### Динамика высыхания западного бассейна Большого Аральского моря по спутниковым данным (2002–2021)

А. И. Гинзбург<sup>1</sup>, А. Г. Костяной<sup>1,2</sup>, Н.А. Шеремет<sup>1</sup>, А. С. Ижицкий<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, gil-gelad@mail.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

Динамика изменения морфометрических параметров западного бассейна Арала за годы после разделения Большого Аральского моря на западную и восточную части (с 2002 г.) прослежена по результатам оценивания его площади по спутниковым изображениям MODIS-Terra, -Aqua (2003–2021), анализа базы данных HYDROWEB, Legos (уровень, площадь, объём) (2010–2021) и сведений из известных публикаций (2002–2018). С 2003 по 2021 г. уровень западного бассейна Арала понизился на 10,5 м (с 30,5 до 20 м), его площадь уменьшилась в 2,3 раза (с 5429 до примерно 2300 км<sup>2</sup>); объём бассейна с 2007 г. (57,22 км<sup>3</sup>) до 2021 г. (32,59 км<sup>3</sup>) уменьшился в 1,8 раз. За последние 10 лет (2011–2021) значения средней скорости падения уровня и сокращения площади и объёма составили примерно 0,8 м/год, 170 км<sup>2</sup>/год и 2,4 км<sup>3</sup>/год соответственно. С ростом солёности вод западного бассейна с 82 ‰ в 2003 г. до 140–150 ‰ в 2019 г. и соответствующим понижением температуры замерзания наблюдается уменьшение площади ледяного покрова с отсутствием такового с зимы 2018/2019 гг. Продолжались потепление западного бассейна и сдвиг весенней и осенней фаз сезонного цикла температуры в сторону более раннего наступления. Годовой размах среднемесячных значений температуры воды достиг в 2018 г. примерно 32 °С.

**Ключевые слова:** обмеление Аральского моря, западный бассейн Большого Аральского моря, морфометрические параметры западного бассейна, ледяной покров, сдвиг фаз сезонного цикла температуры, спутниковые данные

Одобрена к печати: 19.10.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263

### Введение

Аральское море — бессточный солёный бассейн, находящийся в аридной зоне на территории Узбекистана и Казахстана, до 1960-х гг. было четвёртым в мире континентальным водоёмом по площади водной поверхности. В так называемый условно-естественный период (1911-1960), когда уровень моря находился на отметке +53 м БС (в Балтийской системе высот), его площадь составляла примерно 66 000 км<sup>2</sup> (*рис.* 1, см. с. 247), объём — 1064 км<sup>3</sup>, максимальные глубины в западной и центральной частях моря — 69 и 29 м соответственно, в северной (Малом море) — 29 м, солёность воды в открытой части моря менялась в пределах примерно 9,6-10,3 % (Гидрометеорология..., 1990; Косарев, 1975). С 1961 г. вследствие климатического и главным образом антропогенного (безвозвратное использование вод питающих море рек Амударьи и Сырдарьи на нужды орошения) факторов, нарушивших водный баланс Арала, началось его постепенное обмеление с уменьшением площади зеркала и объёма. Обмеление Аральского моря привело к существенным изменениям в его морфометрических характеристиках, термохалинной структуре, биологических и других параметрах (Аладин, Плотников, 2008; Аральское..., 2020; Гидрометеорология..., 1990; Гинзбург и др., 2010; Завьялов и др., 2012; Плотников, 2016; Cretaux et al., 2019; Ginzburg et al., 2010; Izhitskiy et al., 2016, 2021; Micklin, 2016; The Aral..., 2010; Zavialov et al., 2003, 2008, 2009 и др.).



*Рис. 1.* Остаточные водоёмы Аральского моря на изображении MODIS-Terra 13 мая 2021 г. с наложенными контурами берегов на начало 60-х гг. ХХ в. (красная линия)

В 1989 г. Аральское море разделилось на Малое море и Большое море, и с 2006 г., после возведения в проливе Берга в 2004-2005 гг. Кокаральской плотины с водосливом для автоматического сброса излишков воды, уровень Малого моря сохраняется на отметке примерно +42 м БС (Аладин и др., 2017; Плотников, 2016; Kouraev et al., 2009). Солёность вод в зал. Шевченко Малого моря в октябре 2014 г. составляла 11,1 ‰, что на 1,6 ‰ выше, чем до начала обмеления моря (Izhitskiy et al., 2016). С начала 2003 г. (а фактически с 2002 г.) Большое море представляет собой два бассейна: западный и восточный (*рис. 2a*, см. с. 248). Соединявший их на севере пролив (пролив Узун-Арал), через который происходил водообмен между этими водоёмами с существенно разными глубинами и гидрологическими режимами (Завьялов, 2008; Roget et al., 2009), имел ширину на момент разделения моря на два бассейна 10-15 км, к 2006 г. сузился до 1-1,5 км, а в 2016 г. его ширина, судя по спутниковым изображениям, не превышала 100 м. В 2006 г. от восточного бассейна Арала отделился зал. Тщебас (рис. 26), превратившийся к настоящему времени в мелководное гиперсолёное озеро (солёность его, по измерениям в 2014 г. (Izhitskiy et al., 2016), была примерно 92 ‰). К осени 2020 г. от западного бассейна отделился зал. Чернышева (восточная часть, рис. 2e) — гелиотермальное озеро с глубиной в 2015 г. около 14 м и солёностью 130 ‰ у поверхности и 244 ‰ у дна (Izhitskiy et al., 2021), а к сентябрю 2021 г. пересохла мелководная западная часть зал. Чернышева (*рис. 2ж*). Таким образом, к концу 2021 г. бывшее Большое Аральское море разделилось (с учётом пересохшего восточного бассейна) на четыре части (см. рис. 1, 2ж). Динамика обмеления Большого Аральского моря прослеживается по спутниковым изображениям (см. рис. 2).



<image>



ж

*Рис. 2.* Динамика обмеления Большого Аральского моря по спутниковым изображениям: *a*−∂ — соответственно 2003, 2006, 2009, 2010 и 2017 гг. (NASA Earth Observatory, https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/AralSea/show-all); *e* — MSI Sentinel-2A 23.09.2020; *ж* — Sentinel-2 04.08.2022

Восточный бассейн Арала, площадь которого меняется от года к году в зависимости от интенсивности паводка Амударьи (в основном) и поступления вод из Малого моря через так называемый Центральный Арал (неглубокий водоём-озеро за плотиной) (Аладин и др., 2017; Micklin, 2016) и протоку, к сентябрю 2009 г. практически полностью высох (puc. 2в) и представляет собой мелкое солёное «болото», хотя его частичные «наполнения» продолжались и до недавнего времени (*рис. 2г*). Воды Малого моря при сбросе через Кокаральскую плотину и обводнении Центрального Арала через сохранявшиеся до недавнего времени протоки, соединяющие водоёмы (см. *рис. 2г*), подпитывали также заливы Тщебас и Чернышева. Приходными составляющими водного баланса наиболее глубокого западного бассейна в годы отсутствия водообмена с восточным через пролив Узун-Арал стали атмосферные осадки и талые воды, поступление вод из Центрального Арала при его наполнении сбрасываемой из Малого Арала водой и приток подземных вод. Естественно было ожидать, что западный бассейн Большого Аральского моря из-за его самого большого объёма и самого низкого отношения площади зеркала к объёму, а также поступления в него подземных вод с плато Устюрт будет существовать дольше других водоёмов Большого Арала (Cretaux et al., 2005). Высказывались предположения (Аладин и др., 2017; Новикова, 2019; Micklin, 2016), что стабилизация уровня западного бассейна может наступить при отметке +21 м БС. С точки зрения как научного интереса, так и практических нужд важен непрерывный мониторинг морфометрических параметров этого бассейна.

