# К вопросу о вихревой динамике вод в западном бассейне Аральского моря

# А.И. Гинзбург<sup>1</sup>, А.Г. Костяной<sup>1,2</sup>, Н.А. Шеремет<sup>1</sup>, Д.М. Соловьев<sup>3</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
<sup>3</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия E-mail: solmit@gmail.com

На материале спутниковых изображений высокого пространственного разрешения (OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8, -9, MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2A/B) осеннего периода разных лет (сентябрь 2017 и 2019 гг., сентябрь и октябрь 2022 г.) исследуется вихревая динамика в западном бассейне Аральского моря и её связь с сопутствующими ветровыми условиями. При ветрах 2-5 м/с весь западный бассейн заполнен вихрями, вихревыми диполями и их упаковками с диаметром структур от нескольких сотен метров до примерно 9 км. При этом наибольшая вихревая активность наблюдается в широкой и глубокой части бассейна между 44°40′ и 45°20′ с. ш. Выявлен элемент циркуляции, повторяющийся на спутниковых изображениях разных лет, — антициклонический вихрь диаметром 7-9 км в центральной части бассейна, примерно между 45°10′ и 45°15′ с. ш., с меняющими своё положение циклонами на его периферии. Этот антициклонический вихрь наблюдается при ветрах как южных, так и северных направлений, наиболее чётко — при северо-восточном ветре менее 3 м/с. Определяющую роль в формировании данной локальной антициклонической циркуляции играет, по-видимому, особенность донной топографии: здесь самая глубокая часть бассейна с крутым западным склоном и более пологим восточным.

**Ключевые слова:** циркуляция вод в западном бассейне Аральского моря, вихри, вихревые диполи, цисты аральской артемии, спутниковые изображения

Одобрена к печати: 21.11.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-186-194

#### Введение

Циркуляция вод в западном бассейне Аральского моря после разделения Большого Аральского моря на западный и восточный бассейны (в 2002 г.) изучена недостаточно. Немногочисленные прямые измерения скоростей и направлений течений у западного и восточного склонов и численные эксперименты (Завьялов и др., 2012; Ижицкий и др., 2014; Izhitskiy et al., 2014) позволили полагать, что при ветрах северных направлений (преобладающих) циркуляция в поверхностном слое западного бассейна остаётся антициклонической, как и до разделения бассейнов, а при южных ветрах — циклонической. Численное моделирование в работе (Izhitskiy et al., 2014) показало возможность образования в поверхностном слое западного бассейна, при общем антициклоническом характере циркуляции, антициклонических круговоротов суббассейнового масштаба. Анализ спутниковых изображений второй декады 2000-х гг. с высоким пространственным разрешением обнаружил интенсивную вихревую динамику в западном бассейне, особенно — в его наиболее широкой и глубокой части, и изменение характера циркуляции со сменой направления ветра (Гинзбург и др., 2021). Однако подобные наблюдения пока единичны. Представляет интерес выявление повторяющихся (квазистационарных) элементов вихревой динамики западного бассейна и её связи с ветровыми условиями на большем материале наблюдений. Ниже представлены некоторые проявления вихревой динамики на спутниковых изображениях разных лет и сопутствующая метеорологическая информация по данным NCEP GFS (англ. National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр экологических прогнозов; англ. Global Forecast System, Глобальная система прогнозирования) (https://www.ncdc.noaa.gov) в центре западного бассейна (45°12,6′ с.ш., 58°32,4′ в.д.).

#### Анализ спутниковых изображений и сопутствующей метеорологической информации

Для анализа отобраны наиболее информативные с точки зрения проявления вихревой динамики спутниковые изображения разных лет в осенний сезон (сентябрь – октябрь), когда создаются наилучшие условия для развития водорослей фитопланктона и цист (яиц) рачка артемии (*Artemia parthenogenetica*) — эффективного трассера динамики вод в гиперсолёном водоёме (Гинзбург и др., 2021). Для каждого спутникового изображения дана соответствующая метеорологическая информация NCEP (с трёхчасовыми интервалами в течение суток, предшествовавших времени приёма изображения).



