

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КАСПИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗОВ MERRA-2 ЗА ПЕРИОД 1980-2021 гг.

Сафаров С.Г.¹, Исмайлов В.Г.², Сафаров Э.С.¹

¹Министерство науки и образования Азербайджанской Республики,

Институт географии имени акад. Г. Алиева, Азербайджан
AZ1070, г. Баку, просп. Г.Джавида, 115: safarov53@mail.ru

²Бакинский Государственный Университет, Азербайджан
AZ1148, Баку, ул.З. Халилов 23: vusalhakimoglu@gmail.com

STUDY OF THE SURFACE TEMPERATURE OF THE CASPIAN SEA ACCORDING TO MERRA-2 REANALYSIS DATA FOR THE PERIOD 1980-2021

Safarov S.H.¹, Ismayilov V.G.², Safarov E.S.¹

¹Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Institute of Geography named after acad. G. Aliyev, Azerbaijan 115, H.Javid ave., Baku, AZ1070: safarov53@mail.ru

²Baku State University, Azerbaijan
23, Akademik Zahid Xalilov str., Baku, AZ1148

Keywords: Caspian Sea, climate change, sea surface temperature, linear trend, sea level changes

Summary. According to the data collected from MERRA-2 reanalysis for 1980-2021, using different statistical methods, the changes of the sea surface temperature in the Northern, Middle and Southern Caspian Sea, the reasons of their occurrence were studied, and the corresponding linear trends were estimated. It was found out that the average annual surface temperature in the period 2001-2021 increased by 0.5°C in the Northern Caspian, by 0.9°C in the Middle Caspian and by 0.7°C in the Southern Caspian compared with the period of 1980-2000. Different trends in surface temperature in different months and seasons have been revealed under the conditions of global warming and lowering of the level of the Caspian Sea in different parts of the water area. In 1980-2021 there is a significant negative trend in surface temperature in winter in the Northern Caspian Sea, but in other seasons, a positive trend is observed throughout the sea. All trends, except for autumn in the Northern Caspian Sea, were statistically significant at 0.05 level, and in most cases even at 0.01 level. Increase of contrasts between winter and spring surface temperatures in the Northern Caspian Sea against the background of sea level fall can extremely negatively affect the ecological state, including the biodiversity of the sea.

© 2023 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

Введение

Как известно, Каспийское море является крупнейшим замкнутым водоемом в мире, и его уровень постоянно подвержен колебаниям. Согласно современным представлениям, изменения уровня моря напрямую связаны с его водным балансом. Водный баланс, в свою очередь, определяется количеством речных стоков и атмосферных осадков, выпадающих на поверхность моря, которые составляют его приходную часть, а также количеством испарения с поверхности, составляющим его выходную часть. Одним из основных факторов, влияющих на испарение с поверхности моря, является температура поверхности моря (ТПМ). В связи с этим изучение по-

верхностного температурного режима и его изменений в акватории Каспийского моря имеет большое научное и практическое значение.

Каспийское море по своим физико-географическим условиям и рельефу дна делится на три части: Северный, Средний и Южный Каспий (Гидрометеорология..., 1992). Кроме того, максимальная глубина Северного Каспия составляет 20 м, Среднего Каспия — 788 м, Южного Каспия — 1025 м (Водный баланс..., 2016).

До недавнего времени исследования ТПМ Каспийского моря проводились в основном по данным измерений береговых наблюдательных пунктов, которые не могут объективно характеризовать всю морскую акваторию, особенно дина-

мику поверхностной температуры в открытом море. С другой стороны, хотя измерения, полученные морскими экспедициями, организованными в отдельные периоды, и измерения, проведенные дрейфтерами на ограниченных участках, лишь частично решают проблему, однако они не позволяют объективно определить пространственно-временные характеристики ТПМ (Мамедов və b., 2012). Упразднение ряда наблюдательных пунктов после распада Советского Союза и отсутствие адекватного обмена гидрометеорологической информацией между прикаспийскими странами усугубляют данную проблему (Мамедов, 2007). В связи с этим возможность использования данных современных гидродинамических моделей и спутниковых наблюдений (Гинзбург и др., 2004; Ginzburg et al., 2005; Гинзбург и др., 2012; Костяной и др., 2014; Гинзбург и др., 2020; Гинзбург и др., 2021; Kazmin, 2021; Səfərov və b., 2022) с целью исследования поверхностной температуры Каспийского моря вызывает большой интерес. Одним из основных преимуществ такого подхода является то, что в отличие от контактных данных, здесь можно оценить ТПМ по всей акватории, особенно в открытом море, при текущем уровне разрешения.

Использованные материалы и методы исследования

В работе были использованы среднемесячные данные ТПМ MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) за период 1980-2021 гг., включенный в интернет-портал GIOVANNI (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). Для определения статистических характеристик поверхностной температуры в открытом море и влияния на них климатических изменений и других факторов проведено осреднение данных реанализа по акваториям Каспийского моря отдельно в пределах Северного, Среднего и Южного Каспия. Для более удобного расчета температурных характеристик морской поверхности, как и (Гинзбург и др., 2004; Гинзбург и др., 2021) в качестве границы между Северным и Средним Каспием использовалась широта $44^{\circ}30'$ с. ш. В качестве границы между Средним и Южным Каспием применялась общепринятая широта $40^{\circ}15'$ с. ш.

Отметим, что хотя данные реанализов MERRA-2 охватывают относительно большой период (1980-2022 гг.), из-за небольшого их пространственного разрешения ($0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$ или 40-50 км) они не очень удобны для изучения особенностей распределения поверхностной температуры по акваториям моря. Однако относительно длинные временные ряды поз-

воляют изучать вариации поверхностной температуры в разных районах морской акватории. Для определения характеристик изменений ТПМ во времени статистические ряды были разделены на два равных периода (1980-2000 и 2001-2021 гг.), и для каждого из них были рассчитаны среднегодовые, среднесезонные и среднемесячные значения ТПМ, проведено их сравнение и проверена статистическая значимость выявленных изменений по критериям Стьюдента. Кроме того, для определения тенденций изменений ТПМ были построены соответствующие линейные тренды и проверена их статистическая значимость по следующему неравенству:

$$R/\sigma_R \geq s, \quad (1)$$

где R – коэффициент корреляции, σ_R – случайная среднеквадратичная погрешность, s – критическое значение критерия Стьюдента (Рождественский, Лобанова, 2010; Сикан, 2007).