Цель настоящей статьи заключается в прослеживании эволюции морфометрических параметров западного бассейна Большого Аральского моря (уровня, площади, объёма), а также солёности/температуры поверхности (ТПМ) и ледообразования со времени его отделения от восточного бассейна до 2021 г. на основе доступных опубликованных данных и обработки/ анализа спутниковой информации.

### Данные и методы

Площадь, объём и уровень бассейна при известной детальной топографии дна взаимосвязаны, что позволяет при измерении одного из этих параметров и известных зависимостях от него других определить остальные (см., например, (Гидрометеорология..., 1990; Завьялов и др., 2012; Cretaux et al., 2005, 2011, 2019; Zavialov, 2005)). В отсутствие прямых измерений уровня из-за отсутствия гидропостов на побережье моря после 1990-х гг. и постоянного отступания береговой линии в процессе его деградации в одних работах уровень и объём бассейна оцениваются по его площади, измеренной по спутниковым изображениям (например, (Аральское..., 2020; Комплексные..., 2008)), в других площадь и объём бассейна определяются по измеренному спутниковым альтиметром уровню (например, (Cretaux et al., 2005, 2011, 2019)). В настоящей работе площадь водного зеркала западного бассейна (2003-2021) оценена по разработанной методике подсчёта пикселей на бинаризованных изображениях сенсора MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутников Terra и Aqua, полученных путём композиции его спектральных каналов с разрешением 250 м. Использовались безоблачные изображения начала лета каждого года, когда в основном прекращается поступление воды извне (из-за таяния льда и снега, регулярных осадков) и состояние бассейна стабилизируется.

На основе полученных нами результатов оценивания площади по спутниковым изображениям сенсора MODIS (2003–2021) и имеющихся в литературе сведений об уровне, площади и объёме западного бассейна в разные годы (полученных также в основном с использованием спутниковых изображений (2002–2018)) составлена сводная таблица этих ежегодных морфометрических параметров западного бассейна Большого Арала со времени фактического разделения Большого Аральского моря на западный и восточный бассейны. Таблица дополнена известными из литературы результатами прямых и альтиметрических измерений уровня западного бассейна в отдельные годы в период 2002–2010 гг. и солёности его вод в 2001–2019 гг. Выполнен также анализ доступных через интернет временных серий значений уровня, площади зеркала и объёма западного бассейна (с 14.01.2010 по 18.05.2021) из базы данных HYDROWEB, Legos (*англ*. Laboratory of Space Geophysical and Oceanographic Studies), Франция (https://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L\_aral\_ouest?lang=fr), основанных на альтиметрических измерениях уровня с использованием цифровой батиметрической модели DBM (*англ*. Digital Bathymetry Model) (см. (Cretaux et al., 2011)).

Сезонная и межгодовая изменчивость температуры поверхности западного бассейна в период с 01.07.2002 по 31.08.2022 прослежена с использованием доступных через интернет данных, содержащихся в базе данных NASA Giovanni On-line Data System (NASA — *англ*. National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — HACA) и основанных на ночных измерениях радиометра MODIS (11 мкм) спутника Aqua с пространственным разрешением 4 км.

Для прослеживания последовательного разделения Большого Арала по мере обмеления на отдельные водоёмы и их связи (водообмена) через протоки использованы спутниковые изображения онлайн-портала NASA Earth Observatory за 2003–2017 гг. (https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/AralSea/show-all), MSI (*анел*. Multispectral Instrument) Sentinel-2A 23.09.2020, MODIS-Aqua (декабрь 2020 г.), MODIS-Terra (май 2021 г.), Sentinel-2 True Color 04.08.2022.

Информация о температуре воздуха в центре западного бассейна Арала в даты, соответствующие некоторым обсуждаемым спутниковым изображениям, получена из базы данных высокого разрешения NCEP GFS (*англ*. National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр экологических прогнозов; *англ*. Global Forecast System, Глобальная система прогнозирования) (https://www.ncdc.noaa.gov).

### Морфометрические параметры западного бассейна Большого Арала

# Оценки площади по спутниковым изображениям MODIS-Terra, -Aqua (2003–2021) и их соответствие поступлениям вод в западный бассейн

Рисунок 3, основанный на обработке спутниковых изображений высокого разрешения, показывает непрерывное уменьшение площади западного бассейна (в среднем) в период 2003– 2021 гг. Можно отметить и годы, когда площадь бассейна практически не менялась (2005– 2006, 2009–2010) или увеличивалась — заметно (2010–2011) или в меньшей степени (2017– 2018). Характер изменения площади по годам соответствует ежегодным притокам к дельте Амударьи (Аральское..., 2020, табл. 2.2 по гидропосту Саманбай) и вод Сырдарьи к Малому морю (Аральское..., 2020, табл. 2.3 по гидропосту Каратерен). Так, с октября 2005 г. по март 2006 г. наблюдались более высокие, чем в предыдущие и последующие годы, притоки к дельте Амударьи и к Малому морю (4,518 и 6,266 км<sup>3</sup> соответственно) и приток воды в западный бассейн по протокам мог происходить как из восточного бассейна, так и в результате сбро-



са вод из Малого моря (Центральный Арал на *рис. 26* обводнён). В 2008–2009 гг. отмечен рекордно низкий приток к дельте Амударьи (0,144 км<sup>3</sup>) и довольно малый приток вод Сырдарьи (1,494 км<sup>3</sup>), и в 2009 г. восточный бассейн полностью пересох, а Центральный Арал не был обводнён (см. *рис. 2в*). Многоводными оказались 2010 и 2011 гг.: в 2009–2010 гг. притоки в дельте Амударьи и к Малому морю

*Рис. 3.* Межгодовые изменения площади водного зеркала западного бассейна Большого Арала в 2003–2021 гг. были соответственно 1,922 и 3,278 км<sup>3</sup>, в 2010–2011 гг. — 2,483 и 5,183 км<sup>3</sup>. Поступление вод в западный бассейн в эти годы было, по-видимому, и из Малого моря (Центральный Арал обводнён), и из восточного бассейна (см. *рис. 2г*). В 2017–2018 гг. высоким был приток вод к Малому морю (4,651 км<sup>3</sup> при притоке к дельте Амударьи 1,411 км<sup>3</sup>). Основным источником поступления вод в западный бассейн в 2017 г. был, по-видимому, сброс вод из Малого Арала (Центральный Арал на *рис. 2г* обводнён). По данным публикации (Аральское..., 2020), 2017 г. был рекордным по сбросу вод из Малого моря в восточный бассейн в период 2013–2018 гг.

С 2018 г. и до конца 2021 площадь водного зеркала западного бассейна непрерывно уменьшается. Воды Амударьи в эти годы не доходили до южной части восточного бассейна. Анализ спутниковых изображений сверхвысокого разрешения (10 м) сенсора MSI, установленного на спутниках Европейского космического агентства (*англ*. European Space Agency — ESA) Sentinel-2A/B, показал, что если водосброс из Малого Арала в 2020 г. с той или иной степенью интенсивности наблюдался практически в течение всех весенних месяцев, то в 2021 г. первое открытие створок Кокаральской плотины произошло в начале апреля, к середине апреля водосброс достиг максимальной интенсивности (не превышал трёх баллов) и был полностью прекращён в третьем квартале апреля. Таким образом, Центральный Арал уже в мае 2021 г. не был обводнён водами Малого Арала и вода из него не поступала в восточный бассейн, который полностью высох. Однако водообмен западного и восточного бассейнов прекратился ещё осенью 2020 г., когда высох соединяющий их пролив/протока (вода сохранялась только в его самой глубокой части (см. puc. 2e)). В 2021 г. уменьшилась и ещё одна составляющая приходной части водного баланса западного бассейна Арала — талые воды вследствие малоснежной зимы 2020/2021 гг. в районе Большого Арала, что хорошо видно на изображении MODIS-Aqua за 27 декабря 2020 г. (puc. 4) и изображениях MODIS-Terra за 1 января и 1 февраля 2021 г. (не приведены).



