Изменение водных ресурсов в Центрально-Азиатском регионе по данным миссии GRACE.

Мандычев А., Шайдылдаева Н., ЦАИИЗ.

Современная тенденция изменения величины водных ресурсов в Центральной Азии исследуется многими методами, включающими оценку величины атмосферных осадков, поверхностного стока, объема воды в ледниках, озерах и бассейнах подземных вод. Миссия GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) представляет собой интегрированную оценку водных ресурсов на значительных площадях, по данным измерения гравитационного потенциала Земли с помощью специализированных спутников. GRACE и GRACE Follow-On — это двухспутниковые миссии по мониторингу и картированию изменяющегося гравитационного поля Земли. GRACE ежемесячно предоставлял решения по гравитационному полю с апреля 2002 года по июнь 2017 года, а GRACE-FO продолжает эту работу с июня 2018 года по настоящее время. Центры: JPL, NASA GSFC, CSR (UT Austin) и немецкий GFZ, руководят публикацией периодических решений по гравитационному полю, изменяющемуся во времени. В настоящее время доступен ряд решений GRACE для изучения и использования [1-10]. Два таких решения формируются в виде оценок концентрации массы (масконов) и разработаны JPL (Jet Propulsion Laboratory) и GSFC (Goddard Space Flight Center). В данном анализе регионального многолетнего изменения массы воды на поверхности и под землей, использованы данные представленные на сервисах: https://grace.jpl.nasa.gov/data-analysis-tool/ и https://ccar.colorado.edu/grace /gsfc.html.

Разрешение рассматриваемого метода измерения изменения гравитационного потенциала Земли, порядка 300 км, с точностью измерения эквивалентной гравитационному изменению, вызываемому слоем воды, примерно, в 1–2 см. В рассматриваемом случае, усреднённая по времени базовая линия изменения слоя воды рассчитана за период 2004-2009 гг.. Изменение величины слоя воды в сантиметрах, эквивалентное изменению величины силы тяжести, относительно среднего базового значения, приводится на рисунках с детализацией в один географический градус или около 120 км. На представленных далее графиках исключена сезонная составляющая изменения силы тяжести.

За счет изменения объема воды образующегося и расходующегося на земной поверхности и в толще пород, изменяется её локальная масса и соответственно гравитационный потенциал на соответствующем участке поверхности Земли. Измерение этого гравитационного потенциала соответствует изменению запаса воды на момент измерения. В процессе обработки первичных результатов измерений, для выделения воздействия воды, в них вводятся поправки, исключающие влияние различных факторов

на изменение силы тяжести, таких как атмосферное давление, аккумуляция и перенос седиментов, воздействие землетрясений и другие.

Глобальный обзор результатов измерения изменения силы тяжести и соответствующего им изменения слоя водного эквивалента, по данным GSFC, показал (рис.1), что за период наблюдений с 2002 по 2023 гг. средняя скорость изменения водной массы (СИВМ в см/год) на континентах Земли в основном отрицательная, то есть наблюдается потеря водной массы. В этом ряду выделяется Гренландия, где скорость потери водной массы (-10,7 см/г), на порядок и более превышает аналогичные величины на остальной суше: - 0,72 см/г - Северная Америка, - 0,17 см/г - Южная Америка, - 0,56 см/г - Европа, - 0,15 см/г - Азия, - 0,62 см/г - Средний Восток, - 1,08 см/г - Антарктида. Исключение представляет Африканский континент и Австралия, где в среднем преобладает положительный тренд СИВМ - (0,28 см/г и 0,02 см/г, соответственно).

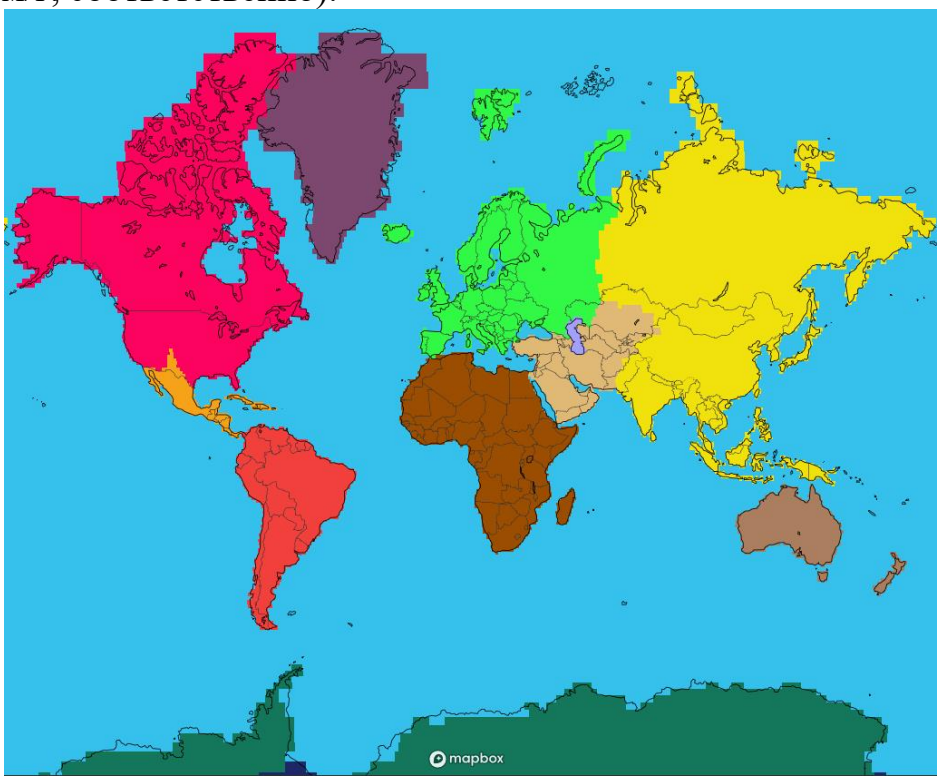

Рис.1 Части на суши, по которым определены (GSFC) средние величины СИВМ за период 2002-2023 гг.

Более детальное глобальное распределение СИВМ, по данным GSFC, за период 2002-2023 гг. с детальностью 1° , показано на рисунке 2. Здесь видно, что максимальные отрицательные СИВМ наблюдаются в северных и южных полярных регионах, где они обусловлены потерей водной массы ледниками в процессе их водной и ледовой разгрузки в моря и таянием льда вечной мерзлоты, а так же, в районах деградации крупного горного оледенения, как это видно для случая Аляски, Южных Анд, Гималаев. Аналогично, относительно, высокие отрицательные СИВМ, характерны для континентальных засушливых

регионов, с значительной площадью пустынь. В этом ряду особенно заметно Каспийское море.

