Александр В. Бочаров (1, 2, 3), Андрей Г. Костяной (2, 3, 4), Сергей А. Лебедев (3, 5, 6), Сергей И. Биденко (7)

(1) Институт океанологии РАН

(2) Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

(3) Майкопский государственный технологический университет

(4) Московский университет им. С.Ю. Витте

(5) Геофизический центр РАН

(6) Московский институт электронной техники

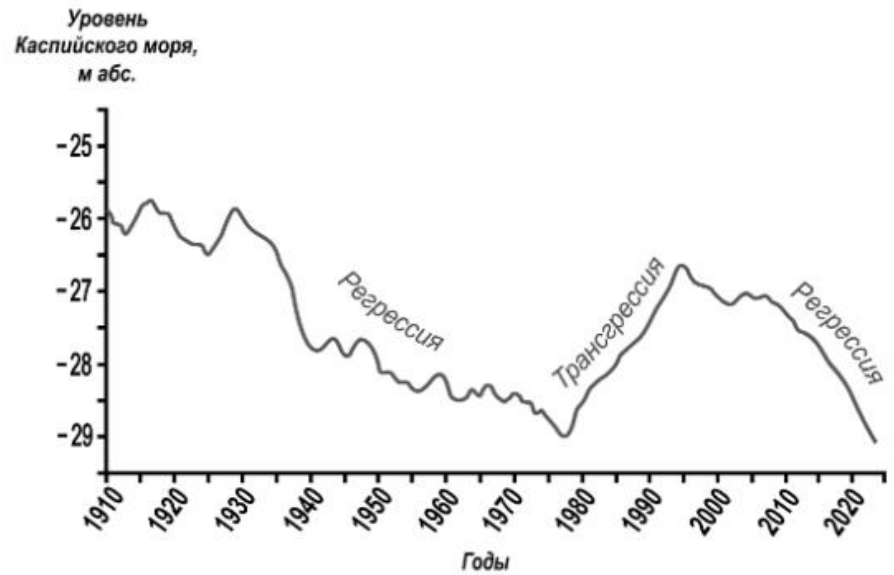
(7) АО НПО Импульс

Сопоставление данных Landsat и спутниковой альтиметрии для установления связи площади и уровня Каспийского моря



Проблема изменений уровня Каспийского моря

Для научно обоснованного прогноза возможных изменений уровня моря требуется точный расчет водного баланса. Одним из важнейших компонентов водного баланса Каспийского моря является испарение, для оценки которого требуется знать площадь водного зеркала.



©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Связь площади и уровня Каспийского моря по данным из литературных источников

Для определения площади Каспийского моря при расчете водного баланса сначала использовались данные Д.М. Кудрицкого (Кудрицкий, 1941), впоследствии данные уточненные Б.А. Аполловым (Аполлов, 1956), и Р.В. Николаевой (**Николаева, 1971**; Байдин, Косарев, 1986)

Уровень моря, м БС	Площадь, тыс. км²				Объем вод, км²			
	Северный Каспий	Средний Каспий	Южный Каспий	Все море	Северный Каспий	Средний Каспий	Южный Каспий	Все море
-24,0*	141,0	139,1	153,8	433,9	856	27170	51857	79883
-24,5*	134,5	139,0	153,2	426,7	787	27100	51780	79667
-25,0*	128,0	138,9	152,6	419,5	722	27031	51704	79457
-25,5*	121,6	138,8	152,0	412.4	660	26962	51628	79250
-26,0**	115,2	138,6	151,3	405,1	601	26892	51552	79045
-26,5**	109,6	138,4	150,6	398,6	545	26823	51477	78845
-27,0**	104,6	138,2	149,8	392,6	492	26754	51402	78648
-27,5**	99,4	137,9	149,1	386,4	442	26685	51327	78454
-28,0**	90.1	137,7	148,5	376,3	397	26439	51245	78081
-29,0**	71,9	137,4	146,9	356,2	318	26301	51078	77697
-30,0**	61,8	136,9	145,3	344,1	251	26165	50912	77328

В пределах современных колебаний уровня моря, зависимость площади от уровня моря (гипсометрическая кривая) оказалась близка к линейной. З.К. Абузяровым было предложено линейное уравнение для расчета площади Каспийского моря по его уровню (Абузяров, 2006; Абузяров, 2009). В видоизменённом виде оно содержится в Главе 6 научно-методического пособия под ред. Е.С. Нестерова (**Нестеров, 2016**)

Зависимость площади зеркала Каспийского моря от уровня весьма близка к линейной, по крайней мере в диапазоне современных колебаний уровня, и аппроксимируется линейным уравнением вида [1]

$$S = 375 + 1{,}4H\,, \qquad (6.16)$$

где S измеряется в тыс. км^2, а уровень моря H отсчитывается от отметки -28,00 м, принимаемой за нуль поста.

Также имеются оценки зависимости площади и уровня Каспийского моря, полученные более современными методами. В ИВП РАН была использована цифровая модель рельефа DEM Caspy-30, которая была получена путем ручной оцифровки бумажных карт (**Болгов, Красножон, Любушин, 2007**). В качестве исходных данных была взята гидрографическая карта Каспийского моря

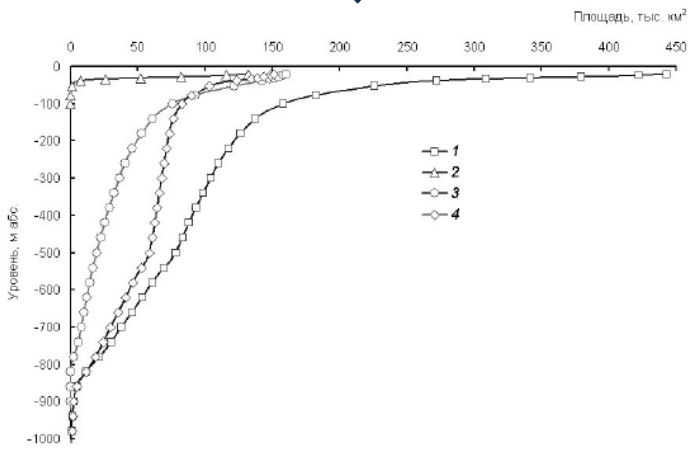


Рис. 2. Зависимость площади водного зеркала Каспийского моря от его уровня. *1* – для всего Каспия без вод зал. Кара-Богаз-Гол, *2, 3, 4* – для Северной, Средней и Южной частей Каспия соответственно.

Недостатки: 1) данные получены с бумажных карт; 2) не указано уровень какого поста используется

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Цель исследования

В данной работе авторами сделана попытка оценки площади Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол в отдельности по данным ДЗЗ, в качестве основных продуктов использованы данные оптических сенсоров спутников Landsat-5, -7 и -8. Целью работы является построение современных гипсометрических кривых водного зеркала Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол, показывающих, как площадь зеркала изменяется в зависимости от уровня воды в водоемах

Почему выбран Landsat?