*Puc. 4.* Изображение MODIS-Aqua 27.12.2020 (https://earthobservatory.nasa.gov/images/147735/aral-sea-in-winter?src=eoa-iotd)

### Уровень, площадь зеркала и объём вод западного бассейна по данным HYDROWEB, Legos

Изменение морфометрических параметров западного бассейна Арала в течение примерно 11,5 лет (14.01.2010–18.05.2021) показано на *puc. 5* (см. с. 252). Видно (см. *puc. 5a*), что уровень бассейна с 2010 по 2011 г. вырос примерно на 1,5 м (в среднем), после чего, за исключением малого изменения в 2016–2017 гг. и некоторого подъёма в 2018 г., непрерывно падал. Максимальное значение уровня 26.04.2011 — +28,01 м БС, минимальное 26.02.2021 — +19,48 м, уровень 18.05.2021 — 20,04 м. То есть за 10 лет (2011–2021) уровень западного бассейна уменьшился примерно на 8 м (средняя скорость падения — около 0,8 м/год).



*Рис. 5.* Временные серии уровня (*a*) (красные вертикальные отрезки — стандартные отклонения), площади водного зеркала (*б*) и объёма (*в*) западного бассейна Арала в период с 14.01.2010 по 18.05.2021 по данным HYDROWEB, Legos

Тот же характер изменения во времени — у площади зеркала (см. *рис. 56*) и объёма (см. *рис. 56*) западного бассейна. Максимальное значение площади 26.04.2011 — примерно 3954,23 км<sup>2</sup>, минимальное 26.02.2021 — 2159,4 км<sup>2</sup>, площадь 18.05.2021 — 2252,17 км<sup>2</sup>. Значения площади зеркала в апреле 2011 г. и мае 2021 г. на *рис. 56* примерно на 130 и 120 км<sup>2</sup> меньше соответствующих значений на *рис. 3* (точные значения площади в 2003–2021 гг., соответствующие *рис. 3*, — в сводной таблице ниже). Максимальные расхождения значения значений площади по данным *рис. 3* и *56* (в начале лета) — примерно 260 км<sup>2</sup> (менее 10 %) в 2013 и 2016 гг., минимальные (около 20 км<sup>2</sup>) — в 2018 и 2019 гг. Средняя скорость сокращения площади водного зеркала с апреля 2011 г. до мая 2021 г. по *рис. 56* — примерно 170 км<sup>2</sup>/год, с 2011 по 2021 г. по *рис. 3* — та же (173 км<sup>2</sup>/год).

Объём бассейна согласно *рис. 5в* — 56,44 км<sup>3</sup> в апреле 2011 г. и 32,59 км<sup>3</sup> — в мае 2021 г., средняя скорость уменьшения объёма за этот период — примерно 2,4 км<sup>3</sup>/год.

# Сопоставление морфометрических параметров западного бассейна Арала по результатам настоящего исследования и других источников

Сводка имеющихся на сегодняшний день сведений об уровне, площади, объёме и солёности вод для западного бассейна моря с 2002 г., когда его отделение от восточного практически произошло, представлена в *таблице*. Все оценки площади бассейна в *таблице* получены по спутниковым изображениям разных лет (Аладин и др., 2017; Аральское..., 2020; Гинзбург и др., 2010; Плотников, 2016; Micklin, 2016); оценки площади в настоящем исследовании (см. *рис. 3*) выделены жирным шрифтом. Значения уровня и объёма в *таблице* рассчитаны по полученным оценкам площади с учётом детальных данных батиметрической карты района: уровня до 2007 г. — в работах (Аральское..., 2020; Комплексные..., 2008) (значения площади и объёма оценены в этих работах для Большого Арала в целом и не использовались), уровня, площади и объёма с 2007 по 2018 г. — в работе (Аральское..., 2020). Курсивом в *таблице* выделены значения уровня (2002–2010) и солёности в поверхностном и придонном слоях (2002– 2019), *измеренные* в экспедициях Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН) в западном бассейне. Значения уровня по данным альтиметрических измерений из работ (Аладин, Плотников, 2008; Аладин и др., 2017; Плотников, 2016; Cretaux et al., 2005; Micklin, 2016) отмечены звёздочкой.

Год	Уровень, м БС	Площадь, км <sup>2</sup>	Объём, км <sup>3</sup>	Солёность, ‰	Источники
2002	32,00	_	_	_	(Аральское, 2020, табл. 2.1; Комплексные, 2008)
2002	-	5200			(Гинзбург и др., 2010; Завьялов и др., 2012; Ginzburg et al., 2010)
2002 (ноябрь)	30,47	_		82 (пов.) 94 (придон.)	(Завьялов и др., 2012; Zavialov et al., 2003, 2009)
2002 (ноябрь) (среднегодовой)	30,72* 31,17*			_	(Cretaux et al., 2005)
2003	31,50				(Аральское, 2020, табл. 2.1; Комплексные, 2008)
2003	-	5000			(Гинзбург и др., 2010; Завьялов и др., 2012; Ginzburg et al., 2010)
2003		5429			Настоящее исследование (см. рис. 3)
2003 (максимум)	31,2*	_			(Аладин и др., 2017)
2003 (октябрь)	30,50			86 (пов.) 95 (придон.)	(Завьялов и др., 2004, 2012; Zavialov et al., 2009)

Информация разных лет (2002–2021) о морфометрических параметрах и солёности западного бассейна Большого Аральского моря

Продолжение таблицы

Год	Уровень, м БС	Площадь, км <sup>2</sup>	Объём, км <sup>3</sup>	Солёность, ‰	Источники
2003 (октябрь) (среднегодовой)	30,65* 30,81*	_	_	_	(Cretaux et al., 2005)
2004	31,09	-			(Аральское, 2020, табл. 2.1; Комплексные, 2008)
2004	_	4800			(Гинзбург и др., 2010; Завьялов и др., 2012; Ginzburg et al., 2010)
2004		5329	1		Настоящее исследование (см. рис. 3)
2004 (апрель) 2004 (август)	30,71		-	86 (пов.) 87 (придон.) 92 (пов.) 87 (придон.)	(Завьялов и др., 2012; Zavialov et al., 2009)
2004 (август) (среднегодовой)	30,57* 30,58*	-			(Cretaux et al., 2005)
2004 (максимум)	30.9*	-		100	(Алалин и др. 2017)
2005	30,70	-			(Аральское 2020 табл 2.1:
	50,70		-		Комплексные, 2008)
2005		4800	_		(Гинзбург и др., 2010; Завьялов и др., 2012; Ginzburg et al., 2010)
2005		4936	_		Настоящее исследование (см. рис. 3)
2005 (октябрь)	30,12	_		98 (пов.) 101 (придон.)	(Завьялов и др., 2006, 2012; Zavialov et al., 2009)
2005 (максимум)	30,5*			_	(Аладин и др., 2017)
2006	30,40				(Аральское, 2020, табл. 2.1; Комплексные, 2008)
2006	_	4600			(Гинзбург и др., 2010; Завьялов и др., 2012; Ginzburg et al., 2010)
2006	-	4925			Настоящее исследование (см. рис. 3)
2006 (март)	30,20	_		99 (пов.)	(Завьялов и др., 2008, 2012; Zavialov
2006 (сентябрь)	29,60			109 (пов.) 106 (придон.)	et al., 2009)
2006 (максимум)	30.5*	-			(Аладин и др., 2017)
2007	29.3	4450	57.22		(Аральское 2020. табл. 2.1)
2007	_	4677			Настоящее исслелование (см. рис. 3)
2007 (ноябрь)	29,18		-	104 (пов.) 115 (придон.)	(Завьялов и др., 2012)
2007 (максимум)	29,5*			100 (средняя)	(Аладин, Плотников, 2008; Аладин и др., 2017)
2008	28,7	4140	55,41	_	(Аральское, 2020, табл. 2.1)
2008	_	4250			Настоящее исследование (см. рис. 3)
2008 (июнь)	29,28	_		104 (пов.) 107 (придон.)	(Завьялов и др., 2012; Zavialov et al., 2008)
2008 (максимум)	28,9*			_	(Аладин и др., 2017)
2009	28,0	3960	53,14		(Аральское, 2020 (табл. 2.1))
2009	_	3948	-		Настоящее исследование (см. рис. 3)
2009 (22 сентября)	27,0*	3588	56	>100 (средняя)	(Плотников, 2016; Micklin, 2016)
2009 (максимум)	27,6*	_	_	_	(Аладин и др., 2017)
2009 (август)	27,64			114 (пов.) 114 (придон.)	(Завьялов и др., 2012; Izhitskiy et al., 2014)
2010	27.8	3870	52.50		(Аральское, 2020 (табл. 2.1))
2010 (август)	_	3795,9	_	-	(Аральское, 2020 (табл. 4.1))