Рис. 1. Фрагменты изображений OLI Landsat-8 от 15.10.2017 (а) и MSI Sentinel-2В от 19.10.2019 (б)

Дата	Время, UTC	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С
14.10.2017	00:00	305	5,00	15,5
	03:00	295	4,72	14,9
	06:00	280		15,8
	09:00	275	4,17	16,9
	12:00	285	3,88	17,1
	15:00	295	3,05	17,0
	18:00	305	2,77	16,2
	21:00	320	1,94	15,7
15.10.2017	00:00	350	2,50	15,2
	03:00	35	2,20	15,0
	06:00	120		16,6

Таблица 1. Метеорологическая информация по данным NCEP к рис. 1а

На *рис. 1а* отчётливо различаются два вихревых диполя из двух циклонических вихрей с диаметрами 7–9 км и общего для них антициклона такого же размера с координатами центра примерно 45,21° с.ш., 58,53° в.д., на *рис. 16* — три циклона с такими же размерами и также (предположительно) антициклон в широтном поясе 45,15–45,25° с.ш. с координатами центра 45,19° с.ш., 58,5° в.д. Кроме того, на обоих изображениях видны мелкие вихри размером в сотни метров. Изображению на *рис. 1а* соответствовал, по данным NCEP, юго-восточный (120°)

ветер со скоростью 2,2 м/с (в 06:00 UTC (*англ*. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время), в предыдущие сутки преобладали северо-западные ветры (*табл*. *1*)); в случае *рис*. *16* наблюдался юго-западный (205°) ветер со скоростью 3,6 м/с (в 6:00 UTC, при устойчивых ветрах юго-юго-восточного направления в предшествующие сутки (*табл*. *2*)). Температура воздуха в обоих случаях — примерно 15–16 °C.

Дата	Время, UTC	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С
18.10.2019	00:00	130	6,67	13,8
	03:00		7,22	
	06:00	140	7,50	14,1
	09:00	150	7,22	14,3
	12:00		6,39	
	15:00	145	5,60	14,4
	18:00	155	5,30	14,8
	21:00	165	4,72	15,3
19.10.2019	00:00	180	4,17	15,2
	03:00	200	3,60	14,9
	06:00	205		15,8

Таблица 2. Метеорологическая информация по данным NCEP к рис. 16

Таблица 3. Метеорологическая информация по данным NCEP к рис. 2

Дата	Время, UTC	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С
31.08.2022	00:00	50	2,5	24,6
	03:00	30	1,39	25,0
	06:00	135	1,11	26,2
	09:00	170	3,06	26,7
	12:00	190		27,4
	15:00	215	3,89	26,5
	18:00	210	1,94	26,0
	21:00	165	1,11	25,1
01.09.2022	00:00	185	2,22	24,5
	03:00	205	1,67	24,9
	06:00	155	2,50	26,0
	07:00		2,78	26,2
02.09.2022	00:00	190	2,78	24,3
	03:00	180	2,22	24,8
	06;00	165	1,94	26,1
	09:00	150	2,22	27,1
	12:00	130	2,50	27,3
	15:00	140	1,67	25,8
	18:00	150	1,39	25,6
	21:00	195	1,94	25,8
03.09.2022	00:00	190	2,50	25,6
	03:00	210	2,22	25,9
	06:00	190	1,94	27,7
	07:00	170		28,1



*Рис. 2.* Изображения MSI Sentinel-2A от 01.09.2022, фрагмент (*a*); OLI Landsat-9 от 03.09.2022, полное (б) и фрагмент (*в*); TIRS Landsat-9 от 03.09.2022, фрагмент (*г*)

Вихревая картина 1 и 3 сентября 2022 г. показана на *рис. 2* (см. с. 189), соответствующие метеорологические данные — в *табл. 3*. Изображениям на *рис. 2* соответствовали устойчивые ветры южных направлений со скоростью 2–2,8 м/с при температуре воздуха 26–28 °С.

