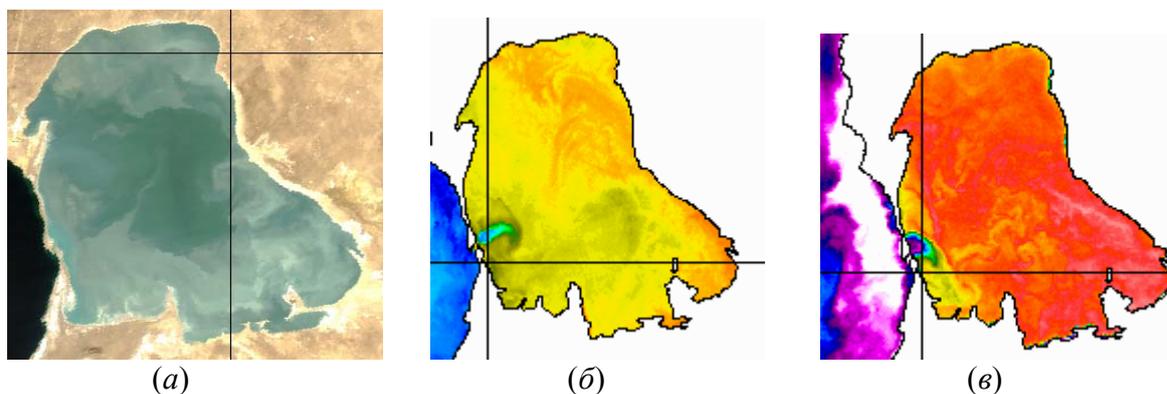


Рис. 4. Примеры проявления вихревых структур на оптическом изображении MODIS-Aqua (комбинация RGB каналов 1, 4, 3) 02.10.2005 (а) и ИК-изображениях (фрагменты) NOAA-15 21.06.2001 (б) и NOAA-16 26.06.2003 (в)

На изображениях MODIS-Terra (рис. 5) и Sentinel 2 9 октября 2021 г. наблюдалась система параллельных полос в западной части залива, «упирающихся» в барьер – ограниченную резким фронтом зону смешения каспийских вод и вод залива. По данным NCEP, в этот



Рис. 5. Изображения видимого диапазона MODIS-Terra 09.10.2021

день над акваторией залива дул северо-восточный ($25\text{--}30^\circ$) ветер со скоростью 3,3 м/с, температура воздуха над заливом – $14,5^\circ\text{C}$. Увеличенный фрагмент изображения Sentinel 2 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, озерах, на морской поверхности и являющейся эффективным механизмом перемешивания вод верхнего слоя водоема [4]. Индикатором линий конвергенции была, наиболее вероятно, пена, которая часто образуется в гипергалинных водоемах.

Исследование выполнено в рамках Госзадания № FMWE-2021-0002.

Литература:

1. Булатов С.А. Новые виды диатомовых (Bacillariophyta) для флоры залива Кара-Богаз-Гол (Каспийское море) // Ботанический журнал. 2021. Т. 106. № 1. С. 52–60.

2. Выручалкина Т.Ю. Создание цифровой модели рельефа залива Кара-Богаз-Гол // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 139–144. DOI: 10.17076/lim1199.
3. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 277–291.
4. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана // Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 376 с.
5. Kosarev A.N., Kostianoy A.G., Kara-Bogaz-Gol Bay. In: Kostianoy A, Kosarev A (eds.) The Caspian Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry, Springer, 2005. P. 211–221. https://doi.org/10.1007/698_5_011.
6. Kosarev A.N., Kostianoy A.G., Zonn I.S., Kara-Bogaz-Gol Bay: physical and chemical evolution, *Aquat. Geochem.* 2009. Vol. 15. No. 1–2. P. 223–236 (Special Issue: Saline Lakes and Global Change). Doi: 10.1007/s10498-008-9054-z.
7. Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Solovyov D.M. Satellite Monitoring of the Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol Bay, Sarykamysk and Altyn Asyr Lakes, and Amu Darya River // I.S. Zonn and A.G. Kostianoy (eds.), The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan, *Hdb Env Chem* (2014) 28: 197–232, DOI 10.1007/698_2013_237. # Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, Published online: 10 May 2013.
8. 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 International*. 2006. Vol. 150. P. 52–70.