Окончание таблицы

Год	Уровень, м БС	Площадь, км <sup>2</sup>	Объём, км <sup>3</sup>	Солёность, ‰	Источники
2010	_	3898	_	_	Настоящее исследование (см. рис. 3)
2010 (апрель)		—		115 (пов.)	(Завьялов и др., 2012)
2010 (сентябрь)	26,79			117 (пов.) 132 ( придон.)	(Завьялов и др., 2012; Izhitskiy et al., 2014)
2010 (максимум)	27,1*			_	(Аладин и др., 2017)
2011	28,0	3870	53,14		(Аральское, 2020, табл. 2.1)
2011 (август)	_	3960,8	_		(Аральское, 2020, табл. 4.1)
2011		4086			Настоящее исследование (см. рис. 3)
2011 (ноябрь)		—		117	(Izhitskiy et al., 2014)
2011 (максимум)	27,9*			—	(Аладин и др., 2017)
2012	27,0	3690	50,00		(Аральское, 2020, табл. 2.1)
2012 (октябрь)	_	3696,6	_		(Аральское, 2020, табл. 4.1)
2012		3869			Настоящее исследование (см. рис. 3)
2012 (максимум)	27,4*	_			(Аладин и др., 2017)
2013	27,0	3670	50,00		(Аральское, 2020, табл. 2.1)
2013 (август)	_	3606,9	_		(Аральское, 2020, табл. 4.1)
2013		3766			Настоящее исследование (см. рис. 3)
2013	26,5*	3279	54	>100 (средняя)	(Плотников, 2016)
2013 (максимум)	26,3*	_	_	_	(Аладин и др., 2017)
2014	26,0	3270	46,95		(Аральское, 2020, табл. 2.1)
2014 (август)	_	3375,2	_		(Аральское, 2020, табл. 4.1)
2014		3351			Настоящее исследование (см. рис. 3)
2014 (октябрь)		_		115,4 (пов.) 121,5 (придон.)	(Izhitskiy et al., 2016)
2014	25,0*	3120	54	>150 (средняя)	(Micklin, 2016)
2014 (максимум)	25,4*	_	_	_	(Аладин и др., 2017)
2015	27,1	3010	50,26		(Аральское, 2020, табл. 2.1)
2015 (август)	_	3157,8	_		(Аральское, 2020, табл. 4.1)
2015		3193			Настоящее исследование (см. рис. 3)
2015 (август)	24-25*	3000			(Аладин и др., 2017)
2016	26,5	2920	48,45		(Аральское, 2020, табл. 2.1)
2016 (август)	_	2958,1	_		(Аральское, 2020, табл. 4.1)
2016		2960			Настоящее исследование (см. рис. 3)
2017 (октябрь)		_		140 (пов.)	(Андрулионис, Завьялов, 2019; Андрулионис и др., 2021)
2017	25,0	2710	44,11	_	(Аральское, 2020, табл. 2.1)
2017 (август)	_	2782,0	_		(Аральское, 2020, табл. 4.1)
2017		2791			Настоящее исследование (см. рис. 3)
2018	24,9	2680	43,59		(Аральское, 2020, табл. 2.1)
2018 (апрель)	_	2710,4	_		(Аральское, 2020, табл. 4.1)
2018	1	2815	1		Настоящее исследование (см. рис. 3)
2019	1		1	140 (пов.)	(Андрулионис и др., 2021)
2019		2716			Настоящее исследование (см. рис. 3)
2020		2523	1		Настоящее исследование (см. рис. 3)
2021	1	2368			Настоящее исследование (см. рис. 3)

Примечание: *пов.* — поверхностный слой; *прид.* — придонный слой.

Можно видеть, что результаты прямых измерений уровня западного бассейна, выполненных группой П. О. Завьялова (ИО РАН) в ноябре 2002 г., октябре 2003 г. и августе 2004 г. (курсив в *таблице*), хорошо согласуются (максимальное отличие — 0,25 м) с альтиметрическими измерениями (Cretaux et al., 2005). Хорошая согласованность прямых измерений Завьялова с коллегами в 2002–2006 гг. с данными альтиметрических измерений продемонстрирована и в работе (Cretaux et al., 2009). Результат прямого измерения уровня в сентябре 2010 г. (26,79 м в *таблице*) также близок к значению уровня в сентябре 2010 г. на *рис. 5a* (26,47 м). Разность же между рассчитанными по измеренной площади значениями уровня в работах (Аральское...2020; Комплексные..., 2008) и его прямыми измерениями в период 2002–2010 гг. в некоторые годы более заметна: примерно 1,5 м в 2002 г., 1 м в 2003 и 2010 гг. Ещё большие различия — в рассчитанных (Аральское..., 2020) и измеренных альтиметром (см. *рис. 5a*) значениях уровня: примерно до +2,6 и +3,0 м в 2015 и 2016 гг. соответственно, хотя в 2011 г. это различие в начале лета — в пределах 0,4 м. Заметим, что значения уровня на *рис. 5a* хорошо согласуются с альтиметрическими измерениями (до 2016 г. включительно) в работе (Cretaux et al., 2019).

Различия в оценках площади зеркала западного бассейна по спутниковым изображениям в настоящем исследовании (см. *рис. 3, таблицу*) и в работах (Аральское..., 2020, табл. 2.1; Гинзбург и др., 2010) для одного и того же года в период 2003–2018 гг. не превышали 10 % с максимальными значениями в 2003 и 2004 гг. (+429 и +529 км<sup>2</sup>). Разность между оценками площади в табл. 2.1 в работе (Аральское..., 2020) и соответствующими значениями (средними) на *рис. 56*, так же как и между значениями на *рис. 3* и *56* (см. выше), — в пределах 10 %. В отличие от *рис. 3* и *56* оценка площади в табл. 2.1 работы (Аральское..., 2020) в 2011 г. по сравнению с 2010 г. при увеличении уровня на 1,5 м (см. *рис. 5а*, а также (Cretaux et al., 2019)) не увеличилась (это увеличение площади есть в табл. 4.1 той же работы, оценки в которой для 2010–2018 гг. получены по спутниковым снимкам более высокого разрешения). Разница между объёмом, рассчитанным по площади в работе (Аральское..., 2020) и по альтиметрическим измерениям уровня (см. *рис. 5в* и данные в (Cretaux et al., 2019)), в некоторые годы превышает 10 %: +7,26 и +8,45 км<sup>3</sup> в 2015 и 2016 гг. соответственно — в годы, в которые отмечено наибольшее расхождение в уровне (см. выше).

