УДК 551.464:551.583

Демин М.
учащийся 10 класса
Назарбаев Интеллектуальная школа естественно-математического направления города Атырау
Казахстан, г. Атырау

НА СКОЛЬКО ДНЕЙ ДОЛЬШЕ РАСТВОРИМОСТЬ КИСЛОРОДА В КАСПИЙСКОМ МОРЕ ОСТАЁТСЯ НИЖЕ 8 МГ/Л? СЕЗОННЫЙ КАЛЕНДАРЬ, 1982–2022

Аннотация: В прогревающемся Каспийском море снижается растворимость кислорода в поверхностной воде, но процент потери за 40 лет не показывает, сколько времени в году она остаётся ниже определённого уровня. Цель статьи – выяснить, на сколько дней удлинился период с равновесной растворимостью ниже 8 мг/л (уровень выбран после просмотра данных и не является биологическим порогом), и когда он начинается и заканчивается. Календарь рассчитан по трём рядам температуры поверхности, основанным на спутниковых данных (OISST v2, Pathfinder v5.3, суточный OISST v2.1), для трёх частей моря и участков у Атырау и Актау, сравнивались 1982–1991 и 2013–2022 годы. Период удлинился на севере на 12–23 дня, в средней части на 19–24 дня, на юге на 10–16 дней (верхние границы получены по месячным рядам и, вероятно, завышены), в среднем он начинается раньше и заканчивается позже, а при уровне 8,5 мг/л рост меньше (в средней части 12–14 дней). Результат относится к равновесному уровню, а не к измеренному кислороду, и не заменяет прямых замеров.

Ключевые слова: изменение климата, спутниковые данные, Каспийское море, температура поверхности моря, растворённый кислород, растворимость кислорода, сезонность.

Demin M.
Grade 10 student
Nazarbayev Intellectual School of Natural Sciences and Mathematics in Atyrau
Kazakhstan, Atyrau

HOW MANY DAYS LONGER DOES OXYGEN SOLUBILITY IN THE CASPIAN SEA STAY BELOW 8 MG/L? A SEASONAL CALENDAR, 1982-2022

Abstract: In the warming Caspian Sea the solubility of oxygen in surface water is falling, but a per cent loss over 40 years does not show how long within a year it stays below a given level. The aim of this article is to find out by how many days the period with equilibrium solubility below 8 mg/L has grown (the level was chosen after looking at the data and is not a biological threshold), and when it starts and ends. The calendar was calculated from three surface temperature records based on satellite data (OISST v2, Pathfinder v5.3, daily OISST v2.1) for the three parts of the sea and for areas off Atyrau and Aktau, comparing 1982-1991 with 2013-2022. The period grew by 12-23 days in the north, 19-24 days in the middle and 10-16 days in the south (the upper bounds come from monthly records and are probably too high), on average it starts earlier and ends later, and at a level of 8.5 mg/L the growth is smaller (12-14 days in the middle). The result refers to the equilibrium level, not to measured oxygen, and does not replace direct measurements.

Keywords: climate change, satellite data, Caspian Sea, sea surface temperature, dissolved oxygen, oxygen solubility, seasonality.

Введение

Изначально изменения уровня Каспия заинтересовали меня еще с реки Урал в Атырау. Даже сейчас, и с самого детства, невооруженным глазом я замечал, как Урал мелеет. А когда я бывал в Актау, уменьшение Каспийского моря было заметно еще сильнее.

Когда я только начал изучать Каспий, я понял, что одна из главных причин меления это потепление, и я начал копать глубже, начал изучать влияние и последствия, которые оказывает это потепление. Одно из самых серьезных последствий это уменьшение растворимости кислорода, чем выше температура, тем меньше кислорода может содержаться в воде, соответственно, это очень негативно влияет на экосистему Каспия, порты, зависящие от них, и на другие факторы.

То, что меня удивило, это то, что в первые 20 лет потеря растворимости кислорода была больше, чем за последние. Я не понимал, представил график и увидел выпуклую кривую, подумав, что это ответ. Однако, увидев проверку на цифрах, понял, что эффект кривой оказался маленьким, объяснил около 2% разницы. Настоящая причина заключалась в том, что разница возникла потому, что сама скорость нагрева была разной в эти два периода. После этого я увидел логику.

Эти три абзаца написаны автором и относятся к его опубликованной работе [1]. Слова о причине обмеления и о последствиях для экосистемы и портов – мнение автора, здесь они не проверялись. По двум рядам температуры в работе [1] показано, что за 1982–2022 годы в апреле–октябре равновесная растворимость кислорода в поверхностной воде снизилась на севере Каспия на 3,8–5,8%, в средней части на 3,4–3,6%, на юге на 2,6–3,3%. Более быстрая потеря в 1982–2001 годах видна в оценках,

но статистически значима лишь в отдельных случаях, а её причина установлена не полностью [1]. Само потепление Каспия автор рассматривал в более ранней работе [2].

Процент за 40 лет не говорит о том, сколько времени в году растворимость остаётся ниже определённого уровня. Между тем этот срок можно посчитать отдельно. Кислорода в океанах и прибрежных водах становится меньше [3], а вода, которая теплеет, одновременно удерживает меньше кислорода и повышает потребность в нём у морских животных [4]; связь числа дней ниже определённого уровня с состоянием организмов здесь не проверялась. В других водоёмах потепление уже описано как сдвиг календаря: на шельфе Северной Америки весной определённые температуры достигаются раньше, а тёплый сезон становится длиннее [5], в озёрах расслоение воды, по расчётам, будет начинаться раньше и заканчиваться позже [6]. В источниках, просмотренных для этой статьи, такого подсчёта для растворимости кислорода в Каспии не найдено.