- Landsat – разрешение 30 м, а также архив с 1970-х
- MODIS – разрешение от 250 м и более, что очень много
- Sentinel-2 – разрешение 10 м, но небольшой период накопленных данных

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Сложности при выделении площади Каспийского моря

Некоторые исследователи указывали на сложности, которые затрудняют решение задачи по определению площади Каспийского моря. К таковым относятся **сгонно-нагонные явления, крайне малые уклоны береговой линии** (местами 10-20 см на км) (Абузяров, 2006). **Положение береговой линии подвержено постоянному изменению, особенно это характерно для северной мелководной части Каспийского моря**. Существенно улучшить и упростить определение береговой линии и площади Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол может использование современных данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения.

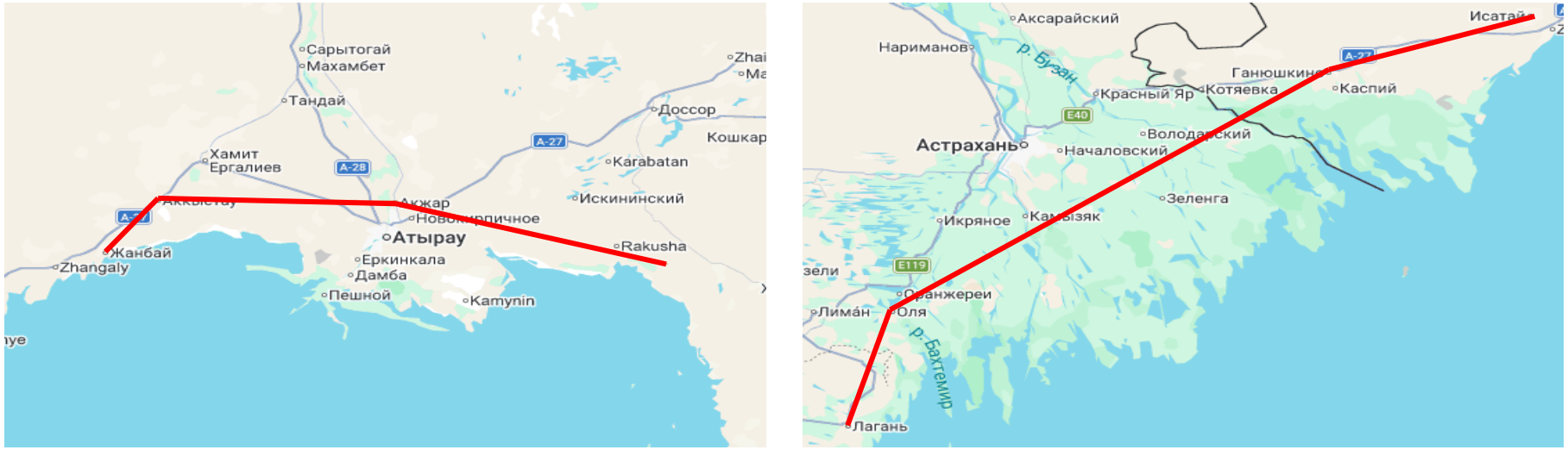
Но использование ДЗЗ также связано со следующими трудностями:

- **невозможно получить одномоментные снимки с высоким пространственным разрешением на всю территорию Каспийского моря;**
- **практически постоянно присутствующая облачность**
- **сложность выделения границ моря в дельтах р.Волга и р.Урал**

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Выделение границы моря в дельте р. Волга и в дельте р. Урал

При определении площади Каспийского моря возникает особая сложность установления границы моря в дельте р. Волги. Там имеется большое количество каналов, проток, и других разобщенных водных объектов, заросших водной растительностью и имеющих малую глубину. По космическим снимкам не всегда можно достоверно установить наличие их связи с основной акваторией моря. Для упрощения в данном исследовании при расчете площади Каспийского моря учитывались все водные объекты, расположенные южнее линии Лагань–Оля–Ганюшкино–Исатай. При обработке снимков, полученных в 1990-е годы, когда уровень воды был выше, аналогичная ситуация, возникала в районе г. Атырау, в дельте р. Урал. В этом случае при расчете площади Каспийского моря учитывались все водные объекты, расположенные южнее линии: Жанбай – Аккыстау (Аккистау) – Акжар – точка с координатами 47.00°с.ш., 53.00°в.д.



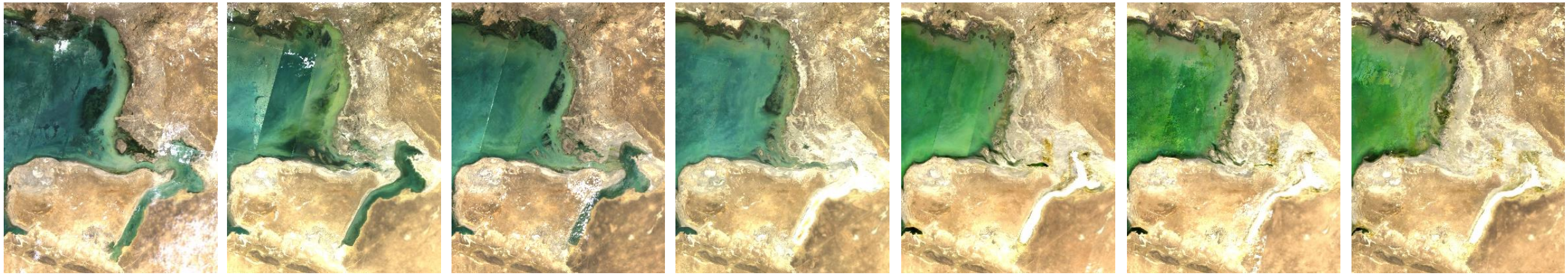
(а) (б)

Выделение границы Каспийского моря: (а) в дельте р. Волга; (б) в дельте р. Урал

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Выделения границы моря в заливах Мертвый Култук и Кайдак

Еще одним сложным для дешифрирования участком является залив Мертвый Култук и являющийся его продолжением залив Кайдак. По данным спутниковой съёмки примерно после 2006-2007 гг. залив Кайдак начал терять связь с акваторией Каспийского моря и постепенно превращаться в пересыхающий солончак. В дальнейшем некоторые части залива Мертвый Култук дешифрируются как изолированные. В данном исследовании при расчете площади Каспийского моря мы учитывали эти изолированные, пересыхающие участки ранее единой акватории, так как по данным ДЗЗ сложно определить момент утраты связи с основной акваторией водоёма.