### Изменения солёности, температуры поверхности моря, ледового режима

Как следует из *таблицы*, после отделения западного бассейна Арала от восточного, с 2002 по 2019 г., солёность, по данным экспедиций ИО РАН, увеличилась на 58 ‰ (с 82 до 140 ‰). Некоторые отличия этих значений солёности от измеренных другими авторами в 2004, 2007 и 2014 гг. (Аладин, Плотников, 2008; Аладин и др., 2017; Micklin, 2016) могут быть последствием разных пунктов и разных месяцев/сезонов измерений.

Следствием увеличения солёности *S* вод и соответствующего понижения температуры замерзания воды ( $T_{fr}$ ) явилось изменение условий образования ледяного покрова в западном бассейне. В соответствии с формулами  $T_{fr} = (0,44 - 0,048)S$  (Завьялов и др., 2012) и  $T_{fr} = -0,054S$  (см. (Kouraev et al., 2004)), в период с 2002 по 2019 г. при изменении *S* от 82 до 140 %  $T_{fr}$  изменялась примерно от -3,5 (-4,4) до -6,28 (-7,6) °C. Зимой 2008 г. при солёности около 100 % (см. *таблицу*) и оценённой по формулам  $T_{fr} = -3,5$  (-4,4) °C, когда большая часть западного бассейна была покрыта льдом (Завьялов и др., 2012, рис. 4.5.1), оценённая по спутниковому инфракрасному изображению температура поверхности воды в точке на открытой воде в начале замерзания 07.01.2008 была равна -4,36 °C. В зиму 2010/2011 гг. (S = 117 %,  $T_{fr} = -5,2$  (-6,4) °C) большая часть западного бассейна также замерзала, а ТПМ менялась от -4,35 до -4,9 °C с ТПМ в 2011 г. на 0,1-0,2 °C выше, чем в 2010 г. Однако зимой 2013/2014 гг. при практически таких же значениях солёности и температуры замерзания (S = 115 %,  $T_{fr} = -5,1$  (-6,2) °C) замерзала только северная часть западного бассейна с ТПМ вблизи припая (-5,1...-5,3) °C. Зима 2017/2018 гг. (S = 140 %,  $T_{fr} = -6,3$  (-7,6) °C) была по-

следней за период наблюдения (до 2021 г.), когда хоть какая-то часть западного бассейна покрывалась льдом, — это его самая северная часть (район зал. Чернышева), с ТПМ -2,5 °C (южнее, в незамёрзшей части, ТПМ = -4 °C). Различия в значениях измеренной ТПМ и рассчитанной температуры замерзания (при условии справедливости расчётных формул для столь высокой солёности) могут быть связаны, с одной стороны, с неоднородным распределением солёности и ТПМ по акватории. С другой стороны, они могут быть следствием локального опреснения (и увеличения  $T_{fr}$ ) в годы притока в западный бассейн вод из восточного или из Малого моря через Центральный Арал (прежде всего — в его северную часть) — в 2011 и 2018 гг. (см. выше). Незамёрзший западный бассейн в зиму 2020/2021 гг. при скованных льдом Малом море и зал. Тщебас (см. *рис. 4*) — следствие резкого меридионального градиента температуры воздуха над Аралом: -12,2 °C над Малым морем и -0,9 °C над центром западного бассейна (среднесуточные значения по данным NCEP). По данным Гидрометцентра, зима 2019/2020 гг. была аномально тёплой на всей европейской и азиатской территории страны (https://meteoinfo.ru/novosti/16824-nebyvalo-teplaya-zima-v-rossii), в том числе и на близко расположенном к Аралу Северном Каспии (Гинзбург и др., 2021).



*Рис. 6.* Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений температуры поверхности западного Арала (°С) с 01.07.2002 по 31.08.2022, осреднённых в пределах выделенного участка акватории с координатами 45,1–45,3° с. ш. и 58,44–58,6° в. д. Голубая линия — линейный тренд температуры



Рис. 7. Сезонные циклы ТПМ в разные периоды времени: пунктирная линия соответствует условноестественному периоду (Гидрометеорология..., 1990), красная и зелёная — осреднениям за 1982–1993 и 1994–2000 гг. соответственно по данным работы (Гинзбург и др., 2011), фиолетовая — осреднению за 2002–2022 гг. Все кривые построены аппроксимацией среднемесячных данных полиномами седьмой степени

В 2000-х гг. продолжалось потепление западного бассейна Аральского моря (*puc. 6*, см. с. 257). Тренд среднемесячной температуры 0,04 °С/год, оценённый по *puc. 6*, неточен из-за пробелов в данных и установленного в базе данных MODIS завышенного нижнего предела температурного диапазона (в расчёте на воды с океанской солёностью). В 2018 и 2021 гг. среднемесячная летняя температура достигала 28,06 и 27,93 °С соответственно. Таким образом, годовой размах среднемесячной температуры, с учётом измеренной зимней температуры в 2018 г. -4 °С (см. выше), составил примерно 32 °С.

Как следует из *рис.* 7 (см. с. 257), со времени отделения западного бассейна Арала от восточного (с 2002 по 2022 г.) продолжался сдвиг весенней (особенно) и осенней фаз сезонного цикла ТПМ в сторону более раннего наступления. Итоговый сдвиг по сравнению с условно-естественным периодом составил примерно 50 дней для весенней фазы цикла и 35 — для осенней. Максимум летней температуры сместился с середины августа в условно-естественный период на конец июня – начало июля.

### Обсуждение и выводы

Выполненное в настоящем исследовании сопоставление значений уровня западного бассейна в 2002–2010 гг., полученных прямыми измерениями и измеренных спутниковыми альтиметрами (данные базы HYDROWEB, Legos), показало их хорошее соответствие (различия в разные годы — в пределах 0,25 м), тогда как разность прямых измерений уровня с рассчитанными по площади бассейна, оценённой по спутниковым изображениям (Аральское..., 2020; Комплексные..., 2008), в некоторые годы достигает 1-1,5 м. Эти завышенные или заниженные оценки уровня моря по площади зеркала относительно прямых измерений могут быть следствием неточного определения площади моря по спутниковым изображениям (методики обработки спутниковой информации), а также использования для обработки спутниковых изображений, относящихся к разным месяцам/сезонам или к разным ветровым условиям (см. (Гинзбург и др., 2010)). Изменения уровня моря в течение года очевидны из *рис. 5а* (см. также (Cretaux et al., 2005)).

Различия в оценках площади по спутниковым изображениям в настоящем исследовании (см. *рис. 3, таблицу*) и в работах (Аральское..., 2020; Гинзбург и др., 2010) в разные годы в период 2003–2018 гг. не превышали 10 %. В таких же пределах находятся и различия этих оценок с рассчитанными по альтиметрическим измерениям уровня моря (см. *рис. 56*). Разница между оценками объёма, рассчитанными по площади в (Аральское..., 2020) и по альтиметрическим измерениям уровня моря (см. *рис. 56*). Разница между оценками объёма, рассчитанными по площади в (Аральское..., 2020) и по альтиметрическим измерениям уровня (см. *рис. 5в*), в некоторые годы, когда отмечено наибольшее расхождение в значениях уровня (2015, 2016), превышает 10 %.