В статье рассматриваются два вопроса, которых не было в работе [1]. Сколько дней в году поверхностная вода Каспия не может удержать при равновесии с воздухом 8 мг/л кислорода и как это число изменилось? Начинается ли этот период раньше и заканчивается ли позже? Кроме трёх частей моря отдельно рассмотрены участки у Атырау и Актау, о которых говорится во введении.

Методы

Температура. Использованы три ряда. Основной – месячные значения OISST v2 на сетке 1° [7], в которых спутниковые данные объединены с судовыми и буйковыми. Взяты те же 53 ячейки Каспия и то же деление по широте центра ячейки, что в работе [1]: север – 45,5° с. ш. и выше (12 ячеек), средняя часть – от 40,5° до 44,5° с. ш. (24 ячейки), юг – 39,5° с. ш. и ниже (17 ячеек). Участок у Атырау – одна ячейка 46–47° с. ш., 51–52° в. д., в которую выходит устье Урала. Участок у Актау – две ячейки

43–44° с. ш., 50–52° в. д. Ячейка размером около 75 на 110 км показывает открытую воду вместе с прибрежной, но не саму реку и не берег. Второй ряд – месячные дневные значения Pathfinder v5.3 [8, 9] в точках через 0,25° внутри тех же ячеек, обработанные, как в работе [1]: каждая точка выражена как отклонение от своего среднего за 1991–2020 годы. Третий ряд – суточный OISST v2.1 на сетке 0,25° [10], по которому дни можно считать напрямую. На сервере ERDDAP в этом ряду за 1992–1998 годы есть пропуски, поэтому эти годы взяты из архива NCEI [10]; отдельно отсутствуют 7 сентября 2021 года и 19 октября 2022 года. OISST v2 и v2.1 – версии одного продукта.

Растворимость. Равновесная растворимость кислорода рассчитана по уравнению Гарсиа и Гордона [11] с коэффициентами TEOS-10 [12] и переведена в мг/л при плотности воды 1,005 кг/л, как в работе [1]. Солёность постоянна: 9,28 на севере и у Атырау, 13,0 в средней части и у Актау, 13,1 на юге [13]. Поэтому всё изменение в расчёте создаёт температура. Уровню 8 мг/л соответствует 23,9 °C при солёности 9,28 и 22,6 °C при солёности 13,0 и 13,1, то есть подсчёт дней ниже 8 мг/л практически равен подсчёту дней теплее этой температуры.

Уровень 8 мг/л. Он выбран после первого просмотра результатов для уровней от 7,5 до 10 мг/л, поэтому результаты показаны и для других уровней (таблица 4). Причины выбора: это круглое значение, в каждой части моря и каждом ряду оно достигается ежегодно, а переход через него приходится на время с середины мая по октябрь, далеко от апреля, ненадёжного для севера [1]. На севере переход приходится на июнь–июль и август, а в мае и июне ряды тоже расходятся [1]. Уровень 8,5 мг/л тоже достигается ежегодно, поэтому выбор не единственный. Этот выбор влияет на результат: среди шести уровней рост при 8 мг/л наибольший в 8 из 15 сочетаний района и ряда, а сдвиг уровня всего на 0,1 мг/л меняет рост на

величину до 5 дней (средняя часть, OISST v2.1: +23,4 при 7,9 мг/л и +18,6 при 8 мг/л). Это не биологический порог и не норматив.

Календарь. Для месячных рядов среднемесячное значение относится к 15-му числу месяца, между такими точками растворимость меняется линейно. Считается, сколько дней с 1 апреля по 30 ноября значение ниже уровня, а также первый и последний такой день. Март и зимние месяцы не считаются, потому что на севере в это время лёд [1]. Например, на участке у Атырау в 2018 году по OISST v2 растворимость составляла 8,137 мг/л в июне, 7,511 в июле, 7,909 в августе и 8,655 в сентябре. Уровень пройден через (8,137 − 8) / (8,137 − 7,511) × 30 = 6,6 дня после 15 июня и через (8 − 7,909) / (8,655 − 7,909) × 31 = 3,8 дня после 15 августа, поэтому первый целый день ниже уровня – 22 июня, последний – 18 августа, всего 58 дней. В суточном ряду дни считаются напрямую, и период не всегда непрерывен: между первым и последним днём в среднем на 5–7 дней больше, чем дней ниже уровня. Год из Pathfinder использован, только если есть все месяцы с мая по октябрь (север – 38 лет из 41, Атырау – 37).

Сравнение. Сравниваются средние за 1982–1991 и 2013–2022 годы (разница с 95-процентным доверительным интервалом Уэлча) и линейный тренд за весь период: интервал Ньюи–Уэста с тремя лагами, для рядов с пропусками обычный. Тренды проверены оценкой Тейла–Сена. Чтобы понять, сдвигается ли весь период к весне или к осени, проверен тренд его центра, то есть полусуммы первого и последнего дня. Число дней на 1 °C – наклон регрессии числа дней на среднюю температуру мая–сентября того же ряда (интервалы обычные). Поправка на множественные сравнения не применялась. Расчёт повторён с солёностью на 3 единицы ниже и выше, для севера и Атырау также с солёностью 6,0, 4,5 и 2,0, и для 1982–2020 годов, потому что за 2021–2022 годы ряды расходятся.