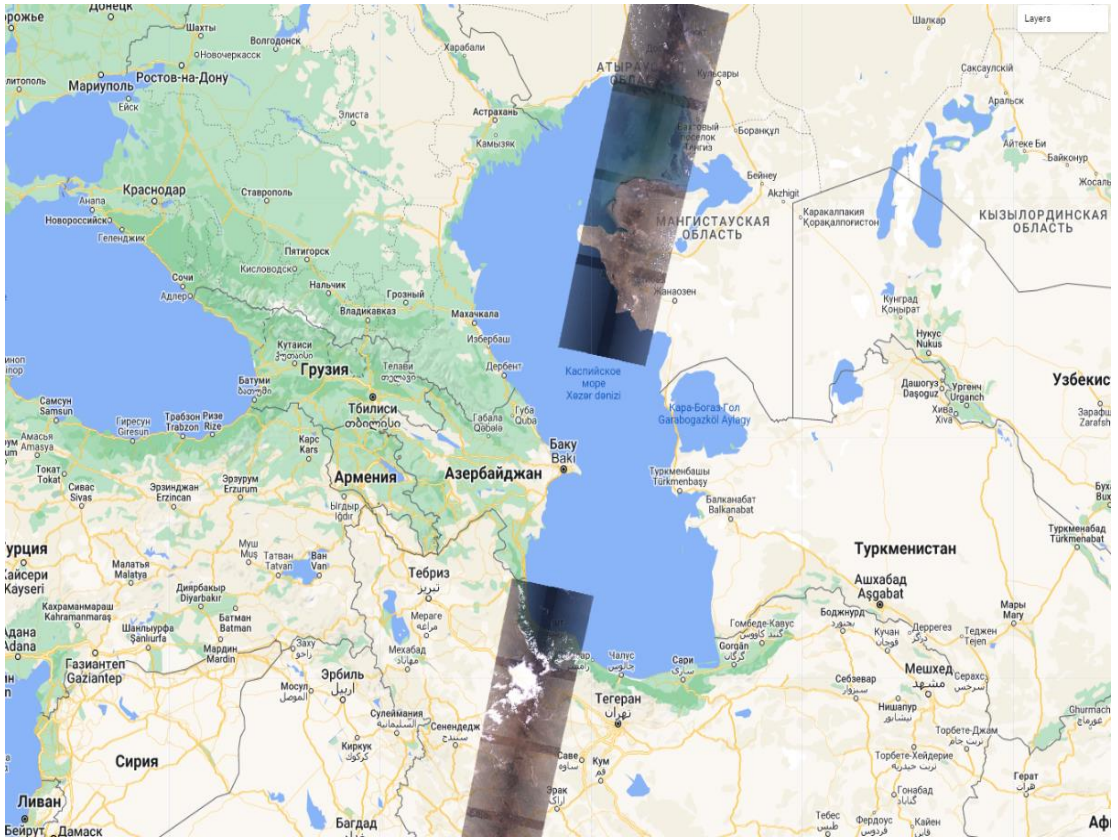


1995 2000 2005 2010 2015 2020 2025

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Центральная часть Каспийского моря имеет худшее покрытие снимками Landsat

Над Каспийским морем есть сектора, для которых космические снимки Landsat полностью отсутствуют либо могут отсутствовать в продуктах более высоких уровней обработки. Это сказалось на том, что центральная часть Каспийского моря имеет худшее покрытие снимками Landsat.



Пример отсутствия в архивах снимков над центральной частью акватории Каспийского моря (трек пролета №166 спутника Landsat-7 при съемке 2008-07-22)

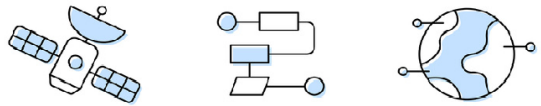
©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

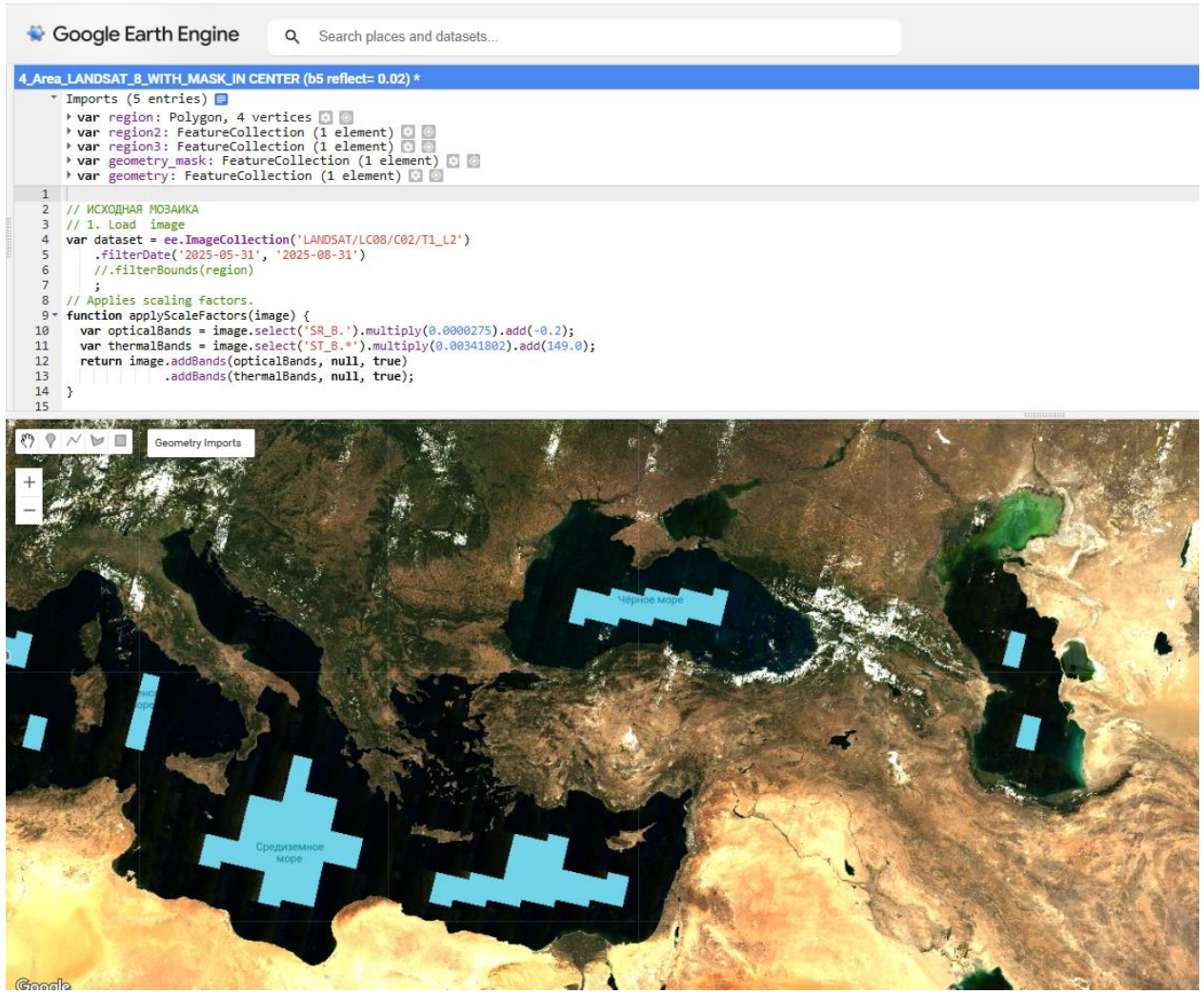
Получение обработка данных Landsat

В работе были использованы продукты Landsat Level-2, которые позволяют получать значения коэффициента отражения подстилающей поверхности. Данные Landsat были получены при помощи платформы Google Earth Engine.