Случайная среднеквадратическая ошибка рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma_R = (1 - R^2)/\sqrt{(n - 1)}, \quad (2)$$

где n — количество членов временного ряда. При 5%-ном уровне значимости $n=40$ $s=2.02$.

Указанные процедуры проводились также для отдельных месяцев и сезонов.

Полученные результаты и их обсуждение

На основе данных реанализов MERRA-2 были проанализированы месячные данные за период 1980-2021 гг. с целью более детального изучения пространственно-временных изменений поверхностной температуры Северного, Среднего и Южного Каспия. В табл. 1 представлены изменения температуры поверхности всех трех частей Каспийского моря во втором полугодии по сравнению с таковым первым.

Как видно из табл. 1, в период 2001-2021 гг. по сравнению с периодом 1980-2000 гг. среднегодовое значение ТПМ Северного Каспия увеличилось на 0.5°C . Наибольшее повышение температуры на 1.8°C и 1.9°C было зафиксировано в апреле и мае соответственно, а в январе и декабре отмечено резкое понижение температуры соответственно на 1.2°C и 1.9°C . Как уже было указано выше, статистическую значимость температурных аномалий оценивали при 5% уровне значимости по критериям Стьюдента. Поскольку степень свободы здесь связана с количеством лет в рассматриваемом временном ряду ($40-2=38$), по специальной

таблице (Иманов, 2011; Шуленин, 2012) можно определить, что соответствующее критическое значение критерия Стьюдента равно 2.024. Как видно из табл. 1, за исключением февраля, октября и ноября, в остальные месяцы происходили статистически значимые изменения в температурном режиме поверхностных вод Северного Каспия.

Как известно, Средний Каспий занимает большую площадь моря, чем Северный Каспий (Гидрометеорология..., 1992). Как видно из табл. 1, среднегодовое значение ТПМ за период 2001-2021 гг. увеличилось на 0.9°C по сравнению с периодом 1980-2000 гг. Наибольшее повышение было зафиксировано в августе и сентябре на 1.4 и 1.6°C соответственно, а наименьшее – в апреле на 0.1°C. Как видно из таблицы, статистически значимые повышения ТПМ Среднего Каспия происходили во все месяцы, за исключением апреля.

Южный Каспий отличается тем, что он глубже Северного и Среднего Каспия. Как видно из табл. 1, среднегодовые значения ТПМ в Южном Каспии наибольшие, что в основном связано с географическими условиями его расположения.

Среднегодовая температура водной поверхности в районе увеличивается с севера на юг (Гидрометеорология..., 1992). Как видно из табл. 1, за период 2001-2021 гг. среднегодовая температура поверхности моря увеличилась на 0.7°C по сравнению с периодом 1980-2000 гг. Наибольшее повышение температуры происходило в июле и августе на 1.1 и 1.3°C соответственно, а наименьшее – в апреле на 0.1°C. За исключением января, апреля, ноября и декабря, в остальные месяцы повышения ТРМ Южного Каспия оказались статистически значимыми (табл.1).

Сравнительный анализ режима ТПМ для разных районов Каспийского моря в отдельные сезоны года позволяет глубже понять процессы, происходящие в гидрологии моря. Хотя данный вопрос детально изучен для прибрежных районов моря по данным контактных наблюдений (Щербак, 1940; Зулфугаров, 1966; Пармузина, 1971; Потайчук, 1978; Гидрометеорология..., 1992; Дьяконов, Ибраев, 2003; Мамедов, 2007; Аллахвердиев, 2016), для районов открытого моря он исследован недостаточно подробно из-за малочисленности или отсутствия наблюдательных пунктов.

Таблица 1

Распределение средней поверхностной температуры моря (°C) по месяцам в периоды 1980-2000 и 2001-2021 гг., температурные аномалии и их статистическая значимость при 0.05

Периоды	Северный Каспий												Год
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	
1980-2000	1.7	0.4	1.5	8.5	17.1	23.4	26.4	25.2	19.9	13.3	7.2	4.5	12.4
2001-2021	0.6	0.3	2.8	10.3	19.0	24.6	27.1	26.2	20.7	13.7	7.1	2.7	12.9
Аномалия	-1.2	-0.1	1.3	1.8	1.9	1.2	0.7	1.0	0.9	0.4	-0.1	-1.9	0.5
t-тест	-4.0	-0.5	2.9	3.4	5.2	3.0	2.7	3.0	3.1	1.0	-0.3	-4.7	3.6
Статистическая значимость	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+
Периоды	Средний Каспий												Год
1980-2000	7.4	6.6	6.7	9.0	13.6	19.9	24.1	24.8	21.9	17.5	12.7	9.2	
2001-2021	8.1	7.2	7.4	9.1	14.7	21.1	25.1	26.2	23.5	18.7	13.7	9.9	15.4
Аномалия	0.7	0.7	0.7	0.1	1.2	1.2	1.0	1.4	1.6	1.2	1.0	0.7	0.9
t-тест	4.0	3.7	3.5	0.3	4.5	3.1	3.3	3.6	6.2	3.8	3.2	2.9	6.7
Статистическая значимость	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Периоды	Южный Каспий												Год
1980-2000	12.2	10.7	10.5	12.8	17.1	22.0	25.0	26.4	24.7	21.5	17.9	14.6	
2001-2021	12.5	11.3	11.2	13.0	17.9	23.0	26.1	27.7	25.7	22.2	18.3	14.8	18.6
Аномалия	0.4	0.6	0.7	0.1	0.8	1.0	1.1	1.3	1.0	0.7	0.5	0.2	0.7
t-тест	1.6	2.6	3.4	0.7	2.4	2.6	3.6	3.8	4.6	2.9	1.7	0.7	4.9
Статистическая значимость	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+