Однако, наряду с потерей водной массы, наблюдаются и регионы, где преобладает, за рассматриваемый период наблюдений и накопление водной массы, которое не проявлялось при средней оценке СИВМ для больших территорий, как это было показано выше. Это хорошо видно на примере Гренландии, где на абсолютных высотах более 2000 м преобладает накопление, а на нижерасположенной территории – потеря водной массы, аналогична ситуация и с Антарктидой, где так же на большой площади фиксируется накопление водной массы при среднем отрицательном показателе СИВМ. В этом случае, преобладание на суше потери водной массы является следствием глобального потепления, а случаи накопления необходимо дополнительно анализировать на предмет наличия процессов накопления воды, особенно в засушливых регионах, где альтернативным процессом увеличения гравитационной массы, может быть накопление седиментов. В то же время, уменьшение гравитационной массы, может быть связано для горных территорий не только с потерей воды, но и с потерей горных пород за счет их эрозии и переноса во впадины. В этом случае имеет значение протяженность пути транспортировки обломочного седиментационного материала водными и воздушными потоками в соответствии с размерами впадин в которых происходит аккумуляция седиментов.

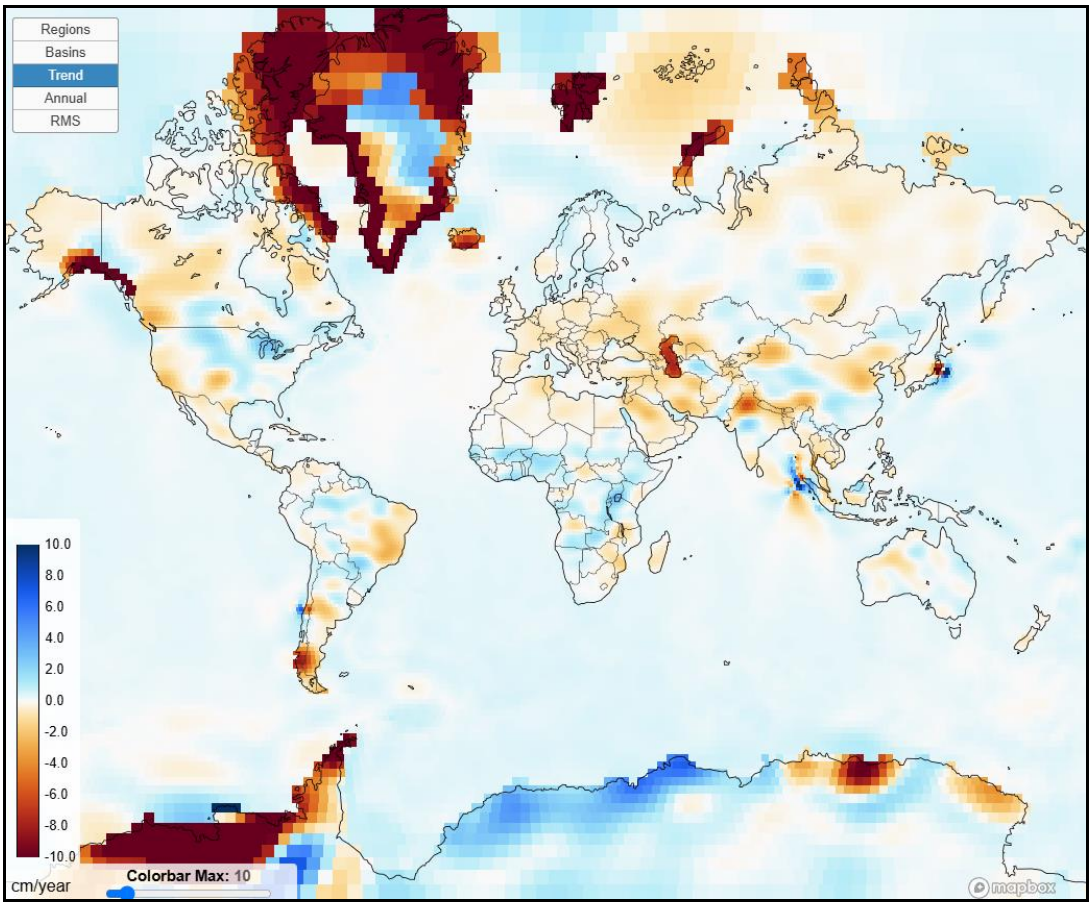

Рис.2 СИВМ (см/год) за период 2002-2023гг.

Значение указанных размеров заключается в том, что рассматриваемый метод не позволяет определить изменение гравитационного потенциала с детальностью большей чем 300 км и если процессы эрозии, переноса и аккумуляции происходят в пределах расстояния порядка 300 км, то гравитационный потенциал каждого из них не может быть измерен, а измеряется усредненный общий потенциал для этой территории. По этой причине для большей части горных территорий, где горные хребты и межгорные впадины имеют ширину меньше 300 км, факторы эрозии, переноса и аккумуляции седиментов взаимно компенсируются и не влияют на оценку изменения водной массы.

Для крупных горных рек, имеющих большую протяженность, эрозия и вынос седиментов преобладают в верховьях их бассейнов, где могут уменьшать гравитационный потенциал, а увеличиваться он может за счет седиментации вдоль основных русел, на площади водохранилищ и в пределах дельт.

Кроме этого, скорость изменения водной массы, как сезонная, так и многолетняя, намного превышает скорость изменения массы седиментов, имеющей монотонный малоамплитудный характер.

На рисунке 3 показан более детально Центрально-Азиатский регион, в этом случае, обращают на себя внимание районы потери влаги в районе Каспийского и Аральского морей за счет испарения и горные районы Гималаев, Восточного Кыргызстана и северного Китая, а так же Таджикистана, где развиты массивы оледенения и происходит деградация ледников. Помимо этого значительная восточная часть территории Казахстана, территории Туркмении и Китая характеризуются накопление водной массы. В последнем случае, за исключением Восточного Казахстана, районы накопления водной массы, за период 2002-2023 гг., имеют устойчивый временной ряд с годовыми колебаниями близкими по амплитуде и периодичности и с многолетним трендом на повышение СИВМ, при постоянной пространственной локализации (рис. 4,5,6). В этом случае, ряд изменения гравитационного потенциала по Туркмении (рис.4) имеет характер монотонного малоамплитудного седиментационного. В Восточном Казахстане, при детальном рассмотрении, тенденция не однозначная, как видно на рисунке 6, с 2002 до 2012 года наблюдался слабый отрицательный тренд, а с 2012 по 2017г. значительный положительный тренд, который сменился до 2023 года на значительный отрицательный. То есть, общий положительный тренд всего периода наблюдения 2002-2023гг. определен периодом 2012-2017 гг.., когда, по - видимому, накопление влаги произошло за счет усиления атмосферного питания. В этом случае, мы наблюдаем территорию с переменным во времени многолетним типом водного баланса и неустойчивым временным рядом, отличающимся наличием как основных короткопериодных, так и более длиннопериодных многолетних колебаний СИВМ, в отличие от более стабильных временных рядов увеличения водности, на фоне короткопериодных колебаний СИВМ, как в случаях Туркмении и Китая.

В то же время по Западному Казахстану, как видно на рисунке 7, наблюдается устойчивая тенденция уменьшения водности, на фоне

преобладания короткопериодной годовой цикличности изменения водного слоя за период 2002-2023гг..

