

ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ МАЛОГО АРАЛЬСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

А. С. Ижицкий

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: izh@ocean.ru*

В работе исследован термический режим крупнейшего по площади и важнейшего по хозяйственному значению остаточного бассейна Аральского моря – Малого Арала. В основу исследования легли численные эксперименты с использованием одномерной модели океанической турбулентности GOTM. На основе данных о климатической изменчивости в районе исследований за современный и прогнозные периоды проведено три серии численных экспериментов. Первая – моделирование современного термического режима Малого Аральского моря, вторая и третья серии – моделирование будущей изменчивости термического режима вод под воздействием прогностических климатических сценариев. Согласно полученным модельным оценкам в рамках двух прогностических сценариев, в ближайшую декаду в Малом Аральском море можно ожидать ослабление процессов вертикального перемешивания, которое повлечет за собой усиление термической стратификации в летний период, что будет сопровождаться значительным снижением придонной температуры относительно современного периода и накоплением тепла преимущественно в верхних метрах водной толщи. Приведены соответствующие количественные и качественные оценки. Также дана оценка влиянию возможных изменений уровня поверхности водоема на его термический режим.

Ключевые слова: температура, стратификация, перемешивание вод, прогноз, климатические сценарии, численное моделирование, GOTM, Аральское море

Введение

В условиях меняющегося климата в морях и внутренних водоемах мира наблюдаются тенденции к увеличению температуры вод, усилению вертикальной стратификации и колебаний уровня поверхности (Domingues et al., 2008). Все это оказывает негативное влияние на состояние экосистем водоемов, прежде всего на водные и биологические ресурсы (Cheung et al., 2013). Особенно явно эти изменения выражены в замкнутых водоемах. К примеру, повышение температуры воздуха приводит к сокращению периода ледостава в озерах (Kainz et al., 2017), увеличению периода стратификации (Ficker et al., 2017) и росту устойчивости вод (Hadley et al., 2014). Снижение интенсивности ветрового воздействия может приводить к увеличению продолжительности и устойчивости стратификации (Woolway et al., 2017). Наконец, наиболее очевидным последствием изменений климата является увеличение поверхностной температуры озер, что, в совокупности с вышеперечисленными факторами,

может вызвать сдвиг или перестройку режима вертикального перемешивания вод (Kirillin, 2010; Shatwell et al., 2019).

Особенно остро влияют климатические изменения и антропогенные воздействия на водоемы аридной зоны (Wurtsbaugh et al., 2017). Ярким примером этому служит Аральское море – бессточное озеро в Средней Азии, некогда занимавшее 4-е место по площади среди всех озер мира и к настоящему моменту потерявшее более 90 % объема своих вод (Завьялов и др., 2012; Гинзбург и др., 2022). В процессе обмеления Аральское море разделилось на несколько водоемов, связанных между собой эпизодическими событиями водообмена и обладающих различным физическим режимом вод и биологическими особенностями (Izhitskiy et al., 2016; Izhitskaya et al., 2019). После разделения каждый из этих водоемов продолжал претерпевать дальнейшую изменчивость физического режима. Так, западный бассейн Большого Арала долгое время характеризовался выраженной соленостной стратификацией, подавлявшей процессы вертикального перемешивания, что приводило к формированию температурной инверсии в придонных слоях (Zavialov et al., 2003; Izhitskiy et al., 2014a, 2014b). Впоследствии вертикальный градиент солености постепенно выравнивался (Андрулионис и др., 2021), что привело к интенсификации сезонного перемешивания вод и исчезновению температурной инверсии в придонном слое. В обособленном от западного бассейна Большого Арала заливе Чернышева сформировался экстремально резкий вертикальный градиент плотности, обусловивший становление в этом водоеме меромиктического режима перемешивания вод и формирование подповерхностного максимума температуры (Izhitskiy et al., 2021). Малое Аральское море с момента отделения от Большого Арала получало пресноводный приток из реки Сырдарья, уровень водоема был зарегулирован при постройке Кокаральской плотины, доступные данные наблюдений не выявляли наличия устойчивых вертикальных градиентов солености (Izhitskiy et al., 2016; Андрулионис и др., 2022), физический режим водоема наиболее близок к наблюдавшемуся в Аральском море до начала обмеления. Таким образом, проведенные в последние годы полевые исследования остаточных водоемов Аральского моря позволили выявить, насколько сильно может трансформироваться физический режим этих водоемов в результате антропогенного вмешательства и происходящих климатических изменений. Недостаточно изученным остается вопрос будущей трансформации режима этих водоемов в контексте изменений климата. Это особенно актуально для относительно стабилизированного Малого Аральского моря, учитывая его растущее рыбохозяйственное значение.

Численное моделирование является ключевым инструментом, позволяющим оценить отклик водоемов на климатическую изменчивость. Для этого широко используются одномерные модели океана и озер, в связи с их вычислительной эффективностью и реалистичностью воспроизведения профиля температуры. Так, множество работ посвящено изучению отклика температурного режима озер на различные глобальные или региональные климатические сценарии (например, Kirillin, 2010; Ladwig et al., 2018; Shatwell et al., 2019; Woolway and Merchant, 2019). В данной работе поставлена цель, во-первых, получить устойчивую модельную конфигурацию

изменчивости термического режима Малого Аральского моря в современный период и, во-вторых, на ее основе исследовать прогностические сценарии отклика термического режима вод Малого Аральского моря на изменчивость внешнего воздействия на ближайшую декаду (до 2030 г.).

Материалы и методы

Район исследований

Малое Аральское море – солоноватый водоем в северной части Аральского моря, питаемый стоком реки Сырдарья (рисунок 1а). Отток воды в сторону Большого Арала через пролив Берга в юго-восточной части водоема зарегулирован Кокаральской плотиной. При полном наполнении водоема в обусловленных плотиной границах объем его вод составляет около 27 км^3 , площадь – около 3250 км^2 . Максимальная глубина достигает значений около 15 м при преобладающих значениях около 5–10 м. Впрочем, морфометрическим параметрам и величине объема вод Малого Арала свойственна как внутригодовая, так и межгодовая изменчивость, определяемая значительным непостоянством компонент водного баланса (Izhitskiy and Ayzel, 2023). В данной статье рассматривается западная часть Малого Арала – залив Шевченко (рисунок 1б). Залив Шевченко наименее подвержен распресняющему влиянию Сырдарьи, величины минерализации его вод колеблются около 10 г/кг.

