Исследование современного гидрологического режима бассейна Аральского моря по данным многолетнего комплексного спутникового мониторинга

Мартьянова В.В.
Научный руководитель Ермаков Д.М.

29/05/2026

Характеристики района исследования

- Один из крупнейших бессточных бассейнов мира
- Площадь водосбора: ~1.9 млн км^2.
- Захватывает территорию нескольких стран (Узбекистан, Казахстан, Туркменистан, Кыргызстан, Таджикистан).

Основные реки – Амударья и Сырдарья
Источник питания – таяние ледников Тянь-Шаня и Памиро-Алая
Центральный объект – Аральское море
Исторически 4-е по величине озеро мира
С 1960-х гг. – регион катастрофического антропогенного обмеления.

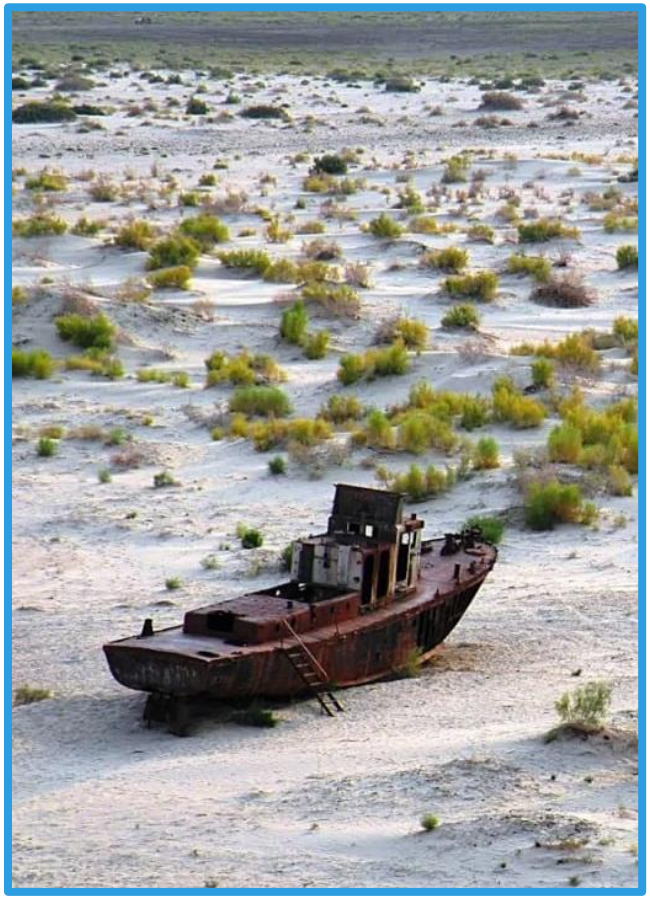
Границы водосборов Амударьи (розовый) и Сырдарьи (желтый) по данным базы HydroBASINS 3 уровня

Формулировка проблемы

Аральское море превратилось из одного из крупнейших озёр мира в несколько малых водоёмов. Процесс признан одной из крупнейших антропогенных экологических катастроф.

Проблема данных:
- отсутствие единой системы мониторинга водного баланса на всей территории водосбора
- трансграничный характер бассейна осложняет сбор согласованной информации

Научный пробел: недостаток комплексных количественная оценок вклада всех компонентов водного баланса в усыхание моря на основе единой методологии.



Корабль, затонувший в Аральском море

Границы региона исследования

Источник данных: база глобальных водоразделов HydroBASINS. Разработчик World Wildlife Fund (WWF) совместно с Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries (IGB).

База построена на основе карты рельефа EarthEnv HydroSHEDS (данные Space Shuttle), что даёт возможность получить границы водосборов в едином стандарте для всего земного шара.

Преимущество: устраняет проблему несогласованности национальных границ для трансграничных бассейнов.