Учитывая вышеизложенное, полагаем, что база данных HYDROWEB, Legos, основанная на регулярных и не зависящих от погоды альтиметрических измерениях уровня и дающая оцифрованные значения уровня, площади зеркала и объёма с интервалом между значениями параметров не более месяца, — лучшая на сегодняшний день основа оперативного мониторинга морфометрических параметров западного бассейна Большого Аральского моря. Ограничением для такого мониторинга может быть непрерывное уменьшение площади зеркала бассейна, поскольку близость берега влияет на показания альтиметра (Cretaux et al., 2019). К сожалению, прямые измерения уровня западного бассейна для валидации альтиметрических данных после 2010 г. отсутствуют. В дальнейшем обсуждении мы основываемся как на данных *таблицы*, так и на значениях уровня, площади зеркала и объёма базы HYDROWEB, Legos (см. *рис. 5*).

За 61 год антропогенного периода (1961–2021) уровень западного бассейна Арала понизился на 33 м (с +53 м БС в 1960 г. до +20 м БС в 2021 г.). При этом за годы после разделения Большого Арала на западный и восточный бассейны (с конца 2002 г. – начала 2003 г. при уровне 30,5 м) произошло падение уровня на 10,5 м. Максимальная глубина западного бассейна (69 м в 1960 г.) всё ещё остаётся довольно большой — 36 м. Площадь зеркала западного бассейна с 2003 г. (5429 км<sup>2</sup>, см. *рис. 3, таблицу*) до 2021 г. (2368 км<sup>2</sup> согласно *рис. 3*  и *таблице*, 2252 км<sup>2</sup> — по *рис. 56*) уменьшилась в 2,3–2,4 раза. Его объём с 2007 г. (57,22 км<sup>3</sup>) до 2021 г. (32,59 км<sup>3</sup> по *рис. 5в*) уменьшился примерно в 1,8 раза. Средняя скорость падения уровня западного бассейна Арала за последние 10 лет (2011–2021) оказалась равной примерно 0,8 м/год, уменьшения площади и объёма — соответственно 170 км<sup>2</sup>/год и 2,4 км<sup>3</sup>/год. Заметим, что примерно такого же значения (0,6–0,8 м/год) достигала средняя многолетняя скорость падения уровня Большого Аральского моря в маловодные годы в период с 1971 по 1985 г. (Аральское..., 2020).

Во второй декаде 2000-х гг. наблюдается тенденция уменьшения площади ледяного покрова в западном Арале, обусловленная как понижением температуры замерзания воды вследствие увеличения солёности, так и региональным потеплением данного района. Максимальные летние среднемесячные значения ТПМ в 2018 и 2021 гг. достигли примерно 28 °C соответственно, а годовой размах среднемесячной температуры в 2018 г. при температуре замерзания воды -4 °C составил примерно 32° С (в 2009 г. он был около 28 °C, а в условноестественный период не превышал 24 °С (Гинзбург и др., 2011)). Если в зиму 2010/2011 гг. большая часть западного бассейна ещё замерзала, то в феврале 2014 г. замёрзла только его северная часть, а зимой 2017/2018 гг. — только самая северная часть в районе зал. Чернышева. В зимы 2018/2019, 2019/2020 и 2020/2021 гг. западный бассейн не замерзал вообще. Причиной этого в последнюю зиму (см. *рис. 4*) была аномально высокая температура воздуха над западным Аралом: среднесуточные значения температуры воздуха 27 декабря 2020 г., 1 января и 1 февраля 2021 г. были равны -0,9, +2,9 и +2,7 °С соответственно. Зима 2019/2020 гг. была аномально тёплой на всём евроазиатском пространстве Северного полушария. В годы увеличенного поступления в западный бассейн опреснённых вод (2011, 2018) температура замерзания повышалась, что было особенно заметно в северной части бассейна в 2018 г.

Уровень западного бассейна опустился ниже отметки +21 м БС, при которой предполагалась его возможная стабилизация (Аладин и др., 2017; Новикова, 2019; Micklin, 2016), и продолжает падать. Если подпитка западного бассейна амударьинскими водами (что маловероятно) и сбросами воды из Малого моря не восстановится, то можно ожидать в дальнейшем его более быстрого высыхания и увеличения солёности вод, которая с 10 ‰ в 1960 г. (и с 82 ‰ в конце 2002 г.) выросла до 140–150 ‰ в 2019 г. Продолжение мониторинга этого процесса и связанных с ним изменений в температурном/ледовом режимах Аральского моря представляет несомненный научный интерес.

А. И. Гинзбург, А. Г. Костяной и Н. А. Шеремет выполняли исследование многолетней изменчивости морфометрических параметров западного бассейна Арала и его температуры поверхности/ледового режима 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». А. С. Ижицкий занимался исследованием термохалинной структуры и изменчивости минерализации вод Арала в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-55-12007 «Исследование механизмов изменений физического и биогеохимического режимов самой динамичной в мире озёрной системы: становится ли Большой Арал меромиктическим водоёмом». Д. М. Соловьев выполнял обработку спутниковых данных оптического и инфракрасного диапазонов 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»).

### Литература

<sup>1.</sup> Аладин Н. В., Плотников И. С. Современная фауна остаточных водоемов, образовавшихся на месте бывшего Аральского моря // Тр. Зоолог. ин-та РАН. 2008. Т. 312. № 1/2. С. 145–154. https://doi. org/10.31610/trudyzin/2008.312.1-2.145.

- 2. Аладин Н. В., Чида Т., Крето Ж.-Ф., Ермаханов З. К., Жоллибеков Б., Миклин Ф., Плотников И. С., *Егоров А. Н.* Современные проблемы и возможное будущее Аральского моря // Ученые записки Российского гос. гидрометеорол. ун-та. 2017. № 48. С. 41–54.
- 3. *Андрулионис Н.Ю.*, *Завьялов П.О.* Лабораторные исследования основного компонентного состава гипергалинных озер // Морской гидрофиз. журн. 2019. Т. 35. № 1. С. 16–36. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-1-16-36.
- 4. *Андрулионис Н.Ю., Завьялов П.О., Ижицкий А.С.* Современная эволюция солевого состава вод западного бассейна Большого Аральского моря // Океанология. 2021. Т. 61. № 6. С. 925–935. DOI: 10.31857/S0030157421060034.
- 5. Аральское море и Приаралье / под ред. А. Рахимова. ЮНЕСКО. Ташкент: Complex Print, 2020. 132 с.
- 6. 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.
- 7. *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.
- 8. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* Эволюция температурного режима Аральского моря в 1982–2009 гг. по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 84–92.
- 9. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
- 10. Завьялов П. О., Гинзбург А. И., Сапожников Ф. В., Абдуллаев У. Р., Амбросимов А. К., Андреев Н. И., Валиджанов Р., Ишниязов Д. П., Колдаев А. А., Кудышкин Т. В., Курбаниязов А. К., Ни А.А., Петров М.А., Строганов О. Ю., Томашевская И. Г., Хан В. М. Комплексные экспедиционные исследования в западной части Аральского моря в октябре 2003 г. // Океанология. 2004. Т. 44. № 4. С. 632–635.
- 11. Завьялов П. О., Арашкевич А. Г., Грабовский А. Б., Дикарев С. Н., Джалилов Г., Евдокимов Ю. В., Кудышкин Т. В., Курбаниязов А. К., Курбаниязов С. К., Матчанов А. Т., Ни А.А., Сапожников Ф. В., Томашевская И. Г. Экспедиционные исследования в западном и восточном бассейнах Аральского моря (октябрь 2005 г.) // Океанология. 2006. Т. 46. № 6. С. 946–950.
- 12. 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.
- 13. 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., Сапожнико 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.
- Комплексные дистанционные и наземные исследования осушенного дна Аральского моря / под ред. В. А. Духовного. Ташкент: НИЦ МКВК, 2008. 190 с.
- 15. Косарев А. Н. Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во МГУ, 1975. 272 с.
- 16. *Новикова Н. М.* Эколого-географический аспект Аральского кризиса. Ч. 1. Развитие аральской проблемы, ее изучение, оценка и разработка мероприятий // Экосистемы: экология и динамика. 2019. Т. 3. № 1. С. 5–66.
- 17. Плотников И.С. Многолетние изменения фауны свободноживущих водных беспозвоночных Аральского моря. СПб.: ЗИН РАН, 2016. 168 с.
- Cretaux J.-F., Kouraev A. V., Papa F., Bergé-Nguyen M., Cazenave A., Aladin N., Plotnikov I. S. Evolution of sea level of the Big Aral Sea from satellite altimetry and its implications for water balance // J. Great Lakes Research. 2005. V. 31(4). P. 520–534. https://www.researchgate.net/publication/313383226.
- 19. *Cretaux J.-F., Létolle R., Calmant S.* Investigations on Aral Sea regressions from mirabilite deposits and remote sensing // Aquatic Geochemystry. 2009. V. 15. P. 277–291. DOI: 10.1007/s10498-008-9051-2.
- Cretaux J-F., Arsen A., Calmant S., Kouraev A., Vuglinski V., Berge-Nguyen M., Gennero M.-C., Nino F., Abarca Del Rio R., Cazenave A., Maisongrande P. SOLS: A lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data // Advances in Space Research. 2011. V. 47. Iss. 9. P. 1497–1507. https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.01.004.
- Cretaux J.-F., Kostianoy A., Bergé-Nguyen M., Kouraev A. Present-day water balance of the Aral Sea seen from satellite // Remote Sensing of the Asian Seas / eds. V. Barale, M. Gade. 2019. P. 523–538. https://doi. org/10.1007/978-3-319-94067-0\_29.
- Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Krantsova 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. V. 7. Heidelberg: Springer, 2010. P. 147–179. DOI: 10.1007/698\_2009\_15.