В целом, по рассматриваемой территории генезис отрицательного водного баланса определяется достаточно уверенно, особенно для равнинных территорий, в районах Каспийского и Аральского морей, где основным фактором потери воды является испарение. Для горных территорий Средней Азии помимо испарения, действует фактор деградации ледников и в некоторой мере фактор эрозии и переноса седиментов, который усиливает отрицательный водный баланс для территории крупных горных узлов. Более проблематично происхождение положительного водного баланса, который в условиях глобального потепления в Средней Азии связывается в накоплением подземных вод. Но, если для Восточного Казахстана, с учетом возможного общего увеличения массы поверхностных и подземных вод, за счет временного перехода от засушливых к увлажненным условиям, этот вариант возможен, то в случае с Туркменией и Таримской впадиной этот вариант менее вероятен. Учитывая размеры этих регионов и устойчиво засушливые условия, здесь наряду с накоплением подземных вод не исключено влияние фактора аккумуляции седиментов, обеспечивающего устойчивый многолетний тренд повышения гравитационной массы. Для Туркмении это возможно за счет аккумуляции седиментов в дельте реки Аму-Дарьи и других рек, для Таримской впадины поступлением седиментов с окружающих горных хребтов. Наличие подземных вод на этих территориях безусловно имеется, но постоянный многолетний прирост их массы маловероятен, так как отсутствуют аналогично увеличивающиеся в многолетнем плане источники водного питания.

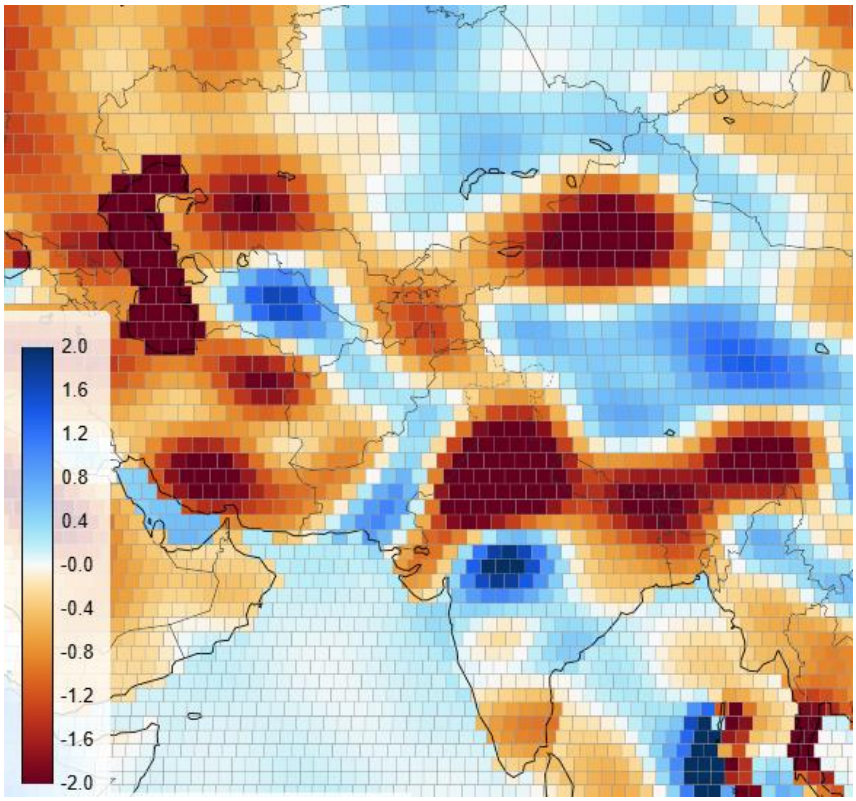

Рис.3 СИВМ (см/год) за период 2002-2023гг.