Результаты

Сколько дней. Во всех частях моря и во всех рядах период ниже 8 мг/л стал длиннее (таблица 1, рисунок 1, рисунок 2). Между 1982–1991 и 2013–2022 годами он вырос на севере на 12–23 дня, в средней части на 19–24 дня, на юге на 10–16 дней, у Актау на 14–24 дня. Все интервалы разницы выше нуля. Интервалы разных частей моря пересекаются, поэтому утверждать, что одна из них прибавила больше другой, нельзя. Участок у Атырау (рост на 11,5–23 дня) почти повторяет север (коэффициент корреляции годовых значений 0,97–1,00) и не является независимой оценкой. OISST v2 и Pathfinder ближе всего друг к другу в средней части (разница +24,2 дня в обоих рядах), а на севере ряды расходятся сильнее всего: OISST v2 даёт почти вдвое больший рост, чем OISST v2.1. Одна из причин – 1982 год: на севере в OISST v2 он даёт 13 дней против 47 в Pathfinder и 50 в OISST v2.1; без него рост в OISST v2 составляет +19,6 дня. Кроме того, OISST v2 относительно v2.1 на севере в 1982–1991 годах холоднее в мае на 2,6 °C и в июне на 1,7 °C, а в 2013–2022 годах разница исчезает (−0,4 и +0,3 °C). Поэтому верхнюю границу для севера следует считать ненадёжной. Оценки Тейла–Сена близки к линейным трендам (север 8,3; 6,4 и 5,0 дня за 10 лет в трёх рядах; средняя часть 8,9; 7,8 и 5,9; юг 5,8; 3,7 и 4,8).

Район	**Ряд**	**1982–1991, дней**	**2013–2022, дней**	**Разница, дней (95% ДИ)**	**Тренд, дней за 10 лет (95% ДИ)**
Север	OISST v2	47,4	70,8	+23,4 (12,4…34,4)	+9,0 (5,7…12,4)
Север	Pathfinder	66,2	81,1	+14,9 (3,6…26,3)	+6,2 (3,0…9,5)
Север	OISST v2.1	58,7	70,9	+12,2 (3,4…21,0)	+5,4 (2,0…8,8)
Средняя часть	OISST v2	62,4	86,6	+24,2 (16,6…31,8)	+8,7 (6,4…11,1)
Средняя часть	Pathfinder	66,1	90,3	+24,2 (12,6…35,8)	+8,4 (5,1…11,7)
Средняя часть	OISST v2.1	63,9	82,5	+18,6 (6,5…30,7)	+6,7 (3,3…10,2)
Юг	OISST v2	111,3	127,3	+16,0 (9,2…22,8)	+6,1 (4,4…7,7)
Юг	Pathfinder	116,7	126,9	+10,2 (2,9…17,5)	+3,9 (2,4…5,4)

Район	Ряд	1982–1991, дней	2013–2022, дней	Разница, дней (95% ДИ)	Тренд, дней за 10 лет (95% ДИ)
Юг	OISST v2.1	113,5	126,5	+13,0 (7,0…19,0)	+5,0 (3,5…6,5)
У Атырау	OISST v2	47,7	70,8	+23,1 (11,8…34,4)	+9,0 (5,4…12,5)
У Атырау	Pathfinder	64,0	79,0	+15,0 (2,0…28,0)	+6,2 (3,0…9,5)
У Атырау	OISST v2.1	57,7	69,2	+11,5 (3,6…19,4)	+5,2 (2,0…8,4)
У Актау	OISST v2	54,2	77,3	+23,1 (15,0…31,2)	+8,7 (6,0…11,4)
У Актау	Pathfinder	54,5	78,1	+23,6 (8,8…38,4)	+8,9 (5,1…12,8)
У Актау	OISST v2.1	53,8	67,4	+13,6 (1,2…26,0)	+5,6 (2,0…9,2)

Таблица 1 – Число дней в году с равновесной растворимостью кислорода ниже 8 мг/л (расчёт по данным [7–10]). Pathfinder 2013–2022: север 8 лет, Атырау 7 лет

По оценкам, рост был неравномерным. Если сравнить 2003–2012 и 2013–2022 годы, север меняется мало или снижается (OISST v2 с 70,5 до 70,8 дня, Pathfinder с 77,3 до 81,1, OISST v2.1 с 79,3 до 70,9), в средней части прибавка небольшая (с 82,1 до 86,6, с 86,4 до 90,3, с 80,2 до 82,5), юг почти не меняется (с 125,2 до 127,3, с 126,2 до 126,9, с 125,1 до 126,5), а у Актау и Атырау в двух рядах из трёх среднее за последнее десятилетие ниже. Но все эти разницы незначимы: 95-процентные интервалы включают ноль. В последний год ряды снова заметно расходятся: в 2022 году OISST v2.1 даёт на севере 55 дней, а OISST v2 – 79.

