

УДК 528.94

## СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ЗАЛИВА КАРА-БОГАЗ-ГОЛ

**Т. Ю. Выручалкина**

*Институт водных проблем РАН, Москва, Россия*

Приведены результаты работ по созданию цифровой модели рельефа дна залива Кара-Богаз-Гол. Информационной основой при создании цифровой модели рельефа послужили топографические карты 1986–1989 гг. масштаба 1:200 000 и 1:100 000. Цифровая модель рельефа дна создана по результатам оцифровки топографических карт. Работы по созданию цифровой модели рельефа проходили последовательно в несколько этапов. На первом этапе в соответствии с исходной системой координат (Пулкovo 1942) проводилась цифровая привязка сканированных изображений топографических карт. Далее карты оцифровывались. Полученные цифровые данные проинтерполированы на узлы регулярной сетки. На стадии проверки результатов на базе созданных GRD-моделей выполнены визуальный контроль полученных контуров изолиний и значений отметок глубин, исправление неточностей. В итоге создана цифровая модель рельефа дна залива с пространственным разрешением 100×100 м. Получены морфометрические зависимости для Кара-Богаз-Гола – между уровнем и площадью зеркала залива, между уровнем и наполнением водоема. Выше отметки –30 м БС залив Кара-Богаз-Гол имеет крутые и обрывистые берега. От отметки –30 м БС до –34 м берега имеют уклон 30–45 %, ниже отметки –34 м БС – практически плоское дно. Морфометрические характеристики коренной чаши залива Кара-Богаз-Гол существенно изменяются в зависимости от положения уровня воды моря и залива. Площадь водоема между отметками –25 и –30 м БС изменяется мало, в дальнейшем сокращаясь к отметке –35,6 м БС.

Ключевые слова: Кара-Богаз-Гол; цифровая модель рельефа; батиметрическая карта; морфометрия; Каспийское море.

### **T. Yu. Vyruchalkina. DEVELOPMENT OF A DIGITAL ELEVATION MODEL OF KARA-BOGAZ-GOL BAY**

The article presents the results of the efforts to create a digital elevation model of Kara-Bogaz-Gol Bay. The informational background for the digital elevation model was maps of 1:200 000 and 1:100 000 scales. The digital elevation model was created by digitizing topographic maps. The development process was organized sequentially in several stages. At the first stage, scanned images of topographic maps were referenced in accordance with the original coordinate system (Pulkovo 1942). Next, the maps were digitized. The resultant digital data were interpolated to the grid nodes. At the verification stage, the contour lines and depth values were visually checked on the basis of GRD models, and flaws were corrected. As a result, the digital elevation model of the bay bed was created with a spatial resolution of 100×100 m. Morphometric relationships were obtained for Kara-Bogaz-Gol – between the level and the area of the bay water surface, between the level and the storage of the bay. Kara-Bogaz-Gol Bay has an irregular shape. Its

shores above –30 m BS elevation are steep and precipitous. Between –30 and –34 m BS elevation the shore slope is 30–45 %, and an almost flat bed extends below –34 m BS. The rock basin morphometry of Kara-Bogaz-Gol Bay varies significantly depending on the water level in the sea and in the bay. The area of the waterbody remains almost invariable between –25 and –30 m BS height marks, and then shrinks towards –35.6 m BS elevation.

**Key words:** Kara-Bogaz-Gol; digital elevation model; bathymetric map; morphometry; Caspian Sea.

---

## Введение

Залив Кара-Богаз-Гол (КБГ) – один из самых крупных гипергалинных водоемов на планете. Он расположен на восточном побережье Среднего Каспия на территории Туркменистана между 40°31' и 42°29' с. ш., 52°43' и 54°46' в. д. Это самая обширная на Каспии лагуна, отделенная от моря двумя песчаными косами с непостоянной береговой линией. Между ними находится пролив длиной 7–9 км, шириной от 120 до 800 м и глубиной 3–6 м. В его соляных залежах найдено почти 20 солевых минералов, которые являются ценным сырьем для промышленности и сельского хозяйства.