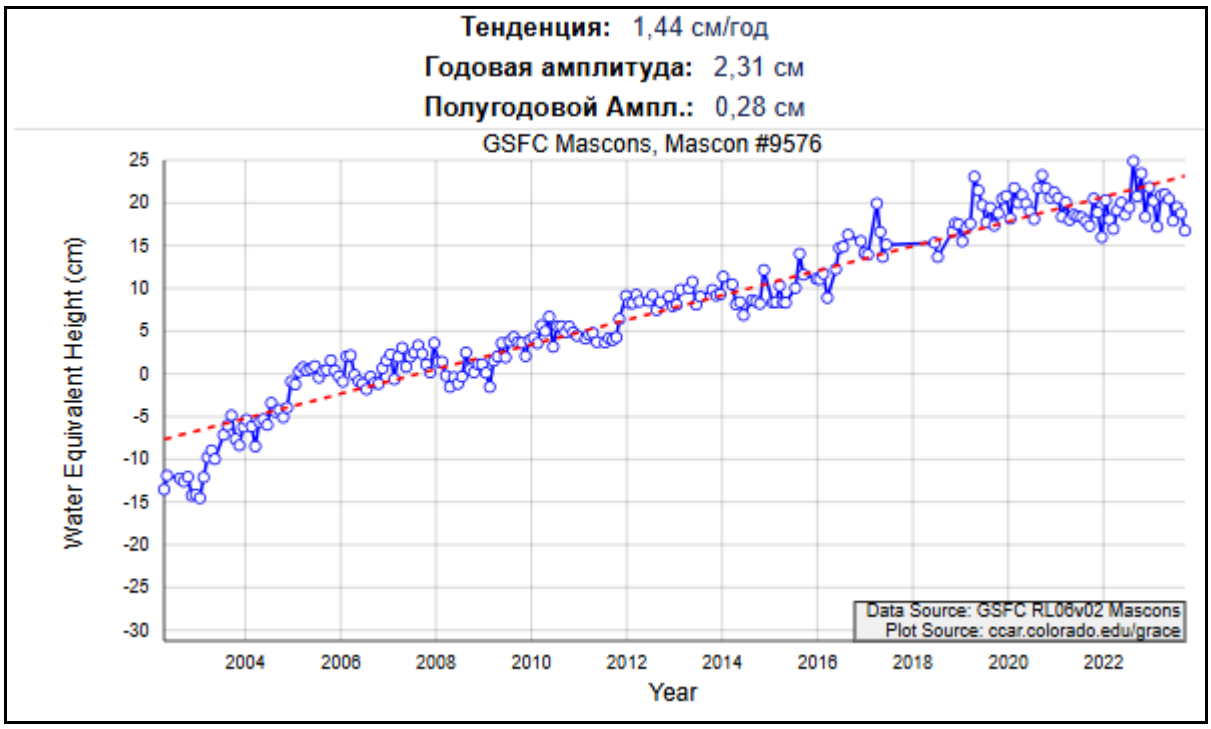

Рис. 4 СИВМ по одному из масконов на территории Туркмении

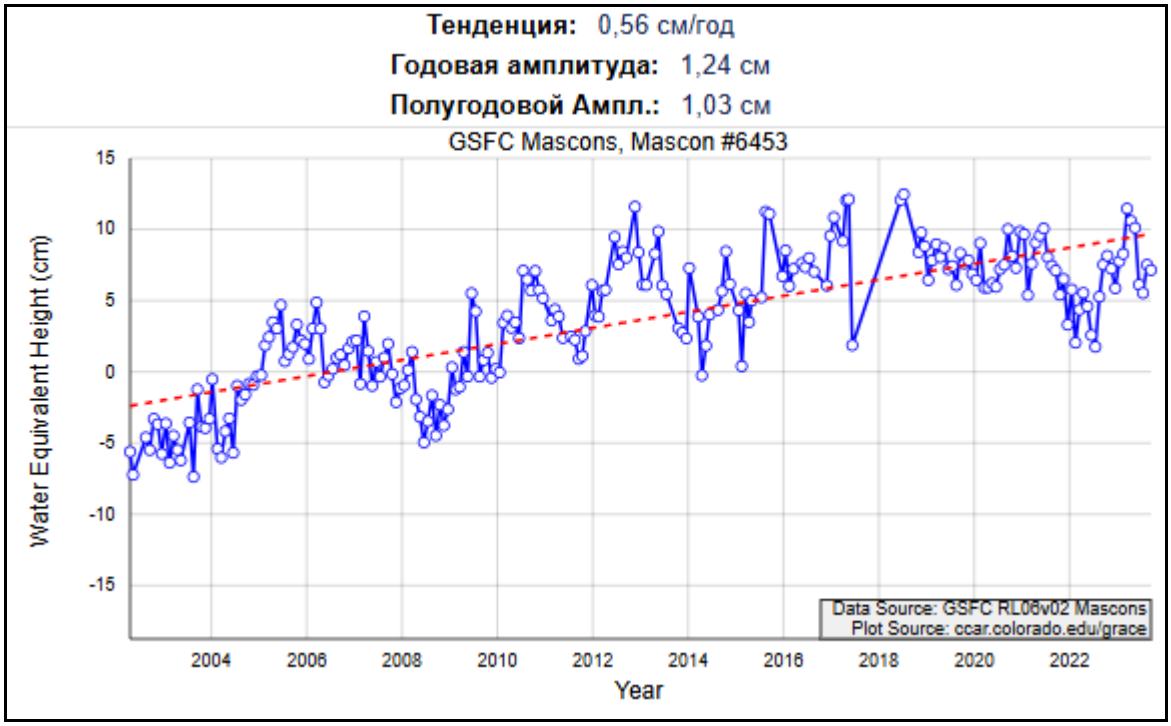

Рис. 5 СИВМ по одному из масконов на территории Западного Китая

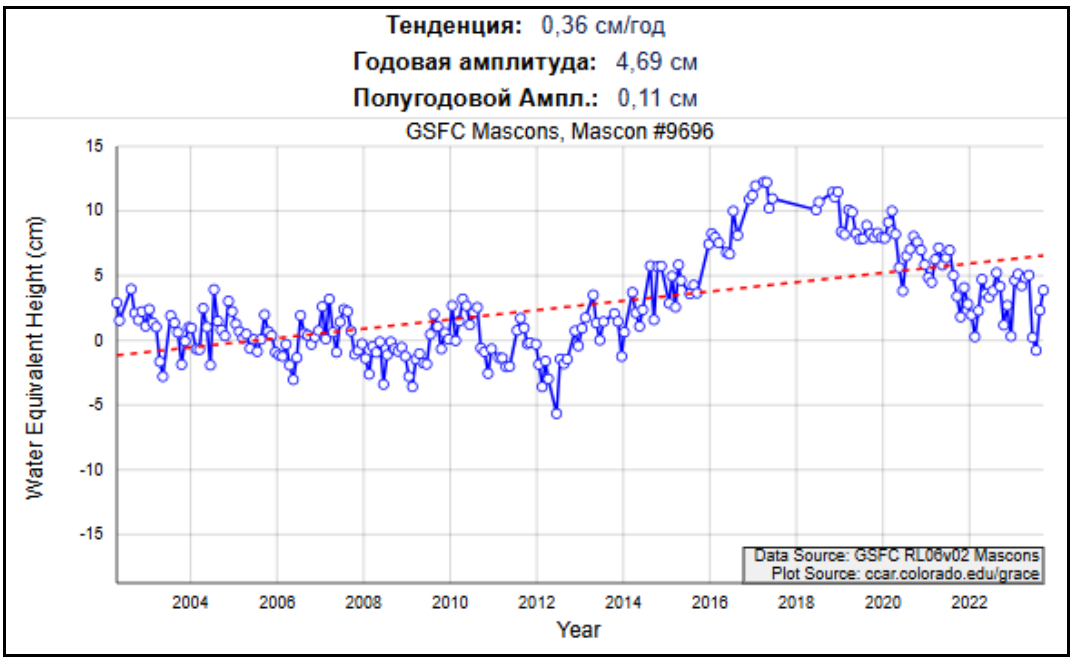

Рис. 6 СИВМ по одному из масконов на территории Восточного Казахстана

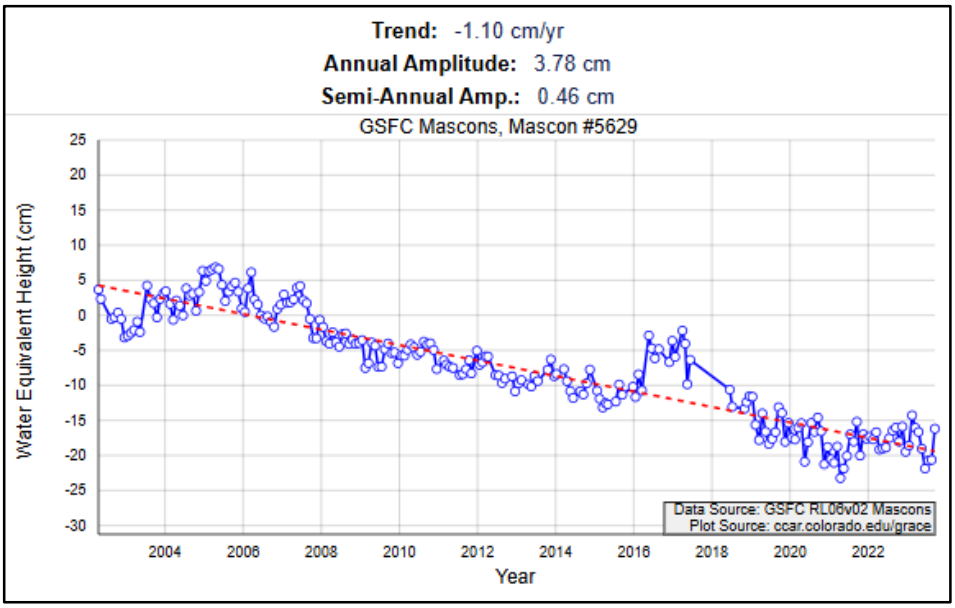

Рис. 7 СИВМ по одному из масконов на территории Западного Казахстана

В аспекте бассейнов поверхностного стока, показанным на рисунке 8, по данным GSFC, за период 2002-2023 гг., как видно на рисунках 9,10, 11,12,13 по всем из них: Прикаспийским, Аму-Дарьинском, Сыр-Дарьинском, Балхашском, наблюдается отрицательный тренд СИВМ, при наличии цикличности временных рядов, выраженной длиннопериодной составляющей колебаний СИВМ. Здесь необходимо отметить, что для бассейна Восточного побережья Каспия определен отрицательный тренд СИВМ, при том, что на его значительной части расположена Туркмения, по которой, как упоминалось выше зафиксирован положительный тренд СИВМ.