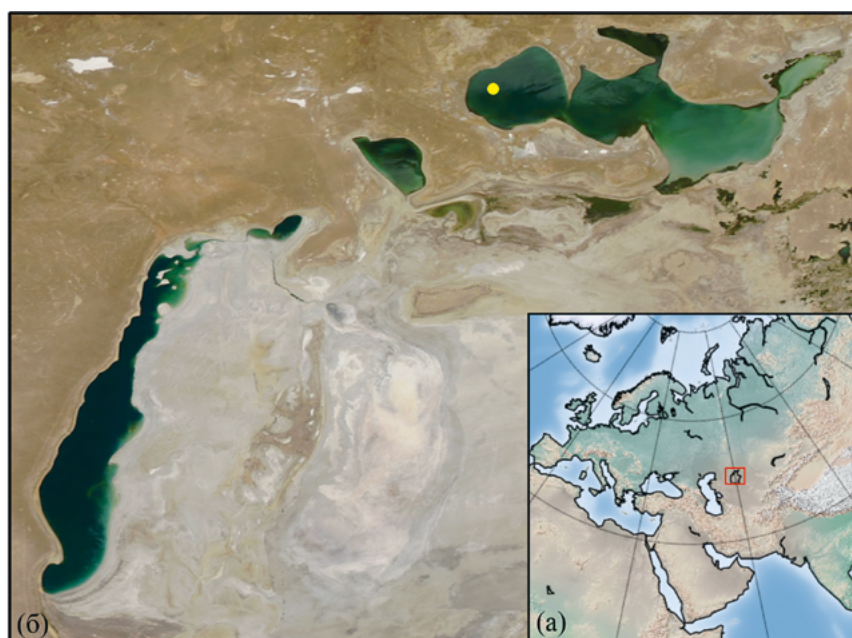


Рис. 1 – Изучаемый район: а) схематическое отображение Аральского моря на карте мира; б) спутниковый снимок остаточных водоемов Аральского моря *MODIS Aqua* от 09.07.2019, желтым кругом показано положение точки проведения модельных расчетов в заливе Шевченко Малого Аральского моря

Сценарии экспериментов

В соответствии с поставленными целями, в работе проведены и проанализированы три серии модельных экспериментов продолжительностью 9 лет каждая. Первая серия экспериментов охватывала исторический период (2011–2019 гг.), в качестве атмосферного воздействия использовались данные климатического реанализа (см. ниже). Задача в рамках первой серии экспериментов – калибровка модели, валидация модельных результатов и выявление современных особенностей внутригодовой и межгодовой изменчивостей термического режима Малого Аральского моря. На основе выработанной модельной конфигурации проводились прогностические эксперименты в рамках второй и третьей серий, охвативших период с 2021 по 2029 гг. В рамках этих серий исследовались будущие изменения термического режима водоема на внутригодовом и межгодовом масштабах в зависимости от возможной вариации климатического форсинга. Различия между второй и третьей сериями проведенных экспериментов обуславливались выбором альтернативных сценариев будущей климатической изменчивости. Более подробное описание выбранных данных внешнего воздействия и использованной модели дано в следующих подразделах.

Входные данные

В качестве условий внешнего воздействия были использованы современные данные об изменчивости метеорологических параметров, подготовленные и опубликованные в рамках проекта ISIMIP (www.isimip.org). Так, оценки изменчивости метеорологических параметров на историческом периоде (1979–2019) были взяты из климатического реанализа W5E5 v2.0 (Lange et al., 2021). Для прогнозных расчетов использовалась возможная будущая изменчивость метеорологических параметров W5E5-SSP (2015–2100) (Lange and Büchner, 2021), смоделированная на основе климатической модели IPSL-CM6A-LR в рамках глобальных социально-экономических сценариев развития (SSP) эксперимента CMIP6 (O'Neill et al., 2016), подготовленного к последнему отчету IPCC (Pörtner et al., 2022). В нашей работе рассмотрено два альтернативных сценария будущих климатических изменений. Первый – оптимистический сценарий SSP1-2.6, подразумевающий в числе прочего удерживание роста глобального потепления ниже 2 °C к 2100 г. относительно преиндустриального уровня. Второй сценарий – один из наиболее неблагоприятных сценариев SSP3-7.0, подразумевающий более высокие и резкие темпы роста глобального потепления к 2100 г. (Riahi et al., 2017). Используемые массивы атмосферных данных имеют глобальное покрытие с пространственным разрешением сетки 0.5 градуса и суточным временным шагом, подвергнуты процедурам корректировки систематических отклонений и статистическим методам увеличения пространственного разрешения, реанализ и прогнозны сценарии пространственно скорректированы между собой (Lange, 2019). Для проводимых в представляемой работе модельных расчетов были взяты данные для точки 46.54° с. ш. и 60.05° в. д., совпадающей с местоположением реализующихся

в последние годы полевых исследований в заливе Шевченко Малого Арала. Полученные в ходе полевых работ данные наблюдений (Izhitskiy and Kirillin, in prep; Kirillin et al., 2023) были использованы в процессе валидации модели.

Модель

В работе использована общая модель океанической турбулентности (General Ocean Turbulence Model или GOTM) – одномерная модель водной толщи, воспроизводящая основные гидродинамические и термодинамические процессы, участвующие в вертикальном перемешивании природных водоемов (Burchard et al., 1999; Umlauf and Burchard, 2005). GOTM была разработана для моделирования процессов турбулентного перемешивания в океане, однако впоследствии также использовалась при моделировании гидродинамических процессов в озерах (например, Ayala et al., 2020), в том числе в рамках проекта ISIMIP. В численных экспериментах использовалась версия модели GOTM 5.0. Для запуска модели необходимы следующие метеорологические параметры, использовавшиеся в экспериментах как внешнее атмосферное воздействие: приземная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), приземная скорость ветра (м/с), нисходящая на поверхность Земли коротковолновая радиация ($\text{Вт}/\text{м}^2$), приземное атмосферное давление (гПа), приземная относительная влажность воздуха (%) и облачный покров (от 0 до 1). Значения всех перечисленных параметров доступны в использованных климатических массивах помимо облачного покрова, который был пересчитан из значений нисходящей коротковолновой радиации по методике (Martin and McCutcheon, 1998). Пересчет может вносить дополнительную погрешность в оценку баланса длинноволновой радиации, но используется в ряде численных экспериментов (Ayala et al., 2020) в случае неимения других оценок облачности. В качестве начальных условий использовались основанные на данных натуральных наблюдений однородные профили температуры 18°C и солёности $10.5 \text{ г}/\text{кг}$, заданная глубина моря в расчетной точке – 12 м. Адвективный перенос вод в экспериментах не учитывался, положение уровня поверхности моря считалось постоянным. Модель запускалась с суточным временным шагом, шаг по вертикали составлял 0.5 м. Перед началом каждого расчетного 9-летнего сценария выполнялся предварительный 1 год модельных расчетов. Результаты экспериментов сохранялись в NetCDF файлы, последующая их обработка, интерполяция, визуализация и анализ проводились с использованием написанных на языке Python программ.

Результаты

Смоделированные суточные вертикальные профили температуры Малого Аральского моря для исторического (2011–2019 гг.) и двух прогностических периодов (2021–2029) представлены на рисунке 2. Калибровка модели GOTM производилась на историческом периоде для минимизации разницы между смоделированными и

измеренными значениями придонной и поверхностной температуры воды. В процессе калибровки менялись следующие параметры конфигурации модели: коэффициент ветрового воздействия (*wind_factor*), коэффициент влияния коротковолновой радиации (*swr_factor*) и метод вычисления коэффициента экстинкции радиации (*extinct_method*). Валидация смоделированных суточных значений придонной и поверхностной температуры проводилась на годовом отрезке с 20 сентября 2018 г. по 1 сентября 2019 г. – единственном отрезке, на котором имелись непрерывные данные натуральных наблюдений, выполненные автономной заякоренной буйковой станцией (Izhitskiy and Kirillin, in prep; Kirillin et al., 2023).