На *puc. 2a* можно различить диполь с выраженным циклоническим вихрем (центр циклона — на  $45^{\circ}07'$  с.ш.,  $58^{\circ}30'$  в.д., диаметр около 3 км), циклон с центром на  $45^{\circ}16'$  с.ш.,  $58^{\circ}27'$  в.д. (диаметр 2,5 км) и циклон (или диполь) в заливе у восточного побережья. Характер распределения трассера двумя днями позже (см. *puc. 2b*) при немного меньшей скорости ветра позволяет предполагать наличие, помимо различимых на *puc. 2a* структур и появившегося циклонического вихря с центром чуть южнее  $45^{\circ}20'$ , антициклонической циркуляции между  $45^{\circ}10'$  и  $45^{\circ}15'$  с.ш.





б



*Рис. 3.* Фрагменты изображений MSI Sentinel-2A от 08.10.2022 (*a*), MSI Sentinel-2B от 13.10.2022 (*б*) и MSI Sentinel-2A от 18.10.2022 (*в*)

Некоторые элементы этой вихревой картины различимы в поле температуры поверхности (см. *рис. 2г*). Изображение на *рис. 26* свидетельствует об интенсивной вихревой динамике не только в центральной части, но и в западном бассейне Арала в целом. Помимо уже упомянутых вихревых структур видны также циклоны в северной части (диаметр около 4 км), диполь со струёй между разнополярными вихрями чуть южнее 45°00′ с. ш., упаковка двух диполей с общим циклоном (центр циклона — на 44°48′ с. ш., 58°20′ в.д., диаметр около 6,5 км), диполь меньшего размера с центрами вихрей на 44°40′ с. ш., циклонический вихрь с диаметром примерно 7 км в самой южной части бассейна.

Дата	Время, UTC	Направление ветра (град)	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С
07.10.2022	00:00	230	2,22	15,3
	03:00	280	2,78	15,4
	06:00	290	3,33	16,9
	09:00	315	2,50	17,4
	12:00	305	5,56	
	15:00		7,22	16,6
	18:00	335	8,06	14,9
	21:00		6,94	13,9
08.10.2022	00:00	330	6,67	13,0
	03:00	335	6,11	12,5
	06:00		4,72	13,9
	07:00	340	3,89	14,5
12.10.2022	00:00	105	3,33	15,3
	03:00		3,61	
	06:00	115	3,33	15,8
	09:00	105	2,78	16,0
	12:00	85	1,94	
	15:00	75	2,78	15,3
	18:00	300	2,22	15,6
	21:00	325	6,11	15,2
13.10.2022	00:00	315	7,50	14,0
	03:00	300	6,67	13,1
	06:00	280	5,56	15,2
	07:00	270	5,00	15,9
17.10 2022	00:00	60	4,72	13,2
	03:00	75	5,00	12,7
	06:00	70	5,28	12,6
	09:00	60	4,44	12,5
	12:00		3,61	12,2
	15:00	80	2,78	11,9
	18:00	50	1,67	11,7
	21:00	20	3,33	11,6
18.10.2022	00:00	15	3,33	11,4
	03:00	30		10,9
	06:00	25	2,78	11,6
	07:00	30	2,22	11,7

Таблица 4. Метеорологическая информация по данным NCEP к рис. 3

Изображения 8, 13 и 18 октября 2022 г. (*рис. 3*, см. с. 190) с наиболее чёткой прорисовкой вихрей на *рис. 3в* свидетельствуют о существовании в широтной полосе примерно  $45^{\circ}10' 45^{\circ}15'$  с. ш. (см. *рис. 3a*, *б*) или  $45^{\circ}07'-45^{\circ}13'$  с. ш. (см. *рис. 3в*) антициклонического вихря диаметром примерно 9 км с меняющими своё положение присоединёнными циклонами на его периферии. По данным NCEP (*табл. 4*), изображениям на *рис. 3а–в* соответствовали северозападный ветер со скоростью около 4 м/с, западный со скоростью около 5 м/с и северо-северо-восточный со скоростью около 2,5 м/с.