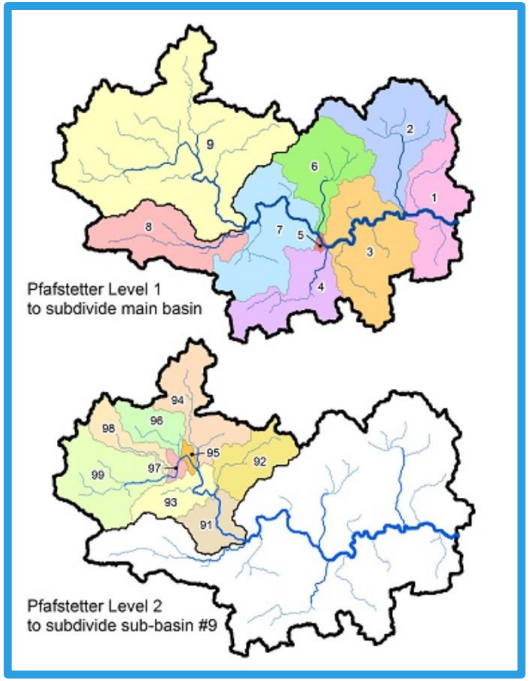


Схема построения границ водосборов в базе HydroBASINS

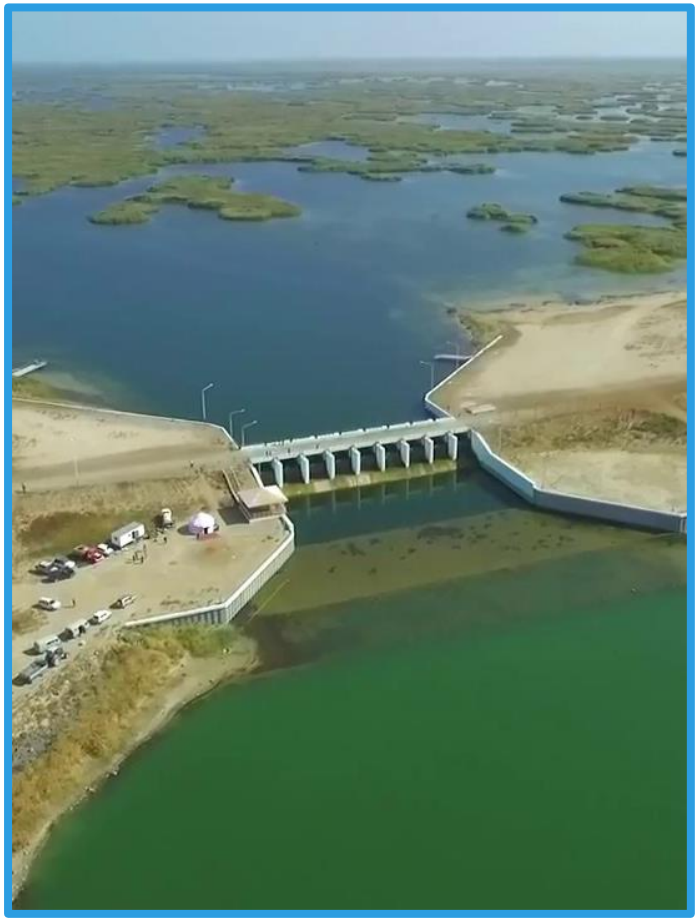
Данные для сравнения

Ключевой показатель для проверки результатов - объем воды в Аральском море. Динамика объема будет рассчитана самостоятельно по данным об уровне и площади отдельных Аральских морей.

Рассчитанный дефицит водного баланса должен коррелировать с изменением объема моря.

Ожидаемая связь: отрицательный баланс соответствует сокращению объема моря. Положительный баланс – росту объема.

Сравнение проводится по анализу многолетней динамики и трендов.



Кокаральская плотина

Балансовая методика

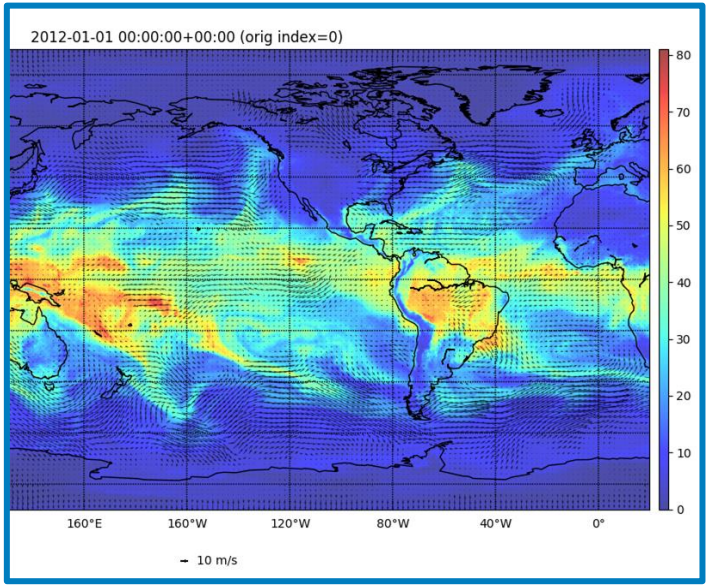
Глобальные спутниковые измерения микроволновой радиометрии позволяют получить интегральное влагосодержание атмосферы (общее количество водяного пара в столбе атмосферы) с определенной периодичностью.

Можем сделать расчет горизонтального переноса водяного пара между регионами с помощью алгоритмов компьютерного зрения.

В результате получаем оценку эффективного испарения (разность между испарением и осадками) как остаточного члена баланса.