- 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.
- Izhitskiy A. S., Zavialov P. O., Sapozhnikov P. V., Kirilin G. B., Grossart 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. Art. No. 23906. DOI: 10.1038/srep23906.
- Izhitskiy A. S., Kirillin G. B., Goncharenko I. V., Kurbaniyazov A. K., Zavialov P.O. The world's largest heliothermal lake newly formed in the Aral Sea basin // Environmental Research Letters. 2021. V. 16. Art. No. 115009. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2d66.
- Kouraev A. V., Papa F., Mognarda N. M., Buharizine P. I., Cazenave A., Cretaux J.-F., Dozortseva J., Remy F. Sea ice cover in the Caspian and Aral Seas from historical and satellite data // J. Marine Systems. 2004. V. 47. P. 89–100. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2003.12.011.
- Kouraev A. V., Kostianoy A. G., Lebedev S. A. Ice cover and sea level of the Aral Sea from satellite altimetry and radiometry (1992–2006) // J. Marine Systems. 2009. V. 76. P. 272–286. DOI: 10.1016/j. jmarsys.2008.03.016.
- Micklin P. The future Aral Sea: hope and despair // Environmental Earth Sciences. 2016. V. 75(9). P. 1–15. DOI: 10.1007/s12665-016-5614-5.
- Roget E., Zavialov P., Khan V., Muniz M.A. Geodynamical processes in the channel connecting the two lobes of the Large Aral Sea // Hydrology and Earth System Sciences. 2009. V. 13. P. 2265–2271. https:// doi.org/10.5194/hess-13-2265-2009.
- 30. 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.
- 31. *Zavialov P.* Physical Oceanography of the Dying Aral Sea. Chichester, UK: Springer-Praxis Publ., 2005. 146 p.
- 32. Zavialov P.O., Kostianoy A. G., Emelianov S. V., Ni A.A., Ishniyazov D., Khan V. M., Kudyshkin T. V. Hydrographic survey in the dying Aral Sea // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. No. 13. Art. No. 1659. DOI: 10.1029/2003GL017427.
- Zavialov P. O., Ni A. A., Ishniyamazov D. P., Kudyshkin T. V., Kurbaniyazov A. K., Mukhamedzhanova D. Ongoing changes in salt composition and dissolved gases in the Aral Sea // Aquatic Geochemistry. 2008. V. 15. No. 1–2. P. 263–275. DOI: 10.1007/s10498-008-9057-9.
- Zavialov P. O., Ni A.A., Kudyshkin T. V., Kurbaniyazov A. K., Dikarev S. N. Five years of field hydrographic research in the Large Aral Sea (2002–2006) // J. Marine Systems. 2009. V. 76. P. 263–271. DOI: 10.1016/j. jmarsys.2008.03.013.

# The drying dynamics of the Western Large Aral Sea from satellite data (2002–2021)

### A. I. Ginzburg<sup>1</sup>, A. G. Kostianoy<sup>1,2</sup>, N. A. Sheremet<sup>1</sup>, A. S. Izhitskiy<sup>1</sup>, D. M. Soloviov<sup>3</sup>

 <sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru, gil-gelad@mail.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 dynamics of changes in the morphometric parameters of the western basin over the years after the division of the Large Aral Sea into western and eastern basins (since 2002) has been traced by the results of estimating its area using MODIS-Terra, -Aqua satellite images (2003–2021), analyzing the data bases HYDROWEB, Legos (sea level, area, volume) (2010–2021) and information from known publications (2002–2018). From 2003 to 2021, the level of the Western Aral basin has decreased by 10.5 m (from 30.5 to 20 m), its area has decreased 2.3 times (from 5429 to approximately 2300 km<sup>2</sup>); the volume of the basin from 2007 (57.22 km<sup>3</sup>) to 2021 (32.59 km<sup>3</sup>) decreased 1.8 times. Over the past

10 years (2011–2021), the average rates of the sea level decline and reduction in area and volume were approximately 0.8 m/year, 170 km<sup>2</sup>/year and 2.4 km<sup>3</sup>/year, respectively. With an increase in the salinity of the waters of the western basin from 82 % in 2003 to 140–150 % in 2019 and associated decrease in freezing temperature, a decrease in the area of ice cover is observed, with the absence of such since the winter of 2018/2019. The warming of the western basin and the shift of the spring and autumn temperature phases of the temperature seasonal cycle towards an earlier onset continued. The annual range of average monthly water temperatures reached about 32 °C in 2018.

**Keywords:** shallowing of the Aral Sea, western basin of the Large Aral Sea, morphometric parameters of the western basin, ice regime, phase shift of the seasonal temperature cycle, satellite data