Ниже показана динамика среднегодовой ТПМ во всех трех районах Каспийского моря (рис. 1). Как видно, динамика среднегодового повышения ТПМ наблюдается во всех трех частях Каспийского моря, но наибольшее повышение выявлено в Среднем Каспии, а наименьшее – в Северном Каспии. Более высокие ТПМ отмечаются в Южном Каспии (17.0÷19.7°C), а самые низкие – в Северном (11.0÷13.7°C). В Среднем Каспии ТПМ колеблется от 13.3 до 16.1°C. Годы, в которые наблюдаются экстремумы, почти совпадают. Коэффициенты корреляции между ТПМ Северного Каспия и Среднего Каспия, а также Южного Каспия составляют 0.82 и 0.68 соответственно, а между Средним Каспием и Южным Каспием – 0.89.

Для изучения характера изменения ТПМ во времени в различных частях Каспийского моря были рассчитаны соответствующие тренды (табл. 2). Как видно из таблицы, наибольший рост среднегодовой ТПМ в рассматриваемый период отмечен в Среднем Каспии (0.392°C/10 лет), наименьший – в Северном Каспии (0.202°C/10 лет) и 0.299°C/10 лет в Южном Каспии, значения которых близки к полученным в (Гинзбург и др., 2021).

Как уже было упомянуто выше, для определения статистической значимости линейных трендов использовалось неравенство $R/\sigma_R \geq s$. В табл. 3 приведены коэффициенты детерминации и расчетные значения R/σ_R для каждой части Каспийского моря и каждого сезона. Для 40-летнего временного ряда значение s равно 2.02 при уровне значимости 0.05 и 2.7 при уровне значимости 0.01 (Иманов, 2011). С учетом этого и на основании рис. 1 и табл. 3 можно отметить, что линейные тренды среднегодовой ТПМ для всей акватории Каспийского моря статистически значимы на уровне 0.01.

Динамика средней зимней ТПМ Северного, Среднего и Южного Каспия во времени представлена на рис. 2. В отличие от годовой ТПМ, в этом сезоне для разных районов Каспия наблюдалась разная динамика. Как видно из рис. 2, на фоне заметного повышения ТПМ в Среднем Каспии и умеренного ее повышения в Южном Каспии, в Северном Каспии наблюдалось резкое ее снижение. Более высокие температуры отмечаются в Южном Каспии (11.0÷14.0°C), а самые низкие – в Северном Каспии (0.2÷3.7°C). В Среднем Каспии температура поверхности колеблется в пределах 6.9÷9.3°C.

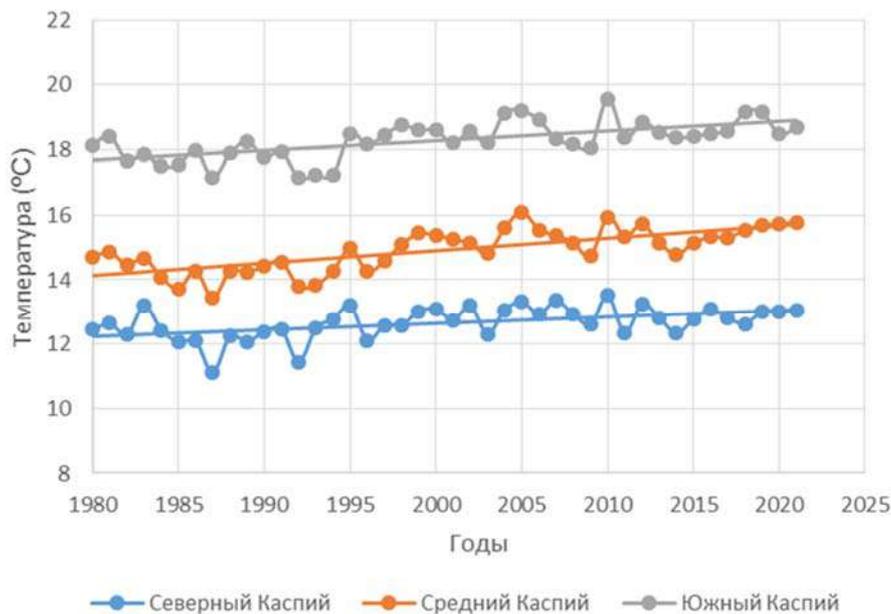


Рис. 1. Временной ход среднегодовой ТПМ в различных частях Каспийского моря

Таблица 2

Линейные тренды (°C/10 лет) ТПМ Северного, Среднего и Южного Каспия для разных сезонов за 1980-2021 гг.

Акватории Каспия	Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Северный	0.202	-0.475	0.743	0.465	0.076
Средний	0.392	0.279	0.263	0.544	0...481
Южный	0.299	0.153	0.277	0.517	0.256

Таблица 3

Коэффициенты детерминации (R^2) и отношения R/σ_R трендов ТРМ для разных сезонов года в акватории Каспийского моря за 1980-2021 гг.

Акватории Каспия	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	R^2	R/σ_R								
Северный	0.244	3.50	0.461	5.70	0.417	5.21	0.395	4.98	0.013	0.73
Средний	0.539	6.67	0.297	4.01	0.244	3.50	0.401	5.04	0.380	4.83
Южный	0.399	5.03	0.106	2.12	0.261	3.66	0.375	4.77	0.195	3.04

Хотя годы, в которые наблюдаются экстремумы, несколько перекрываются для Среднего и Южного Каспия, они существенно различаются для Северного Каспия. Об этом также свидетельствуют соответствующие значения коэффициентов корреляции. Так, коэффициент корреляции между ТРМ Северного и Среднего Каспия составляет -0.30, Северного и Южного Каспия – -0.38, а между Средним Каспием и Южным Каспием – 0.72.