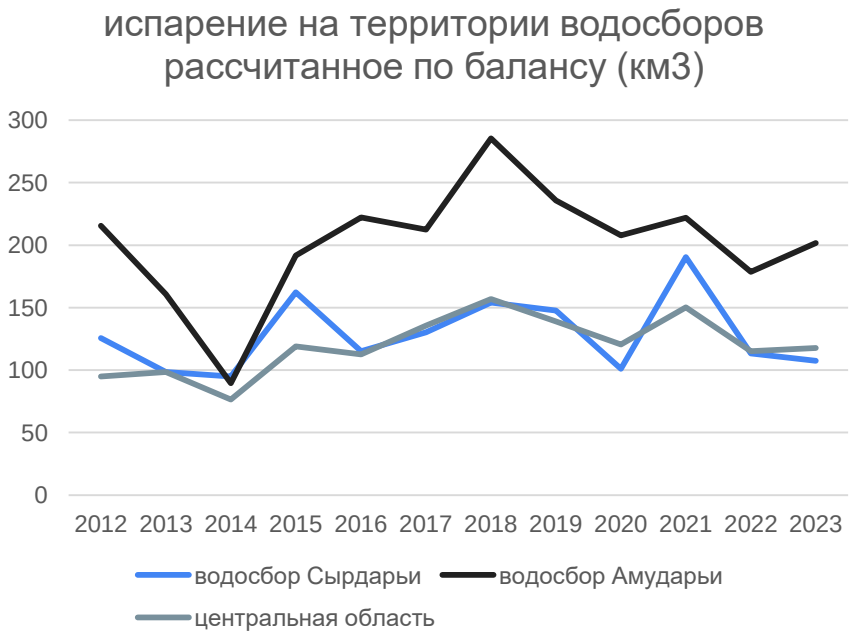
Главное преимущество: независимая оценка водного баланса по единому спутниковому источнику для всей территории.

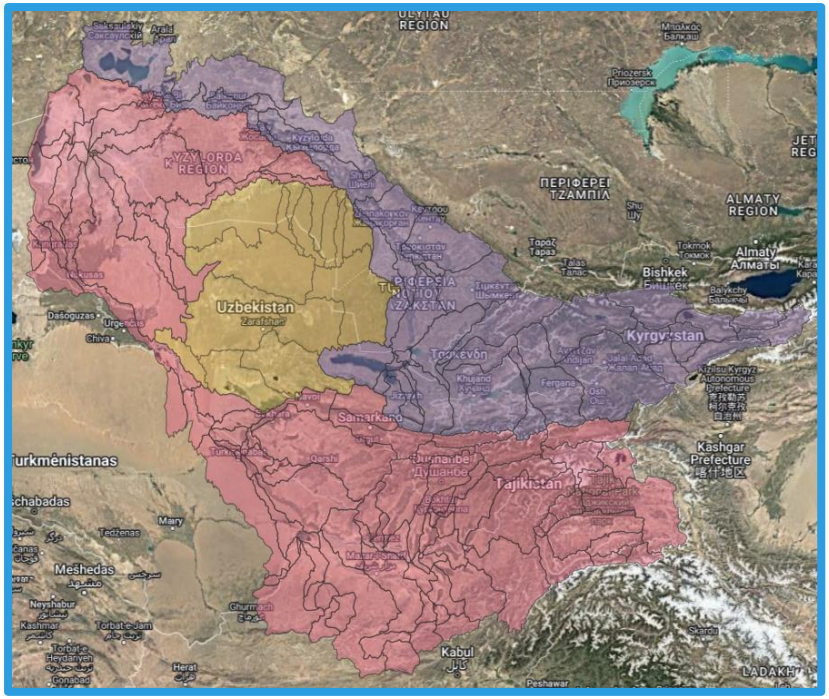
Восстановление вертикального обмена влагой над сушей по данным спутникового радиотеплового зондирования



Карта интегрального влагосодержания атмосферы в программе Viewflow

Баланс на территории водосборов





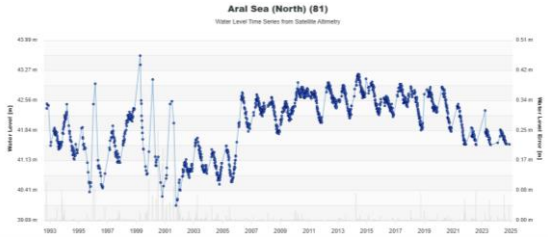
Границы водосборов Амударьи (розовый) и Сырдарьи (фиолетовый) по данным базы HydroBASINS 6 уровня