Положительный водный баланс определяется для расположенного на юге Таримского с СИВМ +0,04 см/год и на севере Обского с СИВМ +0,11 см/год, бассейнов (рис.14,15). Для Таримкого бассейна, характер ряда с положительным трендом (рис.14) значительно отличается от такового по Туркмении (рис. 4), небольшим градиентом 0,04 см/год и наличием относительно высокоамплитудной периодичности порядка нескольких лет. Эта особенность означает возможность преобладания в формировании ряда гравитационного потенциала не седиментационной, а водной составляющей. В качестве сравнения, на рисунке 15 приведена оценка водности по бассейну реки Обь, где положительный водный баланс на значительной территории обусловлен изменением атмосферного питания с периодичностью порядка 10 лет.

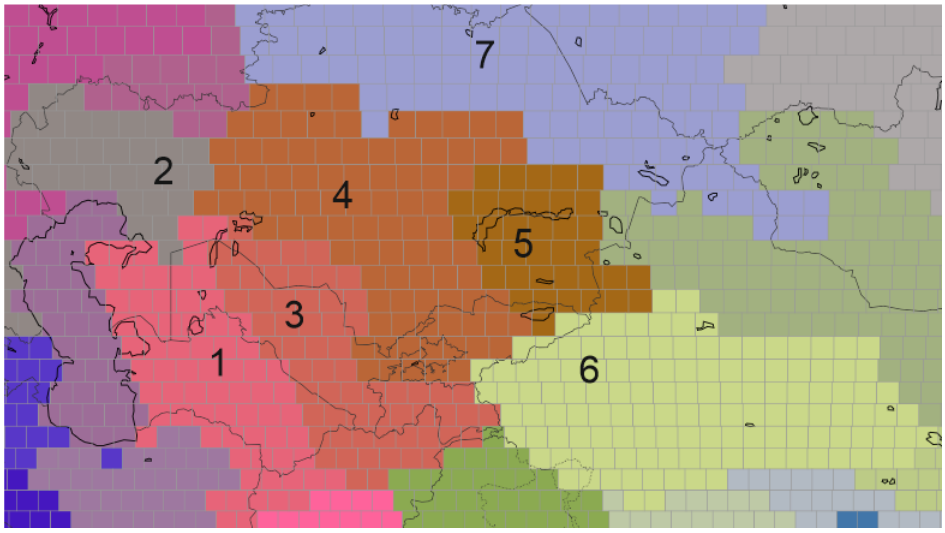

Рис.8 Бассейны поверхностного стока: 1- Восточное побережье Каспия, 2- Северное побережье Каспия, 3- Аму-Дарьинский, 4- Сыр-Дарьинский, 5-Балхашский, 6-Таримский, 7- Обский

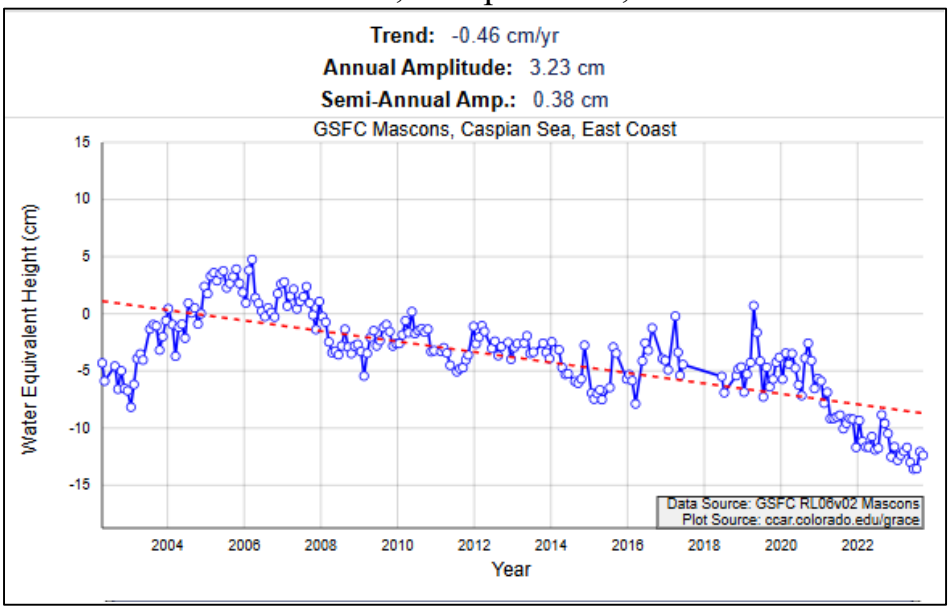

Рис. 9 Тренд СИВМ по Восточному побережью Каспия, 2002-2023гг., данные GSFC. Градиент - 0,46 см/год.
Цикличность короткопериодная.

