Вихри в западном бассейне Большого Аральского моря (спутниковая информация)

А. И. Гинзбург 1 , А. Г. Костяной 1,2 , Н. А. Шеремет 1 , Д. М. Соловьев 3

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

³ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия E-mail: solmit@gmail.com

Исследование вихревой динамики в современном западном бассейне Большого Аральского моря и её связи с направлением ветра выполнено с использованием оптических спутниковых изображений MSI Sentinel-2A, MSI Sentinel-2B и OLI Landsat-8 с высоким пространственным разрешением (30-60 м) в период 11-18 октября 2020 г., с временным интервалом между изображениями в 2-3 дня, и соответствующей информации о скорости и направлении ветра. Скорость ветра над акваторией в период с 11 по 18 октября в среднем не превышала 4 м/с, а его направление с северо-восточного/восточного 11-15 октября сменилось юго-восточным/ южным 16-18 октября. Наибольшая вихревая активность на протяжении всего периода наблюдалась в наиболее глубокой и широкой части западного бассейна, примерно между широтами 44° 58′ и 45° 22′ с. ш. При ветрах восточных румбов доминирующей структурой в данном широтном поясе был антициклонический вихрь с диаметром 5-7 км и присоединёнными циклонами меньшего масштаба. Размер вихревой части дипольной структуры из этого антициклона и циклона на его северо-западной периферии составлял примерно 11 км (при ширине бассейна около 21 км на широте 45° 10′ с. ш.). Сопоставление этого диполя с «модельной» картиной циркуляции примерно в тех же координатах в работе (Izhitskiy et al., 2014) показало их качественное сходство. Со сменой направлений ветров на южные вихревая картина заметно усложнилась: наиболее крупными и ярко выраженными на фоне сложной упаковки вихрей и вихревых диполей стали циклонические вихри до 8 км в диаметре. Обсуждается вопрос о возможных причинах более интенсивной вихревой картины с чёткой «прорисовкой» вихревых структур на спутниковых изображениях в октябре 2020 г. по сравнению со спутниковыми изображениями западного бассейна начала 2000-х гг.

Ключевые слова: обмеление Аральского моря, циркуляция вод в западном бассейне Большого Аральского моря, вихри, вихревые диполи, цисты аральской артемии, спутниковые данные, оптические изображения

Одобрена к печати: 11.08.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-236-246

Введение

Обмеление замкнутого Аральского моря, начавшееся в так называемый антропогенный период (с 1961 г.), привело к существенным изменениям в его морфометрических характеристиках, термохалинной структуре, биологических и других параметрах (Гидрометеорология..., 1990; Завьялов и др., 2012; Стетацх et al., 2019; Kostianoy et al., 2004; Micklin, 2014; The Aral..., 2010; Zavialov, 2005, 2010 и др.). В 1987 г. Аральское море разделилось на Малое и Большое моря, а с 2001 г. Большое море представляет собой два бассейна: западный и восточный. Соединявший их на севере пролив, имевший ширину на момент разделения моря на два бассейна 10–15 км, к 2006 г. сузился до 1–1,5 км (Завьялов и др., 2008), а в 2016 г. его ширина не превышала 100 м (рис. 1, см. с. 237). Существенно уменьшилась и максимальная глубина в наиболее глубокой западной части моря: с 66 м в условно-естественный период (1911–1960) (Гидрометеорология..., 1990) до 32,6 м в 2014 г. (Izhitskiy et al., 2016) и 30 м в 2019 г. (Андрулионис и др., 2021). Из слабосолёного водоёма с солёностью примерно 10 г/кг (Косарев, 1975) Арал превратился в гиперсолёный: в 2010 г. солёность в поверхностном слое западного бассейна Большого Аральского моря составляла 117 г/кг (Izhitskiy et al., 2014), а в период 2014—2019 гг. достигала 126—140 г/кг (Андрулионис и др., 2021).







Puc. 1. Оптические изображения MODIS/Terra: a-27 мая 2016 г.; b-30 апреля 2020 г.; b-10 июня 2021 г. (NASA Worldview Snapshots, https://wvs.earthdata.nasa.gov/?LAYERS=MODIS_Terra_CorrectedReflectance_TrueColor,Coastlines_15m&CRS=EPSG:4326&COORDINATES=43.914184,58.081055,46.39 7095,60.358887&FORMAT=image/jpeg&AUTOSCALE=TRUE&RESOLUTION=250m)

Восточный бассейн Большого Аральского моря с 2008—2009 гг. представляет собой мелкое солёное «болото», площадь которого меняется от года к году в зависимости от интенсивности паводка Аму-Дарьи (в основном) и сброса вод из Малого моря (Micklin, 2014). Этот процесс периодического частичного «наполнения» восточного бассейна продолжался и до недавнего времени (см. рис. 1). К маю 2020 г. пролив, соединявший западный и восточный бассейны Большого Аральского моря, практически исчез (см. рис. 16), к осени 2020 г. он исчез полностью, а залив Чернышёва отделился от западного бассейна (см. спутниковое изображение за 18 октября 2020 г. на рис. 6, а также рис. 1в).