Google Earth Engine



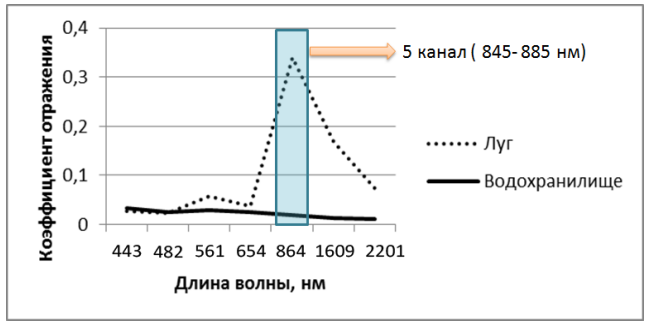


©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

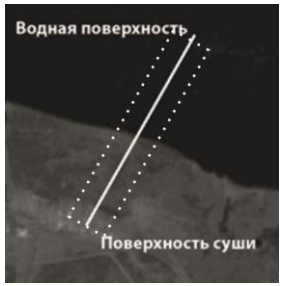
Выделение береговой линии водоемов

Наилучшую эффективность показала методика на основании разделения пикселей ближнего ИК канала по пороговому значению (Bocharov et al., 2021). При этом пороговое значение было адаптировано к используемым продуктам Landsat.

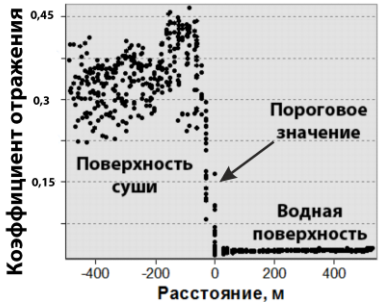
- **Для данных спутника Landsat-8 наилучший контраст между водной поверхностью и сушей проявляется в 5-м канале (0.845–0.885 мкм).**



- **Расчет порогового значения между группами пикселей производился на основе профилей переходной зоны.**







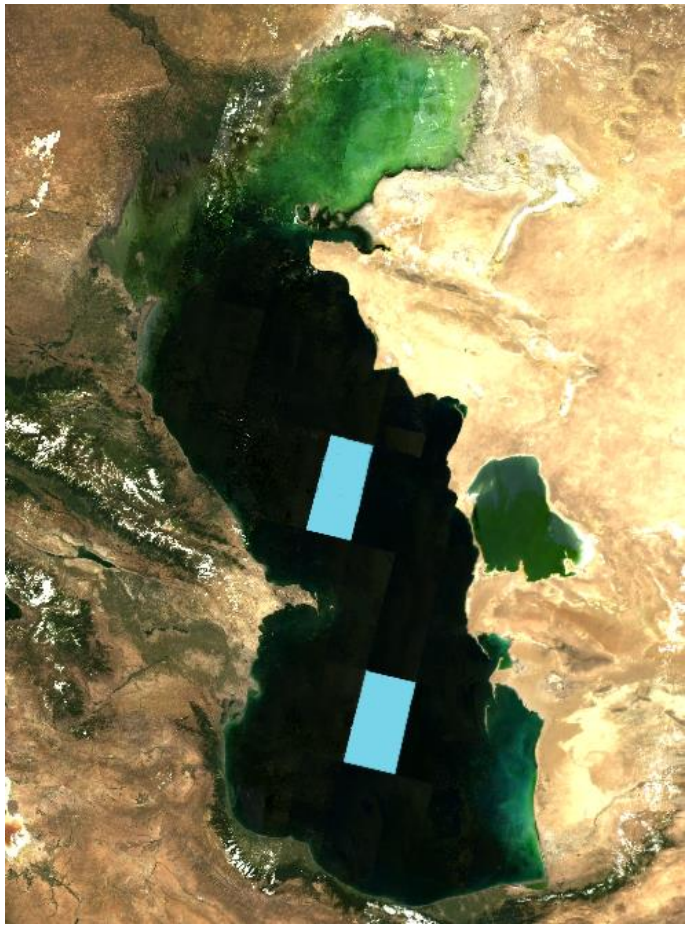
- **Выделение границ водных объектов**



©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Получение трехмесячных композитов

В данной работе исследование основной акватории Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол производится по отдельности. Для оценки площади использовались данные, полученные сенсорами спутников серии Landsat. Спутники серии Landsat осуществляют повторный пролет по орбите каждые 16 дней. Район полевых исследований перекрывается 6 треками спутников Landsat, поэтому одномоментно получить изображение всего Каспийского моря не предоставляется возможным. Для такого большого пространства редко можно подобрать безоблачный композит хотя бы за один месяц. Для минимизации влияния облачности использовались все снимки Landsat, полученные за три летних месяца каждого года.



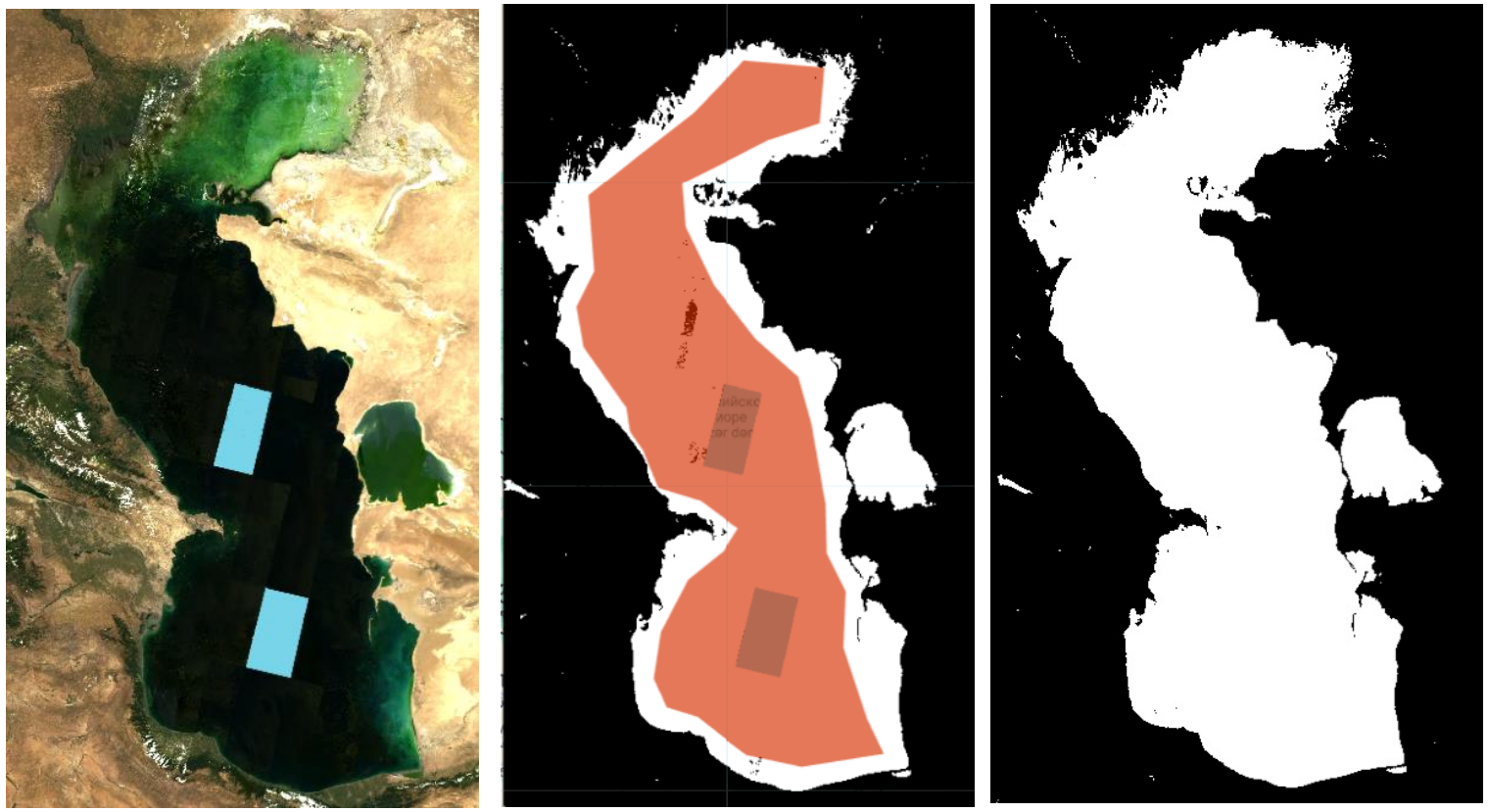
Пример безоблачного композита из снимков Landsat (01.06.2025-31.08.2025)