В табл. 2 приведены значения линейных трендов средних зимних ТПМ, рассчитанные по рис. 2 для разных районов Каспийского моря. Как видно, в зимний период произошло резкое понижение ТПМ Северного Каспия с отрицательным трендом -0.475 °C/10 лет. Как уже указывалось выше, в последние годы происходит резкое падение уровня моря (Сафаров и др., 2017; Chen et al., 2017; Агре et al., 2020; Выручалкина и др., 2020). Температура водной поверхности Северного Каспия, мелеющей с понижением уровня моря, становится более чувствительной к температурным изменениям окружающего воздуха из-за ухудшения вертикального теплообмена (Потайчук, 1978). В дальнейшем, в связи с ожидаемым продолжением падения уровня моря, данная тенденция может усилиться. Как видно из табл. 2, тренды

температуры в Среднем и Южном Каспии положительные и составляют 0.279 и 0.153 °C/10 лет соответственно. По табл. 3 можно отметить, что для Северного и Среднего Каспия тренды средней зимней ТРМ статистически значимы на уровне 0.01 и для Южного Каспия – на уровне 0.05.

Весной характер изменения средней ТПМ от года к году в различных частях Каспийского моря также отличается своеобразием (рис. 3). Как видно из рисунка, более высокие температуры наблюдаются в Южном Каспии и имеют возрастающую динамику, колеблются в пределах $12.0 \div 15.2$ °C. Динамика изменения (повышения) температуры Среднего Каспия соответствует Южному Каспию и колеблется в пределах $8.5 \div 11.3$ °C.

Как видно из рис. 3 и табл. 2, динамика повышения ТПМ Северного Каспия стала более резкой и изменялась в диапазоне $6.2 \div 11.9$ °C. В результате этого в период после 2005 г. весенняя ТПМ Северного Каспия быстро повышалась и превышала температуру Среднего Каспия. Основная причина этого в том, что из-за мелководья Северного Каспия его поверхностные воды нагреваются быстрее. В последнее время в связи с понижением уровня моря влияние данного фактора становится все более острым.

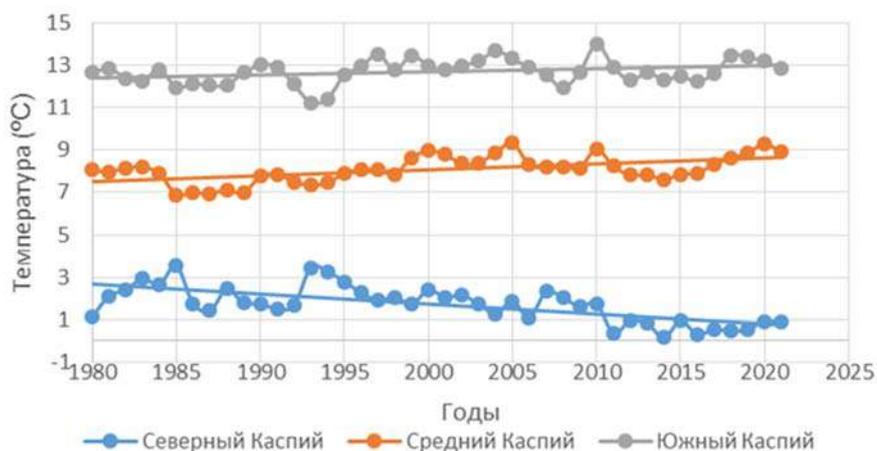


Рис. 2. Временной ход среднезимней ТПМ в различных частях Каспийского моря

Годы экстремальных температур в основном совпадают. Это также находит отражение в значениях коэффициентов взаимной корреляции. Так, коэффициенты корреляции между поверхностными температурами Северного Каспия и Среднего и Южного Каспия составили 0.86 и 0.83 соответственно, а между Средним Каспием и Южным Каспием – 0.84.

На основании рис. 3 рассчитаны линейные тренды ТПМ для каждой части Каспийского моря (табл. 2) и определено, что ее значение для Северного Каспия ($0.743^{\circ}\text{C}/10$ лет) значительно больше, чем для Среднего и Южного Каспия (0.263 и $0.267^{\circ}\text{C}/10$ лет соответственно). Более резкое повышение температуры поверхности Северного Каспия связано с глобальным потеплением и резким падением уровня моря.

Как видно из табл. 3, линейные тренды ТПМ для всей акватории Каспийского моря в весенний период статистически значимы на уровне 0.01.

В летний сезон в рассматриваемых частях Каспийского моря характеристики изменений средней ТПМ от года к году отличаются своими особенностями и имеют возрастающую динамику (рис. 4). Как видно из рисунка, летом более высокие ТПМ наблюдаются не в Среднем и Южном Каспии, а в Северном Каспии и колеблются в пределах $23.9\div 27.5^{\circ}\text{C}$. Линейный тренд для Южного Каспия проходит примерно на 0.5°C ниже, чем для Северного Каспия (рис. 4). Годы, в которые наблюдаются экстремумы, в основном совпадают для всех трех областей. Коэффициент корреляции между средними летними ТПМ Северного и Среднего Каспия, а также Северного и Южного Каспия составляет 0.93 и 0.87 соответственно. Между ТПМ Сред-

него и Южного Каспия также существует достаточно тесная связь (0.2).

Как видно из рис. 4 и табл. 2, летом во всех трех частях Каспийского моря наблюдаются значительные тренды ТПМ ($0.465\text{-}0.544^{\circ}\text{C}/10$ лет), которые статистически значимы на уровне 0.01.

Осенью характер распределения ТПМ по акватории в основном адекватен географическим широтам. Так, самая высокая температура зафиксирована в Южном Каспии, а самая низкая – в Северном (рис. 5).

Как видно из рис. 5 и табл. 2, средняя осенняя ТПМ Северного Каспия колеблется в пределах $12.1\div 15.2^{\circ}\text{C}$ и практически не имеет заметного тренда. ТПМ Среднего Каспия колеблется в пределах $15.8\div 19.8^{\circ}\text{C}$, а линейный тренд соответствует значительному росту. ТПМ в Южном Каспии колеблется в пределах $19.6\div 22.9^{\circ}\text{C}$, а линейный тренд соответствует умеренному росту.