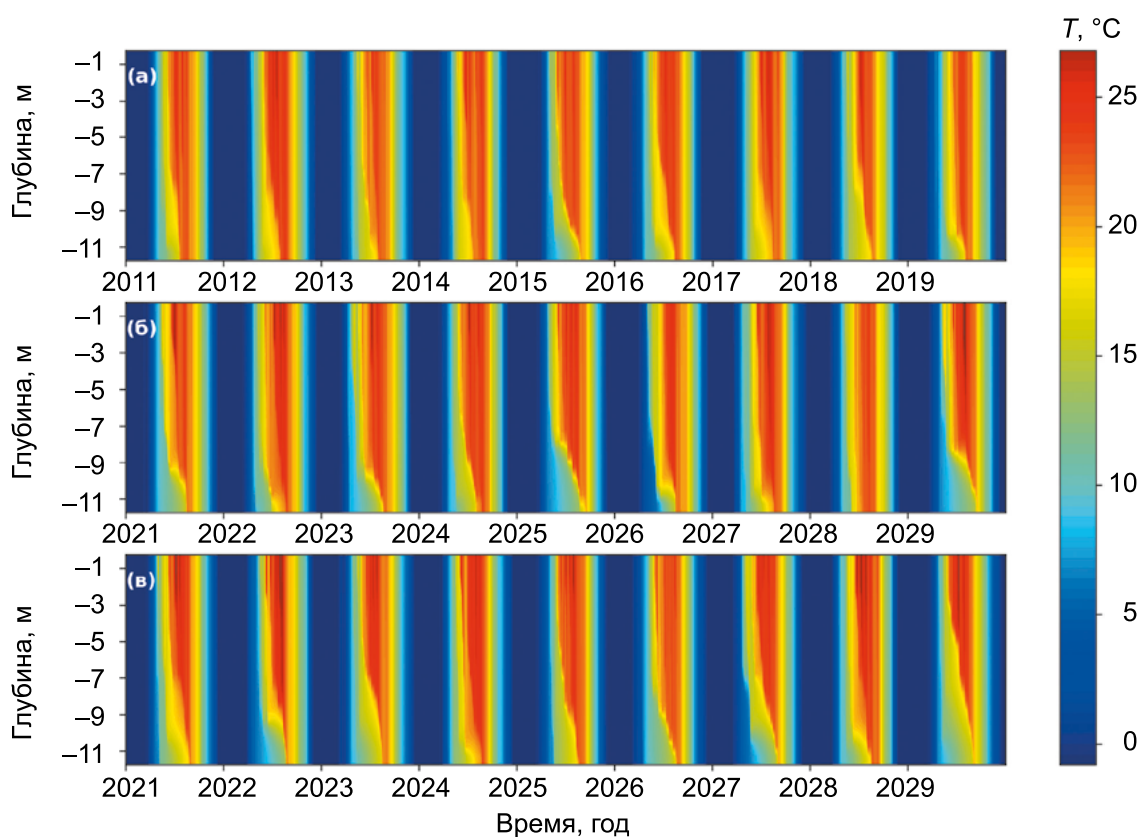


Рис. 2 – Временная изменчивость вертикального профиля температуры воды в заливе Шевченко Малого Аральского моря по результатам моделирования GOTM: **а)** исторический период 2011–2019 гг. под атмосферным воздействием по данным климатического реанализа; **б)** прогностический период 2021–2029 гг. под атмосферным воздействием в рамках сценария SSP1-2.6; **в)** прогностический период 2021–2029 гг. под атмосферным воздействием в рамках сценария SSP3-7.0

Результаты валидации смоделированных значений поверхностной и придонной температур представлены на рисунке 3. В целом, модель достаточно достоверно воспроизводит данные измерений на годовом цикле 2018–2019 гг. Тем не менее, в период осенне-зимнего выхолаживания модель занижала значения как поверхностной, так и придонной температуры (рисунки 3а, б). В период весенне-летнего прогрева модель также занижала температуру поверхностного слоя (рисунок 3а). В придонном слое

отмечались выраженные колебания значений температуры по данным наблюдений (рисунок 3б). Автономная буйковая станция находилась на склоне центральной котловины залива, поэтому в нижней части перемешанной и прогретой водной толщи прослеживалось взаимодействие с располагавшимся примерно на этих же глубинах термоклинном более глубокой части залива, имевшее, по-видимому, внутриволновое происхождение. С другой стороны, модельные значения придонной температуры хорошо отразили процессы разрушения летней вертикальной температурной стратификации на глубине 12 м вследствие ветрового воздействия, что было зафиксировано по натурным данным. Это является принципиально важным моментом для последующих построений прогностических оценок изменчивости термического режима водоема. При выбранной конфигурации модельных параметров на валидационном периоде коэффициент детерминации для значений поверхностной температуры составил 0.97 (рисунок 3в), для значений придонной температуры – 0.95 (рисунок 3г).

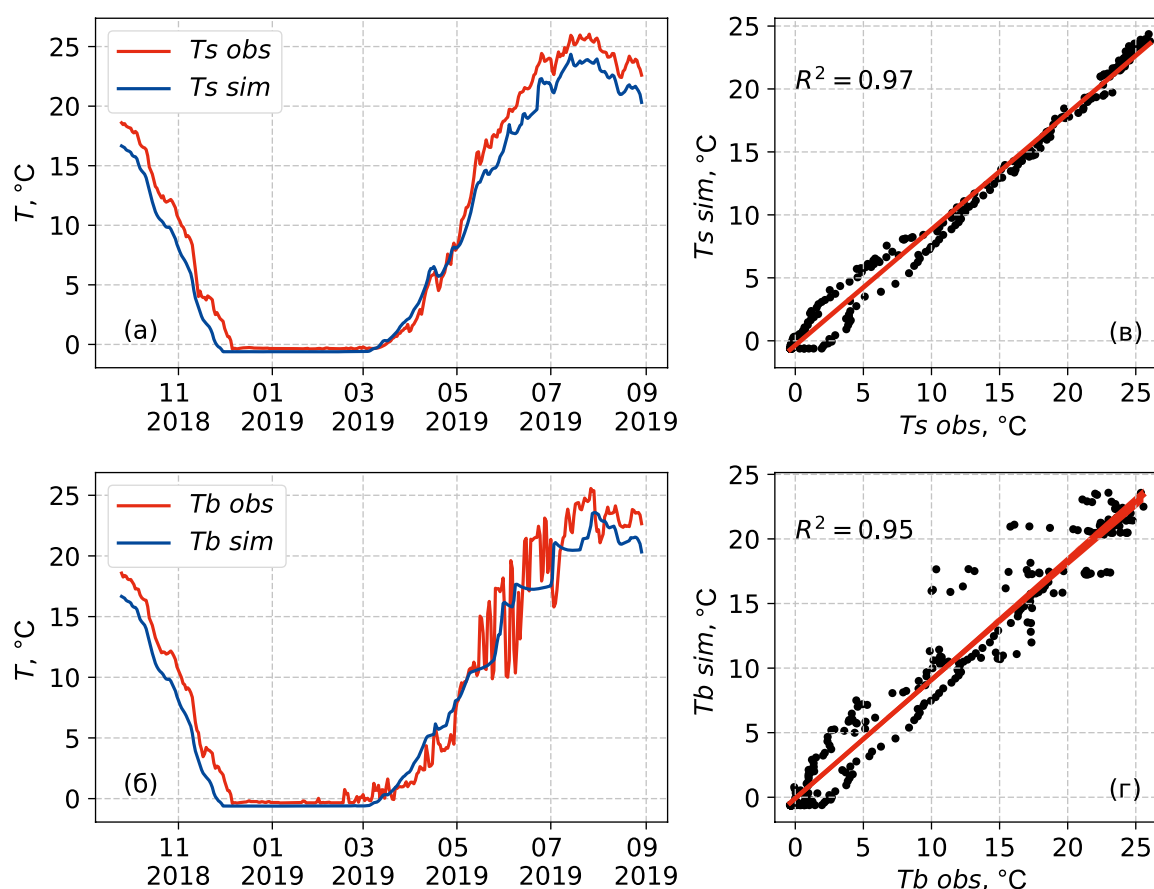


Рис. 3 – Итоги валидации результатов моделирования на отрезке с 20 сентября 2018 г. по 1 сентября 2019 г.:

- а)** изменчивость поверхностной температуры по данным наблюдений (красная линия) и по данным модели (синяя линия);
- б)** изменчивость придонной температуры по данным наблюдений (красная линия) и по данным модели (синяя линия);
- в)** линейная регрессия и коэффициент детерминации по значениям поверхностной температуры;
- г)** линейная регрессия и коэффициент детерминации по значениям придонной температуры

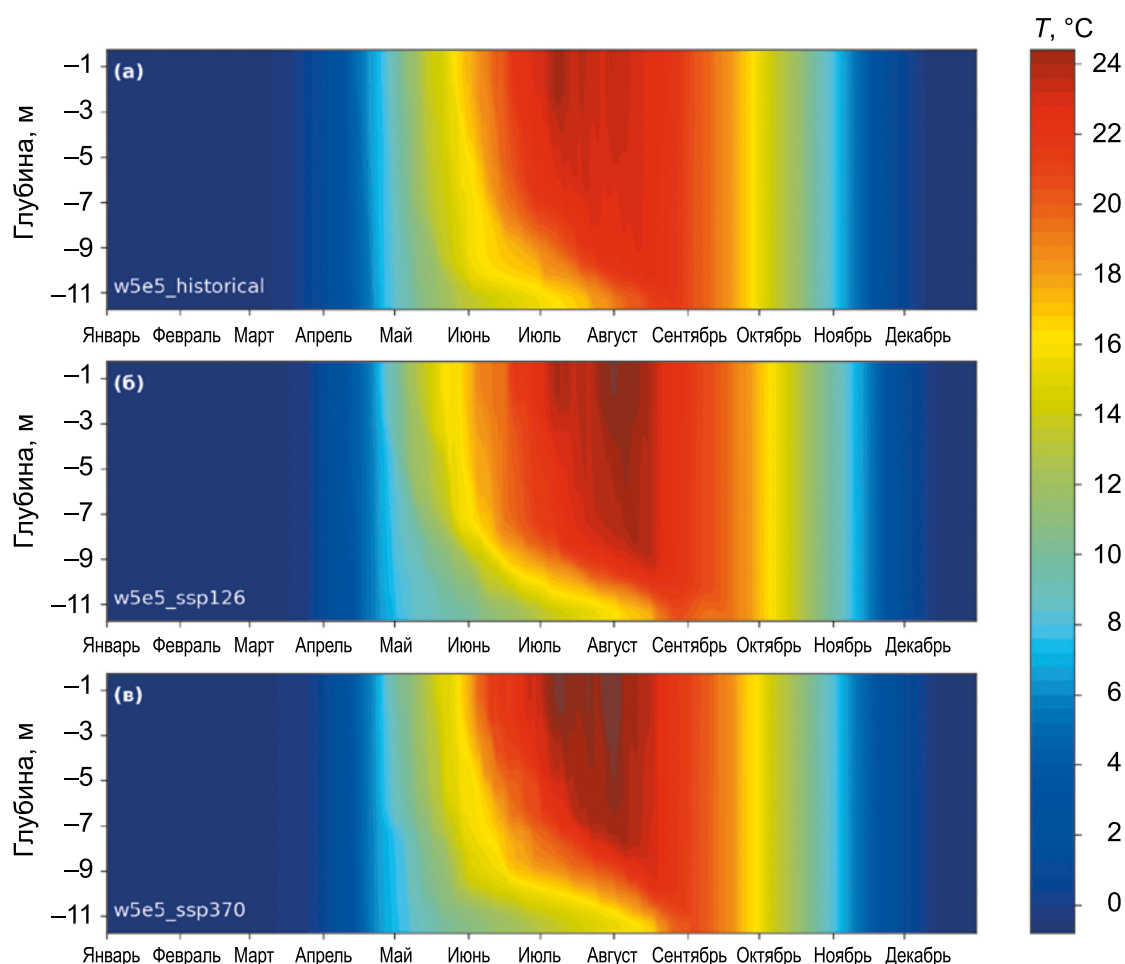


Рис. 4 – Годовой термический цикл вод в заливе Шевченко Малого Аральского моря по результатам моделирования GOTM, полученный осреднением суточных профилей температуры на периодах:
а) исторический период 2011–2019 гг. под атмосферным воздействием по данным климатического реанализа; **б)** прогностический период 2021–2029 гг. под атмосферным воздействием в рамках сценария SSP1-2.6; **в)** прогностический период 2021–2029 гг. под атмосферным воздействием в рамках сценария SSP3-7.0

Подобранная конфигурация модельных параметров была использована для воспроизведения изменчивости термического режима Малого Аральского моря на прогностическом отрезке 2021–2029 (рисунки 2б, в) в отличающихся условиях атмосферного воздействия. Сравнение прогностических оценок изменчивости термического режима в различных сценариях с современной изменчивостью на историческом периоде позволяет качественно и количественно оценить характер и степень отклика режима вертикального перемешивания водоема на меняющееся внешнее воздействие. Модельные профили температуры для Малого Аральского моря на историческом (рисунок 4а) и двух прогностических (рисунки 4б, в) периодах приведены на годовых временных разрезах. Эти разрезы были получены осреднением суточных вертикальных профилей температуры для каждого из трех

девятилетних сценарных периодов. Такие среднемноголетние годовые разрезы дают наиболее ясное визуальное представление о том, как изменится годовой термический цикл водоема в будущем относительно современного состояния.