Вопрос о возможном изменении циркуляции вод в западном бассейне по мере его обмеления и отделения от восточного бассейна недостаточно изучен. В условно-естественный период, в соответствии с теоретическими расчётами А. И. Симонова (Гидрометеорология..., 1990; Симонов, 1954) и данными инструментальных наблюдений (Косарев, 1975), циркуляция в Аральском море с асимметричной донной топографией (крутым и глубоким западным склоном и широкой мелководной областью в восточной части) была антициклонической при ветрах северных направлений (преобладающих) и циклонической при ветрах южных румбов. В 2000-е гг. для определения характера циркуляции в западном бассейне использовались гидрофизические измерения (Завьялов и др., 2012; Ижицкий, 2014; Ижицкий и др., 2014; Izhitskiy et al., 2014, 2016; Zavialov, 2005, 2010), численное моделирование (Завьялов и др., 2012; Ижицкий, 2014; Izhitskiy et al., 2014), редкие информативные спутниковые изображения (Гинзбург и др., 2010; Завьялов и др., 2012; Ginzburg et al., 2010). Измерения скоростей и направлений течений у западного и восточного склонов позволяли полагать, что при ветрах северных направлений циркуляция в поверхностном слое западного бассейна оставалась антициклонической (Izhitskiy et al., 2014), а при южных ветрах — циклонической (Ижицкий и др., 2014). При этом численное моделирование для сентября 2010 г. показало (Ижицкий, 2014; Izhitskiy et al., 2014) возможность образования в его центральной части, при общем антициклоническом характере циркуляции в поверхностном слое западного бассейна, антициклонических круговоротов меньшего, суббассейнового масштаба. Циклонические вихри (с диаметрами 6-20 км) и вихревой диполь (размер вихревой части -20 км, соизмеримый с локальной шириной западного бассейна) наблюдались также в осенний период на спутниковых изображениях в начале 2000-х гг. (Гинзбург и др., 2010; Завьялов и др., 2012; Ginzburg et al., 2010), и было высказано предположение, что циклонические вихри с диаметром порядка 20 км могут быть характерным элементом циркуляции западного бассейна, по крайней мере осенью.

К 2020 г. из-за продолжающегося обмеления и отступания в основном восточной границы ширина западного бассейна существенно уменьшилась (см. *puc. I*): на широте 45° 10′ с. ш. она равна примерно 21 км, т.е. стала примерно в 1,2 раза меньшей, чем в 2010 г. С уменьшением относительно мелкой восточной части западный бассейн в настоящее время представляет собой, по-видимому, впадину с крутым западным и довольно крутым восточным склонами в её центральной части. Неизвестно, как изменилась в этих условиях циркуляция в масштабе бассейна.

Инструментальные квазисинхронные измерения скоростей и направлений течений в масштабах всего западного бассейна практически невозможны из-за отсутствия соответствующей инфраструктуры, необходимой для проведения масштабных гидрологических работ, поскольку западный бассейн всё ещё представляет собой довольно протяжённый водоём (порядка 150 км). Преимущество спутниковых изображений по сравнению с локальными гидрофизическими измерениями — в мгновенном охвате всей исследуемой акватории, хотя информативных (с точки зрения циркуляции вод) изображений до недавнего времени было немного. В настоящей статье анализируется последовательность спутниковых изображений, принятых в октябре 2020 г., демонстрирующая интенсивную вихревую динамику в западном бассейне Большого Аральского моря.

Данные

В настоящем исследовании использованы принятые и обработанные в Морском гидрофизическом институте РАН оптические изображения западного бассейна с высоким пространственным разрешением (30–60 м): MSI (англ. Multispectral Instrument) Sentinel-2A (11 и 18 октября 2020 г.), MSI Sentinel-2B (13 и 16 октября) и OLI (англ. Operational Land Imager) Landsat-8 (16 октября). Использовано также инфракрасное (ИК) изображение TIRS (англ. Thermal Infrared Sensor) Landsat-8 (16 октября) невысокого качества, но дающее представление о температуре поверхности воды в западном бассейне в рассматриваемый период.

Информация о скорости и направлении ветра в период с 7 по 18 октября 2020 г. получена из данных высокого разрешения NCEP (*англ*. National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр экологических прогнозов) Global Forecast System (GFS) (https://www.ncdc.noaa.gov) в центре западного бассейна с временным разрешением в 1 день. Эти данные содержат также сведения о температуре воздуха. Для более детальной информации о скорости ветра с шагом по времени 3 ч с 7 по 18 октября 2020 г. использовались данные, содержащиеся в базе NASA (*англ*. National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства) Giovanni on-line data system (https://giovanni.gsfc.nasa.gov), с пространственным разрешением 0,25×0,25° (GLDAS Noah Land Surface Model).