Коэффициент корреляции между средними осенними ТПМ Северного и Среднего Каспия, а также Северного и Южного Каспия составляет 0.73 и 0.76 соответственно. Между ТПМ Среднего и Южного Каспия также существует достаточно тесная связь (0.93).

Как видно из рис. 5 и табл. 2, в Среднем Каспии наблюдается резкий ($0.481^{\circ}\text{C}/10$ лет), а в Южном Каспии значительный положительный ($0.256^{\circ}\text{C}/10$ лет) тренд ТПМ. В Северном Каспии заметного тренда ТПМ не наблюдается ($0.076^{\circ}\text{C}/10$ лет). Как видно из табл. 3, в Среднем и Южном Каспии тренды средне-осенней ТПМ статистически значимы при уровне 0.01, а в Северном Каспии тренд не является статистически значимым даже при уровне 0.05.

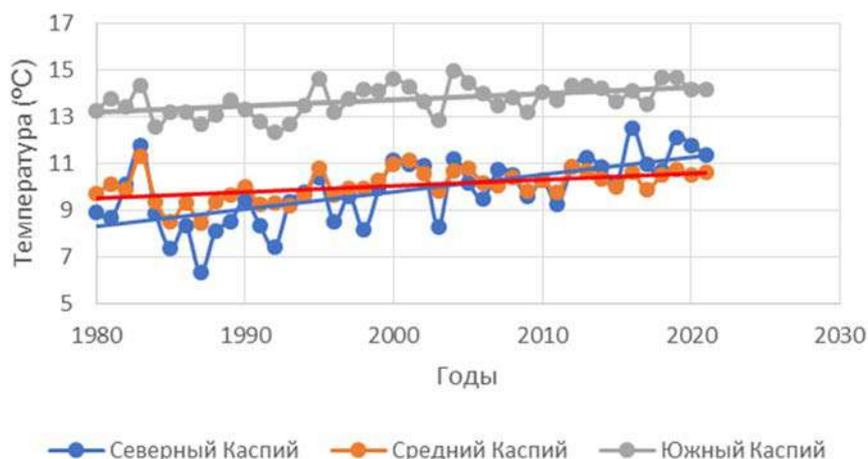


Рис. 3. Временной ход средневесенней ТПМ в различных частях Каспийского моря

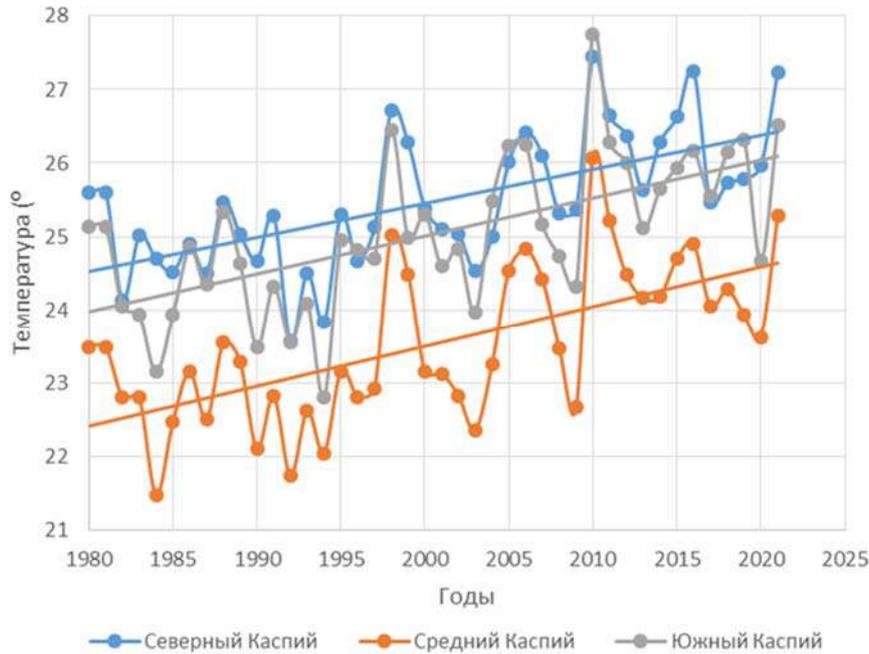


Рис. 4. Временной ход среднелетней ТПМ в различных частях Каспийского моря

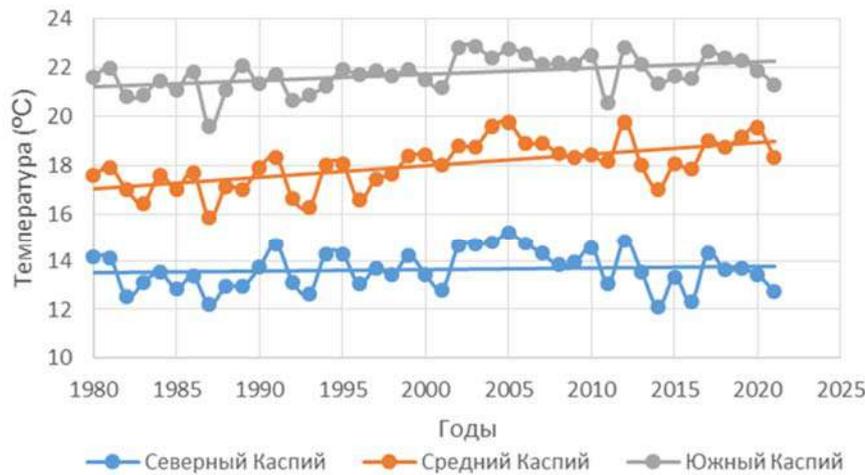


Рис. 5. Временной ход средней осенней ТПМ в различных частях Каспийского моря

Выводы

На основе анализа данных реанализа MERRA-2 по поверхностной температуре Каспийского моря за 1980-2021 гг. были получены следующие результаты:

1. В целом среднегодовая температура поверхности моря уменьшается с юга Каспийского моря на север. Однако весной и особенно в летние месяцы эта закономерность нарушается, так как температура поверхности Северного Каспия весной приближается к температуре Среднего Каспия и даже превосходит ее после 2005 г. Летом самые низкие сезонные температуры наблюдаются в Среднем Каспии, тогда как температура Северного Каспия почти равна температуре Южного Каспия.
2. На фоне глобального потепления и климатических изменений, наблюдается статистически значимые повышения среднегодовой температуры поверхности Северного, Среднего и Южного Каспия, так что в период 2001-2021 гг. по сравнению с периодом 1980-2000 гг. это увеличение составляет 0.4°C, 0.9°C и 0.7°C соответственно.
3. Трендовый анализ показал, что во все сезоны температура поверхности моря в той или иной степени повышается, однако в зимний сезон температура поверхности моря в Северном Каспии имеет тенденцию к значительному снижению, что с большей вероятностью может быть объяснено его обмелением в результате падения уровня моря.

4. В летнем сезоне наибольшие значения температуры поверхности моря наблюдаются в Северном Каспии, что может быть объяснено его мелководьем и постепенным обмелением в связи с падением уровня моря.
5. В условиях глобального потепления и понижения уровня Каспийского моря в разных частях акватории выявлены разные тренды изменения температуры поверхности моря в разные месяцы и сезоны года. Так, в 2001-2021 гг. по сравнению с 1980-2000 гг. в декабре и январе месяцах средняя температура поверхности Северного Каспия снизилась на

-1.9°C и -1.2°C соответственно, а в апреле и мае повысилась на 1.8°C и 1.9°C соответственно, что в основном связано с ускорением обмеления.

Таким образом, на фоне падения уровня моря увеличение контрастов между зимними и весенними поверхностными температурами в Северном Каспии может нарушить традиционные циркуляционные процессы и крайне отрицательно повлиять на экологическое состояние моря, в том числе на его биоразнообразие.

ЛИТЕРАТУРА

- Аллахвердиев З.С. Воздействие климатических изменений на температуру поверхности воды западного Каспия (Южная территория Азербайджана). Гидрометеорология и экология. Алматы, вып.1, 2016, с. 41-48.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. Научно-метод. пособие (под ред. Е.С.Нестерова). Триада-ЛТД, Москва. 2016, 378 с.
- Выручалкина Т.Ю., Дианский Н.А., Фомин В.В. Влияние на эволюцию уровня Каспийского моря многолетних изменений режима ветра над его регионом в 1948-2017 гг. Водные ресурсы, No. 2 (47), 2020, с. 230-240.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Проект «Моря». Том VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия (Под ред. Ф.С.Терзиева, А.Н.Косарева и А.А.Керимова). Гидрометеиздат. Санкт-Петербург, 1992, 359 с.
- Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А. Динамика зоны апвеллинга у восточного побережья Каспия в сезонном цикле (май-сентябрь) по спутниковым среднесезонным температурным данным (2003-2019). В: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Том 17, No. 7, 2020, с. 215-226, DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-7-215-226.
- Гинзбург А.И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А. Сезонная и межгодовая изменчивость температуры поверхности Каспийского моря. Океанология, Т. 44, No. 5, 2004, с. 645-659.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980-2020). В: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Том 18, No. 5, 2021, с. 277-291, DOI:10.21046/2070-7401-2021.18.5.277-291.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Долговременная изменчивость температуры поверхности Каспийского моря. В: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Том 9, No. 2, 2012, с. 262-269.
- Дьяконов Г.С., Ибраев Р.А. Динамика вод Каспийского моря над Апшеронским порогом в 2003 году. Морской гидрофизический журнал, Т.35, No. 6, 2019, с. 633-645, <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-6-633-645>.
- Зулфугаров Т.Х. Об аномалии температуры воды в прибрежных водах западного побережья Среднего Каспия. Труды Азербайджанского Географического Общества. Т. 3, 1966, с. 162-167.
- Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А., Шеремет Н.А. Южные моря России. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (ред. В.М. Катцов, С.М.Семенов). ИГКЭ Росгидромета и РАН. Москва, 2014, с. 644-683.

REFERENCES

- Allahverdiev Z.S. Impact of climate change on water surface temperature in the western Caspian (southern territory of Azerbaijan). Hydrometeorology and ecology. Almaty, Vol. 1, 2016, pp. 41-48 (in Russian).
- Arpe K., Molavi-Arabshahi M., Leroy S. Wind variability over the Caspian Sea, its impact on Caspian seawater level and link with ENSO. International Journal of Climatology, No. 14, 2020, pp. 6039-6054/ <https://doi.org/10.1002/joc.6564>.
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Longterm Caspian Sea level change. Geophysical Research Letters, Vol. 44, 2017, pp. 6993-7001, DOI: 10.1002/2017GL073958.
- Dyakonov G.S., Ibraev R.A. Dynamics of the waters of the Caspian Sea over the Apsheron threshold in 2003. Marine Hydrophysical Journal, Vol. 35, No. 6, 2019, pp. 633-645, <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-6-633-645> (in Russian).
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Sea surface temperature variability. In: The Caspian Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. Vol. 5 Part P, 2005, pp. 59-81, DOI: 10.1007/698 5 004.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Serykh I.V., Lebedev S.A. Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980-2020). In: Modern problems of remote sensing of the Earth from space. Vol. 18, No. 5, 2021, pp. 277-291, DOI:10.21046/2070-7401-2021-18.5.277-291 (in Russian).
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Dynamics of the upwelling zone near the eastern coast of the Caspian Sea in the seasonal cycle (May-September) according to satellite long-term average temperature data (2003–2019). In: Modern problems of remote sensing of the Earth from space. Vol. 17, No. 7, 2020, pp. 215-226, DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-7-215-226 (in Russian).
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Long-term surface temperature variability of the Caspian Sea. In: Modern problems of remote sensing of the Earth from space. T.9, No. 2, 2012, pp. 262-269 (in Russian).
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Seasonal and inter-annual variability of the surface temperature of the Caspian Sea. Oceanology, Vol. 44, No. 5, 2004, pp. 645-659 (in Russian).
- Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Sea project. Volume VI. Caspian Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions. Edited by F.S.Terzieva, A.N.Kosarev and A.A.Kerimov. Gidrometeoizdat. St. Petersburg, 1992, 359 p. (in Russian).
- Imanov F.A. Statistical methods in hydrometeorology. Baku, 2011, 272 p. (in Azerbaijani).
- Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lebedev S.A., Sheremet N.A. South Seas of Russia. In: The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the

