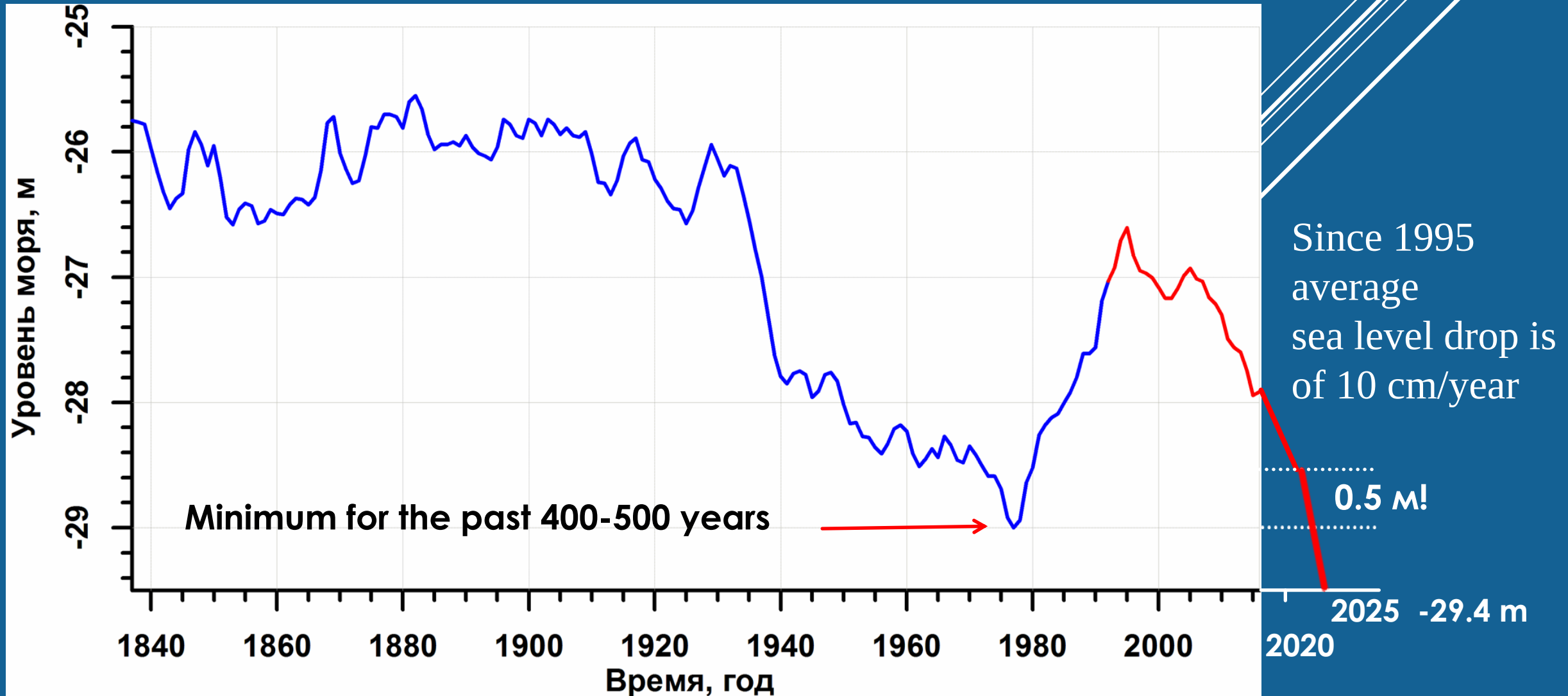


Снижение уровня Каспийского моря и региональное изменение климата

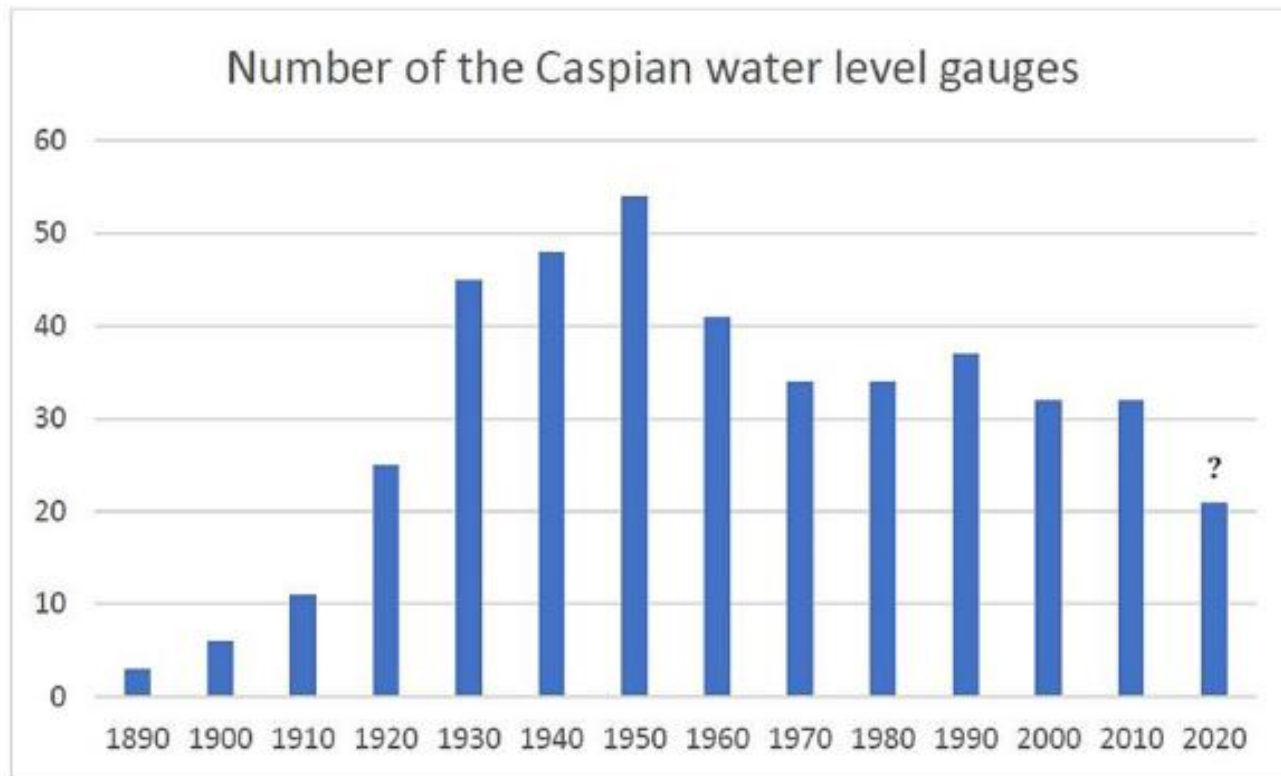
Андрей Костяной

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Москва

The Caspian Sea level (1836-2025)



Water level gauges in the Caspian Sea (1890-2020)



(Lahijani et al., 2023)



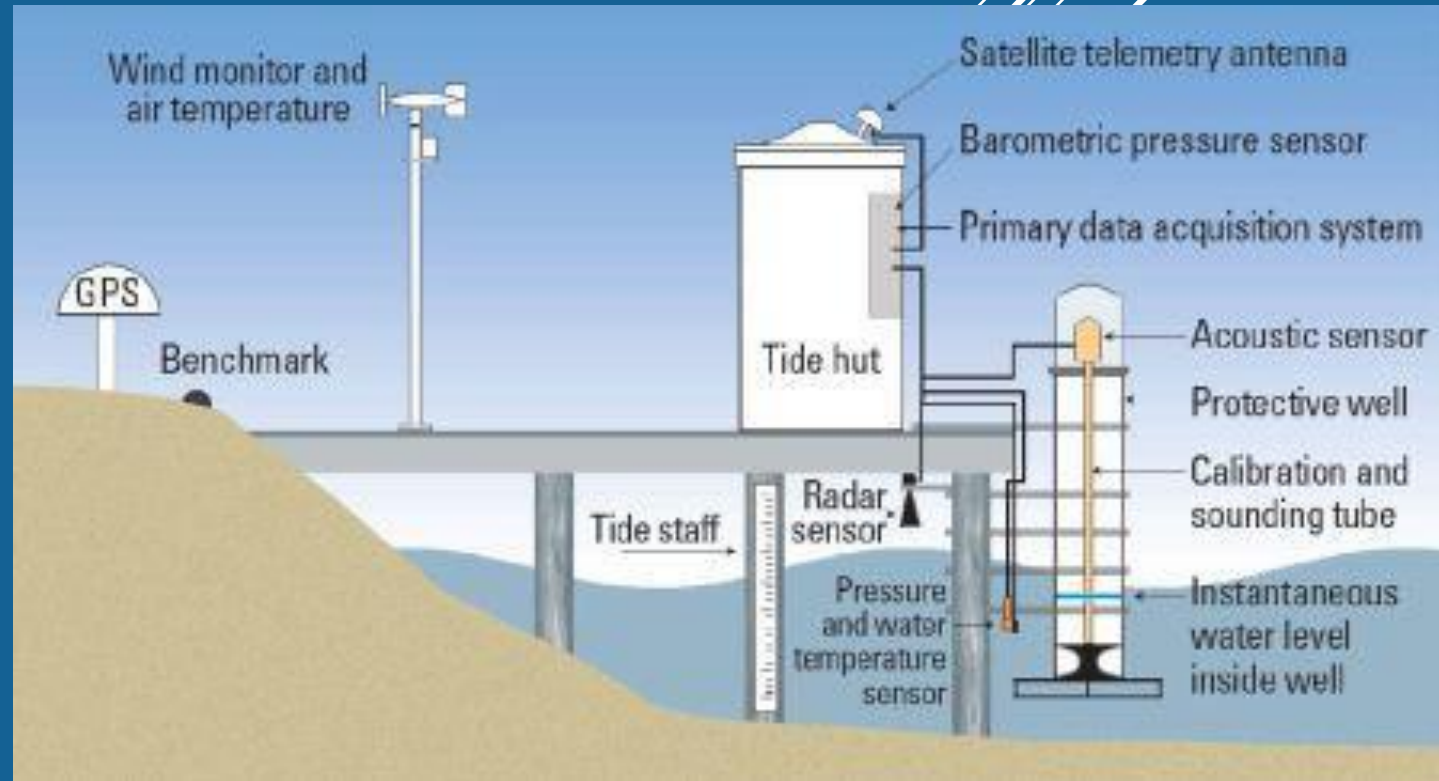
Level pole (1805),
Kronstadt tide gauge,
Baltic Height System