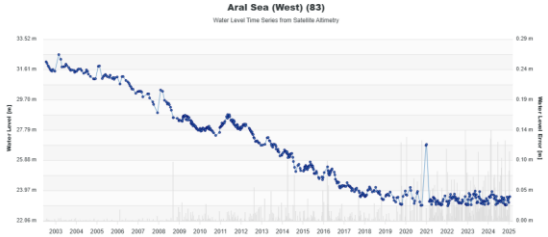
Динамика объема Аральского моря

Северный Арал

Западный Арал

Восточный Арал



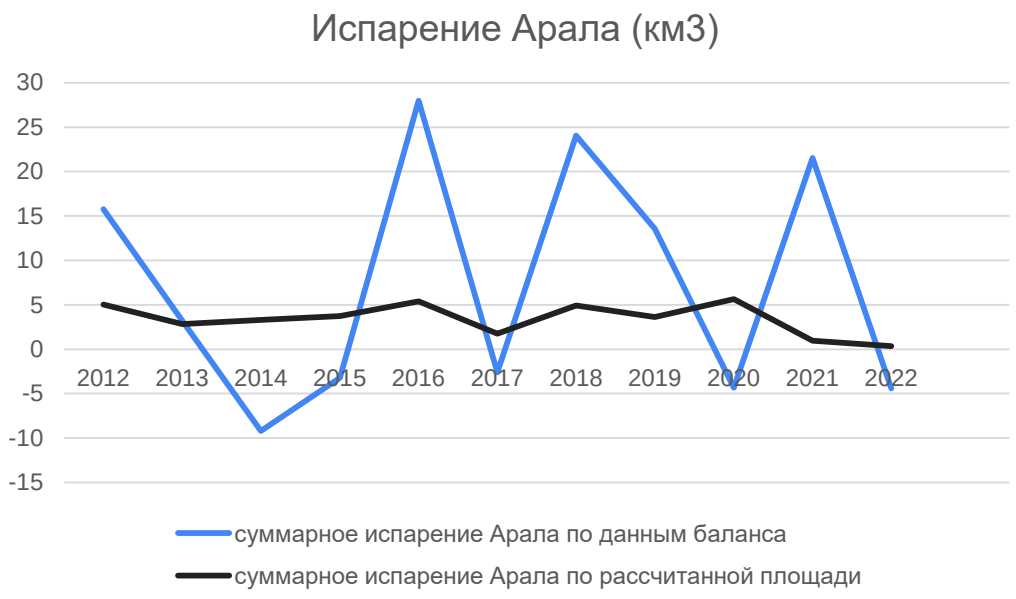


Источник данных:
База DAHITI (Database for Hydrological Time Series of Inland Waters).
Тип данных: Высокоточные измерения уровня воды, полученные со спутниковой альтиметрии.

Рассчитана динамика объема водоемов по данным об уровне и площади водной поверхности.

Сравнение с балансом:
Изменение объема моря сопоставляется с дефицитом водного баланса его водосбора.

Динамика объема Аральского моря



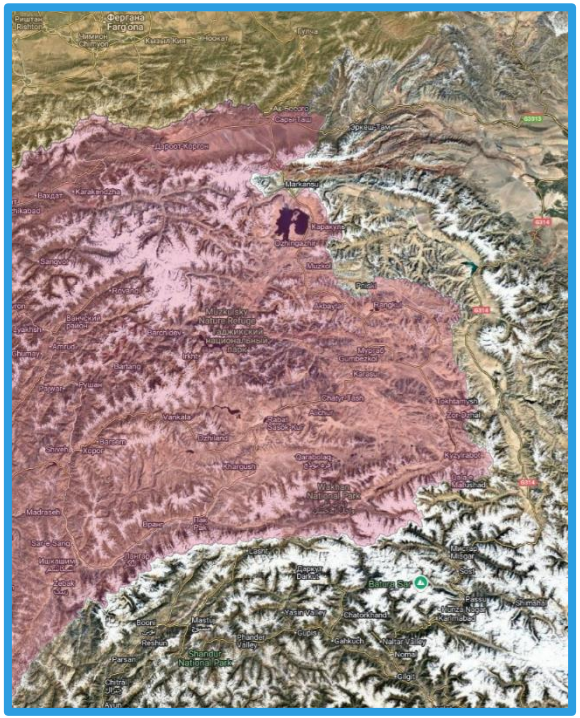
Наложение маски воды на месячный композит MODIS

Неустойчивость решения вблизи горных вершин

Расчет водного баланса для фрагментов ледников в границах HydroBASINS дал физически нереалистичные значения.

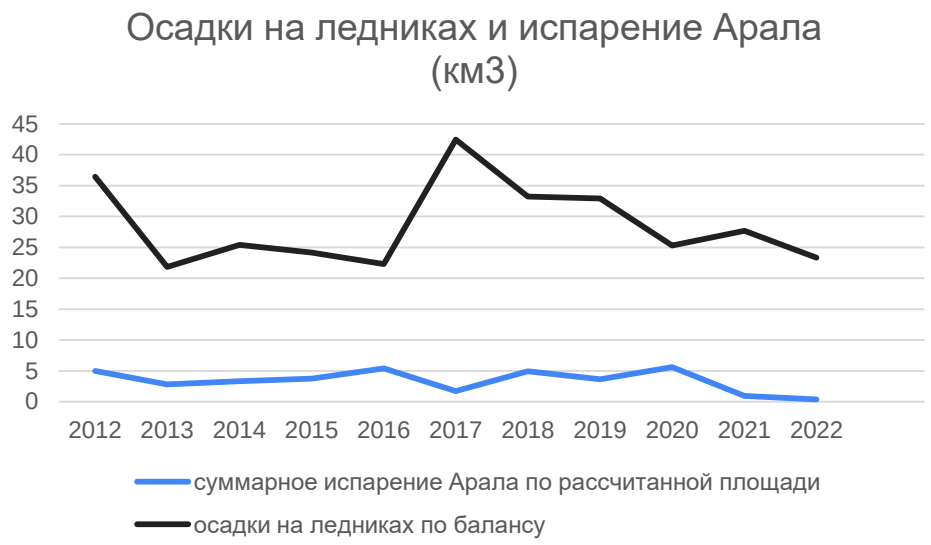
Предполагаемые причины неустойчивости:
- резкие перепады высот и сложный рельеф
- влияние высотности на сигнал спутникового радиометра
- ограниченное пространственное разрешение данных для малых объектов