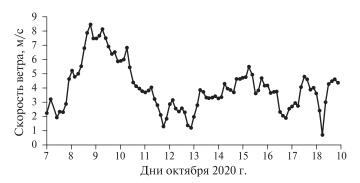
Анализ спутниковых изображений и сопутствующей гидрометеорологической информации

Гидрометеорологическая информация

Все анализируемые спутниковые изображения были приняты примерно в 07:00 GMT (12:00 по местному времени). Метеорологическая информация по данным NCEP, соответствующая 12:00 местного времени в центре западного бассейна в период с 7 по 18 октября, приведена в *таблице*; данные о скорости ветра с трёхчасовым интервалом представлены на *рис.* 2 (см. с. 239).

Метеорологическая информация по данным ?	NCEP
(12:00 по местному времени), 45° 12,6′ с. ш., 58° 3	2,4′ в. д.

Дата	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С
07.10.2020	85	1,4	11,6
08.10.2020	35	6,4	13,1
09.10.2020	75	7,8	10,3
10.10.2020	80	5,6	11,3
11.10.2020	90	3,1	13,4
12.10.2020	50	2,2	15,0
13.10.2020	110	3,3	15,0
14.10.2020	80	3,1	16,0
15.10.2020	90	3,9	15,7
16.10.2020	135	3,3	16,0
17.10.2020	185	4,2	17,4
18.10.2020	130	2,8	17,5

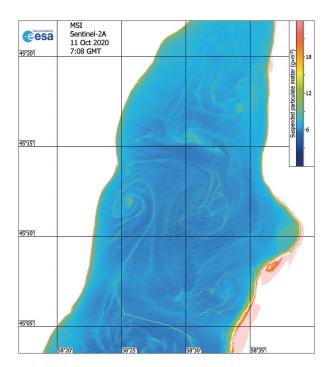


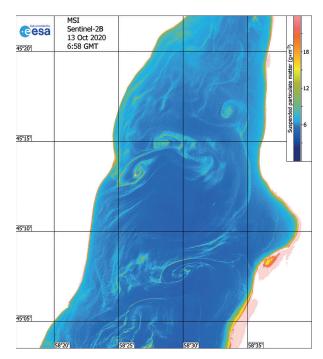
Puc. 2. Скорость ветра, осреднённая по всему бассейну, в период с 7 по 18 октября 2020 г. По данным GLDAS Noah Land Surface Model с пространственным разрешением $0.25 \times 0.25^{\circ}$ и шагом по времени 3 ч

Как следует из данных *таблицы*, в районе исследования с 7 по 15 октября наблюдались ветры северо-восточного/восточного направлений, сменившиеся юго-восточными/южными 16-18 октября. Скорость ветра в течение трёх дней, предшествовавших первому спутниковому изображению 11 октября, была заметно выше (до 7-8 м/с), чем в последующий период, когда в большинстве случаев она не превышала в среднем 4 м/с (см. *рис. 2, таблицу*). Температура воздуха вблизи водной поверхности в период наблюдений с 11 по 18 октября постепенно увеличивалась с 13,4 до 17,4-17,5 °C.

Анализ спутниковых изображений

Серия из четырёх спутниковых изображений в период с 11 по 18 октября 2020 г. с интервалом в 2—3 дня (рис. 3—6, см. с. 240, 241) позволяет проследить вихревую динамику в западном бассейне в рассматриваемый период. Трассером на оптических изображениях были, по-видимому, фитопланктон и цисты (покоящиеся яйца) рачка артемии (Artemia parthenogenttica) — типичного обитателя гипергалинных озёр, максимальная концентрация которых в Аральском море наблюдается осенью. Эти цисты со средним диаметром 262 мкм, обладающие положительной плавучестью, скапливаются на поверхности моря вдоль границ течений, образуя красноватые полосы (Завьялов и др., 2008, 2012; Sapozhnikov et al., 2010). Температура поверхности воды в центральной части бассейна 16 октября менялась в пределах примерно 14,9—15,5 °C (см. рис. 56).





Puc. 3. Фрагмент оптического изображения MSI Sentinel-2A, 11 октября 2020 г., 07:08 GMT

Puc. 4. Фрагмент оптического изображения MSI Sentinel-2B, 13 октября 2020 г., 06:58 GMT