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Коррекция пропусков в центральной части Каспийского моря

Водная поверхность и облака обладают низкой отражательной способностью, поэтому для каждого пикселя определялось максимальное значение коэффициента отражения за исследуемый период. Если максимальное значение пикселя выше порогового, то он определялся как суша. Таким образом, если пиксель суши хотя бы на одном из снимков за три месяца не был перекрыт облачностью, то он будет определен верно.

Данные Landsat имеют постоянные пропуски над центральной частью Каспийского моря (а), Для исключения пропусков, а также влияния облачности на центральную часть Каспийского моря накладывался корректирующий слой (б)., перекрывающий области, которые однозначно относятся к водной поверхности. Это значительно упростило обработку и повысило качество получаемых результатов. Пример получения итоговой маски водной поверхности в регионе исследования приводится на рис. (в).



(а) (б) (в)

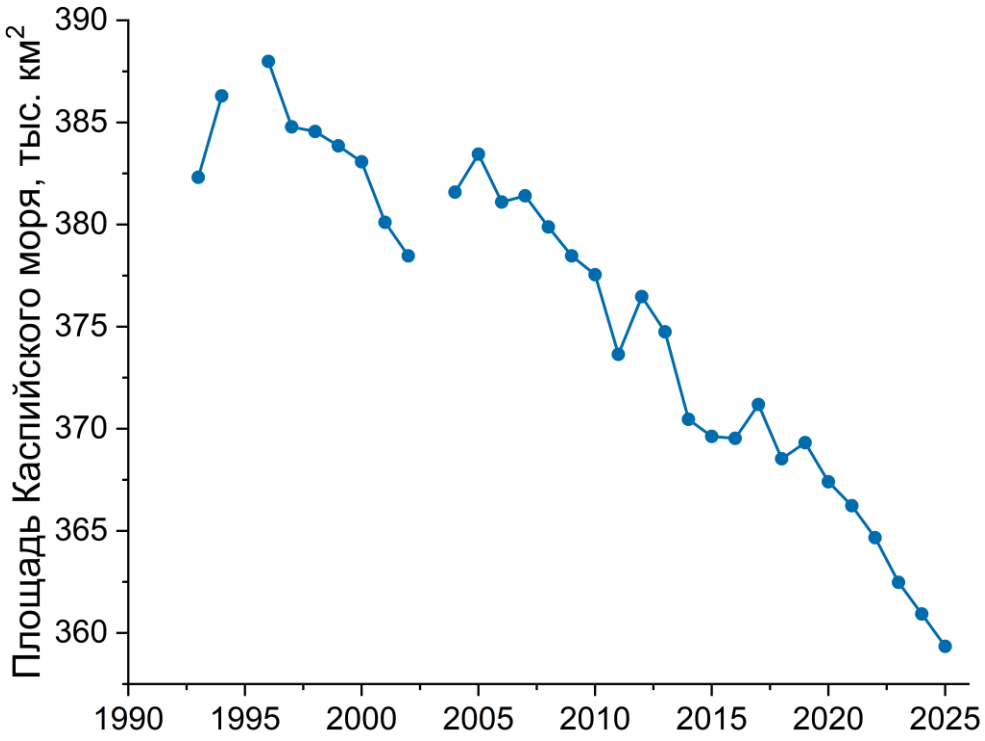
Каспийское море по данным Landsat-8 (2022/06/01 - 2022/08/31): (а) усредненный трехмесячный композит в естественных цветах; (в) маска водной поверхности с границами корректирующим слоя; (б) итоговая водная поверхности

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Площади и уровни Каспийского моря и залив Кара-Богаз-Гол по данным Landsat (1993-2025 гг.)



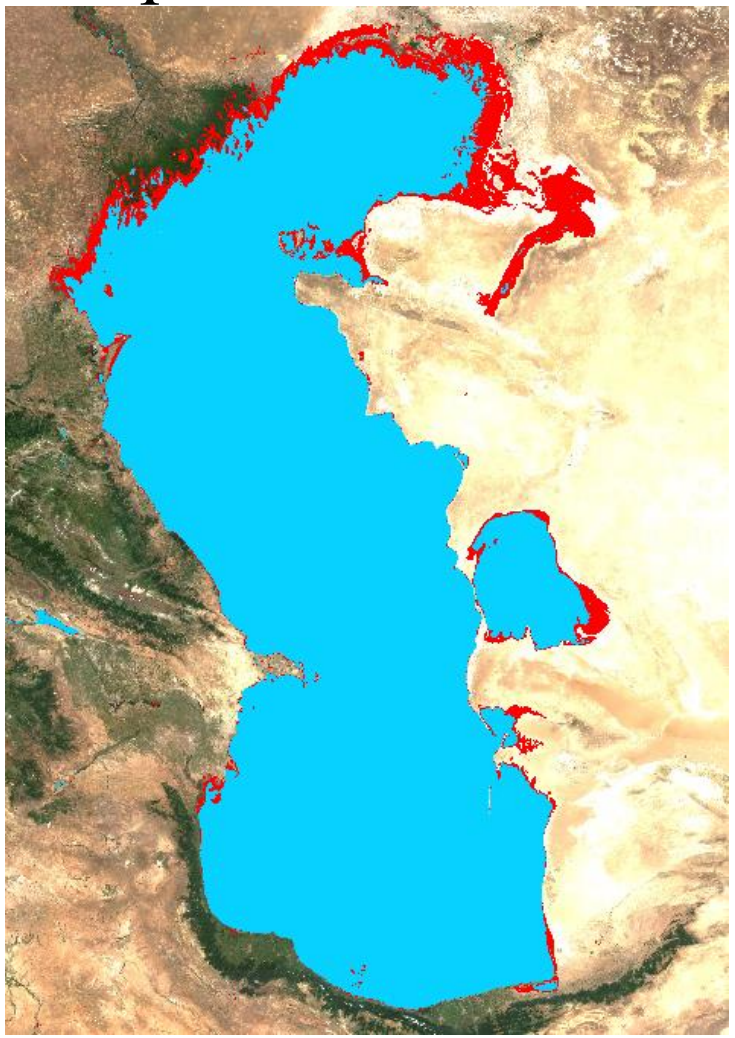
Пересчет пикселей растровых изображений в площадь