Предложенное решение:
Расчет водного баланса выполнен для всей площади ледника. Для территории водосбора взята пропорциональная часть от общего баланса ледника, что дало корректные и физически обоснованные данные для высокогорных зон.



Ледники на территории водосборов

Сравнительный анализ результатов

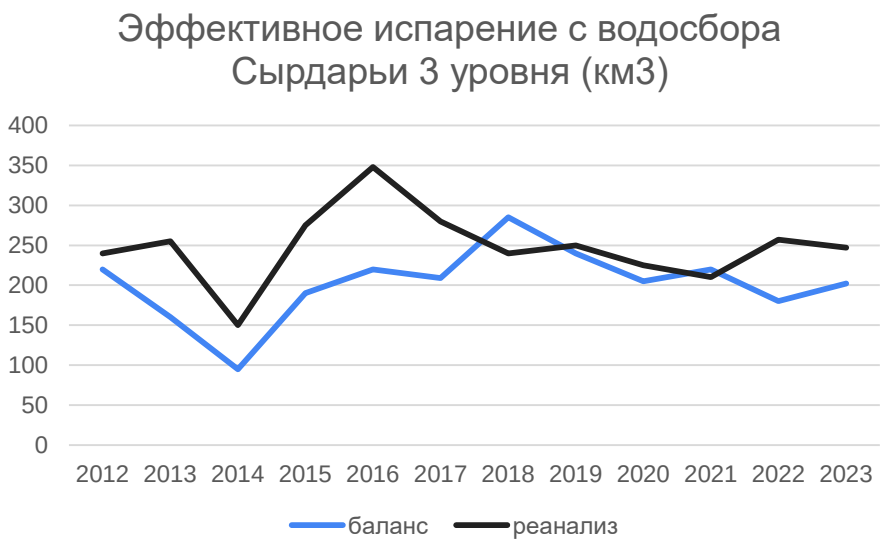


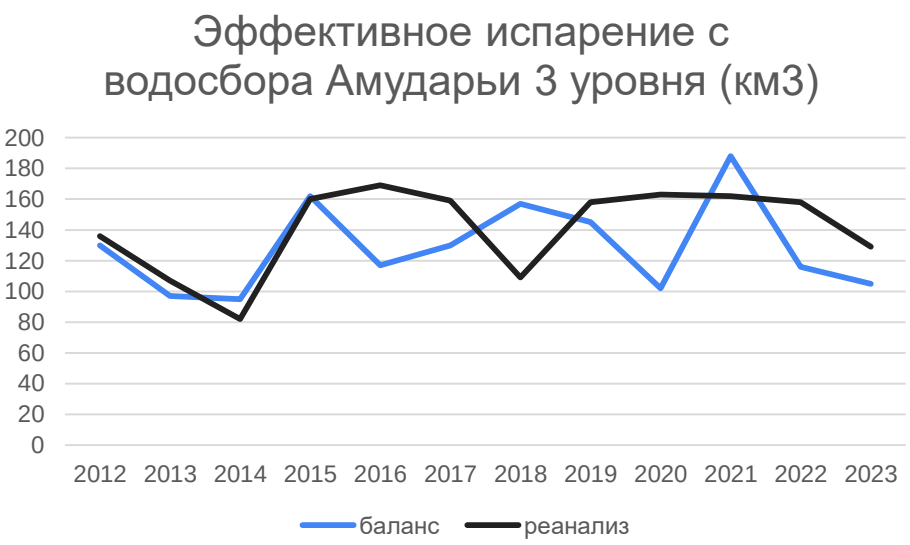
На графике наблюдается устойчивая антикорреляция многолетних трендов. Периоды максимумов осадков на ледниках соответствуют минимумам испарения с моря, и наоборот.

Независимо рассчитанные компоненты баланса демонстрируют физически ожидаемую связь, что является косвенной валидацией использованной методики.

Результат количественно подтверждает тесную гидроклиматическую связь между областью питания ледников и низовьями водосборной системы. Полученная закономерность — ключ к пониманию отклика всей системы на климатические колебания.

Сравнение с результатами реанализа MERRA





Высокие оценки испарения в засушливом районе Аральского моря противоречат аридным условиям: при дефиците осадков и влажности почвы фактические потери на испарение не могут достигать таких величин. Используемая модель плохо работает в условиях сухого воздуха, поскольку она ориентирована на перенос влаги в атмосфере. При ее крайне низком содержании характерном для района Аральского моря модель теряет физическую адекватность и дает нереалистично высокие оценки испарения.