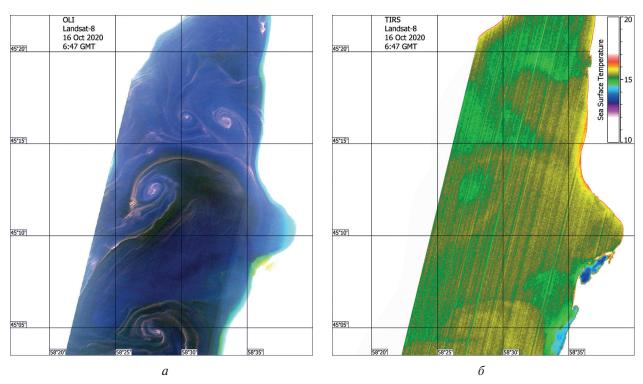
На *рис.* 3 в поле трассера отчётливо проявляются семь разномасштабных циклонических вихрей с диаметрами от примерно 500 м (центр на $45^{\circ}13,6'$ с. ш., $58^{\circ}25,5'$ в.д.) до 3,5 км ($45^{\circ}12'$ с. ш., $58^{\circ}29'$ в.д.). Расположение этих двух циклонов, циклонического вихря с диаметром примерно 2,3 км и центром на $45^{\circ}11,6'$ с. ш., $58^{\circ}32,5'$ в.д., а также фронтальной линии вдоль примерно $45^{\circ}14,2'$ с. ш. между ними вызывает предположение, что три упомянутых циклона находятся на периферии антициклонического вихря примерно 5 км в диаметре с центром на $45^{\circ}12,5'$ с. ш., $58^{\circ}29'$ в.д. Заметим, что диполи и мультиполи на основе антициклонического вихря с циклонами на его периферии часто наблюдаются на спутниковых изображениях внутренних морей при наличии трассера (контраста температуры, наличии взвеси) (см., например, работу (Гинзбург и др., 2017)).

По-видимому, тот же антициклонический вихрь с циклонами на северо-западной и северной периферии, но слегка сместившийся на юго-восток (центр — примерно на $45^{\circ}11'$ с. ш., $58^{\circ}30'$ в.д.) и с большим диаметром (около 7 км), виден на изображении 13 октября (см. puc. 4). Возможно, что два циклонических вихря севернее $45^{\circ}15'$ с. ш. и южнее $45^{\circ}10'$ с. ш. с диаметрами 2 км также были присоединёнными циклонами этого антициклона.

Тот же антициклон примерно 7 км в диаметре с циклоническими вихрями на периферии отчётливо проявляется 16 октября (см. puc. 5a). Центр антициклона сместился ещё на юговосток (45° 10′ с. ш., 58° 31′ в. д.). Размер вихревой части дипольной структуры из этого антициклона и циклона на его северо-западной периферии — примерно 11 км. Хорошо виден также циклонический вихрь (возможно, часть диполя) с диаметром около 6 км и центром на $45^{\circ}05'$ с. ш., $58^{\circ}27,5'$ в. д.

Изображение за 18 октября (см. *рис.* 6) с наилучшими контрастами в поле трассера демонстрирует сложную упаковку вихревых структур в центральной части водоёма. Самая крупная из них представляет собой комбинацию из циклонического вихря с центром примерно в тех же координатах, что и двумя днями ранее (45°05′с.ш., 58°27′в.д.), но несколько увеличившегося в диаметре (8 км), и антициклонических/циклонических вихрей меньшего диаметра. Размер этой структуры в направлении с юго-запада на северо-восток составляет около 15 км. Антициклонический вихрь — наиболее крупное вихревое образование на изображениях 11—16 октября (см. *рис.* 3—5) — сместился на северо-восток (центр на 45°12,5′с.ш., 58°34′в.д.) и уменьшился в диаметре, а циклонический вихрь на его периферии

 $(45^{\circ}\,14'\,\text{с. ш.},\,58^{\circ}\,31,5'\,\text{в. д.})$ образует сложную вихревую структуру с циклонами, расположенными севернее. Очевидно, что наиболее крупные вихревые образования с хорошо выраженными циклонами находились в центральной части бассейна в широтном поясе между $44^{\circ}\,58'$ и $45^{\circ}\,22'$ с. ш., хотя и севернее, и южнее различимы вихри/вихревые диполи меньшего размера (см. *puc. 6a*).



Puc. 5. Фрагменты оптического изображения OLI Landsat-8 (*a*) и изображения ИК-диапазона TIRS Landsat-8 (*б*), 16 октября 2020 г., 06:47 GMT

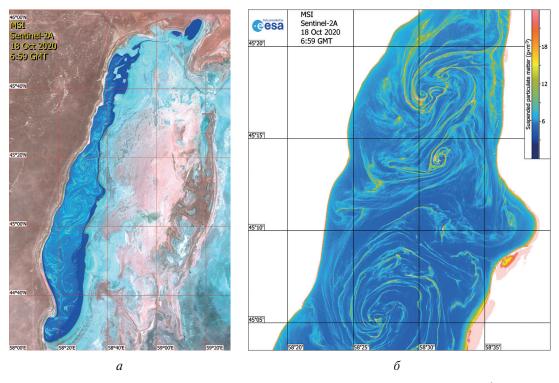


Рис. 6. Оптическое изображение MSI Sentinel-2A (а) и его фрагмент (б), 18 октября 2020 г., 06:59 GMT