Площадь вычислялась по растрам, в виду того, что для конвертации в векторные форматы используемые в ГИС (*.shp и др.) для такого большого объекта не хватает вычислительных возможностей даже при уменьшении разрешения с 30 до 100 м

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Границы акватории Каспийского моря по Landsat



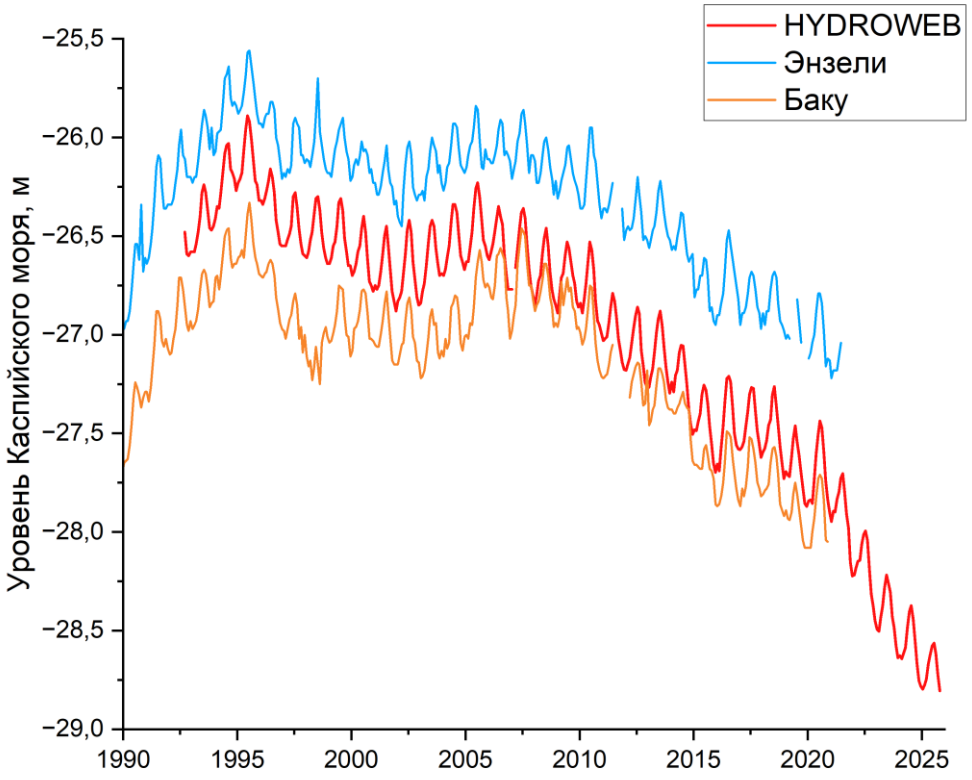
Границы акватории Каспийского моря по усредненным трехмесячным данным Landsat-8 за лето 2025 г. (голубая заливка) и потери площади водного зеркала относительно аналогичного периода 1996 г. (красная заливка), наложенные на подложку из снимков Sentinel-2, усреднённых за лето 2025 г.

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Уровень Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии

Спутниковые измерения уровня моря стали непрерывными и надёжными только с запуском миссии TOPEX/Poseidon в сентябре 1992 года, поэтому в данном исследовании рассматривается период 1993-2025 гг. Этот интервал особенно репрезентативен для анализа Каспийского моря: в 1992 году была разрушена дамба, отделявшая основную акваторию моря от залива Кара-Богаз-Гол, в результате чего залив вновь начал заполняться водой, а уровень Каспийского моря в 1995 году сменил долгосрочный тренд с роста на падение. В 1995 году уровень Каспийского моря достиг максимума с 1930-х годов, тогда как к 2025 году он существенно снизился до отметок -29.4 м.

В данной работе информация об уровне Каспийского моря получена из базы данных спутниковой альтиметрии HYDROWEB. При сравнении данных HYDROWEB с фактическими измерениями было установлено, что на постах бывшего СССР уровень в среднем ниже, чем по данным HYDROWEB на 0,43 м, на иранских выше на 0,49 м.



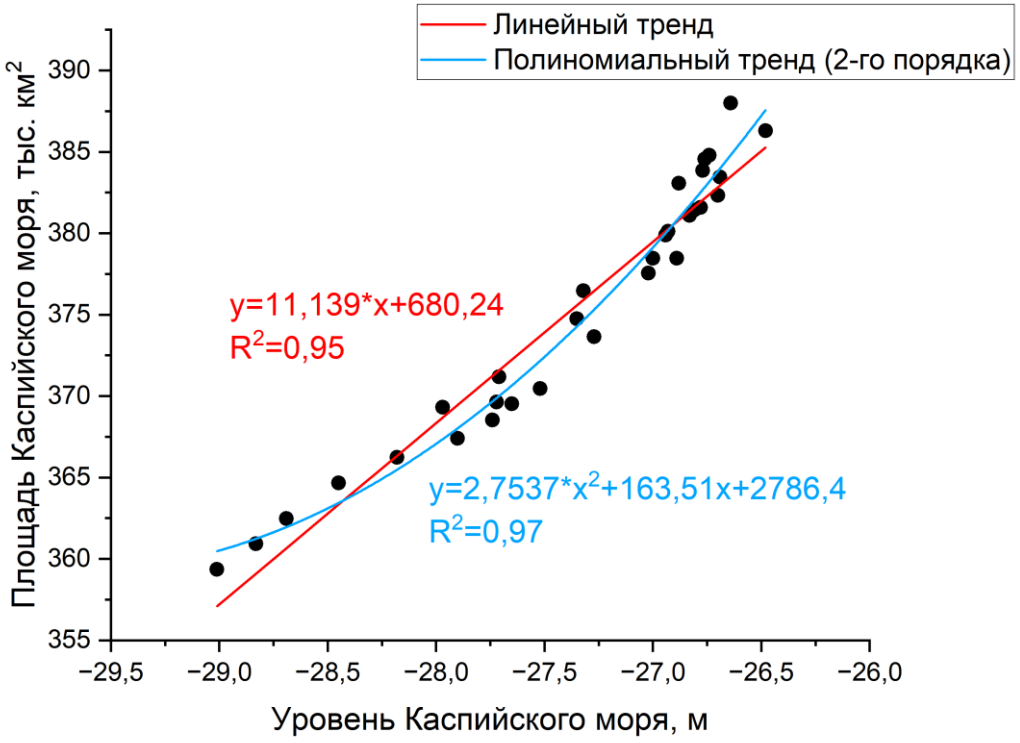
Среднемесячные значения уровня Каспийского моря в 1990-2025 гг. на постах Баку и Энзели, а также по данным HYDROWEB

Результаты сопоставления площадей и уровней Каспийского моря и залив Кара-Богаз-Гол по данным Landsat и HYDROWEB (1993-2025 гг.)