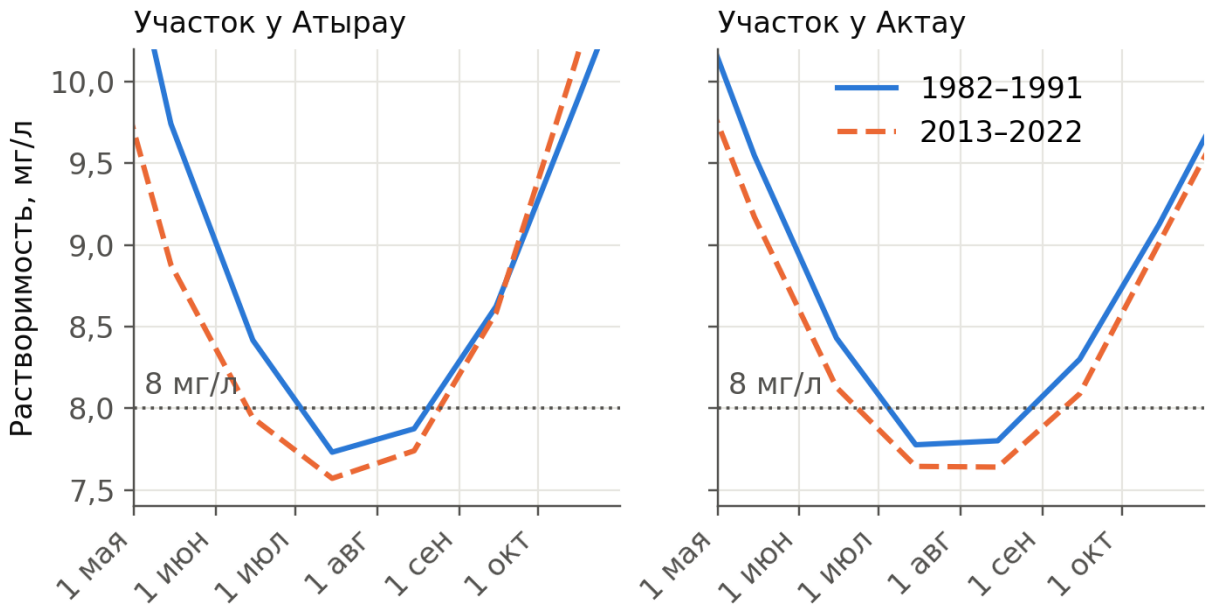


Рисунок 1 – Средний ход растворимости кислорода в 1982–1991 и 2013–2022 годах, участки у Атырау и Актау, OISST v2 (расчёт по данным [7])

Когда начинается и заканчивается. Во всех рядах и районах среднее начало сдвинулось на более ранние даты, а средний конец на более поздние (таблица 2). Начало сдвигается на 1,4–6,7 дня за 10 лет, конец на 1,4–5,7 дня; в 4 из 30 сдвигов интервал включает ноль. На севере и у Атырау только OISST v2 показывает, что период растёт в основном со стороны весны: центр периода смещается к весне на 2,2 дня за 10 лет ($p < 0,001$). Этот ряд даёт на севере самое сильное потепление мая и июня (+1,39 и +1,13 °C за 10 лет), которого нет в Pathfinder (+0,38 и +0,43 °C) и которое слабее в OISST v2.1 (+0,74 и +0,51 °C). В двух других рядах центр значимо не смещается (p от 0,24 до 0,74). В средней части в OISST v2 и Pathfinder рост идёт примерно поровну в обе стороны, в OISST v2.1 больше со стороны осени, у Актау в двух рядах из трёх тоже сильнее со стороны осени, но значимого смещения центра нет ни там, ни там (обычный p от 0,15 до 0,76, по Ньюи–Уэсту не ниже 0,06). На юге начало сдвигается заметнее конца, но центр значимо смещается только в OISST v2 и только по Ньюи–Уэсту ($p = 0,03$; обычный $p = 0,13$).

Район	Ряд	Первый день	Последний день	Сдвиг начала, дней за 10 лет (95% ДИ)	Сдвиг конца, дней за 10 лет (95% ДИ)
Север	OISST v2	04.07 → 16.06	19.08 → 24.08	−6,7 (−8,3…−5,1)	+2,3 (−0,1…4,7)
Север	Pathfinder	16.06 → 10.06	20.08 → 29.08	−2,9 (−5,4…−0,4)	+3,3 (1,6…5,1)
Север	OISST v2.1	21.06 → 13.06	26.08 → 02.09	−3,6 (−6,0…−1,2)	+2,2 (0,9…3,5)
Средняя часть	OISST v2	04.07 → 22.06	04.09 → 15.09	−4,7 (−6,0…−3,4)	+4,0 (2,4…5,6)
Средняя часть	Pathfinder	01.07 → 19.06	04.09 → 16.09	−4,0 (−6,0…−2,0)	+4,4 (2,6…6,2)
Средняя часть	OISST v2.1	28.06 → 23.06	06.09 → 18.09	−2,4 (−4,8…−0,01)	+4,1 (2,4…5,8)
Юг	OISST v2	17.06 → 07.06	05.10 → 11.10	−3,7 (−4,9…−2,6)	+2,3 (1,4…3,3)
Юг	Pathfinder	13.06 → 05.06	07.10 → 09.10	−2,6 (−3,8…−1,4)	+1,4 (−0,1…3,0)
Юг	OISST v2.1	12.06 → 03.06	07.10 → 10.10	−2,9 (−4,8…−1,0)	+1,5 (0,1…3,0)
У Атырау	OISST v2	02.07 → 15.06	18.08 → 23.08	−6,6 (−8,4…−4,9)	+2,3 (−0,1…4,8)
У Атырау	Pathfinder	17.06 → 12.06	19.08 → 29.08	−2,7 (−5,2…−0,1)	+3,6 (1,7…5,4)
У Атырау	OISST v2.1	21.06 → 12.06	25.08 → 31.08	−3,9 (−6,0…−1,8)	+2,0 (0,6…3,3)
У Актау	OISST v2	05.07 → 23.06	28.08 → 07.09	−4,8 (−5,9…−3,6)	+3,9 (1,7…6,2)
У Актау	Pathfinder	02.07 → 24.06	25.08 → 09.09	−3,2 (−5,2…−1,3)	+5,7 (2,8…8,6)
У Актау	OISST v2.1	29.06 → 27.06	29.08 → 10.09	−1,4 (−3,7…1,0)	+4,0 (2,1…5,9)