#### Заключение

Выполненный анализ подтвердил вывод работы (Гинзбург и др., 2021) об интенсивной вихревой динамике в западном бассейне Аральского моря при ветрах 2–5 м/с. Вихрями, вихревыми диполями и их упаковками заполнен весь бассейн (см. рис. 26 и (Гинзбург и др., 2021, рис. 6а)) с наибольшей вихревой активностью в самой широкой и глубокой части бассейна между 44°40′ и 45°20′ с. ш. (см. *рис. 26*). Диаметры вихрей — от нескольких сотен метров до 3-9 км, причём характер циркуляции на спутниковых изображениях разных лет/месяцев различается. Однако есть область в центральной части бассейна, примерно между 45°10' и 45°15′ с.ш. (иногда южнее, между 45°08′ и 45°12′ с.ш.), где один и тот же элемент циркуляции повторяется на изображениях разных лет — это антициклонический вихрь диаметром 7–9 км с меняющими своё положение циклонами на его периферии (см. *рис. 1a, б, 2в, 3* и (Гинзбург и др., 2021, рис. 3–5)). Интересно, что антициклонический вихрь примерно в тех же координатах обнаруживается в результате численного моделирования циркуляции в стратифицированном западном бассейне Арала в работе (Izhitskiy et al., 2014) для сентября 2010 г. при северо-восточном ветре 3 м/с. Факторами, определяющими циркуляцию сравнительно небольшого водоёма, каковым представляется современный западный бассейн Арала, становятся характер ветрового воздействия, донная топография и стратификация вод (см. (Izhitskiy et al., 2014)). С 2010 г. к настоящему времени изменилась стратификация бассейна из-за прекращения водообмена с пересохшим восточным бассейном и Малым морем, его уровень упал примерно на 6,8 м (Гинзбург и др., 2022), ширина бассейна уменьшилась более чем в 1,2 раза. Судя по описанным выше ситуациям, рассматриваемый антициклонический вихрь наблюдается при ветрах как южных (см. рис. 1, 2в), так и северных направлений, наиболее чётко при северо-восточном ветре менее 3 м/с (см. рис. 3в). По-видимому, определяющую роль в формировании локальной антициклонической циркуляции играет, как отмечалось в работе (Izhitskiy et al., 2014), асимметрия донной топографии — здесь самая глубокая часть бассейна с крутым западным склоном и более пологим восточным.

Гинзбург А.И., Костяной А.Г. и Шеремет Н.А. выполняли исследование вихревой циркуляции западного бассейна Арала 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».

## Литература

<sup>1.</sup> *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н.А., Соловьев Д. М.* 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.

<sup>2.</sup> Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н.А., Ижицкий А.С., Соловьев Д. М. Динамика высыхания западного бассейна Большого Аральского моря по спутниковым данным (2002–2021) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 246–263. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263.

<sup>3.</sup> Завьялов П.О., Арашкевич Е.Г., Бастида И., Гинзбург А.И., Дикарев С.Н., Житина Л.С., Ижицкий А.С., Ишниязов Д.П., Костяной А.Г., Кравцова В.И., Кудышкин Т.В., Курбаниязов А.К., Ни А.А.,

*Никишина А.Б., Петров М.А., Сажин А.Ф., Сапожников Ф.В., Соловьев Д.М., Хан В.М., Шеремет Н.А.* Большое Аральское море в начале XXI века: физика, биология, химия. М.: Наука, 2012. 229 с.