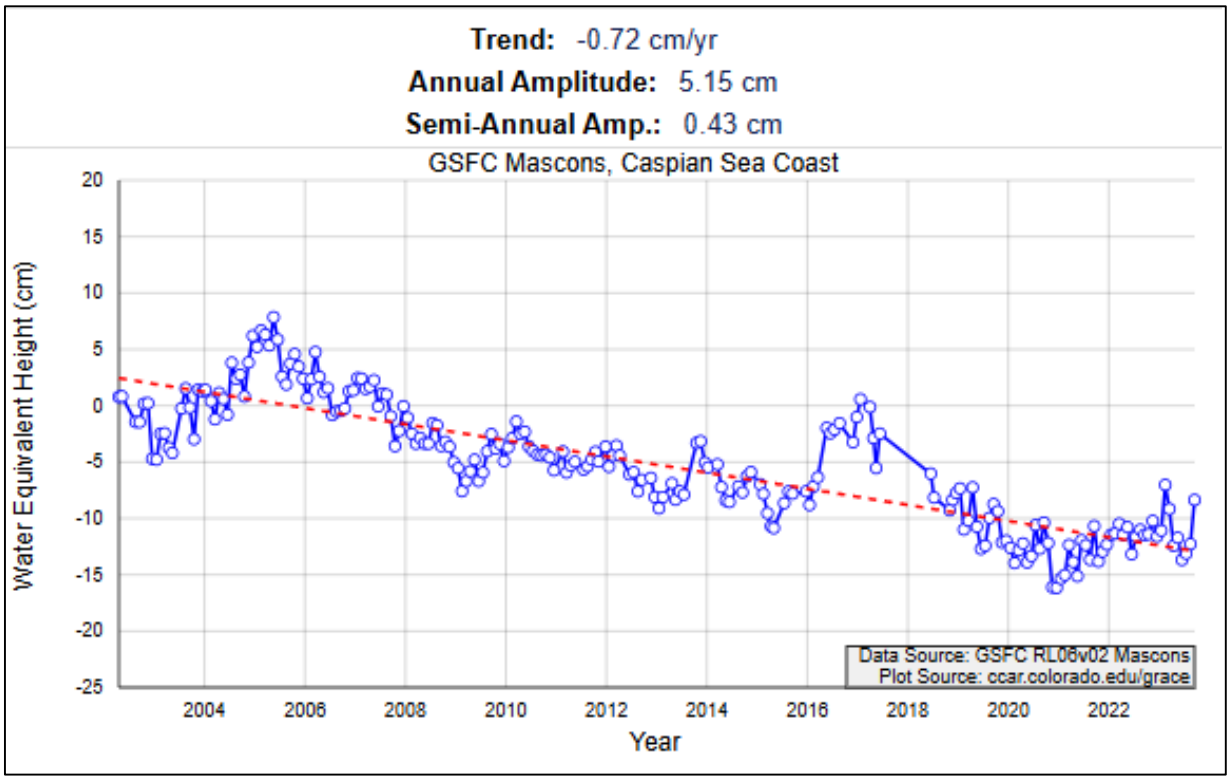

Рис.10 Тренд СИВМ по Северному побережью Каспия, 2002-2023гг., данные GSFC. Градиент - 0,72 см/год.
Цикличность неравномерная короткопериодная.

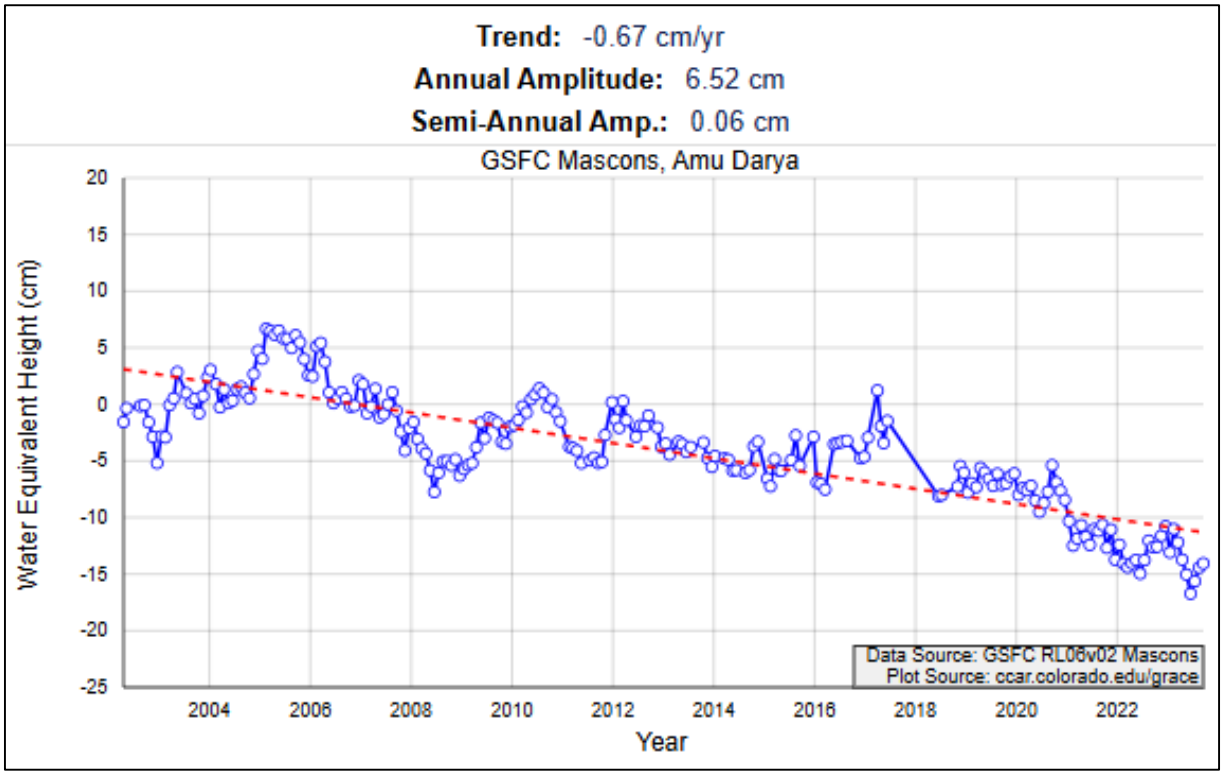

Рис.11 Тренд СИВМ по бассейну р. Аму-Дарьи, 2002-2023гг., данные GSFC. Градиент - 0,67 см/год.
Цикличность неравномерная короткопериодная.