Обсуждение и выводы

В сравнительно небольших водоёмах, каковым является теперь и западный бассейн Арала, внутрибассейновая циркуляция часто включает круговороты меньшего масштаба (например, два антициклонических вихря или комбинацию «больший антициклон – меньший циклон») (см. обзор в статье (Izhitskiy et al., 2014)). При этом факторами, определяющими циркуляцию водоёма, становятся характер ветрового воздействия, донная топография и стратификация вод. Интересно сопоставить полученные в нашем исследовании сведения о вихревой циркуляции в западном бассейне Большого Аральского моря с результатами численного моделирования при реально наблюдавшихся в сентябре 2010 г. условиях (северо-восточный ветер 3 м/с, трёхслойная стратификация в водной толще с максимумом в придонном слое за счёт поступления высокосолёных вод из восточного бассейна через соединяющий бассейны пролив) (Ижицкий, 2014; Izhitskiy et al., 2014). «Модельная» циркуляция в западном бассейне при наличии стратификации оказалась антициклонической, с антициклоническими круговоротами суббассейнового масштаба, отсутствовавшими в нестратифицированном бассейне. Определяющую роль в антициклонической циркуляции бассейна играла асимметрия в донной топографии (крутой и глубокий западный склон и мелководная область вдоль восточного берега) (Ижицкий, 2014; Izhitskiy et al., 2014).

Рассматриваемая нами ситуация с 11 по 16 октября 2020 г. (см. puc. 3-5) отличалась от наблюдавшейся в сентябре 2010 г. двумя факторами. Прежде всего, как отмечалось выше, изза обмеления моря уменьшилась асимметрия донной топографии бассейна. Солёностная стратификации вод в октябре 2020 г. неизвестна, но она определённо не была трёхслойной, поскольку и восточный бассейн, и соединявший ранее два бассейна пролив пересохли (см. рис. 16, в, ба). Тем не менее антициклонический вихрь с диаметром 5-7 км и присоединённым циклоном на западной/северо-западной периферии (см. рис. 3-5) наблюдался примерно там же (глубоководный район в широтном поясе $45^{\circ}10'-45^{\circ}15'$ с. ш.), где и «модельный» антициклон (рис. 13 в работе (Izhitskiy et al., 2014)). Заметим, что смоделированная в работе (Izhitskiy et al., 2014) картина течений в этих координатах также предполагает скорее вихревой диполь с циклоном у западного склона, нежели антициклонический вихрь. Движение вод при таком расположении диполя в этом широтном поясе (см. рис. 5) должно было быть направлено на юг как у западного, так у восточного берегов бассейна. В частности, появление подобного циклонического вихря вблизи западного склона бассейна могло быть причиной резкой и неожиданной смены направления течения с северо-восточного на южное, зарегистрированной в августе 2009 г. измерителем скорости течений в координатах 45°05,21′ с.ш., 58° 23,03′ в.д. (Izhitskiy et al., 2014). Образование циклонических вихрей у крутого западного склона бассейна может быть обусловлено горизонтальным сдвигом скорости между склоном и антициклоническим вихрем или вдольбереговым течением северо-восточного направления.

Характер циркуляции резко изменился (см. *puc.* 6) со сменой направления ветра с северовосточного/восточного на юго-восточный/южный. Наиболее крупными и ярко выраженными на фоне сложной упаковки вихрей и вихревых диполей становятся циклонические вихри. О циркуляции в масштабе всего западного бассейна по проявившейся в поле трассера вихревой картине судить трудно, поскольку весь бассейн заполнен разномасштабными циклоническими и антициклоническими вихрями (см. *puc.* 6a).

Таким образом, анализ спутниковых изображений с 11 по 18 октября 2020 г. и сопоставление ситуаций с разными направлениями ветра в этот период позволяет заключить следующее: 1) наибольшая вихревая активность в западном бассейне наблюдалась в его наиболее глубокой и широкой части примерно между широтами 44° 58′ и 45° 22′ с. ш.; 2) при смене направления ветра с северо-восточного/восточного на юго-восточный/южный изменялся характер вихревой циркуляции в этой части акватории — в первом случае наиболее ярко выраженной структурой стал антициклонический вихрь с присоединёнными циклонами, во втором вихревая картина заметно усложнялась и наиболее крупными вихревыми образованиями становились циклонические вихри.