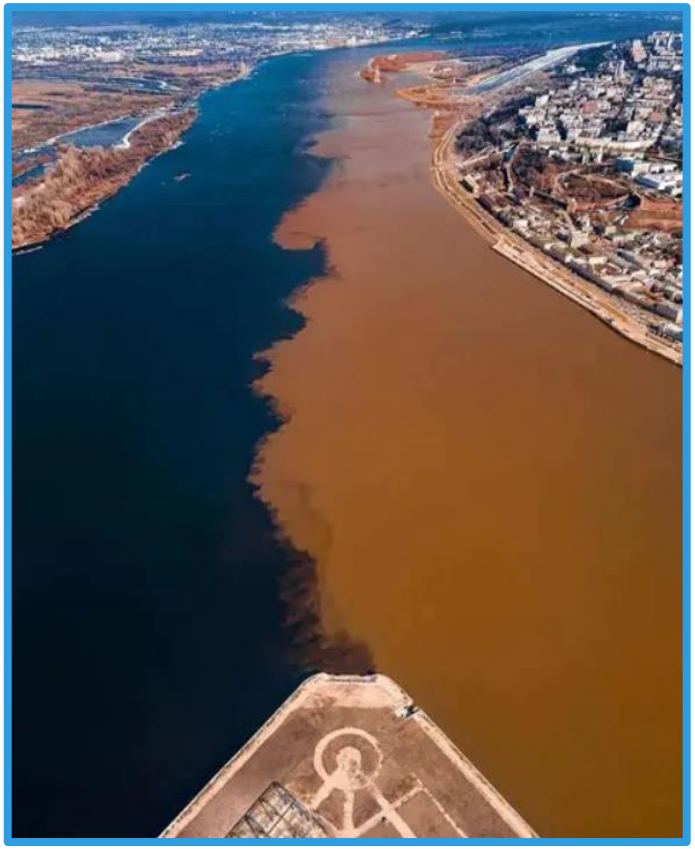
Валидация методики на системе Каспийское море – Водосборный бассейн Волги

Бассейн реки Волги – ключевой элемент водного баланса Каспийского моря
Один из крупнейших замкнутых (бессточных) бассейнов мира
- площадь водосбора: ~1,38 млн км^2
- охватывает территорию России и частично Казахстана
- основная водная артерия – река Волга
Источник питания – таяние снегов, дожди, верховые притоки
Центральный объект – Каспийское море

Границы водосбора Волги
по данным базы HydroBASINS 3 уровня

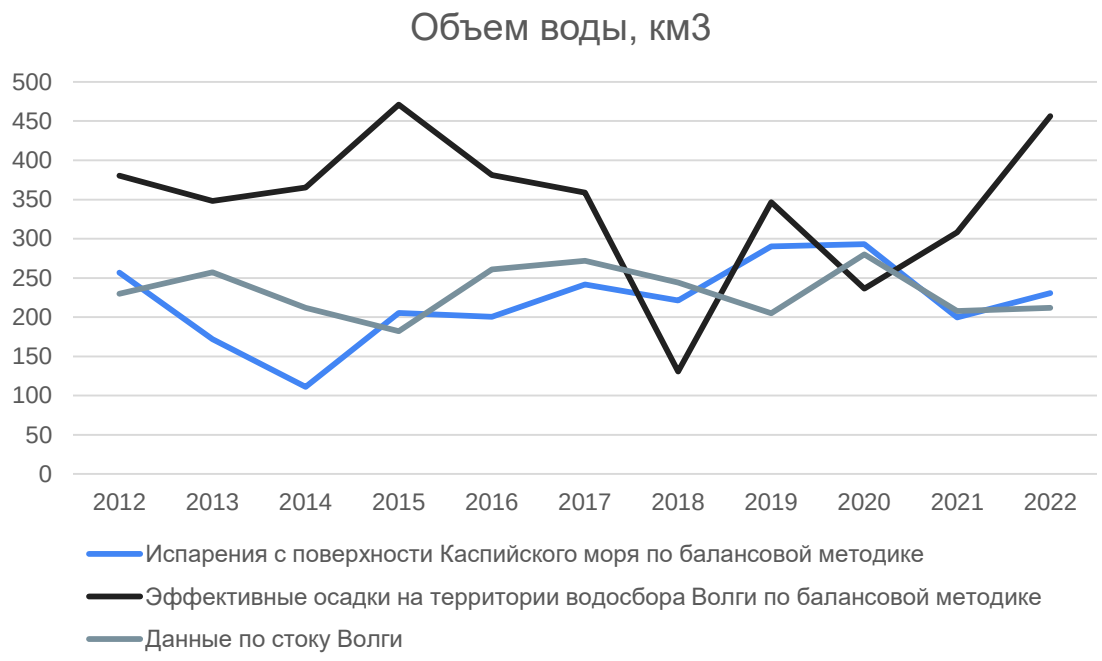
Идея

Известно, что Волга даёт >80% притока в Каспий. Но неизвестно, какая доля влаги, выпавшей в истоках Волги, в конечном счёте возвращается в атмосферу через испарение с поверхности моря, минуя наземные измерения. Предложенные спутниковые методы позволяют замкнуть этот баланс.