- 4. *Ижицкий А.С., Химченко Е.Е., Завьялов П.О., Серебряный А.Н.* Гидрофизическое состояние Большого Аральского моря осенью 2013 г.: термическая структура, течения, внутренние волны // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 451–463.
- Izhitskiy A. S., Zavialov P. O., Roget E., Huang H.-P., Kurbaniyazov A. K. On thermohaline structure and circulation of the Western Large Aral Sea from 2009 to 2011: observations and modeling // J. Marine Systems. 2014. V. 129. P. 234–247.

# On the question of vortex dynamics of waters in the western basin of the Aral Sea

A. I. Ginzburg<sup>1</sup>, A. G. Kostianoy<sup>1,2</sup>, N. A. Sheremet<sup>1</sup>, D. M. Soloviev<sup>3</sup>

 <sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences Moscow 117997, Russia
E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru
<sup>2</sup> Moscow Witte University, Moscow 115432, Russia
<sup>3</sup> Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia E-mail: solmit@gmail.com

The vortex dynamics in the western basin of the Aral Sea and its relationship with the accompanying wind conditions are studied on the basis of high spatial resolution satellite images (OLI (Operational Land Imager) Landsat-8, -9, MSI (Multispectral Instrument) Sentinel-2A/B) of the autumn period of different years (September 2017 and 2019, September and October 2022). With winds of 2-5 m/s, the entire western basin is filled with vortices, vortex dipoles and their packings with structure diameters ranging from several hundred meters to about 9 km. At the same time, the greatest vortex activity is observed in the wide and deep part of the basin between 44°40′ and 45°20′ N. An element of circulation, repeated on satellite images of different years, has been identified — an anticyclonic vortex with a diameter of 7-9 km in the central part of the basin, approximately between 45°10′ and 45°15′ N, with cyclones on its periphery changing their positions. This anticyclonic eddy is observed at both southerly and northerly winds, most clearly at a northeasterly wind of less than 3 m/s. The defining role in the formation of this local anticyclonic circulation is played, apparently, by the peculiarity of the bottom topography: here there is the deepest part of the basin with a steep western slope and a gentler eastern one.

**Keywords:** water circulation in the Western Aral Sea basin, vortices, vortex dipoles, Aral Artemia cysts, satellite data

Accepted: 21.11.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-186-194

## References

- 1. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Soloviev D. M., 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.
- Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Izhitskiy A. S., Soloviev D. M., The drying dynamics of the Western Large Aral Sea from satellite data (2002–2021), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 246–263 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263.
- 3. Zavialov P.O., Arashkevich E.G., Bastida I., Ginzburg A.I., Dikarev S.N., Zhitina L.S., Izhitskiy A.S., Ishniyazov D.P., Kostianoy A.G., Kravtsova V.I., Kudyshkin T.V., Kurbaniyazov A.K., Ni A.A., Niki-

shina A. B., Petrov M. A., Sazhin A. F., Sapozhnikov F. V., Soloviev D. M., Khan V. M., Sheremet N. A., *Bol'shoe Aral'skoe more v nachale XXI veka: fizika, biologiya, khimiya* (The Large Aral Sea at the beginning of century 21: physics, biology, chemistry), Moscow: Nauka, 2012, 229 p. (in Russian).

- 4. Izhitskiy A. S., Khimchenko E. E., Zavialov P. O., Serebryany A. N., Hydrophysical state of the Large Aral Sea in autumn of 2013: thermal structure, currents, and internal waves, *Oceanology*, 2014, Vol. 54, No. 4, pp. 414–425.
- 5. Izhitskiy A. S., Zavialov P. O., Roget E., Huang H.-P., Kurbaniyazov A. K., On thermohaline structure and circulation of the Western Large Aral Sea from 2009 to 2011: observations and modeling, *J. Marine Systems*, 2014, Vol. 129, pp. 234–247.