- Мамедов Р.М. Гидрометеорологическая изменчивость и экогеографические проблемы Каспийского моря. Элм. Баку, 2007, 453 с.
- Пармузина Т.А. Некоторые особенности пространственно-временной изменчивости температуры поверхности Каспийского моря. Труды НИИАК, вып. 76, 1971, с. 74-89.
- Потайчук С.И. Изменение температурного режима Северного Каспия при падении и повышении уровня моря. Труды ГОИН, Вып. 139, 1978, с. 65-71.
- Рождественский А.В., Лобанова А.Г. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. Нестор-История. С-Пб., 2010, 162 с.
- Сафаров Э.С., Родриго Абарка Дел-Рио, Сафаров С.Г., Мамедов Р.М., Крето Ж-Ф. Явление Эль-ниньо и колебание уровня Каспийского моря. Гидрометеорология и Экология, No. 1, 2017, с. 7-14.
- Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. РГГМУ. С-Пб., 2007, 279 с.
- Шуленин В.П. Математическая статистика. Ч. 1. Параметрическая статистика: учебник. Изд-во НТЛ. Томск, 2012, 540 с.
- Щербак С.Я. Температура воды на поверхности в средней и южной частях Каспийского моря. В: Труды по комплексному изучению Каспийского моря. Изд-во АН СССР. Москва-Ленинград, 1940, с. 66-69.
- Агре К., Molavi-Arabshahi M., Leroy S. Wind variability over the Caspian Sea, its impact on Caspian seawater level and link with ENSO. International Journal of Climatology, No. 14, 2020, pp. 6039-6054/ <https://doi.org/10.1002/joc.6564>.
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J-F., Safarov E.S. Longterm Caspian Sea level change. Geophysical Research Letters, Vol. 44, 2017, pp. 6993-7001, DOI: 10.1002/2017GL073958.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Sea surface temperature variability. In: The Caspian Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. Vol. 5 Part P, 2005, pp. 59-81, DOI: 10.1007/698 5 004.
- Kazmin A.S. Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 250, 2021, 107150, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107150>.
- İmanov F.A. Hidrometeorologiyada statistik metodlar. Bakı, 2011, 272 s.
- Məmmədov R.M., Səfərov E.S., Səfərov S.H. Xəzər dənizində səth suları temperaturunun drifterlər vasitəsilə tədqiqi. AMEA Xəbərləri. Yer elmləri seriyası, No. 1, 2012, s. 55-59.
- Səfərov S.H., Əhlimanova İ.V., İsmayılov V.Y. Qiziləgac körfəzi akvatoriyasında su səthinin temperaturunun reanaliz məlumatları əsasında tədqiqi. "Müasir təbiət və iqtisad elmlərinin aktual problemləri" mövzusunda Beynəlxalq elmi konfrans (Ümummilli Lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 99-ci ildönümünə həsr olunub), 3-cü cild, Gəncə ş., 2022, s. 87-88.
- territory of the Russian Federation(Ed. V.M.Kattsov, S.M.Semenov), IGKE of Roshydromet and RAS, Moscow, 2014, pp. 644-683 (in Russian).
- Kazmin A.S. Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 250, 2021, 107150, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107150>.
- Mamedov R.M. Hydrometeorological variability and ecogeographic problems of the Caspian Sea. Elm. Baku, 2007, 453 p. (in Russian).
- Mammadov R.M., Safarov E.S., Safarov S.H. Study of the surface temperature regime in the Caspian Sea using drifters. ANAS Proceedings. The Sciences of Earth, No. 1, 2012, pp. 55-59 (in Azerbaijani).
- Parmuzina T.A. Some features of space-time variability surface temperature of the Caspian Sea. Proceedings of NIIAK, No.76, 1971, pp. 74-89 (in Russian).
- Potaichuk S.I. Changes in the temperature regime of the Northern Caspian during the fall and rise of the sea level. Proceedings of the State Oceanographic Institute, No. 139, 1978, pp. 65-71 (in Russian).
- Rozhdstvensky A.V., Lobanova A.G. Guidelines for evaluating homogeneity hydrological characteristics and determination of their calculated values from heterogeneous data. Nestor-Istoriya. St. Petersburg, 2010, 162 p. (in Russian).
- Safarov E.S., Rodrigo Abarca Del-Rio, Safarov S.H., Mamedov R.M., Creto J-F. The phenomenon of El Niño and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Hydrometeorology and Ecology, No. 1, 2017, pp. 7-14 (in Russian).
- Safarov S.H., Ahlimanova I.V., Ismayilov V.Y. Research of water surface temperature in the water area of Kyzilagac Bay based on reanalysis data. International scientific conference on "Current problems of modern natural and economic sciences" (dedicated to the 99th anniversary of the birth of National Leader Heydar Aliyev), Ganja city, Vol. 3, 2022, pp. 87-88 (in Azerbaijani).
- Shcherbak S.Ya. Surface water temperature in the middle and southern parts of the Caspian Sea. Proceedings on the integrated study of the Caspian Sea. Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. Moscow-Leningrad, 1940, pp. 66-69 (in Russian).
- Shulenin V.P. Mathematical statistics. Part 1. Parametric statistics: textbook. NTL Publishing House. Tomsk, 2012, 540 p. (in Russian).
- Sikan A.V. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. RGGMU. St. Petersburg, 2007, 279 p. (in Russian).
- Vyruchalkina T.Yu., Diansky N.A., Fomin V.V. Effect on the evolution of the Caspian Sea level of long-term changes in the wind regime over its region in 1948–2017. Water resources, No. 2 (47), 2020, pp. 230-240 (in Russian).
- Water balance and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Modeling and forecast: educational and methodical manual edited by E.S.Nesterov. Triada ltd. Moscow, 2016, 378 p. (in Russian).
- Zulfugarov T.Kh. On the anomaly of water temperature in the coastal waters of the western coast of the Middle Caspian. Proceedings of the Azerbaijan Geographical Society, Vol. 3, 1966, pp. 162-167 (in Russian).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КАСПИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗОВ MERRA-2 ЗА ПЕРИОД 1980-2021 ГГ.