Изучение залива началось в 1715 г. с экспедиции князя А. Бековича-Черкасского и составления первых географических карт береговой линии КБГ и Каспийского моря в этом районе. Дальнейшие изыскания здесь были продолжены только 120 лет спустя. В 1836 г. Г. С. Карелин установил, что залив бессточный, а вода из него интенсивно испаряется вследствие воздействия сухого и жаркого климата окружающей его пустыни. В 1847 г. И. М. Жеребцов составил описание залива и подготовил географические карты. При измерении глубин и взятии проб грунта со дна Жеребцовым было установлено, что подстилающий слой грунта состоял из соли. На рубеже XIX–XX вв. основной целью экспедиций было изучение солевых ресурсов залива и выявление причин гибели рыб в нем [Лепешков и др., 1981; Кара-Богаз-Гол..., 1988; Карпычев, 2007; Kosarev et al., 2009, 2013].

Широкое изучение и использование природных ресурсов КБГ началось в советский период. В 1921–1923 годах в заливе выполняла обширные исследования в области метеорологии, гидрологии и гидрохимии специальная многоцелевая экспедиция. И в дальнейшем до начала 1990-х годов изыскания в заливе проводились на относительно регулярной основе [Лепешков и др., 1981; Кара-Богаз-Гол..., 1988; Гидрометеорология..., 1996]. Однако в литературных источниках батиметрия залива

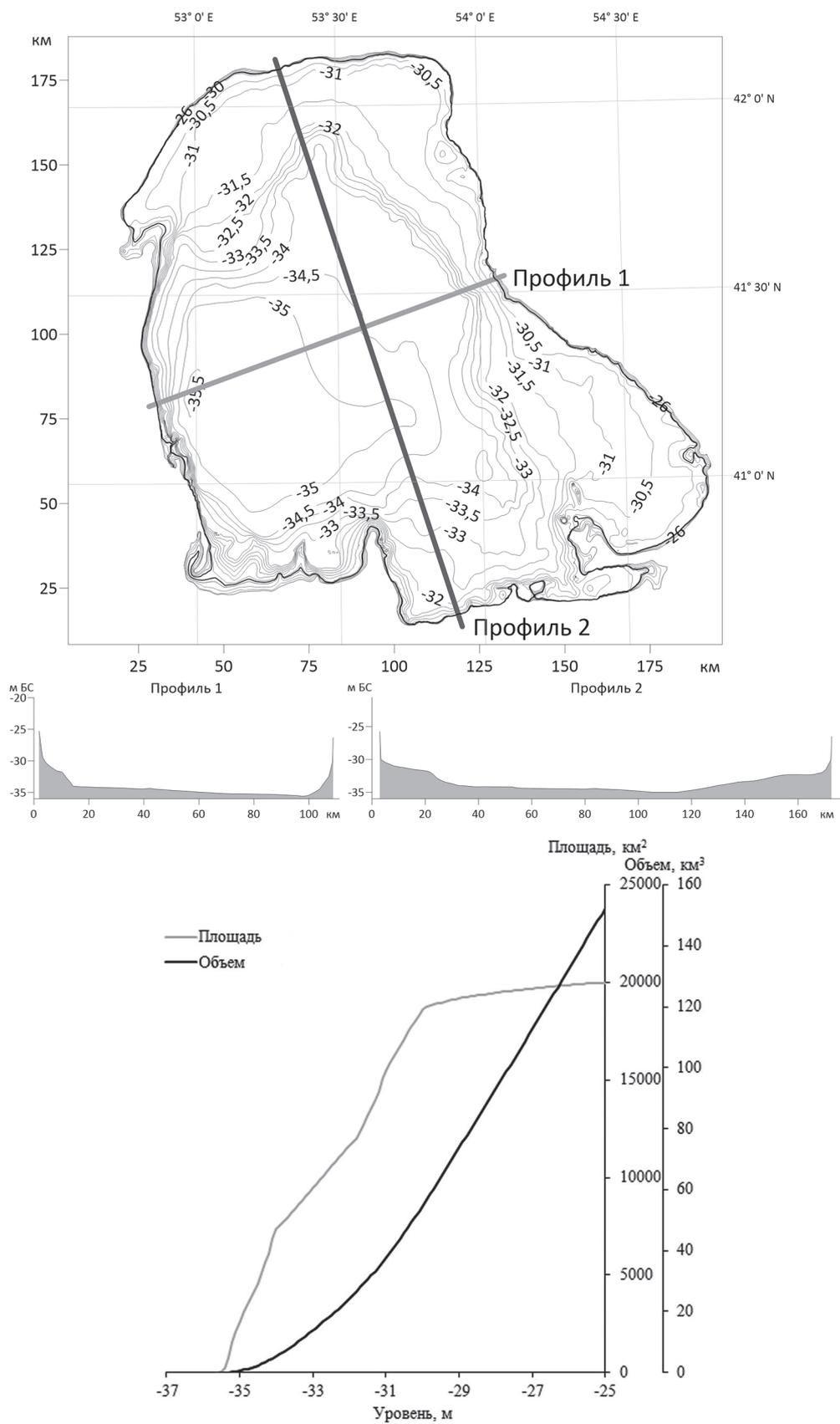
представлена лишь схематическими картами, а морфометрические зависимости – только в виде нескольких пар величин «уровень-зеркало» и «уровень-объем вод залива». Вероятно, это связано с тем, что береговая линия залива и рельеф дна значительно менялись во времени. В цифровом виде рельеф дна КБГ отсутствует.