На основе полученных модельных оценок были выявлены следующие различия в среднегодовом термическом цикле вод в заливе Шевченко Малого Аральского моря. Так, температура поверхностного слоя в период формирования летней стратификации (май–август) в среднем имела значения 20.0 °С, в то время на прогностическом периоде в рамках сценария SSP1-2.6 эти значения были выше на 0.4 °С. Наибольший прогрев поверхностного слоя наблюдался на прогностическом периоде в рамках сценария SSP3-7.0, средние значения – 20.7 °С. Напротив, средняя придонная температура достигала максимальных показателей на историческом периоде (17.7 °С), в то время как на прогностических периодах ее средние значения были ощутимо (более, чем на 4 °С) ниже и достигали отметок 13.2 и 13.1 °С. Несмотря на столь существенную разницу в придонных температурах между сценариями, значения средней температуры по профилю отличались меньше. Так, средняя температура по профилю на историческом периоде достигала отметки 18.7 °С, на прогностическом периоде в рамках сценария SSP1-2.6 – 18.4 °С, на прогностическом периоде в рамках сценария SSP3-7.0 – 18.3 °С. Рассчитанные значения описанных средних температур приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения поверхностной температуры, придонной температуры и средней температуры по профилю, осредненные на периоде май–август для каждого из модельных сценариев

Параметр	2011–2019	2021–2029 SSP1-2.6	2021–2029 SSP3-7.0
$T_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	20.0	20.4	20.7
$T_{\text{дно}}, ^\circ\text{C}$	17.7	13.2	13.1
$T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	18.7	18.4	18.3

Разность между средними поверхностными и придонными температурами как количественная характеристика термической стратификации в период летнего прогрева наглядно представлена на рисунке 5. Наименьшие значения разности температур наблюдались на историческом периоде, составляя около 1 °С в начале мая в период формирования летней стратификации, достигая максимума в первой половине июля (8 °С) и нулевых значений к концу августа. Иная картина наблюдалась в рамках двух прогностических сценариев. Так, в рамках сценария SSP1-2.6 разность между поверхностными и придонными температурами увеличивалась значительно быстрее в мае, составляя уже к началу лета около 8 °С и выше 10 °С на пике в начале июля. В рамках прогностического сценария SSP3-7.0 разность между поверхностными и придонными температурами в мае росла не так быстро, как в рамках сценария SSP1-2.6, однако после начала июня и до конца августа ее

значения оказались наибольшими среди трех сценариев, на пике в первой половине июля превышая 11 °С. Стоит также отметить более длительное присутствие высоких значений разности между поверхностными и придонными температурами, наблюдавшееся в рамках прогностических сценариев по сравнению с историческим периодом. На историческом периоде значения разности температур постепенно снижаются, пройдя пик в начале июля, и исчезают к концу августа, в то время как на обоих прогностических периодах разность температур сохраняет высокие значения на протяжении всего лета, начиная резкое снижение со второй половины августа, но исчезая полностью к концу месяца.

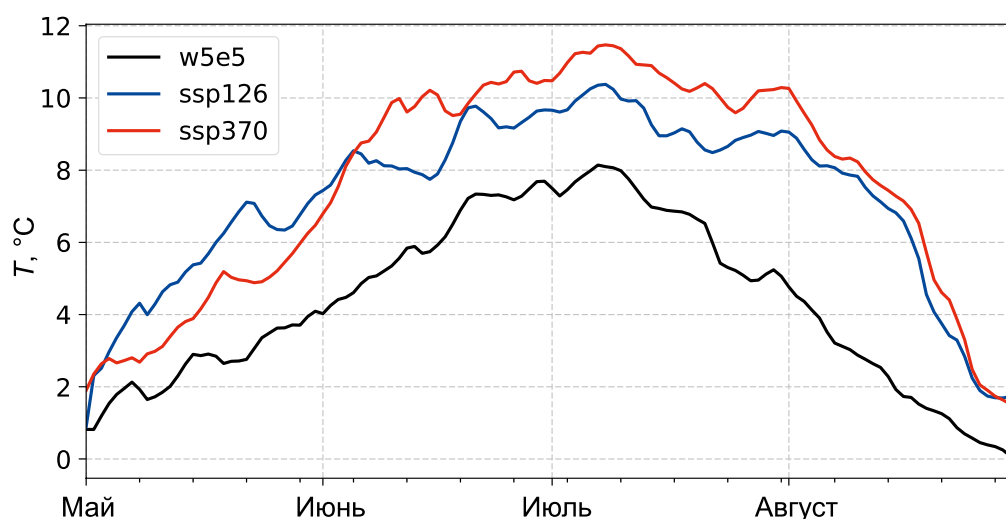


Рис. 5 – Разница между поверхностной и придонной температурой (май–август), осредненная на историческом (черный цвет) и двух прогностических периодах (синий и красный цвета)

Особенности летней стратификации Малого Аральского моря в период максимальной разницы поверхностных и придонных температур хорошо иллюстрируются качественной формой средних июльских вертикальных профилей температуры для каждого из сценариев (рисунок 6а). Наиболее плавный характер вертикального градиента температуры был характерен для исторического периода, здесь же наблюдался минимальный разброс температур. Для июльского профиля по сценарию SSP1-2.6 был характерен схожий характер прогрева в верхнем слое с некоторым увеличением температуры у поверхности, однако ниже 8 м начинался выраженный термоклин с достаточно высоким вертикальным градиентом и значительно более низкой температурой в придонном слое. Схожая картина наблюдалась и на среднем июльском профиле по сценарию SSP3-7.0. Однако уже в верхнем слое водной толщи присутствовал ярко выраженный вертикальный градиент температуры наряду с более высоким прогревом вод у поверхности по сравнению с двумя другими сценариями. Резкий термоклин начинался уже с 7 м, температура придонного слоя была несколько ниже, чем на профиле сценария SSP1-2.6.

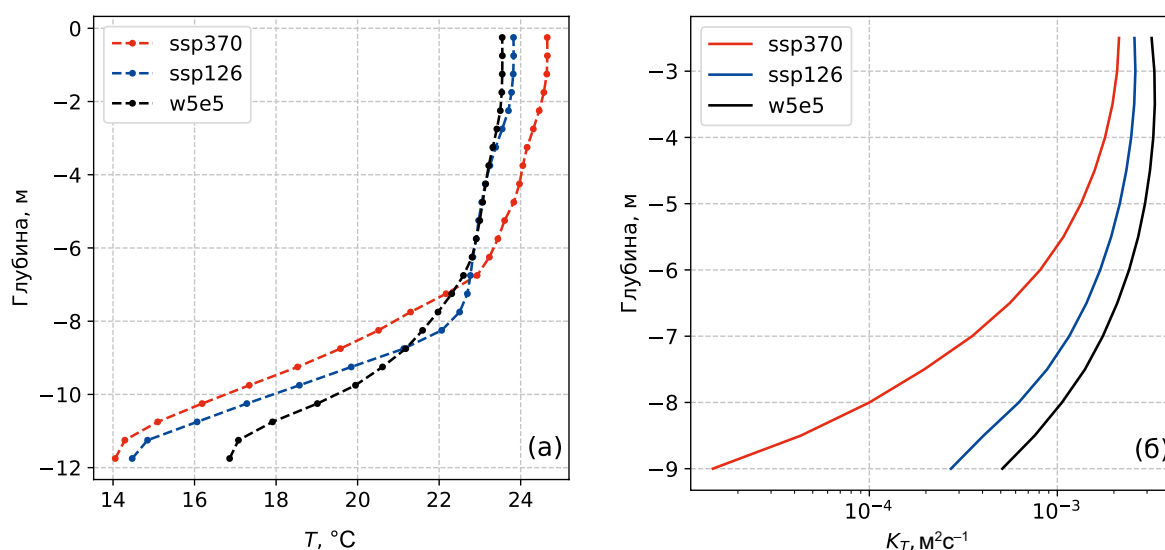


Рис. 6 – Результаты численных экспериментов, осредненные для июля на историческом (черный цвет) и двух прогностических периодах (синий и красный цвета):
а) вертикальные профили температуры; б) вертикальные профили коэффициента турбулентного обмена теплом