Water level gauge in Baku 1836-present

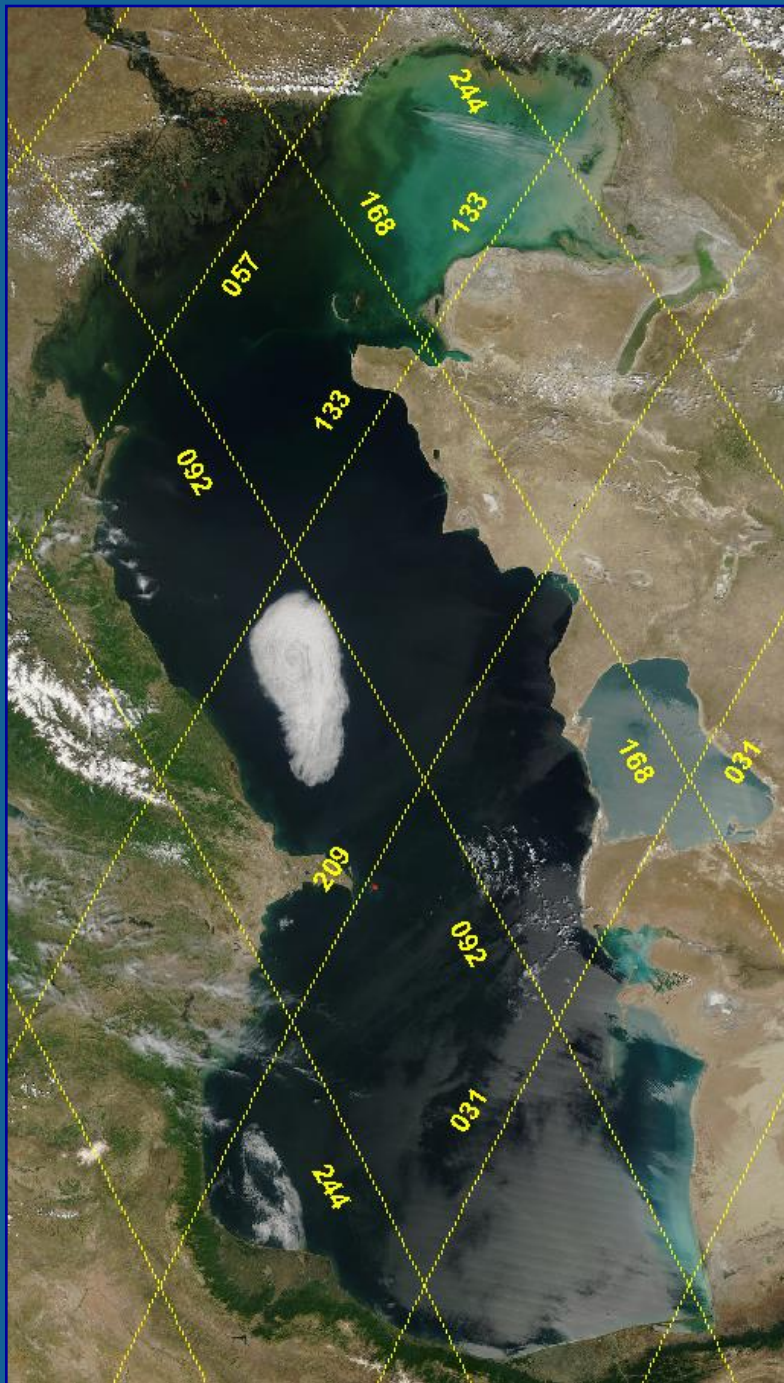
Float mechanical gauges



13.09.2007



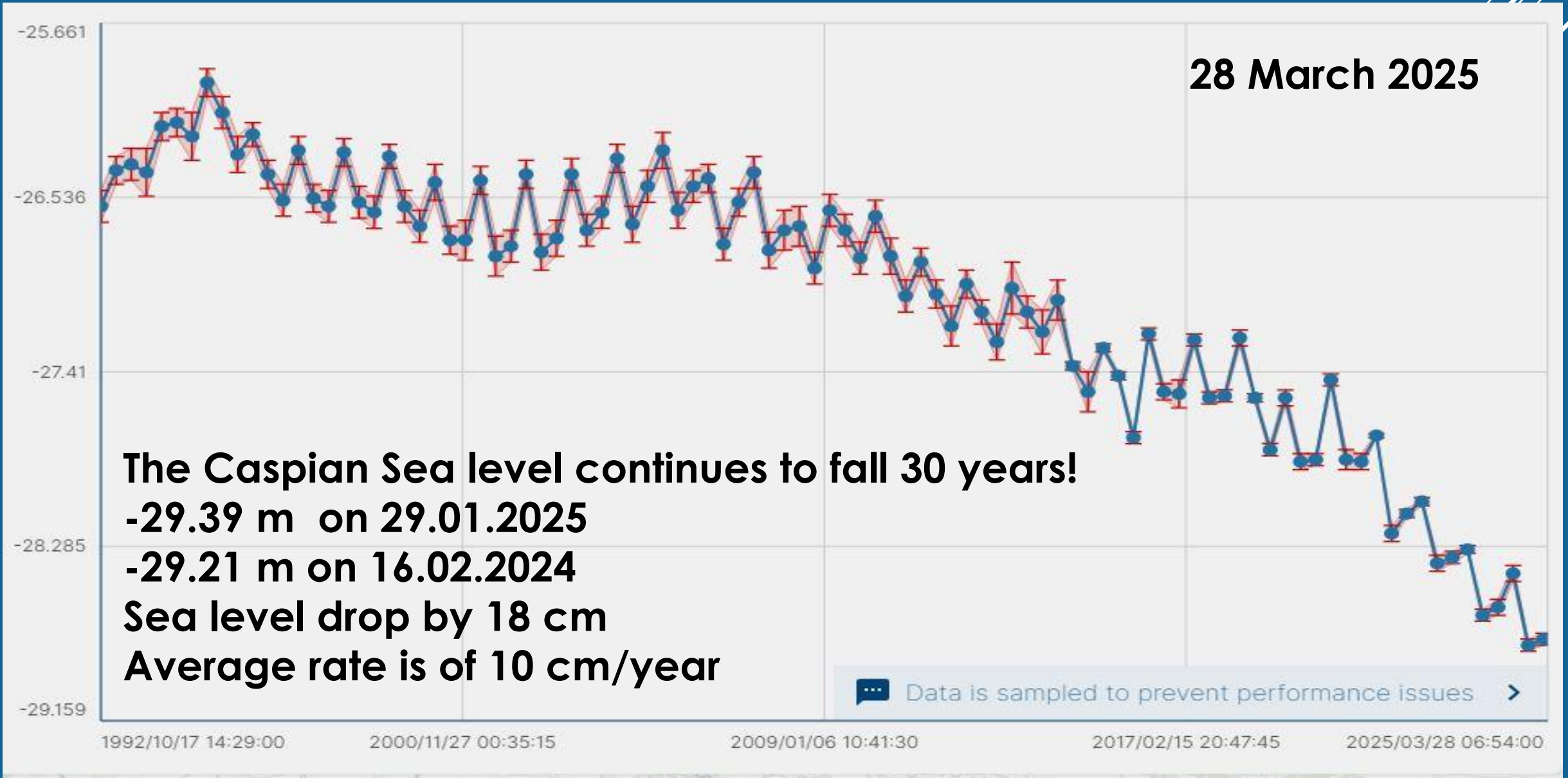
Schematic of SEAFRAME station used by the Australian Baseline Sea Level Monitoring Project



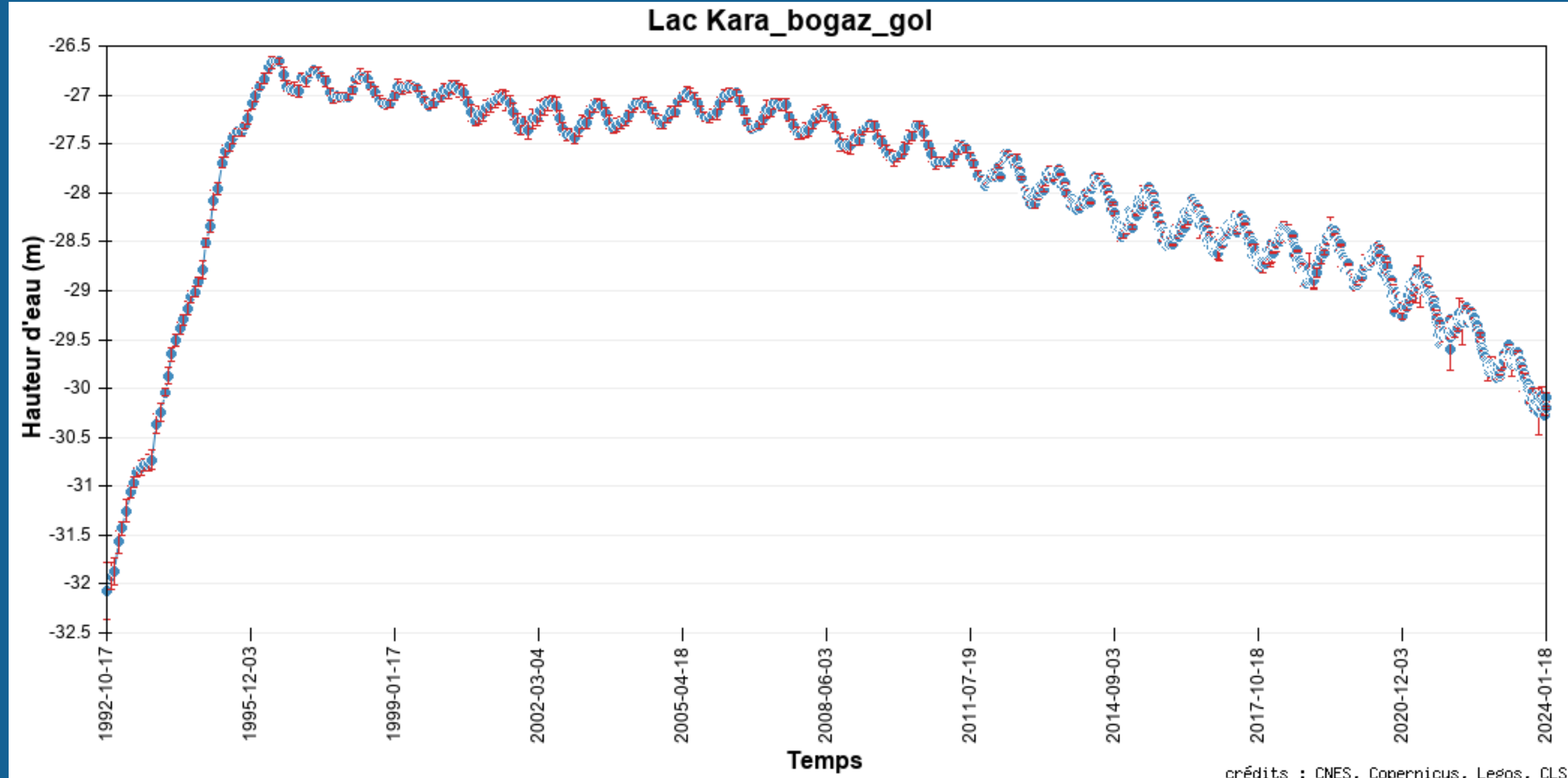
Ground tracks of satellite altimeters on
Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3
September 1992 – present
Even numbers are ascending tracks, odd numbers
are descending tracks.