Стрелка Оки и Волги
в Нижнем Новгороде

Сопоставление результатов



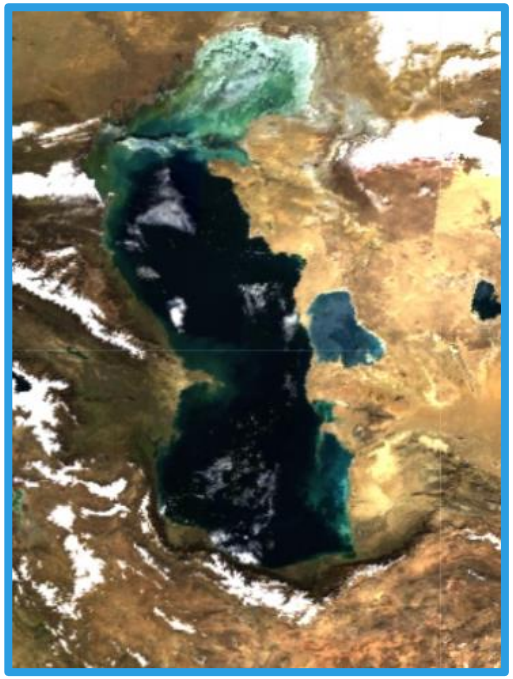
На графике видна синхронность всех трёх рядов: годы с повышенными осадками на водосборе соответствуют годам повышенного испарения с моря.

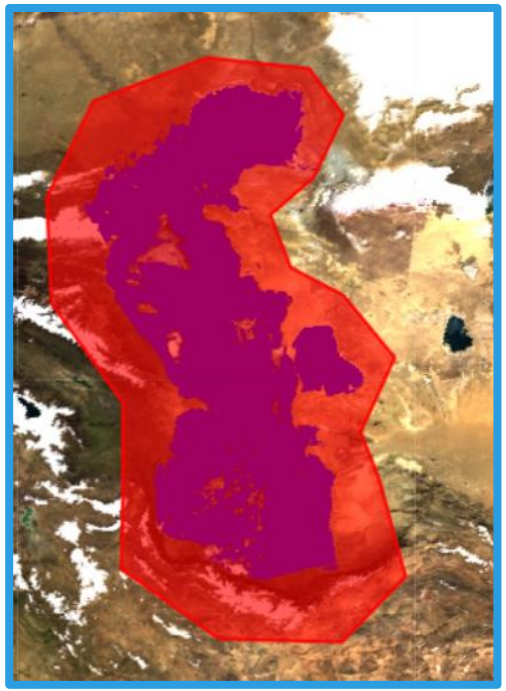
Валидация результатов с данными реанализа MERRA

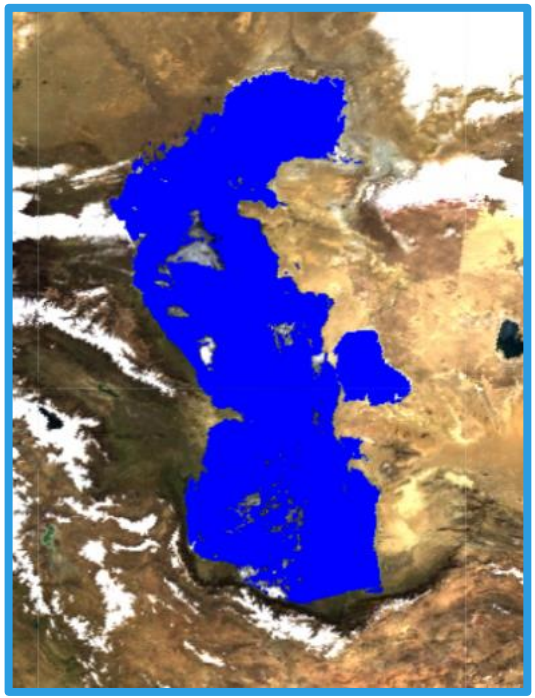
Качественно: годовые тенденции полностью совпадают.

Количественно: балансовая методика стабильно превышает значения реанализа.