Таблица 2 – Первый и последний день ниже 8 мг/л: средние даты 1982–1991 → 2013–2022 и сдвиг за весь период (расчёт по данным [7–10])

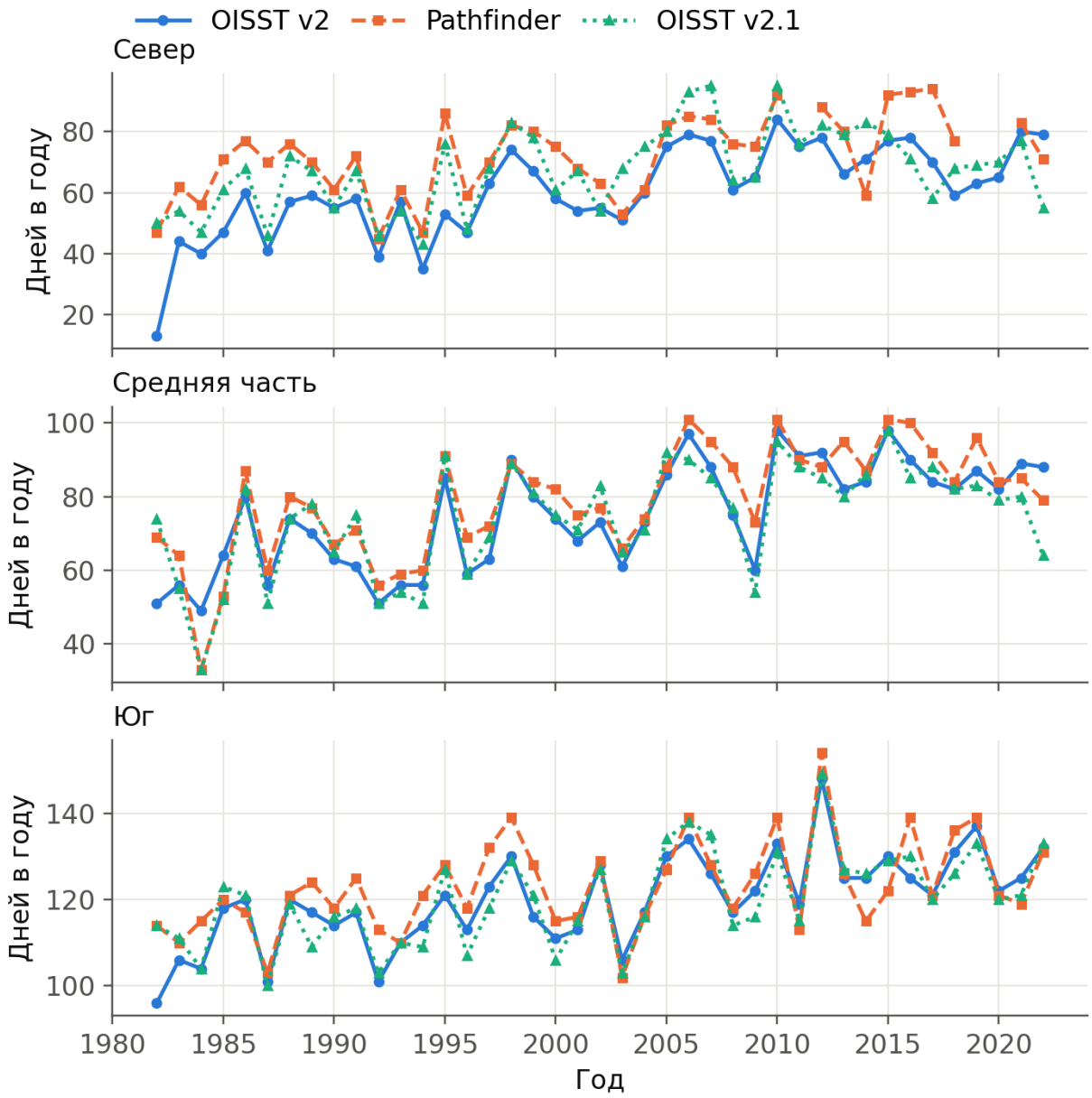


Рисунок 2 – Число дней в году ниже 8 мг/л по трём рядам; разрывы линий – годы без данных (расчёт по данным [7–10])

Сколько дней на градус. Год с более тёплым маем–сентябрём имеет больше дней ниже 8 мг/л, и наклон близок во всех трёх рядах (таблица 3), хотя величина потепления разная: на севере 0,72 °C за 10 лет в OISST v2 и 0,44 °C в Pathfinder. Это сходство нельзя считать независимым подтверждением. Последний столбец таблицы 3 показывает, сколько дней прибавится, если просто сдвинуть средний сезонный ход ряда на 1 °C, без всяких данных о потеплении: при 8 мг/л получается близкое число, кроме юга. Значит, наклон определяется прежде всего формой сезонного хода.

Он также зависит от уровня: при 8 мг/л средняя часть прибавляет на градус больше севера, а при 8,5 мг/л уже нет. Зависит он и от выбранных месяцев и солёности. Например, в средней части в OISST v2 наклон составляет 16,7 дня для мая–сентября и 13,2 дня для июля–августа.