Анализ результатов численных экспериментов позволяет выявить несколько основных особенностей отклика термического режима залива Шевченко Малого Аральского моря на прогнозируемую климатическую изменчивость. Для исторического сценария в среднем характерна менее выраженная изменчивость температуры по вертикальному профилю в период установления летней стратификации с наименьшей разницей между поверхностным и придонным слоями. Для прогнозных сценариев отмечались несколько более высокие температуры в поверхностном слое при значительно более низких придонных температурах. При этом средняя температура по вертикальному профилю между сценариями отличалась не так значительно. Этот эффект можно объяснить наблюдающимся общим усилением стратификации, характерным для обоих прогнозных сценариев. В результате верхняя часть профиля в целом оказывалась более прогретой, формировался резкий термоклин в придонном слое. Об этом свидетельствуют модельные оценки среднего за июль профиля коэффициента вертикального турбулентного теплообмена, приведенные на рисунке 6б. Наиболее высокие значения коэффициента теплообмена были характерны для исторического сценария и были ниже для обоих прогнозных сценариев. Таким образом, при ослаблении процессов вертикального перемешивания на прогнозных сценариях нагрев менее равномерно распределялся по вертикальному профилю, формируя значительно более высокие градиенты и, как следствие, более устойчивую и продолжительную термическую стратификацию относительно исторического сценария при наличии весьма незначительной тенденции к потеплению вод водоема в целом. При этом эксперименты в рамках двух прогностических сценариев показали качественно схожие результаты с отличием в величине вертикальных градиентов температуры на профиле.

В последние годы в других остаточных водоемах Аральского моря наблюдались ярко выраженные процессы усиления или ослабления стратификации, приводившие в некоторых случаях к установлению меромиктического режима (Izhitskiy et al., 2021) или, наоборот, приводившие в течение нескольких лет к нарушению устойчивой соленостной стратификации (Андрулионис и др., 2021). Основным вкладом в эти процессы вносила изменчивость объемов межбассейнового обмена, при которой воды разной минерализации формировали в водоемах вертикальные градиенты плотности, тем самым определяя характер вертикального перемешивания. Иная ситуация рассмотрена в представленной работе. На основе проведенных экспериментов отдельно выявлен вклад климатической изменчивости в возможные изменения термического режима и стратификации вод, показано и оценено ее вероятное усиление без учета влияния иных критичных для Малого Аральского моря факторов, таких, как изменчивость уровня поверхности и минерализации вод. Тем временем влияние климатической изменчивости на объемы поступающих в Малый Арал речных вод (Ayzel and Izhitskiy, 2019; Ayzel and Izhitskiy, 2019) и колебания уровня его поверхности (Izhitskiy and Ayzel, 2023) будут только нарастать в XXI столетии. В связи с этим, на основе полученных в работе результатов можно предположить еще большее усиление вертикальной термической стратификации и вертикальных градиентов температуры в случае поднятия среднего уровня поверхности водоема в допустимых плотинной пределах. С другой стороны, в случае более вероятного падения уровня поверхности Малый Арал будет испытывать тенденцию к потеплению среднего вертикального профиля температуры.

Заключение

Цель выполненной работы – подготовка устойчивой конфигурации модели термического режима Малого Аральского моря, исследование на этой основе особенностей его изменчивости в современный период и построение прогностических сценариев отклика термического режима водоема на изменчивость внешнего воздействия в ближайшую декаду (до 2030 г.). Для решения поставленной цели была использована численная одномерная модель океанической турбулентности GOTM, подготовлены данные о климатической изменчивости в районе исследований за современный и прогностические периоды, проведено 3 серии численных экспериментов. Первая – моделирование современного термического режима Малого Аральского моря под воздействием климатического реанализа, вторая и третья серии – моделирование будущей изменчивости термического режима под воздействием прогностических климатических сценариев. Согласно полученным модельным оценкам в рамках двух прогностических сценариев, в ближайшую декаду в Малом Аральском море ожидается ослабление процессов вертикального перемешивания, которое приведет к усилению термической стратификации в летний период, что будет сопровождаться значительным снижением придонных температур относительно современного периода и накоплением тепла

преимущественно в верхних 8–10 метрах водной толщи. Возможная изменчивость уровня поверхности водоема и, как следствие, его глубин, может оказывать значительное влияние на этот процесс, еще больше изолируя придонный слой от взаимодействия с вышележащими слоями или, наоборот, приводя к общему потеплению водной толщи.

Благодарности. Автор выражает благодарность проекту ISIMIP за возможность свободного использования данных по климатической изменчивости. Автор также благодарит двух рецензентов рукописи статьи за ценные замечания, позволившие улучшить работу. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-77-00088, <https://rscf.ru/project/21-77-00088/>.

Список литературы

1. 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. <https://doi.org/10.31857/S0030157421060034>.
2. Андрулионис Н. Ю., Завьялов П. О., Ижицкий А. С. Современная эволюция солевого состава остаточных бассейнов Аральского моря // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 1. С. 41–58. <https://doi.org/10.31857/S0030157422010026>.
3. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А., Ижицкий А. С., Соловьев Д. М. Динамика высыхания западного бассейна Большого Аральского моря по спутниковым данным (2002–2021) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. №. 5. С. 246. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263>.
4. Завьялов П. О., Арашкевич Е. Г., Бастида И., Гинзбург А. И., Дикарев С. Н., Житина Л. С., Ижицкий А. С., Ишниязов Д. П., Костяной А. Г., Кравцова В. И., Кудышкин Т. В., Курбаниязов А. К., Ни А. А., Никишина А. Б., Петров М. А., Сажин А. Ф., Сапожников Ф. В., Соловьев Д. М., Хан В. М., Шеремет Н. А. Большое Аральское море в начале XXI века: физика, биология, химия. М.: Наука, 2012. 228 с.
5. 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*. 2014а. Т. 54. №. 4. С. 414–425.
6. Ayala A. I., Moras S., Pierson D. C. Simulations of future changes in thermal structure of Lake Erken: proof of concept for ISIMIP2b lake sector local simulation strategy // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020. Vol. 24. No. 6. P. 3311–3330.
7. Ayzel G. V., Izhitskiy A. S. Coupling physically based and data-driven models for assessing freshwater inflow into the Small Aral Sea // *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. 2018. Vol. 379. P. 151–158.
8. Ayzel G. V., Izhitskiy A. S. Climate change impact assessment on freshwater inflow into the Small Aral Sea // *Water*. 2019. Vol. 11. No. 11. P. 2377.
9. Burchard H., Bolding K., Villarreal M. R. GOTM. a General Ocean Turbulence Model. Theory, implementation and test cases, Technical Report EUR 18745 EN, European Commission, 1999.
10. Cheung W. W. L., Watson R., Pauly D. Signature of ocean warming in global fisheries catch // *Nature*. 2013. Vol. 497. No. 7449. P. 365–368.
11. Domingues C. M. et al. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise // *Nature*. 2008. Vol. 453. No. 7198. P. 1090–1093.