Accepted: 19.10.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263

### References

- 1. Aladin N. V., Plotnikov I. S., Modern fauna of residual water bodies formed on the place of the former Aral Sea, *Trudy Zoologicheskogo instituta RAN*, 2008, Vol. 312, No. 1/2, pp. 145–154 (in Russian), https://doi.org/10.31610/trudyzin/2008.312.1-2.145.
- 2. Aladin N.V., Chida T., Cretaux J.-F., Ermakhanov Z.K., Jollibekov B., Micklin P., Plotnikov I.S., Egorov A. N., Modern problems and possible future of the Aral Sea, *Uchenye zapiski Rossiiskogo Gosudar-stvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2017, No. 48, pp. 41–54 (in Russian).
- 3. Andrulionis N. Yu., Zavyalov P.O., Laboratory studies of main component composition of hyperhaline lakes, *Physical Oceanography*, 2019, Vol. 26, No. 1, pp. 13–31, DOI: 10.22449/1573-160X-2019-1-13-31.
- Andrulionis N. Yu., Zavyalov P. O., Izhitskiy A. S., Modern evolution of the salt composition of the western basin waters of the Aral Sea, *Oceanology*, 2021, Vol. 61, No. 6, pp. 925–935 (in Russian), DOI: 10.31857/ S0030157421060034.
- 5. Aral Sea and the Aral Sea Region, A. Rakhimov (ed.), UNESCO, Paris: Complex Print, 2020, 127 p.
- 6. *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).
- 7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Kravtsova V. I., Satellite monitoring of the Aral Sea, *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2010, Vol. 23, pp. 150–193 (in Russian).
- 8. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Evolution of temperature regime of the Aral Sea during 1982–2009 according to satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmo-sa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 84–92 (in Russian).
- 9. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A., 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.
- Zavialov P.O., Ginzburg A.I., Sapozhnikov F.V., Abdullaev U.R., Ambrosimov A.K., Andreev N.I., Validzhanov R., Ishniyazov D.P., Koldaev A.A., Kudyshkin T.V., Kurbaniyazov A.K., Ni A.A., Petrov M.A., Stroganov O.Yu., Tomashevskaya I.G., Khan V.M., Comprehensive expeditionary research in the western part of the Aral Sea in October 2003, *Oceanology*, 2004, Vol. 44, No. 4, pp. 632–635 (in Russian).
- 11. Zavialov P.O., Arashkevich E.G., Grabovsky A.B., Dikarev S.N., Jalilov G., Evdokimov Yu.V., Kudyshkin T.V., Kurbaniyazov A.K., Kurbaniyazov S.K., Matchanov A.T., Ni A.A., Sapozhnikov F.V., Tomashevskaya I.G., Expedition research in the western and eastern basins of the Aral Sea (October 2005), *Oceanology*, 2006, Vol. 46, No. 6, pp. 946–950 (in Russian).
- 12. Zavyalov P. O., Andrulionis E. E., Arashkevich E. G., Grabovsky A. B., Dikarev S. N., Kudyshkin T. V., Kurbaniyazov A. K., Ni A. A., Sapozhnikov F. V., Expedition research in the western basin of the Aral Sea in September 2006, *Oceanology*, 2008, Vol. 48, No. 4, pp. 648–654 (in Russian).
- 13. Zavyalov P.O., Arashkevich E.G., Bastida I., Ginzburg A.I., Dikarev S.N., Zhitina L.S., Izhitsky A.S., Ishniyazov D.P., Kostianoi 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., Solovev 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).
- 14. *Kompleksnye distantsionnye i nazemnye issledovaniya osushennogo dna Aral'skogo morya* (Comprehensive remote and ground studies of the dried bottom of the Aral Sea), V.A. Dukhovnyi (ed.), Tashkent: NITS MKVK, 2008, 190 p. (in Russian)

- 15. 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).
- Novikova N. M., Ecological and geographical aspects of the Aral Sea crisis. Pt. 1. The development of the Aral Sea problem, its research, evaluation and development activities, *Ecosystems: Ecology and Dynamics*, 2019, Vol. 3, No. 1, pp. 5–66 (in Russian).
- 17. Plotnikov I.S., *Mnogoletnie izmeneniya fauny svobodnozhivushchikh vodnykh bespozvonochnykh Aral'skogo morya* (Long-term changes in the fauna of free-living aquatic invertebrates of the Aral Sea), Saint Petersburg: ZIN RAN, 2016, 168 p. (in Russian).
- Cretaux J.-F., Kouraev A. V., Papa F., Bergé-Nguyen M., Cazenave A., Aladin N., Plotnikov I.S., Evolution of sea level of the Big Aral Sea from satellite altimetry and its implications for water balance, *J. Great Lakes Research*, 2005, Vol. 31(4), pp. 520–534, https://www.researchgate.net/publication/313383226.
- 19. Cretaux J.-F., Létolle R., Calmant S., Investigations on Aral Sea regressions from mirabilite deposits and remote sensing, *Aquatic Geochemistry*, 2009, Vol. 15, pp. 277–291, DOI: 10.1007/s10498-008-9051-2.
- Cretaux J-F., Arsen A., Calmant S., Kouraev A., Vuglinski V., Berge-Nguyen M., Gennero M.-C., Nino F., Abarca Del Rio R., Cazenave A., Maisongrande P., SOLS: A lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data, *Advances in Space Research*, 2011, Vol. 47, Issue 9, pp. 1497–1507, https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.01.004.
- Cretaux J.-F., Kostianoy A., Bergé-Nguyen M., Kouraev A., Present-day water balance of the Aral Sea seen from satellite, In: *Remote Sensing of the Asian Seas*, V. Barale and M. Gade (eds.), 2019, pp. 523–538, https://doi.org/10.1007/978-3-319-94067-0\_29.
- Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Krantsova 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.), Vol. 7, Heidelberg: Springer, 2010, pp. 147–179, DOI: 10.1007/698\_2009\_15.
- 23. 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.
- Izhitskiy A. S., Zavialov P. O., Sapozhnikov P. V., Kirilin G. B., Grossart 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, Art. No. 23906, DOI: 10.1038/ srep23906.
- 25. Izhitskiy A. S., Kirillin G. B., Goncharenko I. V., Kurbaniyazov A. K., Zavialov P. O., The world's largest heliothermal lake newly formed in the Aral Sea basin, *Environmental Research Letters*, 2021, Vol. 16, Art. No. 115009, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2d66.
- Kouraev A. V., Papa F., Mognarda N. M., Buharizine P. I., Cazenave A., Cretaux J.-F., Dozortseva J., Remy F., Sea ice cover in the Caspian and Aral Seas from historical and satellite data, *J. Marine Systems*, 2004, Vol. 47, pp. 89–100, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2003.12.011.
- Kouraev A. V., Kostianov A. G., Lebedev S. A., Ice cover and sea level of the Aral Sea from satellite altimetry and radiometry (1992–2006), *J. Marine Systems*, 2009, Vol. 76, pp. 272–286, DOI: 10.1016/j. jmarsys.2008.03.016.
- 28. Micklin P., The future Aral Sea: hope and despair, *Environmental Earth Sciences*, 2016, Vol. 75, No. 9, pp. 1–15, DOI: 10.1007/s12665-016-5614-5.
- Roget E., Zavialov P., Khan V., Muniz M.A., Geodynamical processes in the channel connecting the two lobes of the Large Aral Sea, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, Vol. 13, pp. 2265–2271, https:// doi.org/10.5194/hess-13-2265-2009.
- 30. *The Aral Sea Environment, The Handbook of Environmental Chemistry*, A.G. Kostianoy, A.N. Kosarev (eds.), Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2010, Vol. 7, 332 p.
- 31. Zavialov P., *Physical Oceanography of the Dying Aral Sea*, Chichester, UK: Springer-Praxis Publ., 2005, 146 p.
- 32. Zavialov P.O., Kostianoy A.G., Emelianov S.V., Ni A.A., Ishniyazov D., Khan V.M., Kudyshkin T.V., Hydrographic survey in the dying Aral Sea, *Geophysical Research Letters*, 2003, Vol. 30, No. 13, Art. No. 1659, DOI: 10.1029/2003GL017427.
- Zavialov P. O., Ni A. A., Ishniyamazov D. P., Kudyshkin T. V., Kurbaniyazov A. K., Mukhamedzhanova D., Ongoing changes in salt composition and dissolved gases in the Aral Sea, *Aquatic Geochemistry*, 2008, Vol. 15, No. 1–2, pp. 263–275, DOI: 10.1007/s10498-008-9057-9.
- 34. Zavialov P.O., Ni A.A., Kudyshkin T.V., Kurbaniyazov A.K., Dikarev S.N., Five years of field hydrographic research in the Large Aral Sea (2002–2006), *J. Marine Systems*, 2009, Vol. 76, pp. 263–271, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.03.013.