Сафаров С.Г.¹, Исмайлов В.Г.², Сафаров Э.С.¹

¹Министерство науки и образования Азербайджанской Республики,
Институт географии имени акад. Г. Алиева, Азербайджан
AZ1070, г. Баку, просп. Г.Джавида, 115: safarov53@mail.ru
²Бакинский Государственный Университет, Азербайджан
AZ 1148, Баку, ул.З. Халилов 23: vusalhakimoglu@gmail.com

Резюме. В статье по данным реанализа MERRA-2 за 1980-2021 гг. с применением различных статистических методов изучены изменения поверхностной температуры Северного, Среднего и Южного Каспия и их причины, а также оценены соответствующие линейные тренды. Установлено, что среднегодовая поверхностная температура за период 2001-2021 гг. увеличилась на 0.5°C в Северном Каспии, на 0.9°C в Среднем Каспии и на 0.7°C в Южном Каспии по сравнению с периодом 1980-2000 гг. В условиях глобального потепления и понижения уровня Каспийского моря в разных частях акватории выявлены разные тренды изменения температуры поверхности в разные месяцы и сезоны года. Так, во втором периоде по сравнению с первым, средняя температура поверхности Северного Каспия снизилась соответственно на -1.9°C и -1.2°C в декабре и январе и на 1.8°C и 1.9°C повысилась в апреле и мае, что в основном связано с ускорением обмеления. Хотя в Среднем и Южном Каспии повышение поверхностной температуры регистрируется во все месяцы, более значительное повышение происходит в более теплые периоды года. В 1980-2021 гг. зимой в Северном Каспии отмечен значительный отрицательный тренд поверхностной температуры, однако в остальные сезоны по всей акватории моря наблюдается положительный тренд. Все тренды, за исключением осеннего в Северном Каспии, оказались статистически значимыми на уровне 0.05, а в большинстве случаев даже на уровне 0.01. Увеличение контрастов между зимними и весенними поверхностными температурами в Северном Каспии на фоне падения уровня моря может крайне отрицательно повлиять на экологическое состояние, в том числе на биоразнообразие моря.

Ключевые слова: Каспийское море, изменения климата, температура поверхности моря, линейный тренд, изменения уровня моря

MERRA-2 REANALİZ MƏLUMATLARINA ƏSASƏN 1980-2021 DÖVRÜ ÜÇÜN XƏZƏR DƏNİZİNİN SƏTH TEMPERATURUNUN TƏDQIQI

Səfərov S.H.¹, İsmayilov V.H.², Səfərov E.S.¹

¹ Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi akademik G.Əliyev adına Coğrafiya İnstitutu, Azərbaycan
AZ1070, Bakı, H.Cavid prosf., 115: safarov53@mail.ru
²Bakı Dövlət Universiteti, Azərbaycan
Akademik Zahid Xəlilov küçəsi, 23, Bakı, AZ1148

Xülasə. Məqalədə 1980-2021-ci illər MERRA-2 reanaliz məlumatlarına əsasən və müxtəlif statistik metodların tətbiqi ilə Şimali, Orta və Cənubi Xəzərin səth temperaturunda baş verən dəyişikliklər və onları yaradan səbəblər tədqiq edilmiş, həmçinin müvafiq xətti trendlər statistik üsullarla qiymətləndirilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, 1980-2000 dövrünə nisbətən 2001-2021 dövründə orta illik səth temperaturu Şimali Xəzərdə 0.5 °C, Orta Xəzərdə 0.9 °C, Cənubi Xəzərdə isə 0.7 °C artmışdır. Qlobal istiləşmə və Xəzər dənizi səviyyəsinin azalması şəraitində akvatoriyanın müxtəlif hissələrində səth temperaturunun ilin müxtəlif ay və fəsiləri üzrə fərqli dəyişmə tendensiyaları aşkara çıxarılmışdır. Belə ki, 2-ci dövrdə 1-ci dövrə nisbətən Şimali Xəzərdə orta səth temperaturu dekabr və yanvar aylarında müvafiq olaraq -1.9 °C və -1.2 °C aşağı düşmüş, aprel və may aylarında isə müvafiq olaraq 1.8 °C və 1.9 °C artmışdır ki, bu da dayazlaşmanın sürətlənməsi ilə əlaqədardır. Orta və Cənubi Xəzər üzrə bütün aylarda səth temperaturunun artımı qeydə alınsa da, daha böyük artımlar ilin daha isti dövrlərini əhatə edir. 1980-2021-ci illərdə qışda Şimali Xəzərin səth temperaturunda əhəmiyyətli mənfə tendensiya qeyd edilə də, digər mövsümlərdə bütün dəniz akvatoriyası üzrə müsbət tendensiya müşahidə olunur. Şimali Xəzərdə payız fəslə istisna olmaqla, bütün digər temperatur trendləri 0.05°C, əksər hallarda isə hətta 0.01°C səviyyəsində statistik əhəmiyyətli olmuşdur. Dəniz səviyyəsinin aşağı düşməsi fonunda Şimali Xəzərdə qış və yaz səth temperaturları arasındakı təzadların artması ekoloji vəziyyətə, o cümlədən dənizin biomüxtəlifliyinə son dərəcə mənfə təsir göstərə bilər.

Açar sözlər: Xəzər dənizi, iqlim dəyişmələri, dənizin səth temperaturu, xətti trend, dəniz səviyyə dəyişmələri.