Satellite altimetry of the Caspian Sea level from 27 September 1992 to 28 March 2025



Satellite altimetry of the Kara-Bogaz-Gol Bay level from 27 September 1992 to 17 January 2024



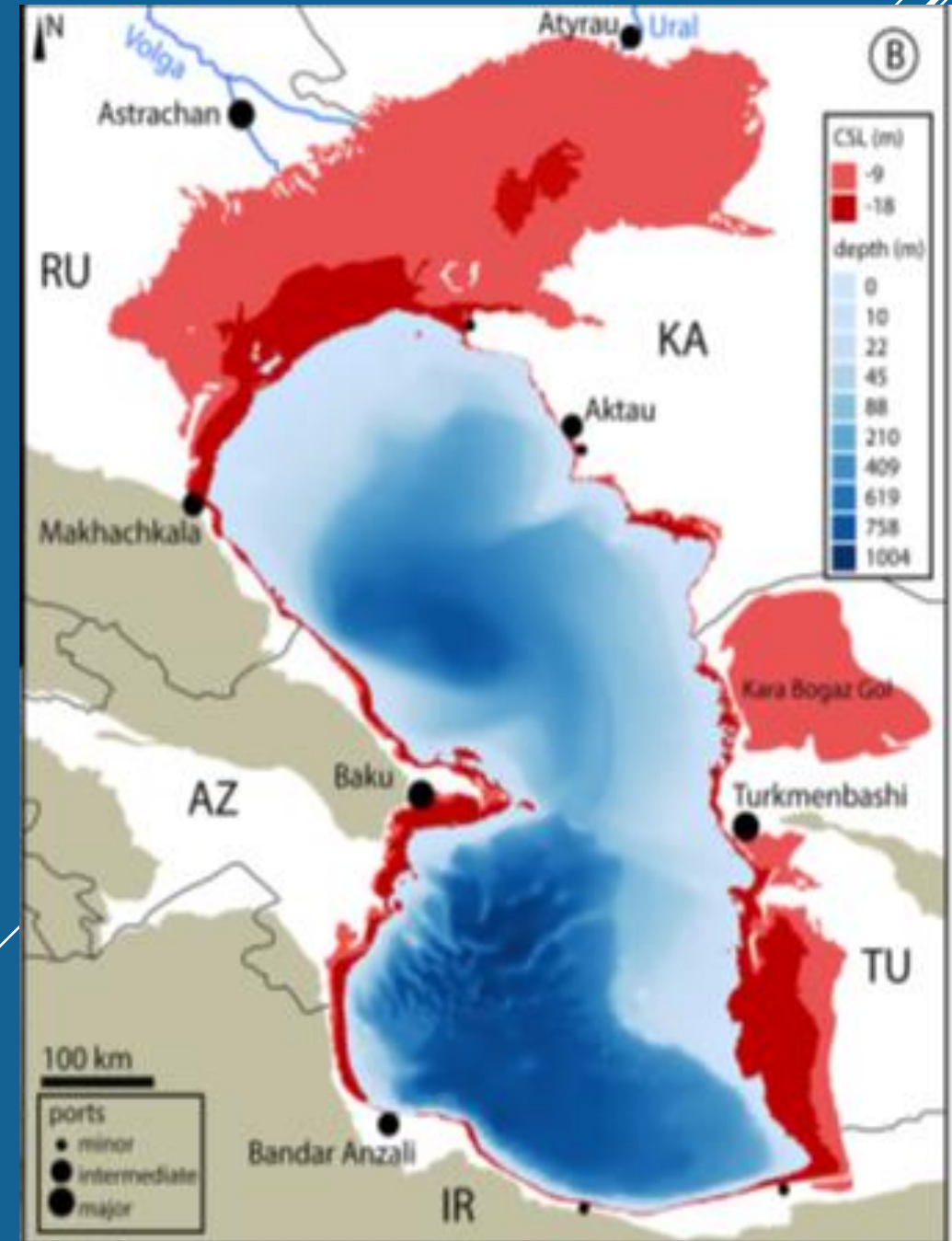
A further drop in the level of the Caspian Sea will lead to a regional socio-economic catastrophe. By 2100, the sea level is predicted to fall by 9-18 m, which corresponds to a reduction in sea area by 23-34%.

 **23 December 2020**
COMMUNICATIONS
EARTH&ENVIRONMENT

COMMENT
<https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6> **OPEN**

The other side of sea level change

Matthias Prange^{1✉}, Thomas Wilke² & Frank P. Wesselingh^{3,4}



Aktau, 21 October 2022



Aktau, 21 October 2022



Aktau, 12 October 2024



Aktau, 28 June 2025



Aktau, 28 June 2025



The water balance of the Caspian Sea is quite simple: the incoming part of the water balance consists of river runoff and atmospheric precipitation falling on the sea area, and the outgoing part consists of evaporation from the sea surface and natural runoff into the Kara-Bogaz-Gol Bay. If the incoming part of the water balance is compensated by the outgoing part, the sea level does not change. If the incoming part exceeds the outgoing part, the sea level rises or, conversely, falls if the outgoing part exceeds the incoming part. Thus, the water balance equation must also take into account changes in the Caspian water volume over time by which it has increased or decreased, for example, over a year. However, the exact calculation of all components of the water balance is very difficult, and their long-term forecast is a virtually impossible task.