Район	**Уровень, мг/л**	**OISST v2**	**Pathfinder**	**OISST v2.1**	**Сдвиг среднего хода на 1 °C, дней (три ряда)**
Север	8	12,6 (10,7…14,5)	12,8 (10,6…15,0)	14,1 (11,5…16,8)	15, 11, 12
Север	8,5	9,3 (8,4…10,2)	10,1 (8,4…11,9)	9,7 (6,9…12,5)	10, 10, 9
Средняя часть	8	16,7 (15,1…18,2)	16,4 (14,1…18,7)	17,0 (14,1…19,9)	15, 16, 15
Средняя часть	8,5	8,8 (6,7…11,0)	8,0 (5,3…10,8)	9,8 (6,5…13,0)	11, 12, 12
Юг	8	10,4 (8,3…12,4)	8,9 (5,7…12,0)	10,3 (7,4…13,2)	14, 14, 14
Юг	8,5	7,7 (5,4…10,1)	8,1 (4,6…11,5)	8,0 (5,2…10,8)	14, 13, 13
У Атырау	8	12,4 (10,4…14,4)	12,0 (9,5…14,4)	13,5 (10,8…16,2)	14, 11, 12
У Атырау	8,5	9,4 (8,4…10,3)	10,7 (6,8…14,7)	9,8 (6,9…12,6)	10, 10, 10
У Актау	8	16,6 (15,0…18,2)	17,2 (14,3…20,1)	18,0 (14,9…21,1)	16, 16, 14
У Актау	8,5	9,8 (8,2…11,5)	11,7 (8,9…14,5)	13,5 (9,5…17,5)	12, 11, 13

Таблица 3 – Дополнительные дни ниже уровня на 1 °C средней температуры мая–сентября (95% ДИ, обычный) и при сдвиге среднего хода на 1 °C (расчёт по данным [7–10])

При уровне 8 мг/л различие между севером и средней частью связано со скоростью остывания. По среднему ходу за 1982–2022 годы вода на севере в конце августа остывает на 0,17–0,18 °C в день, а в средней части в сентябре на 0,11–0,12 °C в день, поэтому 1 °C сдвигает конец периода на севере примерно на 6 дней, а в средней части на 8–10 дней. На юге осенний переход приходится на октябрь, вне мая–сентября, поэтому наклон в таблице 3 здесь занижен: по средней температуре июня и октября он составляет 12–13 дней.

Другие уровни. При других уровнях рост тоже есть везде, но величина другая, и порядок частей моря меняется (таблица 4). При 8,5 мг/л рост на севере 11–18 дней, в средней части 12–14, на юге 10–11. На уровне 9 мг/л в OISST v2 север прибавляет больше средней части, в OISST v2.1

наоборот (6,6 против 15,3 дня), а в Pathfinder перевес севера держится на двух сомнительных годах: без 2014 и 2015 годов, с необычно тёплым апрелем [1], рост на севере падает с 14,2 до 6,3 дня. Уровень 7,5 мг/л в 1982–1991 годах в средней части по OISST v2 и Pathfinder не достигался ни разу, а на юге время ниже него выросло примерно вдвое–втрое (с 23 до 69 дней, с 34 до 63, с 33 до 66). На самых низких уровнях дней мало, поэтому такие числа неустойчивы.

Район	**Ряд**	**7,5**	**8**	**8,5**	**9**	**9,5**	**10**
Север	OISST v2	+4,1	+23,4	+17,9	+18,1	+12,9	+10,0
Север	Pathfinder	+13,1	+14,9	+10,7	+14,2	+12,8	+11,8
Север	OISST v2.1	+4,6	+12,2	+10,8	+6,6	+8,0	+13,2
Средняя часть	OISST v2	+8,8	+24,2	+13,5	+12,8	+11,4	+8,9
Средняя часть	Pathfinder	+13,7	+24,2	+14,1	+12,9	+15,1	+14,9
Средняя часть	OISST v2.1	+7,8	+18,6	+11,9	+15,3	+12,2	+9,3
Юг	OISST v2	+46,0	+16,0	+10,5	+7,0	+5,8	+1,4
Юг	Pathfinder	+29,0	+10,2	+9,8	+9,7	+8,6	+4,8
Юг	OISST v2.1	+33,1	+13,0	+10,9	+9,6	+4,8	+5,9

Таблица 4 – Рост числа дней в году между 1982–1991 и 2013–2022 годами при разных уровнях растворимости, мг/л (расчёт по данным [7–10])

Проверки. Линейная интерполяция месячных значений, проверенная на самом суточном ряду, занижает число дней в среднем на 3–5,5 дня, в отдельные годы до 12–20 дней, и завышает рост между десятилетиями во всех районах: север +12,9 вместо +12,2, Атырау +13,4 вместо +11,5, Актау +15,7 вместо +13,6, юг +15,7 вместо +13,0, средняя часть +23,1 вместо +18,6. Поэтому верхние границы диапазонов, полученные по месячным рядам, вероятно, завышены на несколько дней, а отдельные годы по ним ненадёжны. Интерполяция температуры вместо растворимости меняет средние примерно на 1 день. За 1982–2020 годы тренды почти те же или немного выше: север 8,9; 7,1 и 6,4 дня за 10 лет в трёх рядах; средняя часть 9,0; 9,6 и 8,0; юг 6,3; 4,4 и 5,2.

Сильнее всего сами числа дней зависят от солёности. Если на севере она на 3 единицы выше или ниже, число дней в OISST v2 растёт с 64 до 83 и с 30 до 55; при солёности 6,0 с 28 до 53, при 4,5 с 12 до 41, при 2,0 с 0 до 21. Для участка у Атырау соответственно с 63 до 83, с 32 до 56, с 30 до 54, с 14 до 43 и с 0 до 23. Рост при этом остаётся в пределах 19–29 дней. Сколько именно дней вода у Атырау проводит ниже 8 мг/л, по этим данным определить нельзя: солёность там неизвестна, а для северной точки в работе [1] указаны значения 4,79–7,51. В средней части изменение солёности на 3 единицы даёт рост на 19–30 дней, на юге на 12–22 дня.