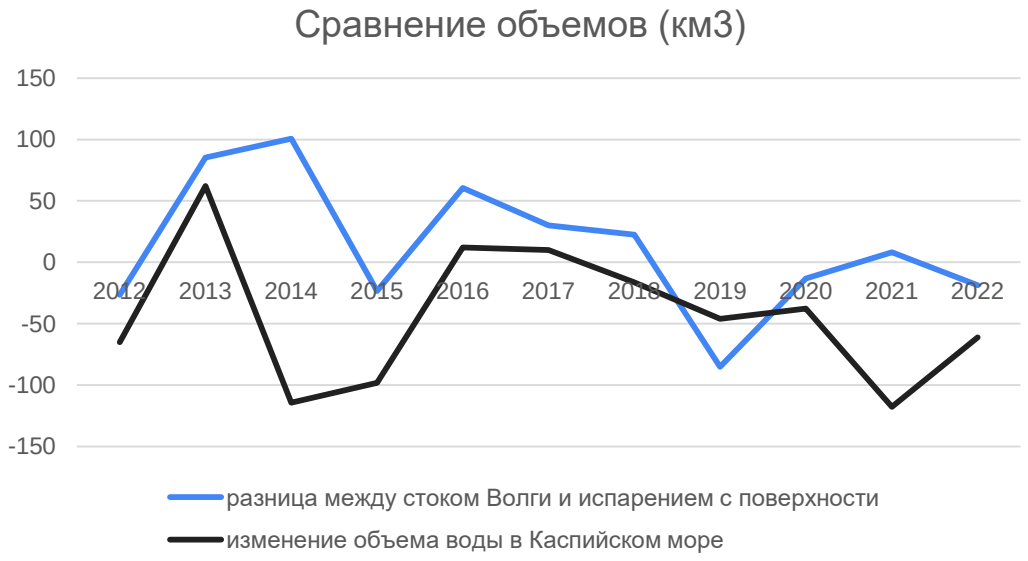
Расчет динамики объема воды в Каспийском море

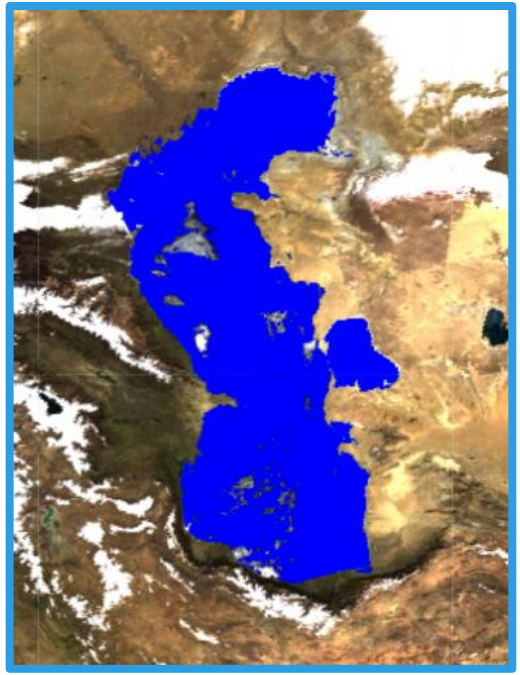






Расчет динамики объема воды в Каспийском море

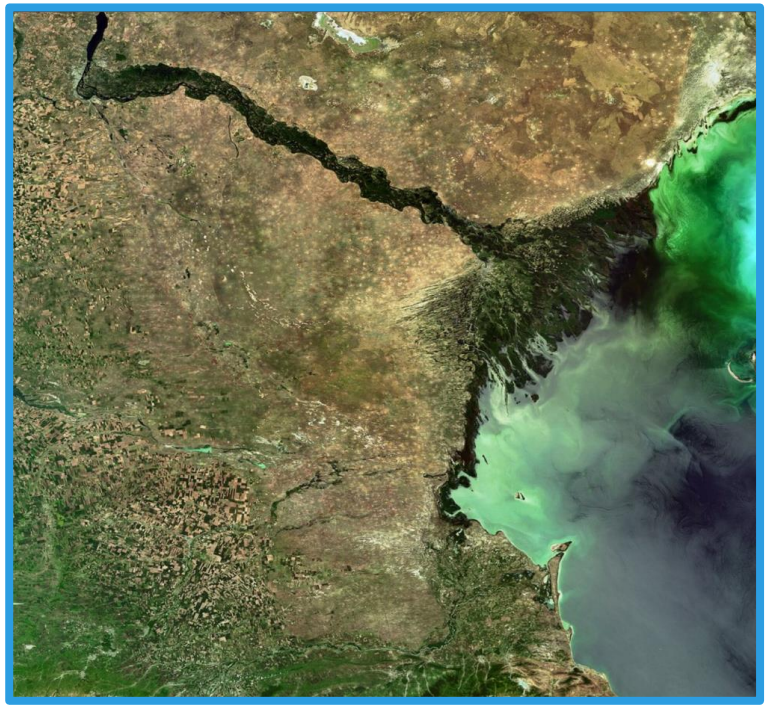




Наложение маски воды на месячный композит MODIS

Итоги

Балансовая методика выявила устойчивую связь между осадками на ледниках и испарением с Аральского моря. Перенос метода на бассейн Каспия и Волги дал аналогичные результаты: синхронность осадков на водосборе, стока и испарения с моря, а также совпадение качественных трендов с данными MERRA. Это подтверждает универсальность спутникового балансового подхода для независимого анализа крупных бессточных бассейнов мира.



Дельта Волги из космоса