12. *Ficker H., Luger M., Gassner H.* From dimictic to monomictic: Empirical evidence of thermal regime transitions in three deep alpine lakes in Austria induced by climate change // *Freshwater Biology*. 2017. Vol. 62. No. 8. P. 1335–1345. <https://doi.org/10.1111/fwb.12946>.
13. *Hadley K. R., Paterson A. M., Stainsby E. A., Michelutti N., Yao H., Rusak J. A., Ingram R., McConnell C., Smol J. P.* Climate warming alters thermal stability but not stratification phenology in a small north-temperature lake // *Hydrological Processes*. 2014. Vol. 28. No. 26. P. 6309–6319. <https://doi.org/10.1002/hyp.10120>.
14. *Izhitskaya E. S., Egorov A. V., Zavialov P. O., Yakushev E. V., Izhitskiy A. S.* Dissolved methane in the residual basins of the Aral Sea // *Environmental Research Letters*. 2019. Vol. 14. No. 6. P. 065005.
15. *Izhitskiy A. S. et al.* On thermohaline structure and circulation of the Western Large Aral Sea from 2009 to 2011: Observations and modeling // *Journal of Marine Systems*. 2014b. Vol. 129. P. 234–247.
16. *Izhitskiy A. S. et al.* Present state of the Aral Sea: diverging physical and biological characteristics of the residual basins // *Scientific reports*. 2016. Vol. 6. No. 1. P. 1–9.
17. *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. No. 11. P. 115009.
18. *Izhitskiy A. S., Ayzel G. V.* Water Balance of the Regulated Arid Lake as an Indicator of Climate Change and Anthropogenic Impact: The North (Small) Aral Sea Case Study // *Water*. 2023. Vol. 15. No. 8. P. 1464.
19. *Kainz M. J., Ptacnik R., Rasconi S., Hager H. H.* Irregular changes in lake surface water temperature and ice cover in subalpine Lake Lunz, Austria // *Inland Waters*. 2017. Vol. 7. No. 1. P. 27–33. <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1294332>.
20. *Kirillin G. B.* Modeling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // *Boreal Env. Res.* 2010. Vol. 15. P. 279–293.
21. *Kirillin G., Izhitskiy A., Kurbaniyazov A.* Thermal conditions and lake metabolism in the ice-covered North Aral Sea, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr. 2023. EGU23-7068. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-7068>.
22. *Ladwig R., Furusato E., Kirillin G., Hinkelmann R., Hupfer M.* Climate change demands adaptative management of urban lakes: model-based assessment of management scenarios for lake Tegiel (Berlin, Germany) // *Water*. 2018. Vol. 10. No. 2. P. 186. <https://doi.org/10.3390/w10020186>.
23. *Lange S.* Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0) // *Geoscientific Model Development*. 2019. Vol. 12. No. 7. P. 3055–3070.
24. *Lange S., Menz C., Gleixner S., Cucchi M., Weedon G., Amici A., Bellouin N., Schmied H., Hersbach H., Buontempo C., Cagnazzo C.* WFDE5 over land merged with ERA5 over the ocean (W5E5 v2.0). 2021. ISIMIP Repository. <https://doi.org/10.48364/ISIMIP.342217>.
25. *Lange S., Matthias Büchner M.* ISIMIP3b bias-adjusted atmospheric climate input data (v1.1). 2021. ISIMIP Repository. <https://doi.org/10.48364/ISIMIP.842396.1>.
26. *Martin J. L., McCutcheon S. C.* Hydrodynamics and transport for water quality modeling. CRC press, 1998.
27. *O'Neill B. C. et al.* The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geoscientific Model Development*. 2016. Vol. 9. No. 9. P. 3461–3482.
28. *Pörtner H. O. et al.* Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Geneva, Switzerland: IPCC: 2022. 3056 p.
29. *Riahi K. et al.* The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview // *Global environmental change*. 2017. Vol. 42. P. 153–168.

30. *Shatwell T., Thiery W. Kirillin G.* Future projections of temperature and mixing regime of European temperate lakes // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019. Vol. 23. No. 3. P. 1533–1551. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1533-2019>.
31. *Umlauf L., Burchard H.* Second-order turbulence closure models for geophysical boundary layers. A review of recent work // *Continental Shelf Research*. 2005. Vol. 25. P. 795–827. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.08.004>.
32. *Woolway R. I., Meinson P., Nöges P., Jones I. D., Laas A.* Atmospheric stilling leads to prolonged thermal stratification in a large shallow polymictic lake // *Climate Change*. 2017. Vol. 141. P. 759–773. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1909-0>.
33. *Woolway R. I., Merchant C. J.* Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change // *Nature Geoscience*. 2019. Vol. 12. No. 4. P. 271–276. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0322-x>.
34. *Wurtsbaugh W. A. et al.* Decline of the world's saline lakes // *Nature Geoscience*. 2017. Vol. 10. No. 11. P. 816–821.
35. *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. P. 1659. <https://doi.org/10.1029/2003GL017427>.

Статья поступила в редакцию 23.04.2023, одобрена к печати 25.05.2023.

Для цитирования: *Ижицкий А. С.* Термический режим Малого Аральского моря в условиях климатических изменений // *Океанологические исследования*. 2023. № 51 (2). С. 3–20. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(2\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(2).2).

THERMAL REGIME OF THE SMALL ARAL SEA IN CHANGING CLIMATE CONDITIONS

A. S. Izhitskiy

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: izh@ocean.ru*

The article is focused on the thermal regime of the largest in area and the most important in terms of economic importance of the residual basins of the Aral Sea – the Small Aral. The study is based on numerical experiments using the one-dimensional ocean turbulence model GOTM. Based on data on climatic variability in the study area for the modern and projection periods, three series of numerical experiments were carried out. The first one is modeling the modern thermal regime of the Small Aral Sea under the influence of climate reanalysis, the second and third series are modeling the future variability of the thermal regime of waters under the influence of predictive climate scenarios. According to the obtained model estimates, within the framework of two prognostic scenarios, in the next decade in the Small Aral Sea, a weakening of vertical mixing processes is expected, which will lead to an increase in thermal stratification in summer, which will be accompanied by a significant decrease in near-bottom temperatures relative to the current period and heat accumulation mainly in the upper meters of the water. The corresponding quantitative and qualitative assessments are given. An assessment is made of the influence of possible changes in the level of the reservoir surface on its thermal regime.

Keywords: temperature, stratification, mixing, projection, climate scenario, numerical simulation, GOTM, Aral Sea

Acknowledgement: Author thanks the ISIMIP project for the possibility of free use of data on climate variability. Author also thanks the two reviewers of the manuscript for valuable comments that allowed to improve the study. The work was supported by Russian Science Foundation grant No. 21-77-00088, <https://rscf.ru/project/21-77-00088/>.

References

1. Andrulionis, N. Yu., P. O. Zavialov, and A. S. Izhitskiy, 2021: Current Evolution of the Salt Composition of Waters in the Western Basin of the South Aral Sea. *Oceanology*, **61** (6), 899–908.
2. Andrulionis, N. Yu., P. O. Zavialov, and A. S. Izhitskiy, 2022: Modern Evolution of the Salt Composition of the Residual Basins of the Aral Sea. *Oceanology*, **62** (1), 30–45.
3. Ayala, A. I., S. Moras, and D. C. Pierson, 2020: Simulations of future changes in thermal structure of Lake Erken: proof of concept for ISIMIP2b lake sector local simulation strategy. *Hydrology and Earth System Sciences*, **24** (6), 3311–3330.
4. Ayzel, G. V. and A. S. Izhitskiy, 2018: Coupling physically based and data-driven models for assessing freshwater inflow into the Small Aral Sea. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, **379**, 151–158.