То же, о чём говорится во введении для потери растворимости, видно и в днях: в 1982–2001 годах период в большинстве случаев рос быстрее, чем в 2002–2022 годах (OISST v2: север 12,8 против 4,8 дня за 10 лет, средняя часть 9,4 против 6,6, юг 6,4 против 3,9; Pathfinder: 6,6 против 8,0, 11,4 против 4,1, 6,5 против 3,6; OISST v2.1: 8,2 против −4,1, 10,1 против 0,7, 2,4 против 2,7). В этих девяти сравнениях ни одна разница не достигает $p < 0,05$ (p от 0,05 до 0,96), а на севере в Pathfinder и на юге в OISST v2.1 порядок обратный. На участках у Атырау и Актау p от 0,03 до 0,89.

Обсуждение

Потеря в несколько процентов выглядит небольшой, но при уровне 8 мг/л ей соответствует удлинение периода на полторы–три с лишним недели, а при 8,5 мг/л на полторы–две с половиной недели. Там, где вода проходит этот уровень, температура меняется примерно на 0,1–0,18 °C в день, поэтому даже небольшое потепление заметно сдвигает даты. Похожий сдвиг описан по температуре на шельфе Северной Америки [5] и по расслоению озёр [6]. Здесь такой подсчёт сделан для растворимости кислорода по разным рядам для одного моря.

Точное число дней зависит от ряда, уровня и солёности; устойчивы сам рост и его порядок величины. При этом три ряда не являются тремя

независимыми подтверждениями: OISST v2 и v2.1 – версии одного продукта, а OISST и Pathfinder основаны в основном на одних и тех же приборах AVHRR [1]. Число дней на 1 °C можно использовать только как грубую оценку при уровне 8 мг/л и в диапазоне температур 1982–2022 годов. Вывод о том, что у Атырау период растёт прежде всего за счёт весны, подтверждает только один ряд из трёх, поэтому его следует считать неустановленным.

Эти числа не означают, что рыбе стало не хватать кислорода. В опыте с молодыми белугами рыбы ели меньше и росли медленнее при 2–3 мг/л, а в более крупной весовой группе рыбы при 9–10 мг/л к концу опыта были тяжелее, чем при 5–6 мг/л [16]; опыт проводился в бассейнах при 18 °C, а не в море. Уровень 8 мг/л далёк от 2–3 мг/л. Кроме того, расчёт даёт только равновесие с воздухом. Измеренный кислород в верхнем слое у берегов Ирана составлял 69–109% расчётного равновесия (одно сомнительное значение 117%) [1, 14], а на мелководье северо-востока летом и осенью 2009 года 125–175% [1, 15]; значения работы [15] не удалось перепроверить. Поэтому реальный кислород может быть и ниже, и выше этого уровня, а проверить изменение измеренного кислорода по этим данным нельзя.

Если сравнивать кислород только в середине лета, сдвиг краёв сезона останется незамеченным. При принятой солёности 9,28 и уровне 8 мг/л края сезона у Атырау приходятся на июнь и август (при солёности 4,5 на конец июня и начало августа, OISST v2), у Актау на июнь и начало сентября. Сравнивать данные за эти месяцы полезно там, где указаны температура, солёность, глубина и метод.

Ограничения работы: расчёт относится только к поверхности; солёность постоянна, хотя у устья Урала она может быть намного ниже принятой, и уравнение подобрано для океанической воды [11, 12]; ячейка 1° смешивает открытую воду с прибрежной; полосы широты лишь

приближённо совпадают с частями моря, ячейки залива Кара-Богаз-Гол исключены [1]; Pathfinder – дневной ряд, а в 2013–2022 годах на севере в нём нет двух лет; уровень 8 мг/л выбран после просмотра данных; число сравнений велико, поэтому отдельные p около 0,05 следует считать лишь указанием.

Заключение

За 1982–2022 годы период, когда поверхностная вода Каспия при равновесии с воздухом не может удержать 8 мг/л кислорода, удлинился во всех частях моря и во всех трёх рядах (они не независимы): между 1982–1991 и 2013–2022 годами на севере на 12–23 дня (верхняя граница ненадёжна), в средней части на 19–24 дня (верхняя граница получена по месячным рядам и завышена интерполяцией, суточный ряд даёт 19), на юге на 10–16 дней, у Актау на 14–24 дня; участок у Атырау почти повторяет север, а само число дней там условно, потому что солёность неизвестна. В среднем период начинается раньше и заканчивается позже (в 4 из 30 сдвигов интервал включает ноль), смещение в сторону весны на севере показывает только один ряд, а по оценкам большая часть роста пришлась на время до 2003–2012 годов. Величина роста зависит от уровня, выбранного после просмотра данных: при 8,5 мг/л она меньше. Результат описывает равновесный уровень, а не измеренный кислород. Следующий шаг – сравнить этот календарь с регулярными замерами кислорода в казахстанской части Каспия за месяцы, на которые приходятся края сезона.