Цель настоящей работы – создание цифровой модели рельефа (ЦМР) и определение морфометрических зависимостей залива Кара-Богаз-Гол. Развитие цифровых технологий и методов моделирования позволяет с помощью ЦМР выполнить эксперименты по расчету площадей и объемов заполнения залива, водно-солевого баланса залива в зависимости как от реальных, так и от прогностических значений уровня Каспийского моря и стока каспийских вод в залив. ЦМР может стать полезным инструментом в исследовании эволюции рельефа дна залива и его морфометрических характеристик. Важным условием получения качественного результата при этом является точная ЦМР дна КБГ.

## Материалы и методы

Информационной основой при создании ЦМР дна залива послужили топографические карты масштаба 1:200 000 и 1:100 000, опубликованные в 1986–1989 годах Главным управлением геодезии и картографии СССР.

Работы по созданию ЦМР проходили последовательно в несколько этапов, алгоритм описан в [Выручалкина, Фролов, 2018; Фролов и др., 2018]. На первом этапе в соответствии с исходной системой координат (Пулкова 1942) проводилась географическая привязка картографического материала. Далее карты векторизовались с заданием отметок глубин на основе исходных карт. Полученные цифровые данные с помощью метода Естественная окрестность, или Natural Neighbor [Sibson, 1981] были проинтерполированы на узлы сетки путем взвешивания соседних точек данных на основе пропорциональных областей. Алго-



Карта залива Кара-Богаз-Гол (в м БС) с профилями (а) и его морфометрические зависимости (б)

Map of the Kara-Bogaz-Gol Bay (in m BS) with profiles (a) and morphometric dependences (b)

ритм интерполяции Natural Neighbor использует взвешенное среднее соседних наблюдений, где веса пропорциональны «занимаемой площади». Метод Natural Neighbor не экстраполирует контуры за пределы оболочки местоположений данных. На стадии проверки результатов на базе «черновых GRD-моделей» выполнялся визуальный контроль полученных контуров изолиний и значений отметок глубин, исправление неточностей. Таким образом была создана ЦМР дна КБГ с пространственным разрешением 100×100 м.

## Результаты

Залив вытянут в северо-запада на юго-восток и имеет размеры по 41-й параллели 151 км, а по меридиану 53°45′ – 167 км. Из-за разницы уровней между Каспийским морем и КБГ морская вода поступает по проливу в залив, где полностью испаряется (в среднем 800–1000 мм/год). При понижении уровня Каспийского моря ниже отметки –30 м БС происходит полное отделение залива от моря. На рисунке представлена топография местности, ограниченная по высоте на отметке –25 м БС. Эта отметка выбрана в соответствии с данными о колебаниях уровня воды в заливе за последние 100 лет [Лавров, 2000; Leroy et al., 2006; Карпычев, 2007] как наблюдавшийся максимум.