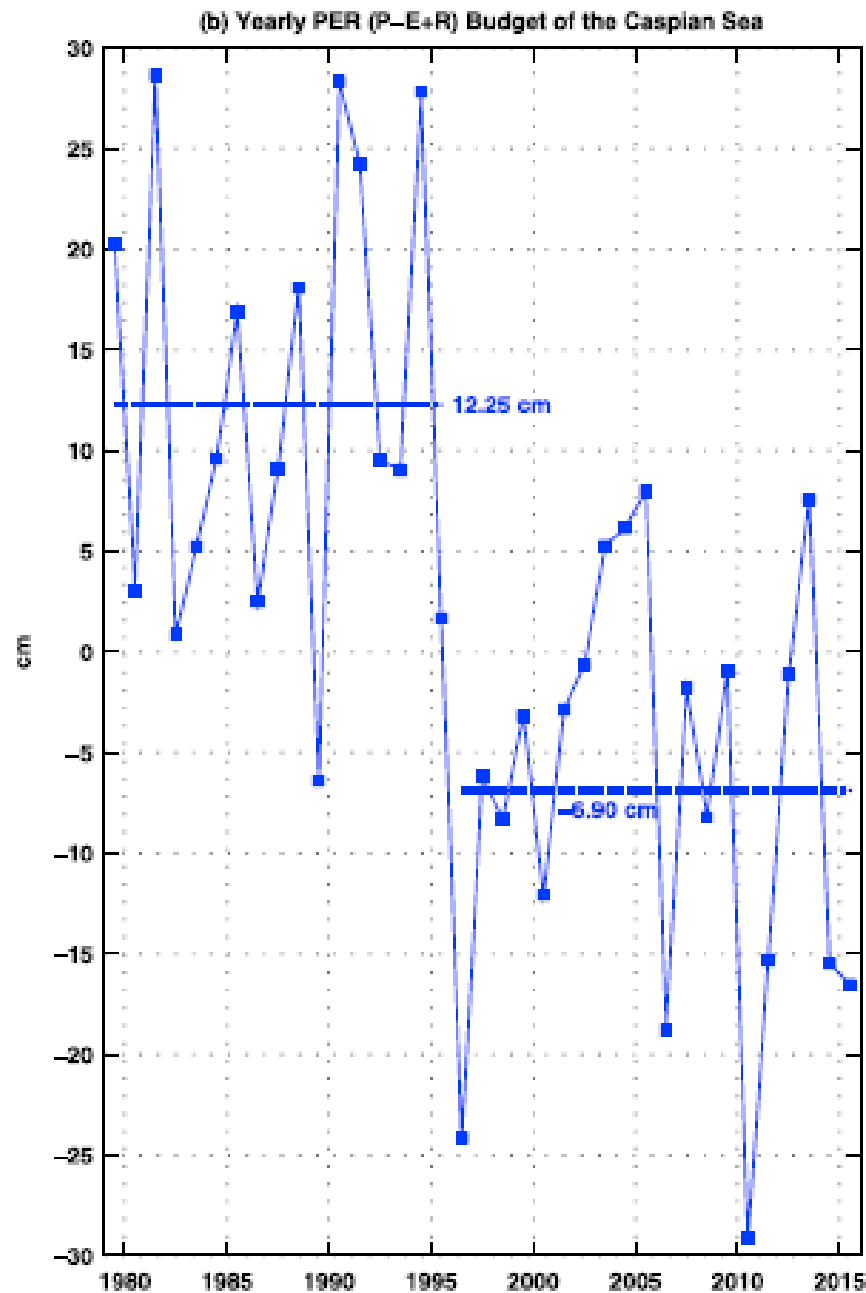
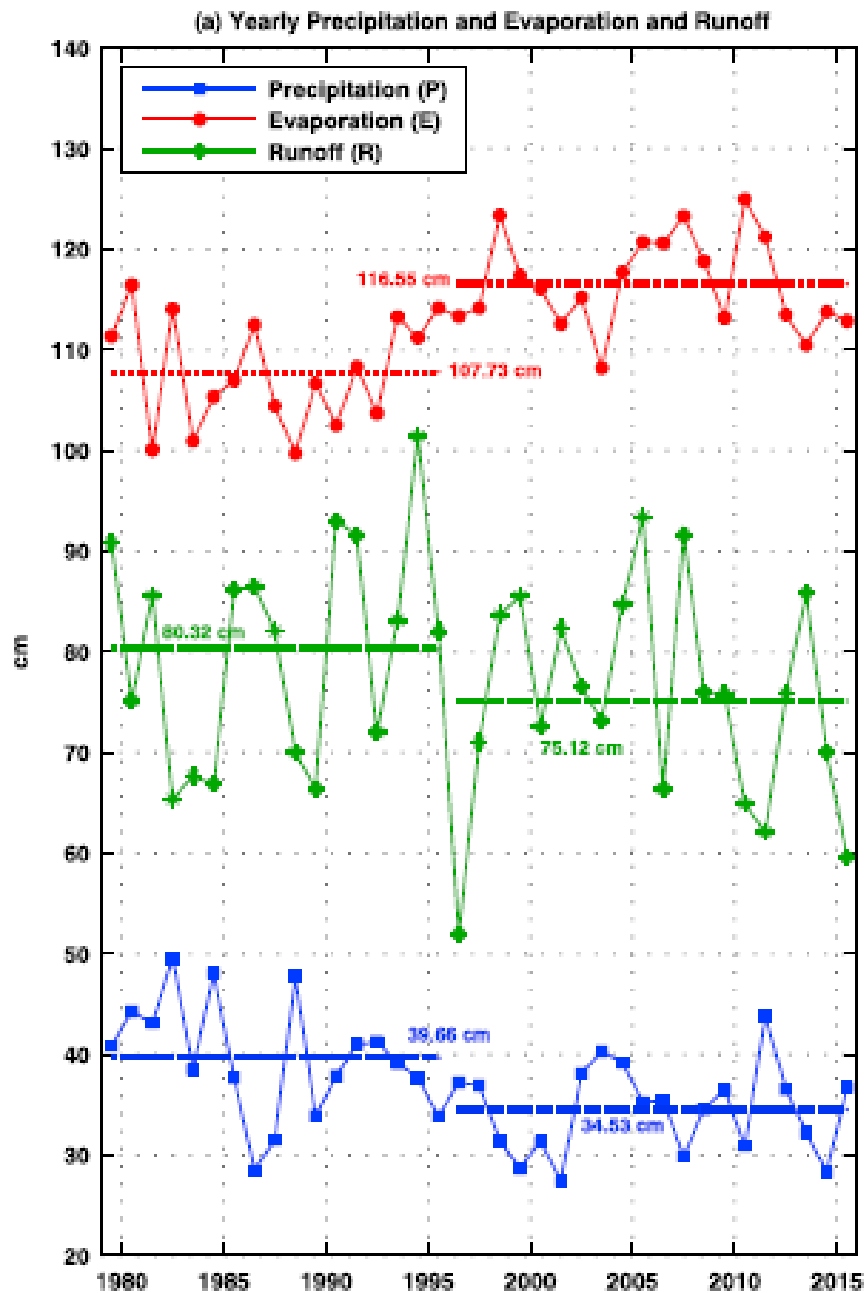
The sustainable economic and social development of the Caspian region countries depends on many factors including the significant regional climate change, which directly affects the Caspian Sea level being a key parameter for this sea. The water balance of the Caspian Sea and its level, as well as the methods for forecasting the Caspian Sea level were investigated in the tens of fundamental studies (Terziev et al., 1992; Malinin, 1994; Golitsyn et al., 1998; Shiklomanov, Dobrovolskiy, 2002; Vasiliyev, 2003; Frolov, 2003; Kosarev, 2005; Lebedev, Kostianoy, 2005, 2008, 2016; Arpe, Leroy, 2007; Elguindi, Giorgi, 2007; Kosarev et al., 2009; Elguindi et al., 2011; Arpe et al., 2012; Nesterov, 2016; Chen et al., 2017; Kostianoy et al., 2019; Frolov 2019, Kostianoy et al., 2025, etc.); however, it should be admitted that the Caspian Sea level is still poorly predicted.

No prediction of the absolute minimum of the Caspian Sea level in 1977 (-28.92 m) and the subsequent dramatic rise in the level was made, neither of the intermediate maximum of 1995 (-26.54 m) and the subsequent sea level decline, which has been continuing now. The same is true for the three-year period of the sea level stabilization from the middle of 2015 to the middle of 2018. In 2018, the average annual sea level in the Caspian Sea dropped below -28.0 m BS, and the sea level in 2000–2015 was decreasing with the mean rate of 10.3 cm/year. In the winter of 2024/2025, the level of the Caspian Sea, according to satellite altimetry data, dropped to -29.4 m.

The Caspian Sea level is determined by the water balance, 80% of whose input is river runoff, where the contribution of the Volga River flow makes up 80%. Obviously, the interannual variability of the Caspian Sea level should be largely determined by the Volga runoff, which has been confirmed for many years. For example, the Volga runoff growth by about 100 km³ from 1992 to 1994 led to the sea level rise by 28 cm in 1993–1995, and the sea level drop from 1995 to 1997 approximately by 40 cm corresponded to the Volga runoff reduction by 168 km³ from 1994 to 1996, that is equivalent to the water layer decrease by 43 cm.

However, there is no such clear correlation after 1996, especially in 1996–1999 and 2005–2016, when the Caspian Sea level drop continued even under the runoff increase by 80 and even 120 km³ between some years, which should have caused the sea level rise by 20–30 cm. Thus, the increased evaporation from the sea surface has evidently been a key factor for the sea level decline under conditions of average river runoff reduction since 1996, and this is clearly demonstrated in [Chen et al., 2017].

A decorative graphic consisting of several parallel white lines of varying lengths, arranged diagonally in the bottom right corner of the slide.



Chen J.L., Pekker T.,
Wilson C.R., Tapley
B.D., Kostianoy A.G.,
Cretaux J.-F., Safarov
E.S. Long-term
Caspian Sea level
change. – Geophysical
Research Letters, 2017
DOI: 10.1002/2017GL
073958

The evaporation growth in that period was mainly favored by the wind speed increase and water temperature rise, as well as by the slight decrease in the cloud amount and sea ice. However, taking into account cardinal differences in the climate of coastal zones of the Caspian Sea, evaporation from its surface is highly affected (in addition to wind speed) by the wind direction. The Caspian Sea region is generally characterized by the eastern zonal component of wind, i.e., zonal wind mainly blows from the deserts of Central Asia. It has negative values along the eastward measurement axis. Thus, the positive anomalies of the zonal component should lead to the weakening of this dry eastern wind and, consequently, to evaporation decline and the Caspian Sea level rise; on the contrary, the negative anomalies of zonal wind should result in the strengthening of eastern wind, in the evaporation growth and the Caspian Sea level drop.

Another important factor which could also cause the evaporation increase is sea depth reduction. As early as in 1987, G.N. Panin revealed a significant dependence of evaporation on the Caspian Sea level [Panin, 1987]. Namely, during the warm season (April–August), evaporation from the shallow Northern Caspian Sea (the mean depth is 4.4 m) is much higher than that from the Middle (192 m) and Southern (345 m) Caspian Sea. For example, the layer of evaporation from the Northern Caspian Sea is 2–3 times higher than the respective value for the middle and southern parts of the sea: 100, 35, and 42 mm/month, respectively [Panin, 1987]. Such essential differences in evaporation across the sea are not indicated in the modern models of the Caspian Sea water balance and atmospheric reanalyses.

As the water balance of the Caspian Sea (as well as its level) is poorly predicted at the regional level (on small spatiotemporal scales), it is reasonable to suppose the existence of teleconnections and try to find long-term changes in climatic characteristics in the Caspian region, which may be caused by the interdecadal (multidecadal) oceanic modes of climatic variability. Therefore, we investigated connections with two such modes: the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and Interdecadal Pacific Oscillation (IPO).

Serykh and Kostianoy (2020) have shown that the Atlantic Ocean's influence on the Caspian Sea weakened in the 1930s and that the Pacific Ocean's influence increased, resulting in a sharp decline in the Caspian Sea level. In the 1970s, the Atlantic Ocean's influence increased, leading to an increase in the Caspian Sea level. Since the late 1990s, a weakening of the Atlantic's influence on the Caspian Sea has been observed over a quasi-eight-year period, possibly leading to a decline in the Caspian Sea level and a slower growth in the air temperature.

Forecasts of the Caspian Sea level change

Prange M., Wilke T., Wesselingh F.P. **2020**. The other side of sea level change. - Communications Earth & Environment, vol. 1, N 69. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.

Nandini-Weiss S.D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M. **2020**. Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area - Int. J. Climatol., vol. 40, p. 2717–2731. <https://doi.org/10.1002/joc.6362>.