Вклад автора и использование искусственного интеллекта

Тему кислорода в Каспии для работы [1] автор выбрал из направлений, предложенных ментором образовательной программы ADMIT; ментор рекомендовал это направление. Автор нашёл для этой работы значения солёности [13] и опыт с белугой [16] и написал три первых абзаца введения; в них исправлены только запятые. Расчёт доли 2%, о которой говорится в третьем абзаце, выполнен ментором в работе

[1]. Вопрос о сезонном календаре, методика, расчёты, таблицы, рисунки и остальной текст статьи подготовлены другим ментором той же программы с использованием инструментов искусственного интеллекта (Claude, Anthropic). Работы [3–6] и [10] прочитаны по аннотациям, [11] цитируется по [12], значения из [14] и [15] взяты из работы [1]. Автор прочитал статью, сверил исходные числа с опубликованной работой [1] и вручную пересчитал пример из раздела «Методы»; остальные расчёты он не пересчитывал. Автор участвует в платной образовательной программе ADMIT. Исходные данные открыты [7–10]; программа расчётов хранится у ментора и предоставляется по запросу через автора.

Использованные источники:

1. Demin M. How much less oxygen can the warming Caspian Sea hold? The loss of oxygen solubility in the northern, middle and southern Caspian, 1982-2022 // Central Asian Scientific Journal. 2026. № 4(32), Vol. 1. P. 684–697. URL: https://cajournal.kz/issue.php?id=45 (дата обращения: 30.10.2026).

2. Demin M. Is the Caspian Sea warming faster than the world ocean, and is the trend accelerating? A satellite-era analysis of sea-surface temperature (1982-2022) // Central Asian Scientific Journal. 2026. № 2(30), Vol. 3. P. 59–64. URL: https://cajournal.kz/vol/2026/2(30)_3.pdf (дата обращения: 30.10.2026).

3. Breitburg D., Levin L.A., Oschlies A. et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters // Science. 2018. Vol. 359, № 6371. Art. eaam7240. DOI: 10.1126/science.aam7240.

4. Deutsch C., Ferrel A., Seibel B., Pörtner H.-O., Huey R.B. Climate change tightens a metabolic constraint on marine habitats // Science. 2015. Vol. 348, № 6239. P. 1132–1135. DOI: 10.1126/science.aaa1605.

5. Thomas A.C., Pershing A.J., Friedland K.D. et al. Seasonal trends and phenology shifts in sea surface temperature on the North American northeastern

continental shelf // Elementa: Science of the Anthropocene. 2017. Vol. 5. Art. 48. DOI: 10.1525/elementa.240.

6. Woolway R.I., Sharma S., Weyhenmeyer G.A. et al. Phenological shifts in lake stratification under climate change // Nature Communications. 2021. Vol. 12. Art. 2318. DOI: 10.1038/s41467-021-22657-4.

7. Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate // Journal of Climate. 2002. Vol. 15, № 13. P. 1609–1625. DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2. Данные: URL: https://downloads.psl.noaa.gov/Datasets/noaa.oisst.v2/ (дата обращения: 30.10.2026).

8. Saha K. et al. AVHRR Pathfinder version 5.3 level 3 collated (L3C) global 4km sea surface temperature for 1981-2023 [Набор данных] // NOAA National Centers for Environmental Information. 2016. DOI: 10.7289/V52J68XX.

9. NOAA CoastWatch West Coast Node. SST, Pathfinder Ver 5.3 (L3C), Day, Global, 0.0417°, 1981-present, Science Quality (Monthly Composite), dataset erdPH53sstdmday // ERDDAP. URL: https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/info/erdPH53sstdmday/index.html (дата обращения: 30.10.2026).

10. Huang B., Liu C., Banzon V. et al. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1 // Journal of Climate. 2021. Vol. 34, № 8. P. 2923–2939. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1. Данные: URL: https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/info/ncdcOisst21Agg_LonPM180/index.html ; https://www.ncei.noaa.gov/data/sea-surface-temperature-optimum-interpolation/v2.1/access/avhrr/ (дата обращения: 30.10.2026).

11. Garcia H.E., Gordon L.I. Oxygen solubility in seawater: better fitting equations // Limnology and Oceanography. 1992. Vol. 37, № 6. P. 1307–1312. DOI: 10.4319/lo.1992.37.6.1307.

12. TEOS-10. gsw_O2sol_SP_pt // Gibbs SeaWater (GSW) Oceanographic Toolbox. URL: https://www.teos-10.org/pubs/gsw/html/gsw_O2sol_SP_pt.html (дата обращения: 30.10.2026).

13. De Planhol X. Caspian Sea i. Geography // Encyclopaedia Iranica. Vol. V, Fasc. 1. 1990. P. 48–50. URL: https://www.iranicaonline.org/articles/caspian-sea-i/ (дата обращения: 30.10.2026).

14. Zaker N.H. Characteristics and seasonal variations of dissolved oxygen // International Journal of Environmental Research. 2007. Vol. 1, № 4. P. 296–301. URL: https://ijer.ut.ac.ir/m/article_140_820ab19a516e2c44fa31cd80c334d2da.pdf (дата обращения: 30.10.2026).

15. Абдурахманов Г.М., Канбетов А.Ш., Сокольская Е.А. Гидролого-гидрохимический и токсикологический режим рыбохозяйственных водаемов Урало-Каспийского бассейна // Юг России: экология, развитие. 2010. № 4. С. 8–12. DOI: 10.18470/1992-1098-2010-4-8-12.

16. Bagherzadeh Lakani F., Sattari M., Falahatkar B. Effect of different oxygen levels on growth performance, stress response and oxygen consumption in two weight groups of great sturgeon Huso huso // Iranian Journal of Fisheries Sciences. 2013. Vol. 12, № 3. P. 533–549. URL: https://jifro.ir/article-1-1091-en.pdf (дата обращения: 30.10.2026).