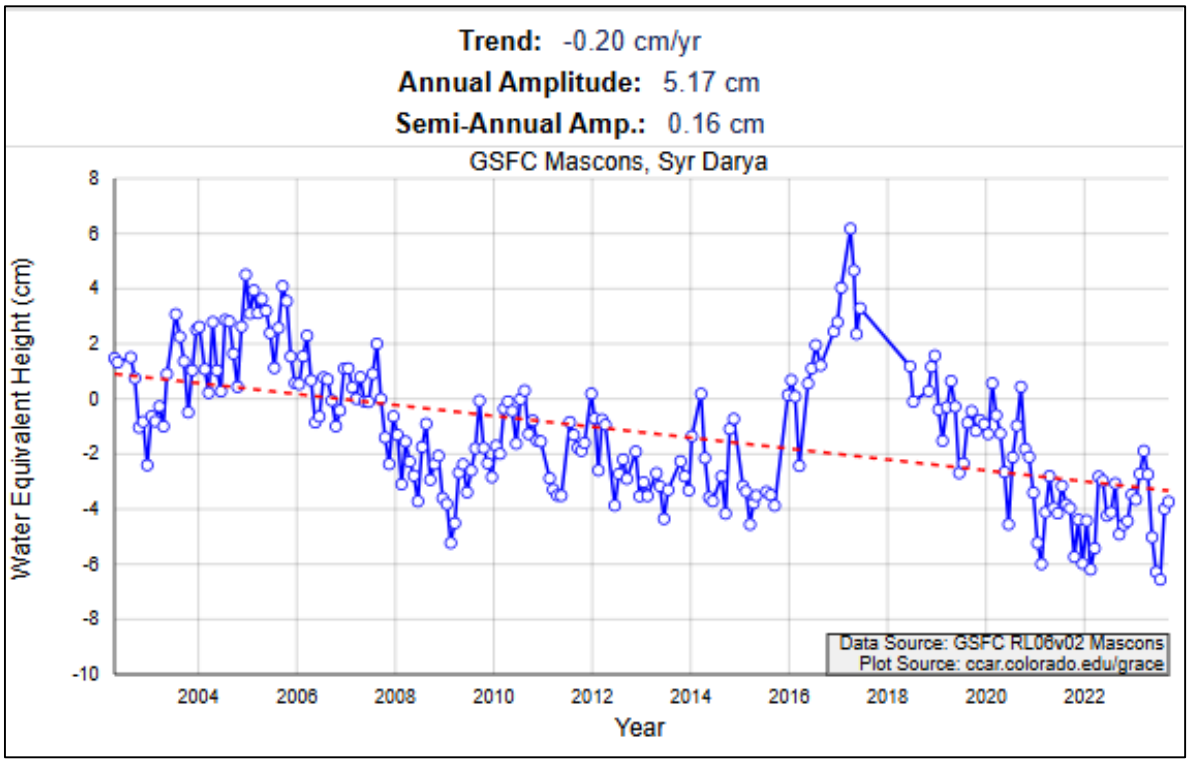

Рис.12 Тренд СИВМ по бассейну р. Сыр-Дарьи, 2002-2023гг., данные GSFC. Градиент - 0,2 см/год.
Цикличность неравномерная короткопериодная, с отдельным проявлением периода в несколько лет.

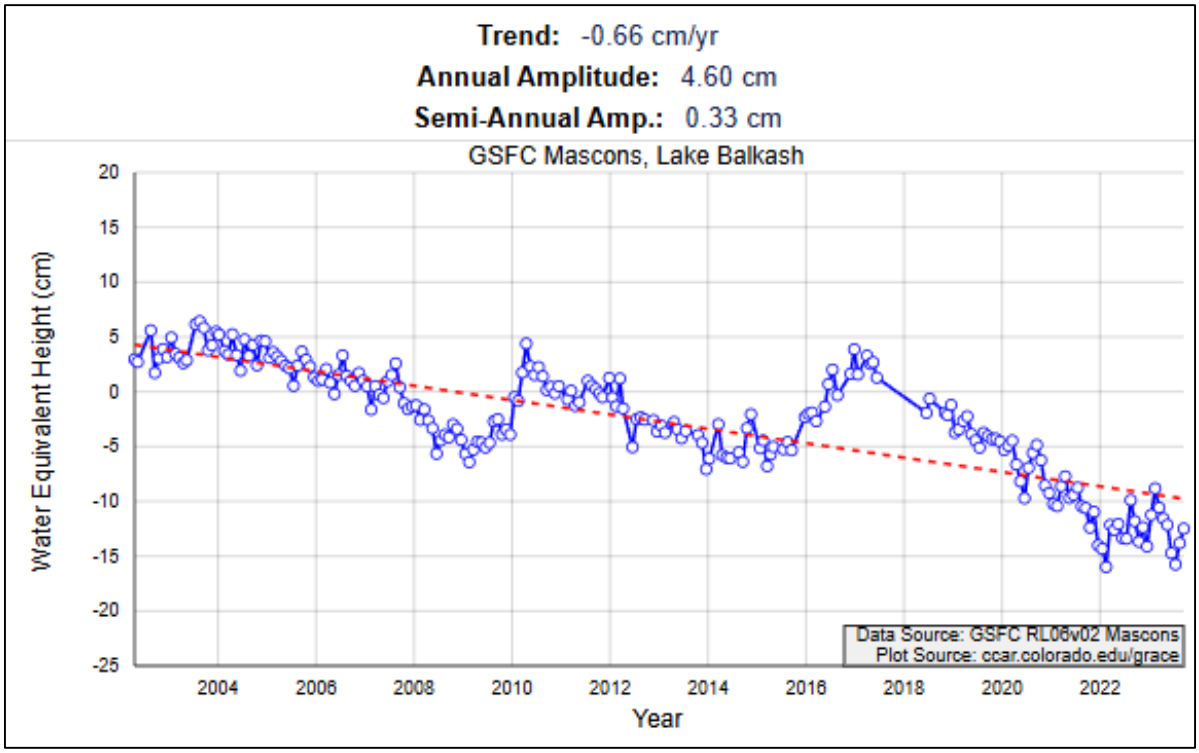

Рис.13 Тренд СИВМ по бассейну озера Балхаш, 2002-2023гг., данные GSFC. Градиент - 0,66 см/год.
Цикличность с периодом несколько лет.

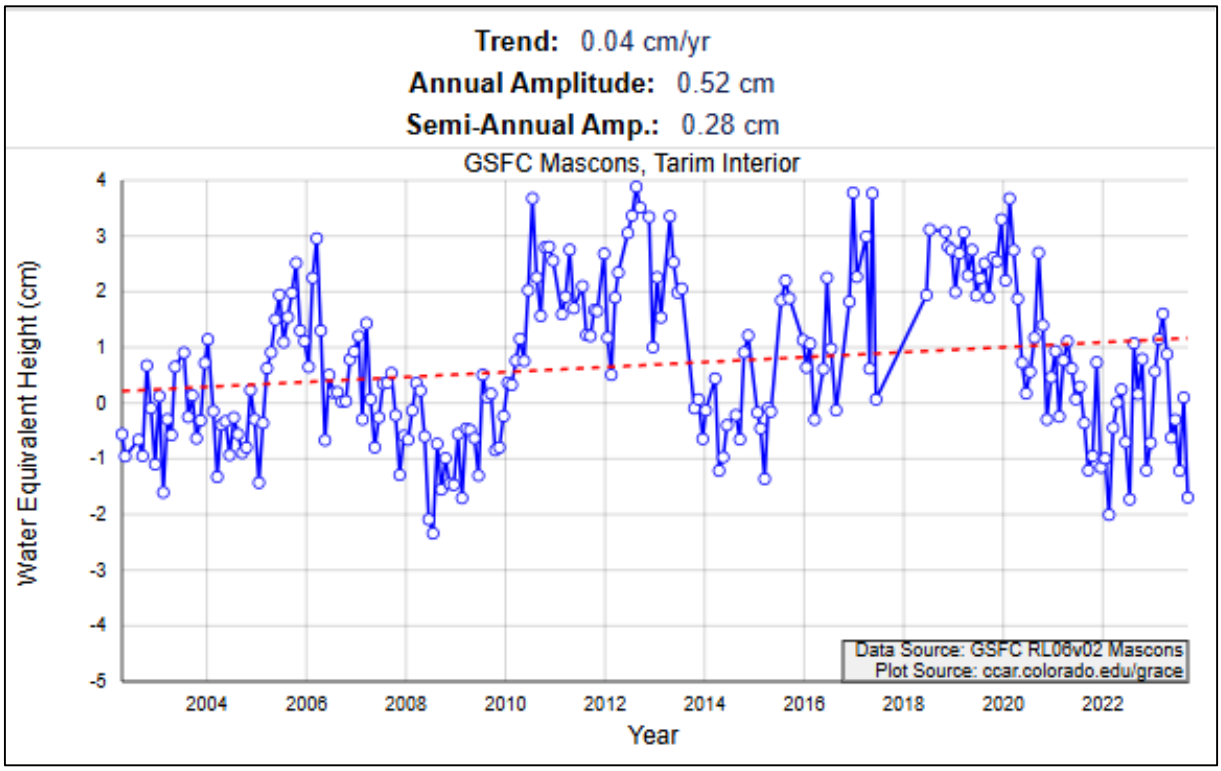

Рис.14 Тренд СИВМ по бассейну р. Тарим, 2002-2023гг.,
данные GSFC. Градиент + 0,04 см/год.
Цикличность неравномерная, с периодом несколько лет.