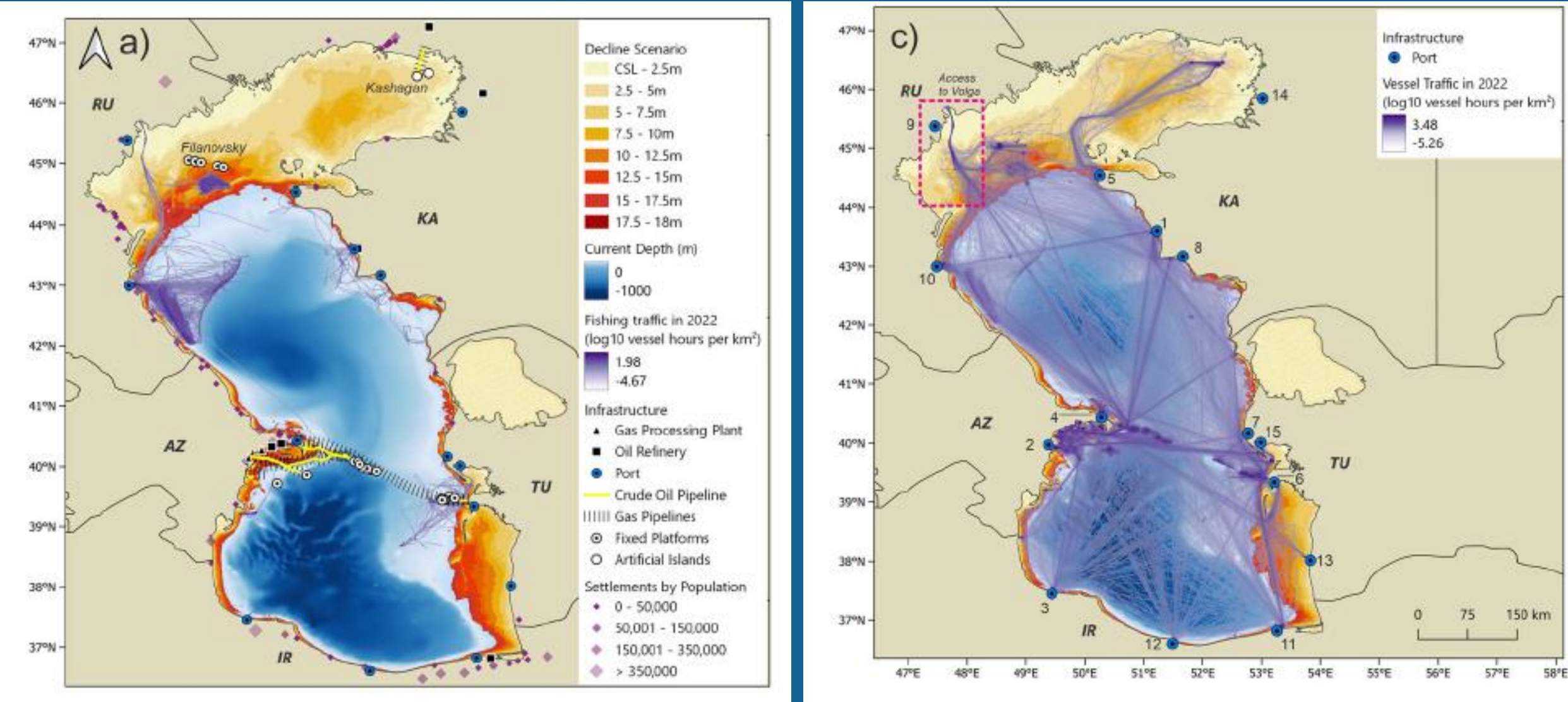
Samant R., Prange M. **2023**. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. – Communications Earth & Environment, vol. 4, N 357, <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>.

Lahijani H., Leroy S.A.G., Arpe K., Cretaux J.-F. **2023**. Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review. – Earth-Science Reviews, vol. 241, N 104428, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104428>.

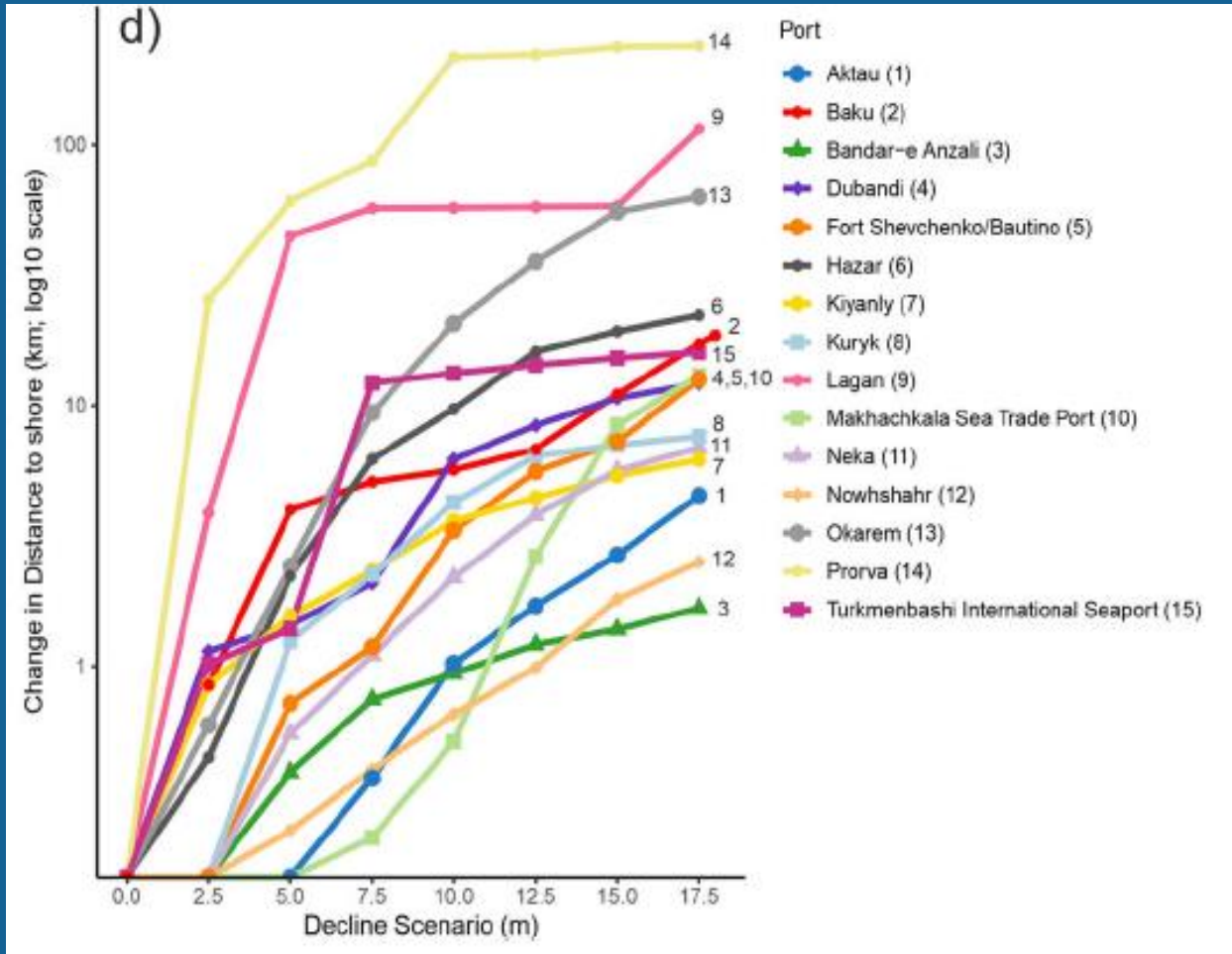
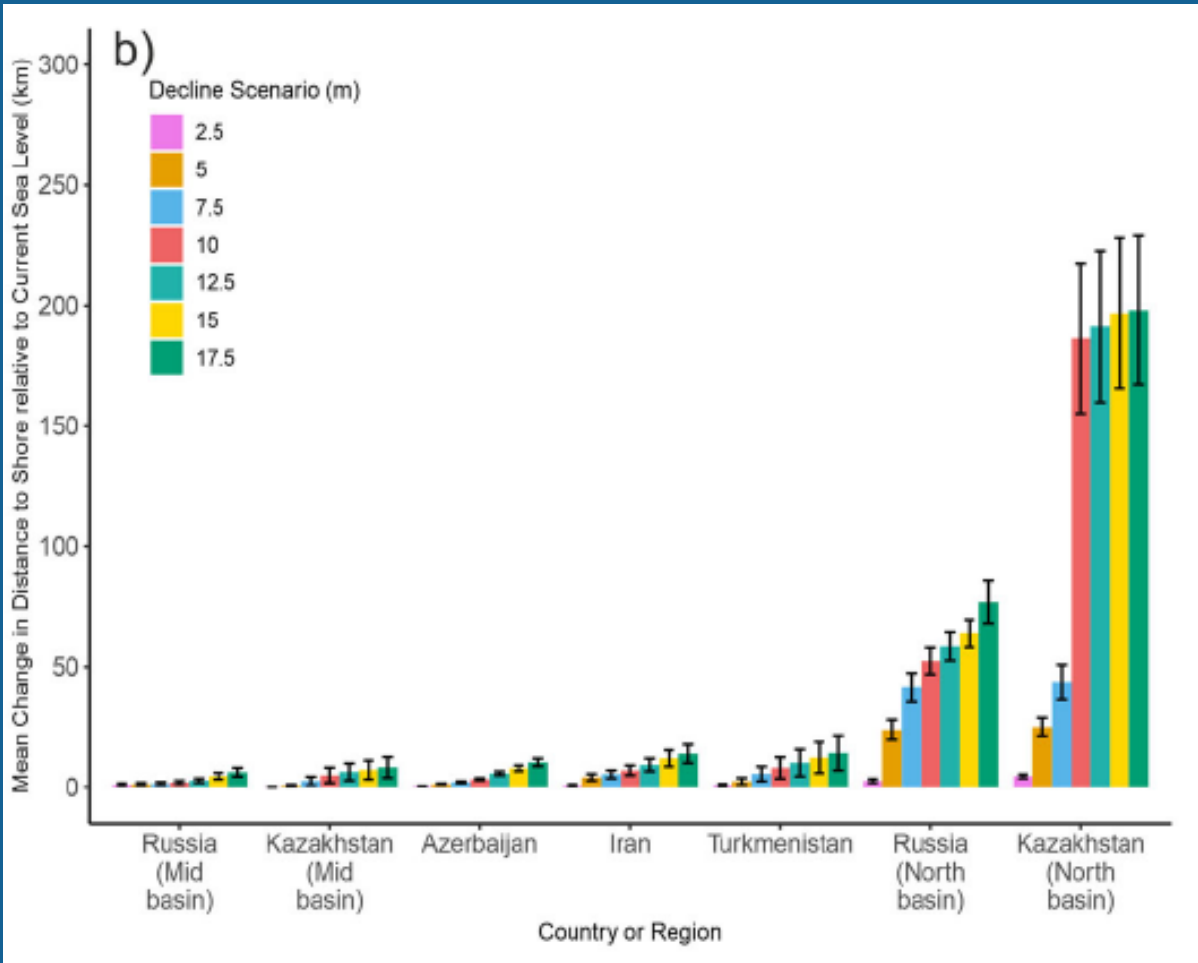
Hoseini S.M., Soltanpour M., Zolfaghari M.R. **2025**. Projected changes in Caspian Sea level under CMIP6 climate change scenarios: probabilistic and deterministic approaches. - Climate Dynamics, vol. 63, N 1, p. 1-18. DOI: 10.1007/s00382-024-07548-w.