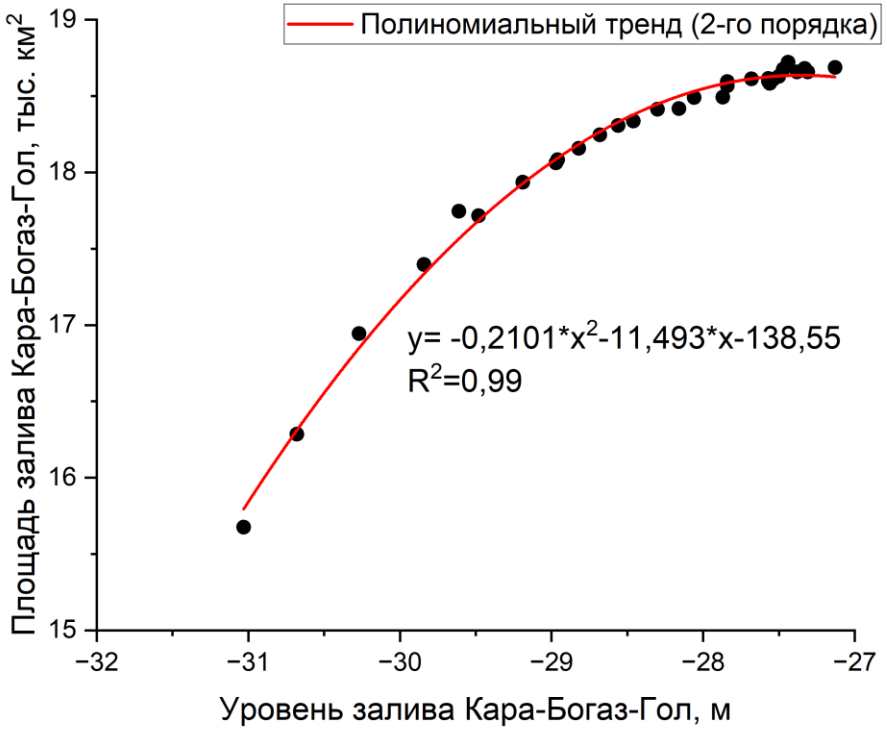
Год	Продукт Landsat	Каспийское море		Залив Кара-Богаз-Гол	
		Площадь, км^2	Уровень, м	Площадь, км^2	Уровень, м
1993	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	382316	-26,70	11903*	-31,25
1994	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	386303	-26,48	17746	-29,61
1995	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	Нет данных	-26,37	18492	-27,87
1996	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	387991	-26,64	18687	-27,13
1997	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	384786	-26,74	18657	-27,31
1998	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	384558	-26,76	18681	-27,33
1999	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	383856	-26,77	18657	-27,38
2000	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	383072	-26,88	18722	-27,44
2001	LANDSAT/LT07/C02/T1_L2	380109	-26,93	18608	-27,54
2002	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	378471	-26,89	18615	-27,57
2003	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	Нет данных	-26,87	Нет данных	-27,56
2004	LANDSAT/LT07/C02/T1_L2	381588	-26,78	18582	-27,56
2005	LANDSAT/LT07/C02/T1_L2	383448	-26,69	18676	-27,47
2006	LANDSAT/LT07/C02/T1_L2	381101	-26,83	18629	-27,50
2007	LANDSAT/LT07/C02/T1_L2	381411	-26,81	18596	-27,57
2008	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	379881	-26,94	18613	-27,68
2009	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	378470	-27,00	18594	-27,84
2010	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	377547	-27,02	18567	-27,84
2011	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	373647	-27,27	18489	-28,06
2012	LANDSAT/LT07/C02/T1_L2	376473	-27,32	18417	-28,16
2013	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	374746	-27,35	18413	-28,3
2014	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	370461	-27,52	18335	-28,46
2015	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	369624	-27,72	18307	-28,56
2016	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	369534	-27,65	18245	-28,68
2017	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	371186	-27,71	18156	-28,82
2018	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	368532	-27,74	18083	-28,96
2019	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	369318	-27,97	18062	-28,97
2020	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	367405	-27,90	17935	-29,19
2021	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	366231	-28,18	17716	-29,48
2022	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	364666	-28,45	17397	-29,84
2023	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	362481	-28,69	16944	-30,27
2024	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	360934	-28,83	16284	-30,68
2025	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	359347	-29,01	15676	-31,03

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Зависимость площади Каспийского моря и залив Кара-Богаз-Гол от уровня воды



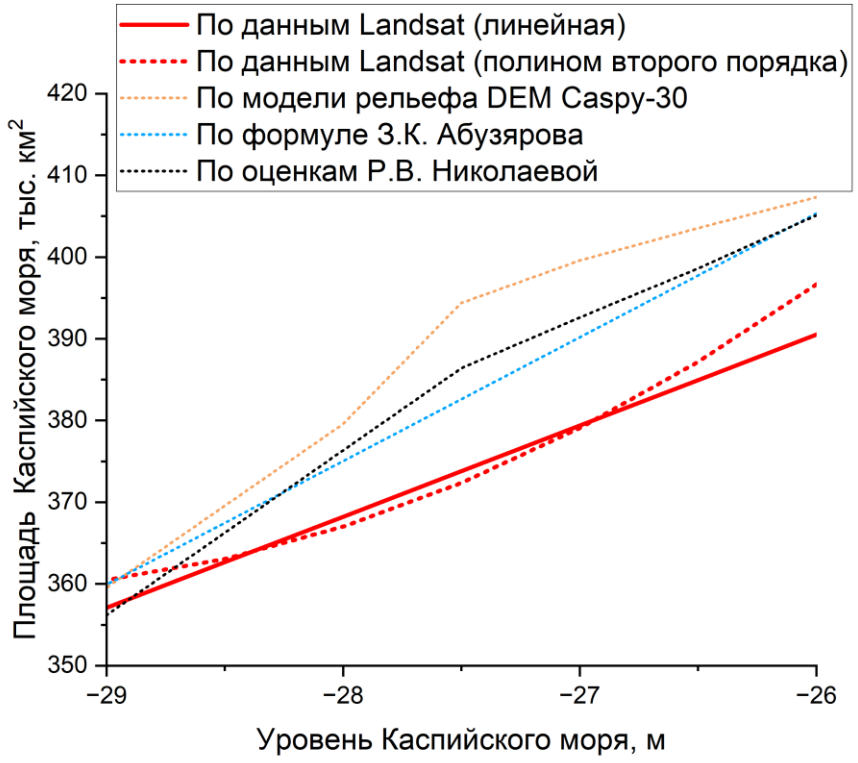
Зависимость площади Каспийского моря от уровня воды (по данным Landsat)