5. Ayzel, G. V. and A. S. Izhitskiy, 2019: Climate change impact assessment on freshwater inflow into the Small Aral Sea. *Water*, **11** (11), 2377.
6. Burchard, H., K. Bolding, and M. R. Villarreal, 1999: GOTM. a General Ocean Turbulence Model. Theory, implementation and test cases. *Technical Report EUR 18745 EN, European Commission*.
7. Cheung, W. W. L., R. Watson, and D. Pauly, 2013: Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature*, **497** (7449), 365–368.
8. Domingues, C. M. et al., 2008: Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature*, **453** (7198), 1090–1093.
9. Ficker, H., M. Luger, and H. Gassner, 2017: From dimictic to monomictic: Empirical evidence of thermal regime transitions in three deep alpine lakes in Austria induced by climate change. *Freshwater Biology*, **62** (8), 1335–1345, <https://doi.org/10.1111/fwb.12946>.
10. Ginzburg, A., A. Kostianoy, N. Sheremet, A. Izhitskiy, and D. Soloviov, 2022: The drying dynamics of the Western Large Aral Sea from satellite data (2002–2021). *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, **19**, 246–263.
11. Hadley, K. R., A. M. Paterson, E. A. Stainsby, N. Michelutti, H. Yao, J. A. Rusak, R. Ingram, C. McConnell, and J. P. Smol, 2014: Climate warming alters thermal stability but not stratification phenology in a small north-temperature lake. *Hydrological Processes*, **28** (26), 6309–6319, <https://doi.org/10.1002/hyp.10120>.
12. Izhitskaya, E. S., A. V. Egorov, P. O. Zavialov, E. V. Yakushev, and A. S. Izhitskiy, 2019: Dissolved methane in the residual basins of the Aral Sea. *Environmental Research Letters*, **14** (6), 065005.
13. Izhitskiy, A. S., E. E. Khymchenko, P. O. Zavialov, and A. N. Serebryany, 2014a: Hydrophysical state of the Large Aral Sea in the autumn of 2013: Thermal structure, currents, and internal waves. *Oceanology*, **54**, 414–425.
14. Izhitskiy, A. S. et al., 2014b: On thermohaline structure and circulation of the Western Large Aral Sea from 2009 to 2011: Observations and modeling. *Journal of Marine Systems*, **129**, 234–247.
15. Izhitskiy, A. S. et al., 2016: Present state of the Aral Sea: diverging physical and biological characteristics of the residual basins. *Scientific reports*, **6** (1), 1–9.
16. Izhitskiy, A. S., G. B. Kirillin, I. V. Goncharenko, A. K. Kurbaniyazov, and P. O. Zavialov, 2021: The world's largest heliothermal lake newly formed in the Aral Sea basin. *Environmental Research Letters*, **16** (11), 115009.
17. Izhitskiy, A. S. and G. V. Ayzel, 2023: Water Balance of the Regulated Arid Lake as an Indicator of Climate Change and Anthropogenic Impact: The North (Small) Aral Sea Case Study. *Water*, **15** (8), 1464.
18. Kainz, M. J., R. Ptacnik, S. Rasconi, and H. H. Hager, 2017: Irregular changes in lake surface water temperature and ice cover in subalpine Lake Lunz, Austria. *Inland Waters*, **7** (1), 27–33, <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1294332>.
19. Kirillin, G. B., A. S. Izhitskiy, and A. K. Kurbaniyazov, 2023: Thermal conditions and lake metabolism in the ice-covered North Aral Sea. *EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr. 2023*, EGU23-7068, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-7068>.
20. Kirillin, G. B., 2010: Modeling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes. *Boreal Env. Res.*, **15**, 279–293.
21. Ladwig, R., E. Furusato, G. Kirillin, R. Hinkelmann, and M. Hupfer, 2018: Climate change demands adaptative management of urban lakes: model-based assessment of management scenarios for lake Tegel (Berlin, Germany). *Water*, **10** (2), 186, <https://doi.org/10.3390/w10020186>.

22. Lange, S., 2019: Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1. 0). *Geoscientific Model Development*, **12** (7), 3055–3070.
23. Lange, S., C. Menz, S. Gleixner, M. Cucchi, G. Weedon, A. Amici, N. Bellouin, H. Schmied, H. Hersbach, C. Buontempo, and C. Cagnazzo, 2021: WFDE5 over land merged with ERA5 over the ocean (W5E5 v2.0). *ISIMIP Repository*, <https://doi.org/10.48364/ISIMIP.342217>.
24. Lange, S. and M. Büchner, 2021: ISIMIP3b bias-adjusted atmospheric climate input data (v1.1). *ISIMIP Repository*, <https://doi.org/10.48364/ISIMIP.842396.1>.
25. Martin, J. L. and S. C. McCutcheon, 1998: Hydrodynamics and transport for water quality modeling. *CRC press*.
26. O’Neill, B. C. et al., 2016: The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, **9** (9), 3461–3482.
27. Pörtner, H. O. et al., 2022: *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Geneva, Switzerland: IPCC, 3056 p.
28. Riahi, K. et al., 2017: The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, **42**, 153–168.
29. Shatwell, T., W. Thiery, and G. Kirillin, 2019: Future projections of temperature and mixing regime of European temperate lakes. *Hydrology and Earth System Sciences*, **23** (3), 1533–1551, <https://doi.org/10.5194/hess-23-1533-2019>.
30. Umlauf, L. and H. Burchard, 2005: Second-order turbulence closure models for geophysical boundary layers. A review of recent work. *Continental Shelf Research*, **25**, 795–827, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.08.004>.
31. Woolway, R. I., P. Meinson, P. Nöges, I. D. Jones, and A. Laas, 2017: Atmospheric stilling leads to prolonged thermal stratification in a large shallow polymictic lake. *Climate Change*, **141**, 759–773, <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1909-0>.
32. Woolway, R. I. and C. J. Merchant, 2019: Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nature Geoscience*, **12** (4), 271–276, <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0322-x>.
33. Wurtsbaugh, W. A. et al., 2017: Decline of the world’s saline lakes. *Nature Geoscience*, **10** (11), 816–821.
34. Zavalov, P. O., A. G. Arashkevich, I. Bastida, A. I. Ginzburg, S. N. Dikarev, L. S. Zhitina, A. S. Izhitskiy, D. P. Ishniyazov, A. G. Kostyanoy, V. I. Kravtsova, T. V. Kudyshkin, A. K. Kurbaniyazov, A. A. Ni, A. B. Nikishina, M. A. Petrov, A. F. Sazhin, P. V. Sapozhnikov, D. M. Soloviev, V. M. Khan, and A. N. Sheremet, 2012: *The Large Aral Sea in the beginning of century 21: physics, biology, chemistry*. Moscow, Nauka, 228 p.
35. Zavalov, P. O., A. G. Kostianoy, S. V. Emelianov, A. A. Ni, D. Ishniyazov, V. M. Khan, and T. V. Kudyshkin, 2003: Hydrographic survey in the dying Aral Sea. *Geophysical Research Letters*, **30** (13), 1659, <https://doi.org/10.1029/2003GL017427>.

Submitted 23.04.2023, accepted 25.05.2023.

For citation: Izhitskiy, A. S., 2023: Thermal regime of the Small Aral Sea in changing climate conditions. *Journal of Oceanological Research*, **51** (2), 3–20, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(2\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(2).2).