Выше отметки –30 м БС залив КБГ имеет крутые и обрывистые берега (рис., а, профиль 1, 2). От отметки –30 м БС до –34 м берега имеют уклон 30–45 %, ниже отметки –34 м БС – практически плоское дно. Морфометрические зависимости коренной чаши залива Кара-Богаз-Гол существенно меняются от положения уровня воды залива. От отметки –25 до –30 м БС площадь водоема медленно убывает, от ~ 20 до 18,6 тыс. км<sup>2</sup> соответственно. При этом происходит интенсивное уменьшение объема залива, с 150 до 50 тыс. км<sup>3</sup>. Затем площадь зеркала залива быстро сокращалась до 0 м<sup>2</sup> к отметке –35,6 м БС. Так, согласно [Лепешков и др., 1981; Кара-Богаз-Гол..., 1988], среднегодовой уровень рапы в заливе с отметок –28 м БС в конце 1930-х годов опустился до отметок –33,5 м БС и ниже в 1980-х годах (в отдельные месяцы залив почти полностью пересыхал). При этом площадь залива сократилась с ~19000 до 6000 км<sup>2</sup>, а объем с 93 до ~8 км<sup>3</sup>. Здесь необходимо уточнить, что на морфометрические характеристики залива оказывает влияние и его водно-солевой баланс. При существенном снижении объема воды КБГ происходит рост концентрации солей в рассоле

и изменение его химического состава, что приводит к их кристаллизации и выпадению в осадок. Вследствие этого процесса дно бассейна поднимается, изменяются морфометрические характеристики залива. После ликвидации плотины в проливе Кара-Бога-Гол среднегодовой уровень воды в заливе к 1996–1997 гг. поднялся до отметки –27,5 м БС, площадь залива и объем составили 19500 км<sup>2</sup> и 100 км<sup>3</sup> соответственно. Зависимости площади зеркала и объема чаши залива от уровня воды приведены на рисунке (б).

## Выводы

За последнее столетие уровень воды в заливе Кара-Бога-Гол вслед за колебаниями Каспийского моря претерпевал значительные изменения, что отражалось на морфометрических характеристиках залива. Так, с 1930-х к 1980-м годам площадь залива сократилась в три раза, а объем – почти десятикратно. К началу XXI в. произошло наполнение залива каспийскими водами, и, соответственно, площадь и объем залива вернулись к величинам 1930-х годов.

Полученная модель рельефа дна КБГ и его морфометрические зависимости в дальнейшем могут быть использованы для моделирования водно-солевого баланса залива, исследования эволюции рельефа дна, построения прогноза уровня воды залива, а также для прогноза уровня Каспийского моря, учитывая демпфирующую роль оттока воды в залив.

*Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0001 (рег. № АААА-А18-118022090056-0) государственного задания ИВП РАН.*

## Литература

Выручалкина Т. Ю., Фролов А. В. Батиметрические и морфометрические характеристики Большого Яшалтинского озера в моделировании водно-солевого баланса водоема // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24, № 2. С. 319–328. doi: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-319-328

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6. Каспийское море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. Справочник / Под ред. Ф. С. Терзиева, М. П. Максимовой, Е. А. Яблонской. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 324 с.

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.

*Кара-Богаз-Гол* вчера, сегодня, завтра / Авт.-сост. В. И. Аковецкий, И. Я. Богданов; Отв. ред. академ. АН СССР А. Г. Аганбегян, академ. АН СССР О. Г. Овезгельдыев. Ашхабад: Ылым, 1988. 340 с.

Лавров Д. А. Гидрологический режим залива Кара-Богаз-Гол в условиях свободного доступа воды // Экологические проблемы Каспия. РАН и Нац. акад. США: Сб. докл. Междунар. науч. семинара по экологическим проблемам Прикаспийского региона (Москва, 1–3 дек. 1999 г.) / Под ред. М. Г. Хубларяна. М.-Киров, 2000. С. 17–21.

Лепешков И. Н., Буйневич Д. В., Буйневич Н. А., Седельников Г. С. Перспективы использования солевых богатств Кара-Богаз-Гола. М.: Наука, 1981. 274 с.

Фролов А. В., Выручалкина Т. Ю., Саркисян С. Г. Динамико-стохастическое моделирование водно-солевого баланса большого Яшалтинского озера // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 3. С. 227–234. doi: 10.7868/S0321059618030021

## References

Frolov A. V., Vyruchalkina T. Yu., Sarkisyan S. G. Modeling water and salt balance of Lake Bolshoe Yashaltinskoe. *Water Resources*. 2018. Vol. 45, no. 3. P. 318–325. doi: 10.1134/S0097807818030053

*Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei. T. 6. Kaspiiskoe more. Vyp. 2. Gidrokhimicheskie usloviya i okeanologicheskie osnovy formirovaniya biologicheskoi produktivnosti. Spravochnik* [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 6. Caspian Sea. Iss. 2. Hydrochemical conditions and oceanological bases of biological productivity formation. A guide]. Eds. F. S. Terziev, M. P. Maksimova, E. A. Yablonskaya. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1996. 324 p.