Court R., Lattuada M., Shumeyko N., Baimukanov M., Eybatov T., Kaidarova A., Mamedov E.V., Rustamov E., Tasmagambetova A., Prange M., Wilke T., Hassall C., Goodman S.J. **2025**. Rapid decline of Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure. – Communications Earth & Environment, vol. 6(1), N 261, <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02212-5>.

Shallowing of the Caspian Sea by 2.5–18 m and coastal and marine infrastructure



Shallowing of the Caspian Sea by 2.5–18 m and a distance from ports to the sea



The Caspian Sea level forecasts (Lahijani et al., 2023)

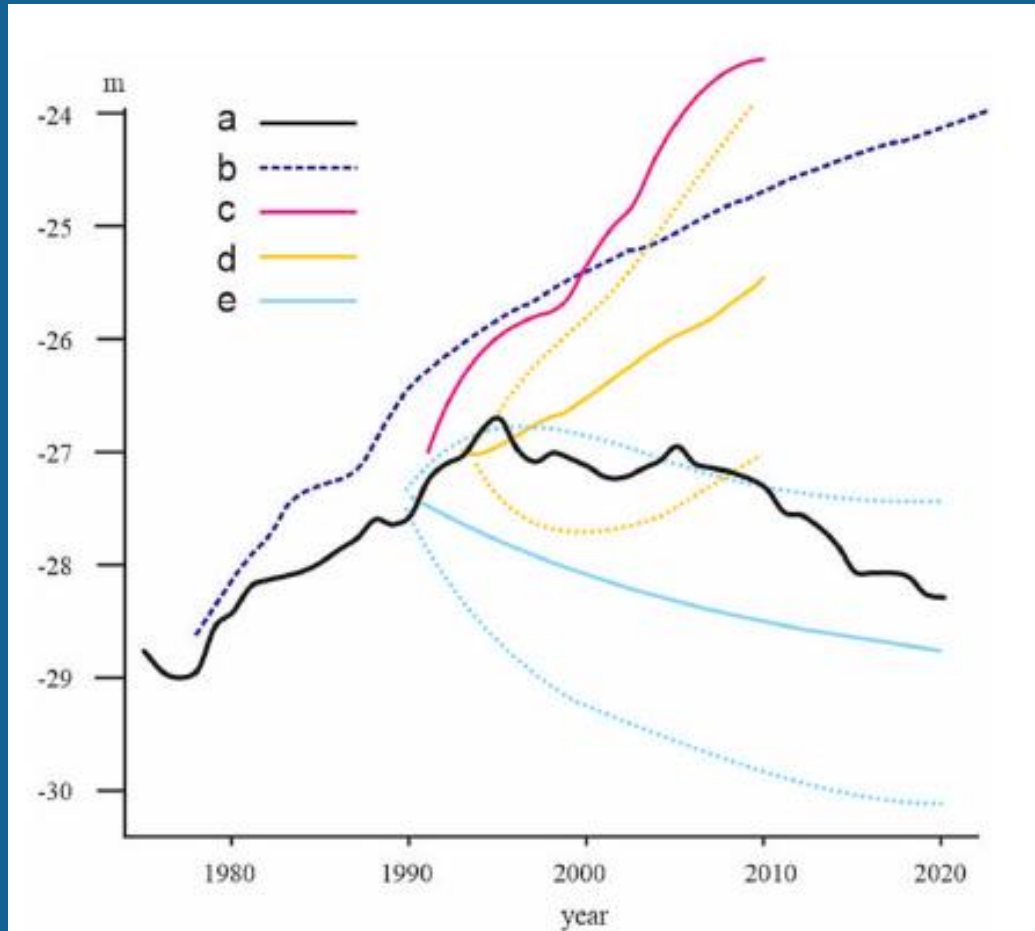


Fig. 10. The Caspian Sea level forecasts and observed curves. All forecasts were made during the period of CSL high stand. a) Observed, b) [Malinin, 1994](#), c) [Kazanskii, 1994](#), d) [Ratkovich and Bolgov, 1994](#), e) [Klige, 1994](#).