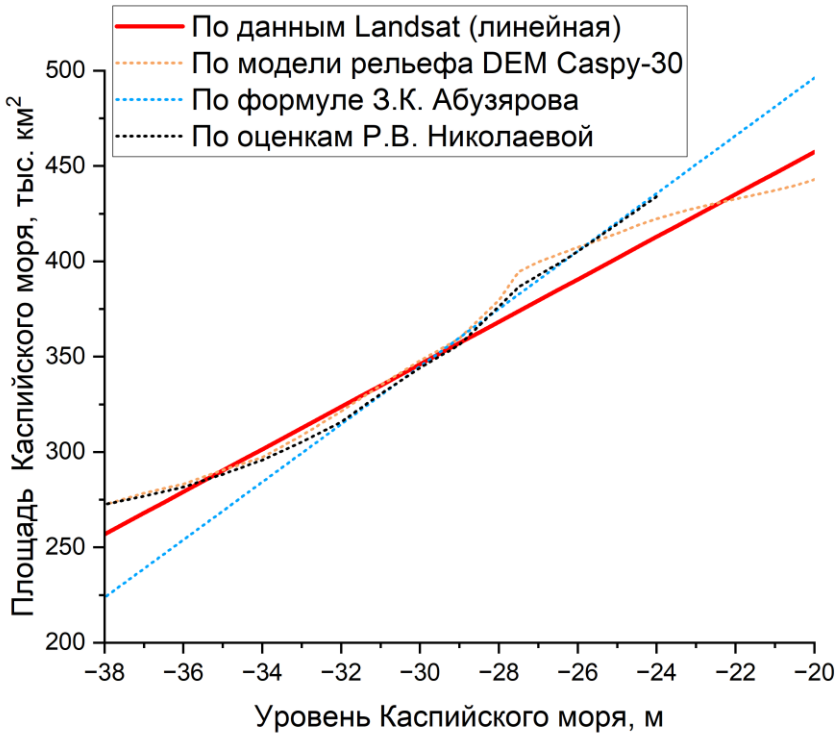
Площадь залива Кара-Богаз-Гол в зависимости от уровня (по данным Landsat)

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Зависимость площади Каспийского моря от его уровня по различным источникам



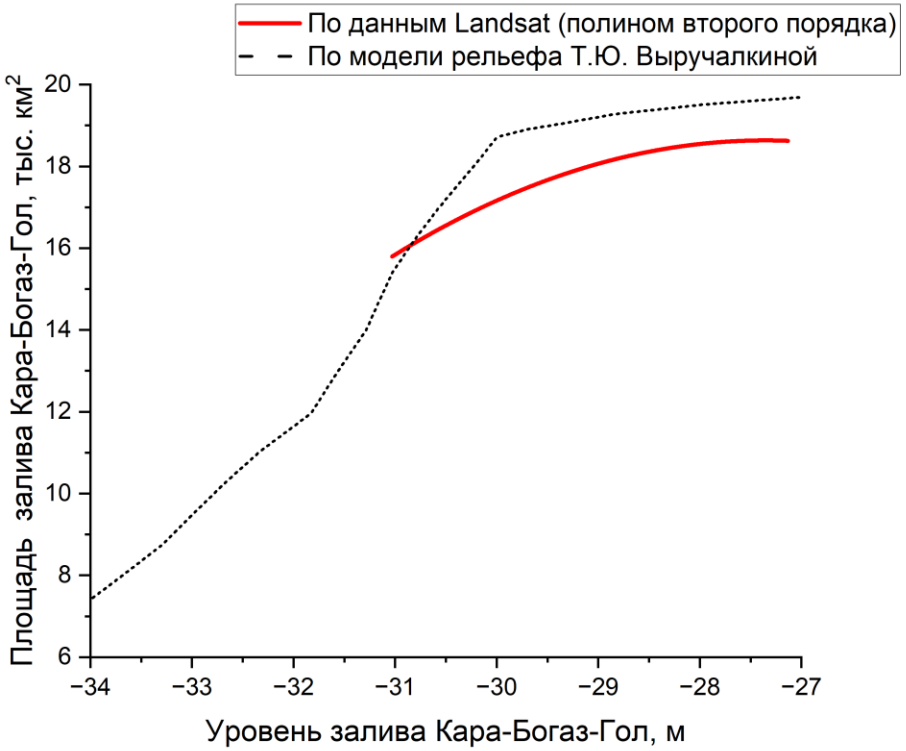
Зависимость площади Каспийского моря от его уровня по различным источникам (в пределах современных колебаний, при отметках от -26 до -29 м БС)



Зависимость площади Каспийского моря от его уровня по различным источникам (при отметках от -20 до -38 м БС)

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Зависимость площади залива Кара-Богаз-Гол от его уровня по различным источникам



. Зависимость площади залива Кара-Богаз-Гол от его уровня по различным источникам (при отметках от -27 до -34 м БС)

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Основные результаты

1) Получены карты фактического ежегодных потерь площади Каспийского моря с 1995 года

2) Получены современные гипсометрические кривые, показывающие изменение площади водного зеркала, рассчитанной по данным Landsat, в зависимости от уровня воды, полученного по данным спутниковой альтиметрии (HYDROWEB), а также **предложены уравнения регрессии, позволяющие рассчитывать площадь Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол по уровню воды в этих водоемах**

3) Полученные по данным ДЗЗ результаты зависимости площади акватории от уровня Каспийского моря были сопоставлены с данными, представленными Р. В. Николаевой (Байдин, Косарев, 1986), расчётами по формуле З. К. Абузярова (Абузяров, 2006, 2009), а также с результатами, рассчитанными по модели рельефа DEM Caspy-30 (Болгов, Красножон, Любушин, 2007). В пределах исследованных колебаний уровня Каспийского моря площади, полученные по данным ДЗЗ, оказались несколько ниже ранее опубликованных оценок.

4) Результаты, полученные по данным ДЗЗ, зависимости площади акватории от уровня воды в заливе Кара-Богаз-Гол были сопоставлены с оценками, представленными Т.Ю. Выручалкиной (Выручалкина, 2000). Площади, определённые по данным ДЗЗ, оказались несколько меньше значений, полученных на основе модели рельефа дна, однако при снижении уровня воды до текущих значений эта разница нивелировалась.

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Благодарности: Исследования по получению уравнений регрессии для расчета площади Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол выполнены при поддержке гранта РНФ N 23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования», https://rscf.ru/project/23-77-00027/. Часть работы, связанная с автоматизацией обработки больших массивов данных ДЗЗ на основе платформы Google Earth Engine с целью выделения границ водных объектов, выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0002 "Исследования процессов формирования качества поверхностных и подземных вод, природных и антропогенных механизмов изменения экологического состояния водных объектов, разработка методов и технологий управления водными ресурсами и качеством вод".

©2026, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Биденко С.И.

Спасибо за внимание!