Следует отметить наличие разномасштабных вихрей и очень чёткую «прорисовку» вихревых структур на *puc.* 3-6, чего не наблюдалось на немногочисленных информативных спутниковых изображениях в начале 2000-х гг. (Гинзбург и др., 2010; Завьялов и др., 2012; Ginzburg et al., 2010). Возникает вопрос: связано ли это с усилением вихревой активности в последние годы, при существенно меньших размерах западного бассейна, или с более высокой разрешающей способностью измерительных устройств современных спутников серии Sentinel-2 и Landsat-8 и появлением более эффективного трассера динамики вод в виде цист артемии — представителя зоопланктона? Вполне вероятно, что в результате отделения западного бассейна и постоянного уменьшения его размеров вихревая активность в нём возрастает с формированием вихрей суббассейнового масштаба (см. выше). Анализ ряда изображений, полученных в 2013 г. (OLI Landsat-8), 2015 г. (OLI Landsat-8), 2017–2019 гг. (Sentinel-2A, -2B), показал, что интенсивная вихревая динамика характерна для всего этого периода, однако чёткие контрасты вихревой картины наблюдаются только на изображениях последних лет (с 2017 г.). Трассером на оптических изображениях в начале 2000-х гг. (MODIS Aqua, MODIS Terra с пространственным разрешением 250 м (MODIS — англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)) оказывались, по-видимому, различные виды фитопланктона, которые обнаруживались даже в восточном бассейне Аральского моря при солёности выше 200 г/кг (Завьялов и др., 2012; Sapozhnikov et al., 2010). С 2017 г. на фоне беловатых полос трассера на оптических спутниковых изображениях высокого разрешения (30-60 м) начали появляться красноватые участки (предположительно, цисты артемии). По-видимому, увеличивающаяся концентрация цист артемии с ростом солёности западного бассейна способствует более чёткому проявлению вихревых контуров на спутниковых изображениях высокого разрешения. Не исключено, что большая концентрация взвеси (трассера) 18 октября (см. рис. 6) по сравнению с 11 и 13 октября (см. рис. 3, 4) связана с повышением температуры воздуха (и значит, воды) в период наблюдения (см. *таблицу*): оптимальными для репродукционного потенциала артемии оказываются солёность 80-150 г/кг и температура 22 °С (Завьялов и др., 2012; Sapozhnikov et al., 2010). Очевидная асимметрия в проявлении циклонических и антициклонических вихрей на puc. 3-6 (спиралевидная структура у первых и в основном лишь внешний контур у вторых), неоднократно отмечавшаяся ранее и на спутниковых изображениях других акваторий (см., например, работу (Гинзбург и др., 2017)), может быть связана с подъёмом вод в циклонах, поскольку концентрация фитопланктона в западном бассейне увеличивается с глубиной, с максимумом на глубине термоклина, а часть цист при солёности ниже 150 г/л может находиться в толще воды (Завьялов и др., 2012; Sapozhnikov et al., 2010). С учётом того, что максимальная численность и водорослей фитопланктона, и цист артемии в западном бассейне наблюдается осенью (Завьялов и др., 2012; Sapozhnikov et al., 2010), именно осенний период оптимален для наблюдения вихревых структур в этом водоёме.

Гинзбург А. И., Костяной А. Г. и Шеремет Н. А. выполняли исследование в рамках госзадания № 0128-2021-0002 «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». Соловьев Д. М. занимался обработкой спутниковых данных в рамках госзадания № 0555-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология»).

Мы благодарим HACA за возможность использования спутниковых изображений из приложения Worldview Snapshots (https://wvs.earthdata.nasa.gov), которое является частью Системы данных и информации системы наблюдения за Землей (EOSDIS, *англ*. Earth Observing System Data and Information System).