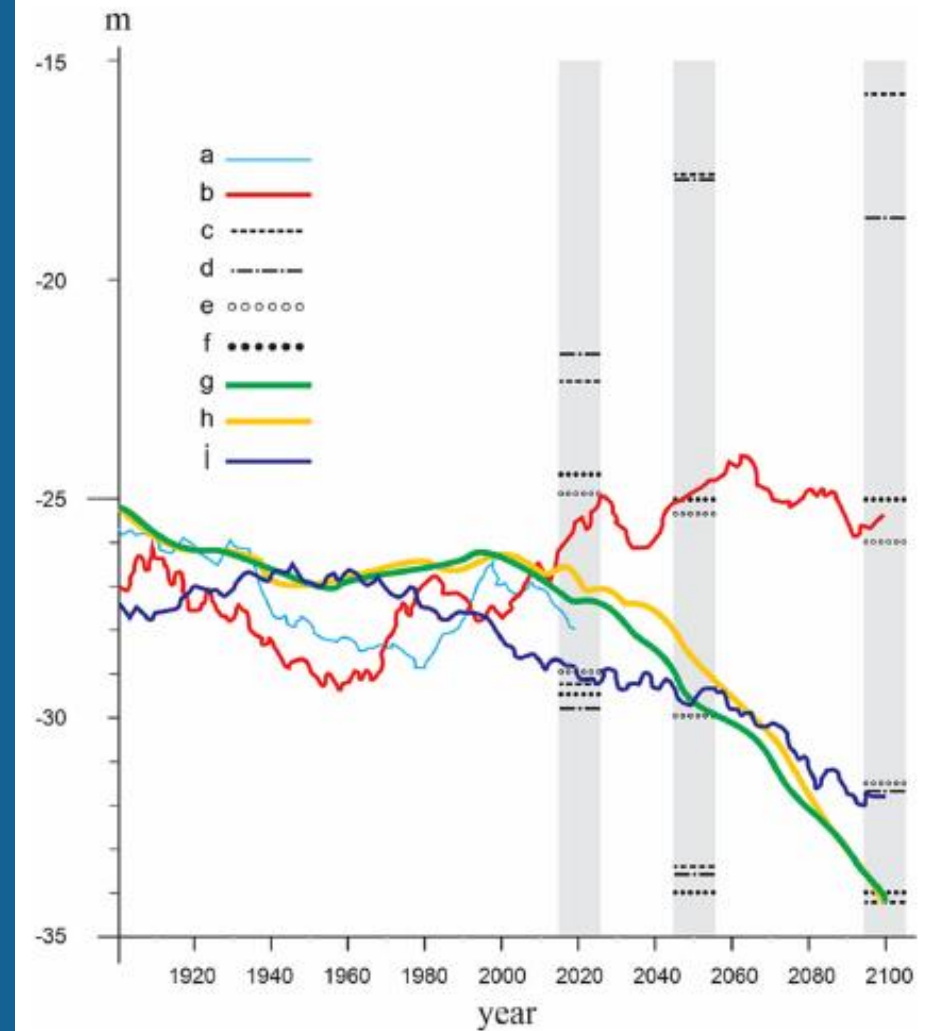
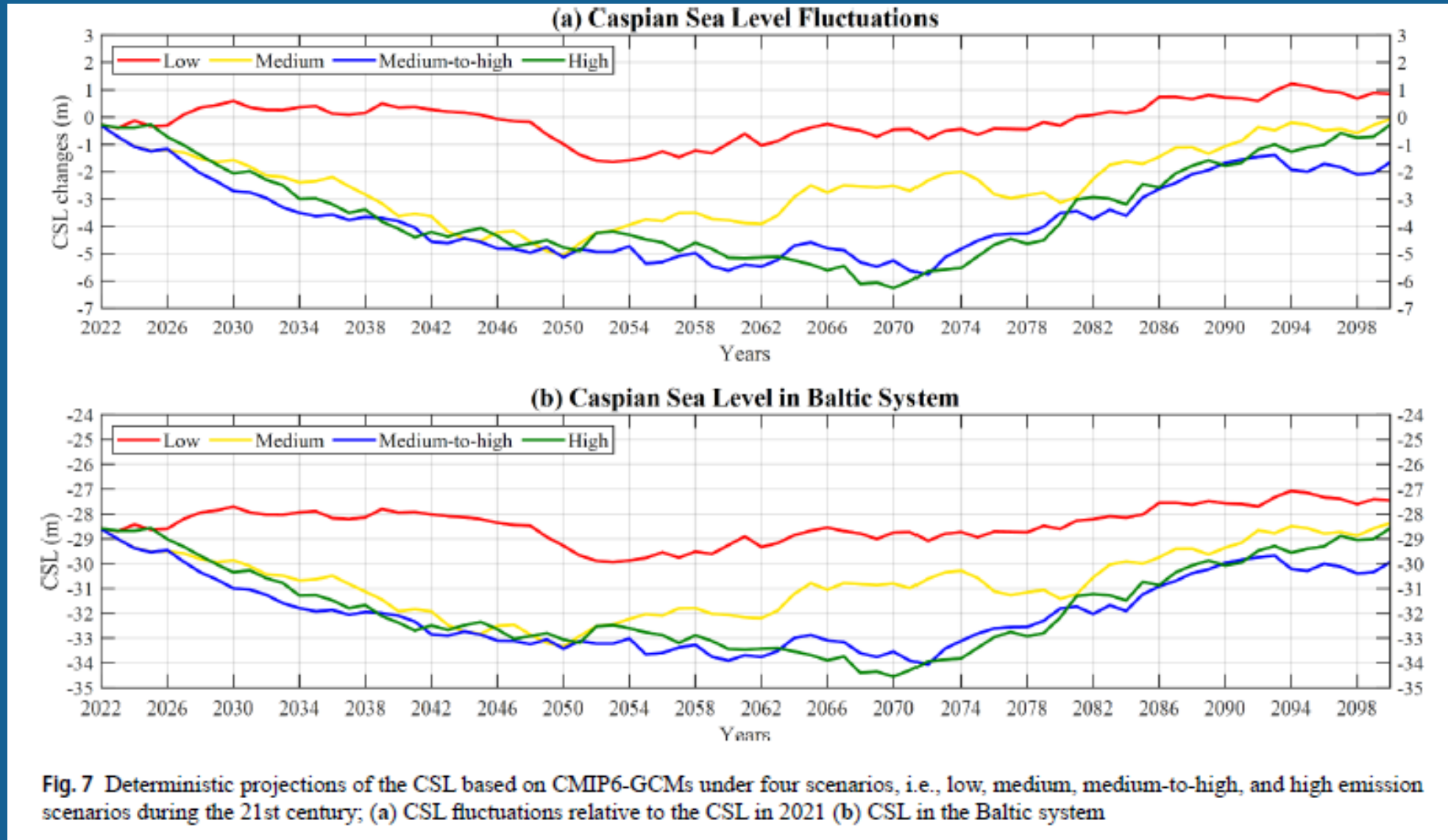
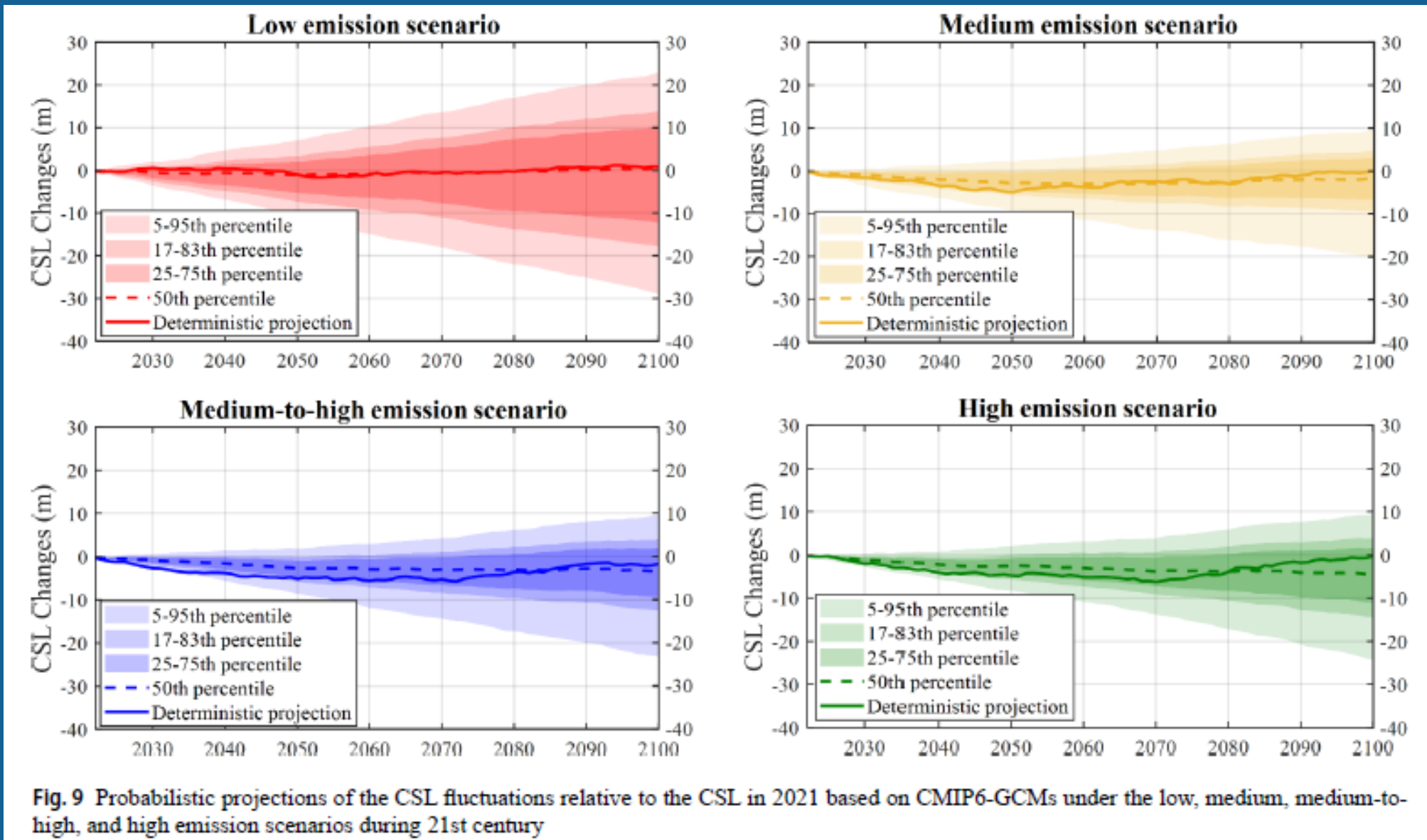


Fig. 11. The Caspian Sea level variability from 1900 to 2100, a) observed, b) reconstructed after [Arpe and Leroy \(2007\)](#), lowest and highest ranges for the forecast of the CSL using different models and scenarios of shared socioeconomic pathways (SSPs) and representative concentration pathways (RCPs); c) RCP4.5, d) RCP 8.5, e) SSP245 and f) SSP585 for 2021, 2050 and 2100 after [Koriche et al. \(2021a\)](#), g and h) ensemble average Caspian Sea level forecast based on the IPCC A2 and A1b scenario emissions respectively, [Elguindi and Giorgi \(2006\)](#), i) [Renssen et al. \(2007\)](#).

The Caspian Sea level forecasts from CMIP6 (Hoseini et al., 2025)



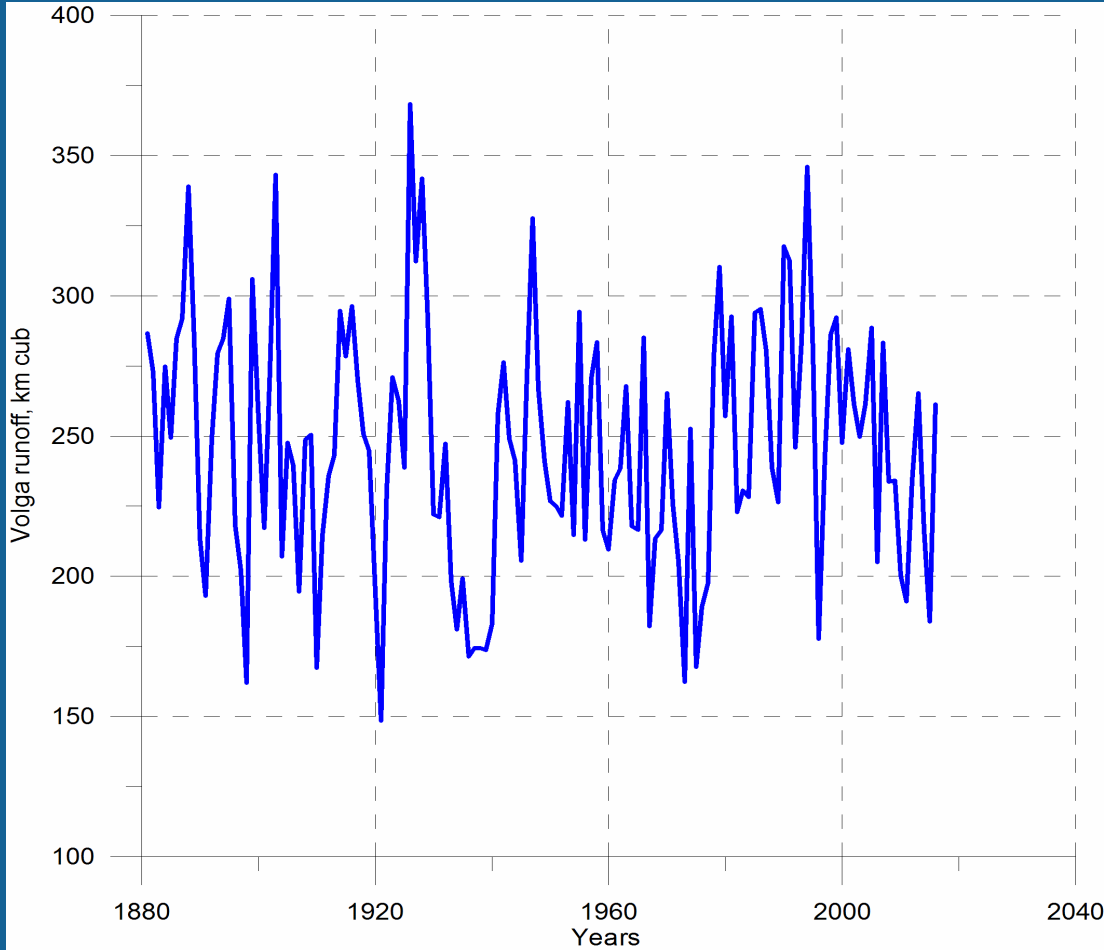
The Caspian Sea level forecasts from CMIP6 (Hoseini et al., 2025)



What do we do?