*Kara-Bogaz-Gol vchera, segodnya, zavtra* [Kara-Bogaz-Gol yesterday, today, tomorrow]. Compiled by V. I. Akovetsky, I. Ya. Bogdanov; Editors-in-chief A. G. Aganbegyan, acad. USSR Acad. Sci., O. G. Ovezgeldyev, acad. USSR Acad. Sci. Ashkhabad: Ylym, 1988. 340 p.

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. P. 857–864. doi: 10.1134/S0001437007060100

Lavrov D. A. Gidrologicheskii rezhim zaliva Kara-Bogaz-Gol v usloviyakh svobodnogo dostupa vody [Hydrological regime of the Kara-Bogaz-Gol Bay in the conditions of free water access]. *Ekol. probl. Kaspiya. RAN i Nats. akad. SShA: Sb. dokl. Mezhd. nauch. seminarov po ekol. probl. Prikaspiiskogo regiona (1–3 dek. 1999 g., Moskva)* [Environmental probl. of the Caspian Sea. RAS and United St. National Acad.: Proceed. int. sci. seminar on environmental probl. of the Caspian region (Dec. 1–3, 1999, Moscow)]. Ed. M. G. Khublarian. Moscow-Kirov, 2000. P. 17–21.

Leroy S. A. G., Marret F., Giralte 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 // *Quat. Int.* 2006. Vol. 150, no. 1. P. 52–70. doi: 10.1016/j.quaint.2006.01.007

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. 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 // Zonn I., Kostianoy A. (eds). *The Turkmen Lake Altyn-Asyr and Water Resources in Turkmenistan. The Handbook of Environmental Chem.* Vol. 28. Berlin-Heidelberg: Springer, 2013. doi: 10.1007/698\_2013\_228

Sibson R. A brief description of natural neighbor interpolation. Chapter 2 in *Interpolating Multivariate Data*. New York: John Wiley & Sons, 1981. P. 21–36.

Поступила в редакцию 18.02.2020

Lepeshkov I. N., Buinevich D. V., Buinevich N. A., Sedel'nikov G. S. Perspektivy ispol'zovaniya solevykh bogatstv Kara-Bogaz-Gola [Prospects for using the salt wealth of Kara-Bogaz-Gol]. Moscow: Nauka, 1981. 274 p.

Vyruchalkina T. Yu., Frolov A. V. Batimetrichekie i morfometrichekie kharakteristiki Bol'shogo Yashaltinskogo ozera v modelirovanii vodno-solevogo balansa vo doema [Bathymetric and morphometric characteristics of Lake Bolshoe Yashaltinskoe in the modeling of the reservoir water-salt balance]. *InterCarto. InterGIS*. 2018. Vol. 24(2). P. 319–328. doi: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-319-328

Leroy S. A. G., Marret F., Giralte 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. *Quat. Int.* 2006. Vol. 150, no. 1. P. 52–70. doi: 10.1016/j.quaint.2006.01.007

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. 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. Zonn I., Kostianoy A. (eds). *The Turkmen Lake Altyn-Asyr and Water Resources in Turkmenistan. The Handbook of Environmental Chem.* Vol. 28. Berlin-Heidelberg: Springer, 2013. doi: 10.1007/698\_2013\_228

Sibson R. A brief description of natural neighbor interpolation. Chapter 2 in *Interpolating Multivariate Data*. New York: John Wiley & Sons, 1981. P. 21–36.

Поступила в редакцию 18.02.2020

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

**Выручалкина Татьяна Юрьевна**  
старший научный сотрудник, к. г. н.  
Институт водных проблем РАН  
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 11933  
эл. почта: vyruchi@list.ru

**CONTRIBUTOR:**

**Vyruchalkina, Tatiana**  
Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences  
3 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia  
e-mail: vyruchi@list.ru