Литература

- 1. *Андрулионис Н. Ю.*, *Завьялов П. О.*, *Ижицкий А. С.* Современная эволюция солевого состава вод западного бассейна Большого Аральского моря // Океанология. 2021. № 6. (В печати).
- 2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря СССР». Т. 7. Аральское море / под ред. Бортника В. Н., Чистяевой С. П. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 196 с.
- 3. *Гинзбург А. И.*, *Костяной А. Г.*, *Шеремет Н. А.*, *Кравцова В. И.* Спутниковый мониторинг Аральского моря // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2010. Т. 23. С. 150–193.
- 4. *Гинзбург А. И.*, *Крек Е. В.*, *Костяной А. Г.*, *Соловьев Д. М.* Эволюция мезомасштабного антициклонического вихря и вихревых диполей/мультиполей на его основе в Юго-Восточной Балтике (спутниковая информация: май июль 2015 г.) // Океанологические исследования. 2017. Т. 45. № 1. С. 10—22. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).3.
- 5. Завьялов П. О., Андрулионис Е. Е., Арашкевич Е. Г., Грабовский А. Б., Дикарев С. Н., Кудышкин Т. В., Курбаниязов А. К., Ни А. А., Сапожников Ф. В. Экспедиционные исследования в западном бассейне Аральского моря в сентябре 2006 г. // Океанология. 2008. Т. 48. № 4. С. 648–654.
- 6. Завьялов П.О., Арашкевич Е.Г., Бастида И., Гинзбург А.И., Дикарев С.Н., Житина Л.С., Ижиц-кий 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.
- 7. *Ижицкий А. С.* Термохалинная структура и циркуляция вод Большого Аральского моря в начале XXI века: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2014. 112 с.
- 8. *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.
- 9. *Косарев А. Н.* Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во Московского ун-та, 1975. 272 с.
- 10. *Симонов А. И.* К вопросу о причине антициклональной циркуляции вод Аральского моря // Метеорология и гидрология. 1954. № 2. С. 50—52.
- 11. *Cretaux J.-F.*, *Kostianoy A. G.*, *Berge-Nguyen M.*, *Kouraev A. V.* Present-day water balance of the Aral Sea seen from satellite // Remote Sensing of Asian Seas / eds. V. Barale, M. Gade. Cham: Springer, 2019. P. 523–539. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-94067-0_29.
- 12. *Ginzburg A. I.*, *Kostianoy A. G.*, *Sheremet N. A.*, *Kravtsova V. I.* Satellite monitoring of the Aral Sea region // The Aral Sea Environment, The Handbook of Environmental Chemistry / eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag. 2010. V. 7. P. 147–179.
- 13. *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.
- 14. *Izhitskiy A. S., Zavialov P. O., Sapozhnikov P. V., Kirillin G. B., Grosssart H. P., Kalinina O. Y., Zalota A. K., Goncharenko I. V., Kurbaniyazov A. K.* Present state of the Aral Sea: diverging physical and biological characteristics of the residual basins // Scientific Reports. 2016. V. 6(1). Art. No. 23906. DOI: 10.1038/srep23906.
- 15. *Kostianoy A. G., Zavialov P. O., Lebedev S. A.* What do we know about dead, dying and endangered lakes and seas? // Dying and Dead Seas, Climatic Versus Anthropic Causes / eds. J. C. J. Nihoul, P. O. Zavialov, Ph. P. Micklin; NATO Science Series: IV. Earth and Environmental Sciences. V. 36. Dordrecht: Springer, 2004. P. 1–48. DOI: 10.1007/978-94-007-0967-6_1.
- 16. *Micklin P.* Efforts to revive the Aral Sea // The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake / eds. P. Micklin, N. V. Aladin, I. Plotnikov. Springer Earth System Sciences. V. 10178. Berlin; Heidelberg: Springer, 2014. P. 361–380. DOI: 10.1007/978-3-642-02356-9_15.
- 17. *Sapozhnikov P. V., Arashkevich E. G., Ivanishcheva P. S.* Biodiversity // The Aral Sea Environment, The Handbook of Environmental Chemistry / eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer-Verlag. 2010. V. 7. P. 235–282.
- 18. The Aral Sea Environment, The Handbook of Environmental Chemistry / eds. Kostianoy A. G., Kosarev A. N. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer-Verlag, 2010. V. 7. 332 p.
- 19. *Zavialov P.* Physical Oceanography of the Dying Aral Sea. Chichester, UK: Springer-Praxis Publ., 2005. 146 p.
- 20. Zavialov P. Physical oceanography of the Large Aral Sea // The Aral Sea Environment, The Handbook of Environmental Chemistry / eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer-Verlag. 2010. V. 7. P. 123–145.

Vortices in the Western Large Aral Sea (satellite information)

A. I. Ginzburg¹, A. G. Kostianoy^{1,2}, N. A. Sheremet¹, Soloviev D. M.³

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru

² S. Yu. Witte Moscow University, Moscow 115432, Russia

³ Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia E-mail: solmit@gmail.com

The study of vortex dynamics in the modern western basin of the Large Aral Sea and its relationship with the wind direction was carried out using optical satellite images of Sentinel-2A MSI, Sentinel-2B MSI and Landsat-8 OLI with high spatial resolution (30–60 m) in the period October 11–18, 2020, with 2-3 days between images, and related wind speed and direction information. The wind speed over the water area in the period from October 11 to 18 did not exceed 4 m/s on average, and its direction from northeasterly/easterly on October 11–15 changed to southeasterly/southerly on October 16–18. The greatest eddy activity throughout the entire period was observed in the deepest and widest part of the western basin, approximately between latitudes 44° 58′ and 45° 22′ N. With the winds of the eastern directions, the dominant structure in this latitudinal belt was an anticyclonic eddy with a diameter of 5-7 km and attached cyclones of a smaller scale. The size of the vortex part of the dipole structure from this anticyclone and cyclone on its northwestern periphery was approximately 11 km (with a basin width of about 21 km at a latitude of 45° 10′ N). Comparison of this dipole with the "model" circulation pattern in approximately the same coordinates (Izhitskiy et al., 2014) showed their qualitative similarity. With the change in the direction of the winds to the southerly, the vortex picture became noticeably more complicated: the largest and most pronounced against the background of a complex packing of vortices and vortex dipoles were cyclonic eddies up to 8 km in diameter. The question of the possible reasons for a more intense vortex pattern with a clear "drawing" of vortex structures on satellite images in October 2020 is discussed as compared to satellite images of the western basin of the early 2000s.