1. Monitoring the Caspian sea level and KBG Bay using satellite altimetry
2. Validation and intercomparison of the Caspian Sea level at 23 level gauges (5 countries) and 3 altimetry data bases HYDROWEB (France), DAHITI (Germany), GREALM (USA)
3. Investigation of the Caspian Sea water balance and reasons of the Caspian Sea level decline.
4. Investigation of atmospheric moisture transport with ERA5.
5. Investigation of the Caspian regional climate change.
6. Determination of the climate scenario according to which climate change develops in the Caspian region.
7. Studies of wind-wave dynamics in the Caspian Sea under strong changes of the environment

Речной сток. В Каспийское море впадает более 130 рек, которые поставляют в море около 300 км³/год (от 240 км³/год в 1970-1977 гг. до 336 км³/год в 1900-1929 гг.), из которых одна только Волга дает примерно 250 км³/год



Межгодовая изменчивость стока Волги (км³/год) с 1881 по 2016 г.

Атмосферные осадки. Атмосферные осадки над акваторией моря распределены весьма неравномерно: наибольшее количество осадков – до 1700 мм/год выпадает во влажных субтропиках Ленкоранской низменности в Азербайджане, а наименьшее – до 95 мм/год на восточном берегу моря, к которому подходят пустыни Центральной Азии .

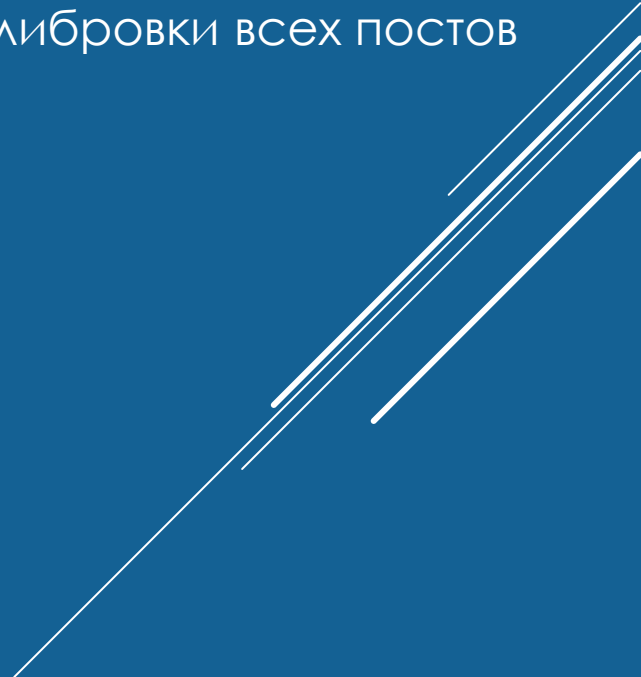
Испарение. Средняя оценка испарения с зеркала Каспийского моря – 910 мм/год, что соответствует примерно 345.8 км³/год (Байдин, Косарев, 1986). По данным Нестерова (Нестеров, 2016) ежегодная величина испарения с поверхности Каспийского моря в XX–XXI вв. изменялась от 920 до 1040 мм слоя, а в среднем море теряло около 970 мм слоя воды (около 375 км³) в год. Близкая оценка нормы испарения за период 1900-1996 гг. (961 мм/год) получена в работе (Георгиевский, Голубев, 2003).

Сток в залив Кара-Богаз-Гол. Залив Кара-Богаз-Гол - это мелководное понижение в рельефе, с плоским дном и непостоянной береговой линией, самая обширная на Каспии лагуна размером около 18,000 км², отделенная от моря двумя песчаными косами, между которыми находится пролив длиной 7-9 км, шириной от 120 до 800 м и глубиной 3-6 м.

Из-за разницы уровней Каспия и залива и в зависимости от ее величины морская вода со скоростью 50-100 см/с устремляется по проливу в залив, где полностью испаряется (в среднем 800-1000 мм/год). Таким образом, при среднегодовой сумме осадков в этом районе не более 110 мм, Кара-Богаз-Гол представляет собой огромный естественный испаритель морской воды. По данным Байдина и Косарева (1986) среднегодовой сток в залив Кара-Богаз-Гол в 1900-1929 гг. составлял 21.8 км³, в 1930-1941 гг. – 12.4 км³, в 1942-1969 гг. – 10.6 км³, в 1970-1977 гг. – 7.1 км³.

В настоящее время, в связи с продолжающимся падением уровня Каспия сток в залив сокращается, однако точных данных о величине стока в залив нет. Отметим, что согласно [Нестеров, 2016] отметка дна пролива Кара-Богаз-Гол (КБГ) составляет –30,6 м БС, поэтому при таком уровне Каспия сток в залив должен прекратиться, что сохранит Каспию примерно 20 км³ в год.

Уровень моря. Как это не звучит парадоксально, но мы даже не можем точно определить уровень Каспийского моря. На Каспии отсутствуют современные измерительные системы уровня моря. Практически все уровенные посты расположены на берегах Каспия, и мы не знаем пространственного распределения уровня моря. Измерения на уровенных постах не учитывают вертикальное движение земной коры, которое разнонаправлено на разных берегах Каспия и достигает 1 см в год. Уровенные посты не оснащены высокоточными трехмерными GPS-приемниками, которые позволяют измерять вертикальные и горизонтальные скорости движения земной коры, т.е. перемещение нулей водомерных постов. Последние калибровки «нулей» постов выполнялись в 1975-1980 годах (только на западном побережье), кроме того, многие посты переставлялись и менялись системы измерения (Нестеров, 2016). Интеркалибровки всех постов на Каспии с тех пор также не проводились.



Что мы не учитываем в расчетах водного баланса?

Кроме всех проблем, связанных с точностью определения всех четырех основных компонент водного баланса и уровня моря, мы не учитываем ряд дополнительных факторов, которые могут сказываться на водном балансе моря.

- (1) Во-первых, это подземный сток в море, который на Каспии не измеряется, однако, при длине береговой линии порядка 6.5-7.0 тыс. км, он может иметь значение, особенно вдоль западного и южного берега, где на некотором расстоянии от моря находятся горные системы Кавказа (Азербайджан, Россия) и Эльбурса (Иран). В научной литературе встречаются оценки до 5% от приходной части водного баланса (т.е. до 20 км³/год), однако, они основаны на «невязке» водного баланса с изменением уровня моря. Lahijani et al. (2023) приводят оценку в 4 км³/год.
- (2) Другим важным фактором, который мы не учитываем, но который может существенно изменить оценки испарения в сторону его увеличения является разная глубина моря в Северном, Среднем и Южном Каспии, и особенно в периоды уменьшения глубины моря на несколько метров. Еще в 1987 году Г.Н. Панин установил значительную зависимость испарения от уровня Каспия (Панин, 1987). А именно, в теплый период года (апрель–август) испарение с мелководного Северного Каспия (средняя глубина 4.4 м) намного больше испарения со Среднего (192 м) и Южного Каспия (345 м). Например, в мае слой испарения с Северного Каспия в 2–3 раза больше, чем соответствующая величина для Среднего и Южного Каспия: 100, 35 и 42 мм/месяц, соответственно (Панин, 1987). Такие существенные различия в испарении по акватории моря не отражаются в современных моделях водного баланса Каспия и атмосферных реанализах.

(3) Северный Каспий зимой представляет собой наиболее энергоактивную зону, которая с наблюдаемым уменьшением площади ледяного покрова и его сплоченности (в результате регионального потепления) должна приводить к значительному увеличению испарения. Дело в том, что при температуре воды около 0 градусов, температура воздуха над Северным Каспием ежегодно опускается ниже 10-15 градусов мороза, а иногда и до -25°C (Lavrova et al., 2022). Максимальная ледовитость за последние 25 лет наблюдалась зимой 2011/2012 г. (103,5 тыс. км²), а минимальная - зимой 2019/2020 г. и составила всего 36 тыс. км². Такие значительные межгодовые вариации ледяного покрова, точнее, площади открытой воды в зимний период, могут значительно увеличивать потоки влаги в атмосферу, что не учитывается в современных атмосферных реанализах.

(4) Межгодовые стерические изменения уровня за счет увеличения температуры Каспийского моря не могут оказывать существенного влияния на уровень моря, однако, сезонные стерические изменения уровня могут достигать до 8 см (Lahijani et al., 2023).

(5) Площадь Каспийского моря присутствует в расчетах испарения и в оценках атмосферных осадков, которые выпадают на его зеркало, а также в изменениях объема вод. Батиграфические кривые, связывающие уровень моря и его площадь, для Каспийского моря известны по публикациям ряда авторов (Крицкий и др., 1975; Музылев и др., 1982; Байдин, Косарев, 1986; Фролов, 2003; Нестеров, 2016). Они несколько отличаются друг от друга, и они все были получены во времена, когда еще отсутствовали спутниковые оптические изображения высокого пространственного разрешения, а также спутниковые альтиметрические данные. Важность построения точных батиграфических кривых для диапазона глубин Каспия от -26 до -30 м и ниже до -50 м очевидна, поскольку для многих задач необходимо знать точную площадь моря. Например, насколько происходящее сокращение площади моря влияет на водный баланс Каспия неизвестно.

(6) Загрязнение акватории моря нефтепродуктами: добыча и транспортировка нефти и газа в водах России, Казахстана, Азербайджана, Ирана и Туркменистана; поступление загрязняющих веществ из Волги и других рек, впадающих в море; утечки с прибрежных нефтяных разработок; аварии на буровых платформах; сбросы нефтесодержащих вод с судов, сипажи нефти со дна моря (Mityagina, Kostianoy, 2024). С точки зрения водного баланса моря наибольший интерес представляет нефтяная пленка, образующаяся во время разливов нефти. Так, при достаточно толстой ($\geq 3,6$ мкм) пленке даже на десятки сутки испарение с чистой поверхности превышает испарение над пленкой еще почти в 2 раза [Панин, 1985]. В зимнее время этот период может быть еще длиннее. Однако степень влияния разливов нефти на испарение в настоящее время неизвестна.

В общем случае большое число различных по своей природе факторов, действующих на формирование уровня целесообразно объединить в четыре большие группы:

- космогеофизические силы,
- геолого-геодинамические процессы,
- антропогенные факторы и
- гидрометеорологические процессы (климатические факторы).

Костяной А.Г., Малинин В.Н., Фролов А.В. Основные причины изменения уровня Каспийского моря. – *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2025, Т. 11, N 3, С. 338-373, doi:10.21513/2410-8758-2025-3-338-373.

Спасибо за внимание!

Thank you for your attention!

感謝您的關注！

Kostianoy@gmail.com