Keywords: shallowing of the Aral Sea, water circulation in the Western Large Aral Sea, vortices, vortex dipoles, cysts of the Aral Artemia, satellite data, optical imagery

Accepted: 11.08.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-236-246

References

- 1. Andrulionis N. Yu., Zavialov P.O., Izhytskiy A. S., Modern evolution of the salt composition of the waters of the Western basin of the Large Aral Sea, *Okeanologiya*, 2021, No. 6 (in Russian, in press).
- 2. Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR. Proekt "Morya SSSR". T. 7. Aral'skoe more (Hydrometeorology and Hydrochemistry of the USSR Seas. Project "Seas of the USSR". Vol. 7. Aral Sea), Bortnik V. N., Chistyaeva S. P. (eds.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990, 196 p. (in Russian).
- 3. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Kravtsova V. I., Satellite monitoring of the Aral Sea, *Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*, 2010, Vol. 23, pp. 150–193 (in Russian).
- 4. Ginzburg A. I., Krek E. V., Kostianoy A. G., Soloviev D. M., Evolution of a mesoscale anticyclonic vortex and vortex dipoles/multipoles on its base in the South-Eastern Baltic (satellite information: May July 2015), *Okeanologicheskiye issledovaniya*, 2017, Vol. 45, No. 1, pp. 10–22 (in Russian), DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).3.
- 5. Zavialov P.O., Andrulionis E.E., Arashkevich E.G., Grabovskii A.B., Dikarev S.N., Kudyshkin T.V., Kurbaniyazov A.K., Ni A.A., Sapozhnikov F.V., Expedition researches in the western basin of the Aral Sea in September 2006, *Oceanology*, 2008, Vol. 48, No. 4, pp. 602–608.
- 6. 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., Nikishina 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 the XXI century: physics, biology, chemistry*), Moscow: Nauka, 2012, 229 p. (in Russian).
- 7. Izhitskiy A. S., *Termokhalinnaya struktura i tsirkulyatsiya vod Bol'shogo Aral'skogo morya v nachale XXI veka: Diss. kand. geogr. nauk* (Thermohaline structure and water circulation of the Large Aral Sea at the beginning of the XXI century: Cand. geogr. sci. thesis), Moscow, 2014, 112 p. (in Russian).

- 8. 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.
- 9. Kosarev A. N., *Gidrologiya Kaspiiskogo i Aral'skogo morei* (Hydrology of the Caspian and Aral Seas), Moscow: Izd. Moskovskogo universiteta, 1975, 272 p. (in Russian).
- 10. Simonov A. I., On the question of the cause of the anticyclonic circulation of the Aral Sea waters, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1954, No. 2, pp. 50–52 (in Russian).
- 11. Cretaux J.-F., Kostianoy A. G., Berge-Nguyen M., Kouraev A. V., Present-day water balance of the Aral Sea seen from satellite, *Remote Sensing of Asian Seas*, V. Barale, M. Gade (eds.), Cham, Springer, 2019, pp. 523–539, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-94067-0_29.
- 12. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Kravtsova V. I., Satellite monitoring of the Aral Sea region, In: *The Aral Sea Environment, The Handbook of Environmental Chemistry*, A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev (eds.), Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, Vol. 7, pp. 147–179.
- 13. 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.
- 14. Izhitskiy A. S., Zavialov P. O., Sapozhnikov P. V., Kirillin G. B., Grosssart H. P., Kalinina O. Y., Zalota A. K., Goncharenko I. V., Kurbaniyazov A. K., Present state of the Aral Sea: diverging physical and biological characteristics of the residual basins, *Scientific Reports*, 2016, Vol. 6(1), Art. No. 23906, DOI: 10.1038/srep23906.
- 15. Kostianoy A. G., Zavialov P. O., Lebedev S. A., What do we know about dead, dying and endangered lakes and seas? In: *Dying and Dead Seas*, *Climatic Versus Anthropic Causes*, J. C. J. Nihoul, P. O. Zavialov, Ph. P. Micklin (eds.), NATO Science Series: IV. Earth and Environmental Sciences, Vol. 36, Dordrecht: Springer, 2004, pp. 1–48, DOI: 10.1007/978-94-007-0967-6_1.
- 16. Micklin P., Efforts to revive the Aral Sea. In: *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake*, P. Micklin, N.V. Aladin, I. Plotnikov (eds.), Springer Earth System Sciences, Vol. 10178, Berlin; Heidelberg: Springer, 2014, pp. 361–380, DOI: 10.1007/978-3-642-02356-9 15.
- 17. Sapozhnikov P.V., Arashkevich E.G., Ivanishcheva P.S., Biodiversity, In: *The Aral Sea Environment, The Handbook of Environmental Chemistry*, Kostianoy A.G., Kosarev A.N. (eds.), Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2010, Vol. 7, pp. 235–282.
- 18. *The Aral Sea Environment, The Handbook of Environmental Chemistry*, Kostianoy A. G., Kosarev A. N. (eds.), Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2010, Vol. 7, 332 p.
- 19. Zavialov P., *Physical Oceanography of the Dying Aral Sea*, Chichester, UK: Springer-Praxis Publishing, 2005, Vol. 7, 146 p.
- 20. Zavialov P., Physical oceanography of the Large Aral Sea, In: *The Aral Sea Environment*, *The Handbook of Environmental Chemistry*, Kostianoy A. G., Kosarev A. N. (eds.), Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2010, Vol. 7, pp. 123–145.