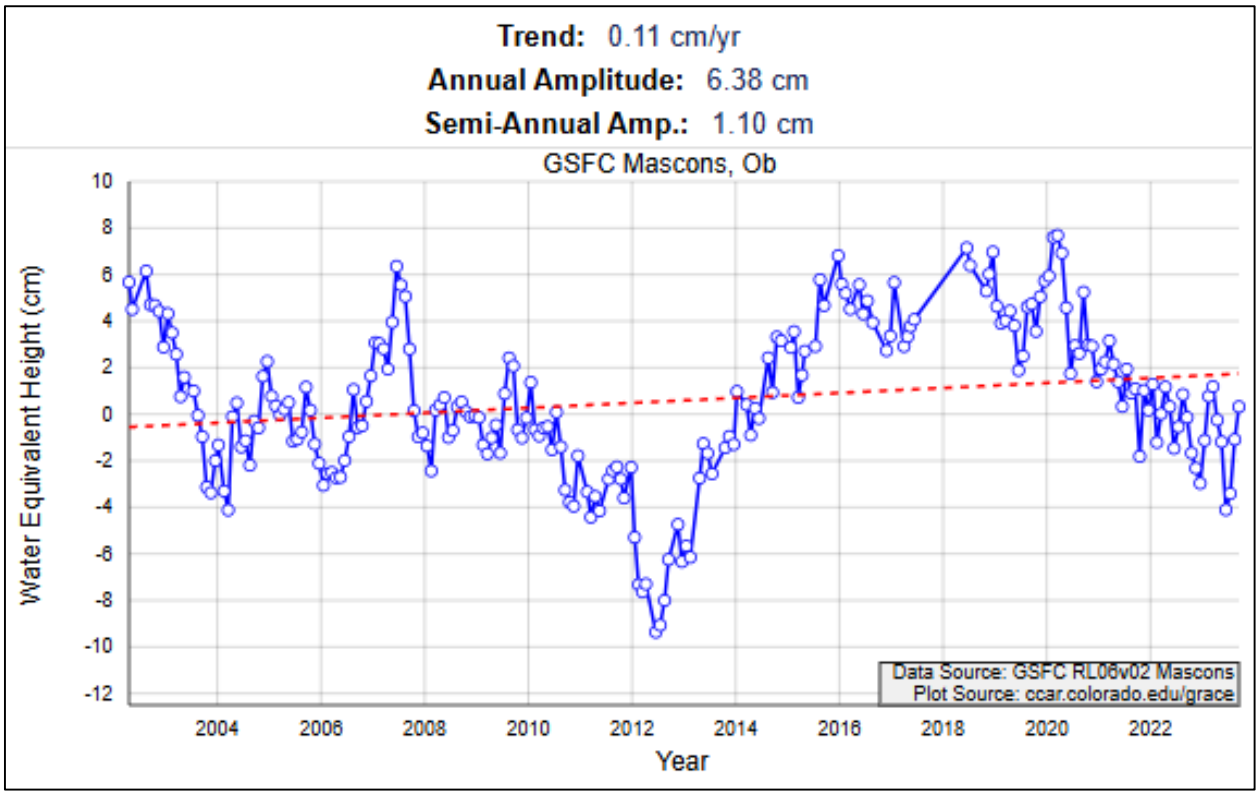

Рис.15 Тренд СИВМ по бассейну р. Оби, 2002-2023гг.,
данные GSFC. Градиент + 0,11 см/год.
Цикличность с периодом около 10 лет.

Для условий Кыргызстана, входящего в состав Сыр-Дарьинского бассейна, с общим отрицательным водным балансом (рис.12), как видно на рисунке 3, за период 2002-2023гг. характерна общая тенденция снижения водной массы на всей территории с относительно повышенным отрицательным трендом на востоке и западе. Конкретная характеристика изменения водной массы за период 2002-2023гг., по данным GSFC, в пределах отдельных районов-масконов на востоке, севере и юге Кыргызстана показана на рисунках 16,17,18.

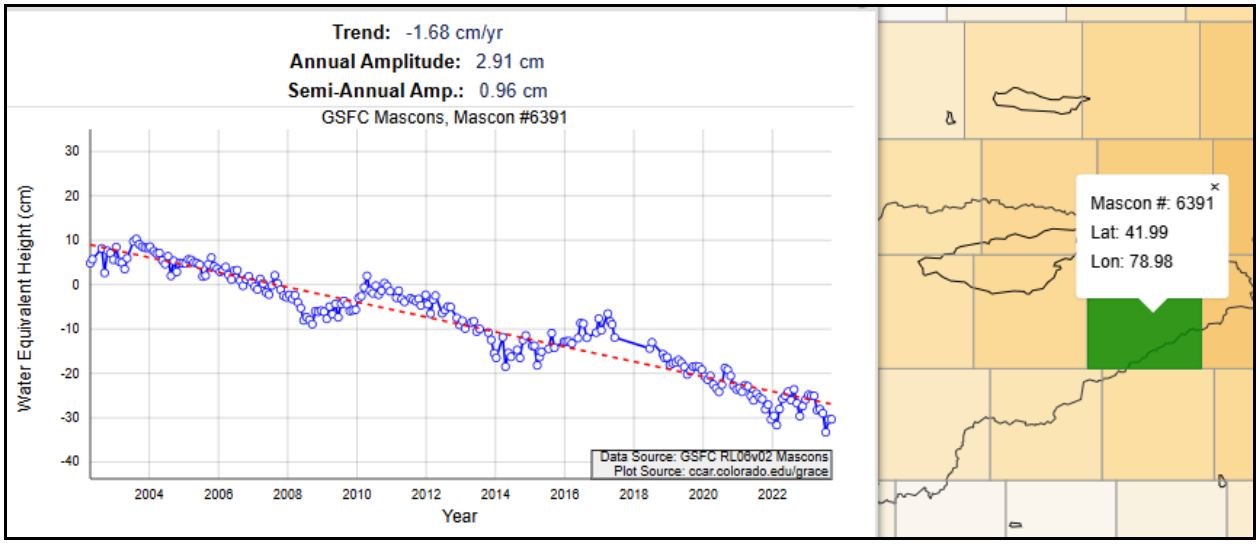

Рис.16 Тренд СИВМ по маскону на востоке Кыргызстана, 2002-2023гг., данные GSFC. Градиент - 1,68 см/год. Цикличность порядка нескольких лет.

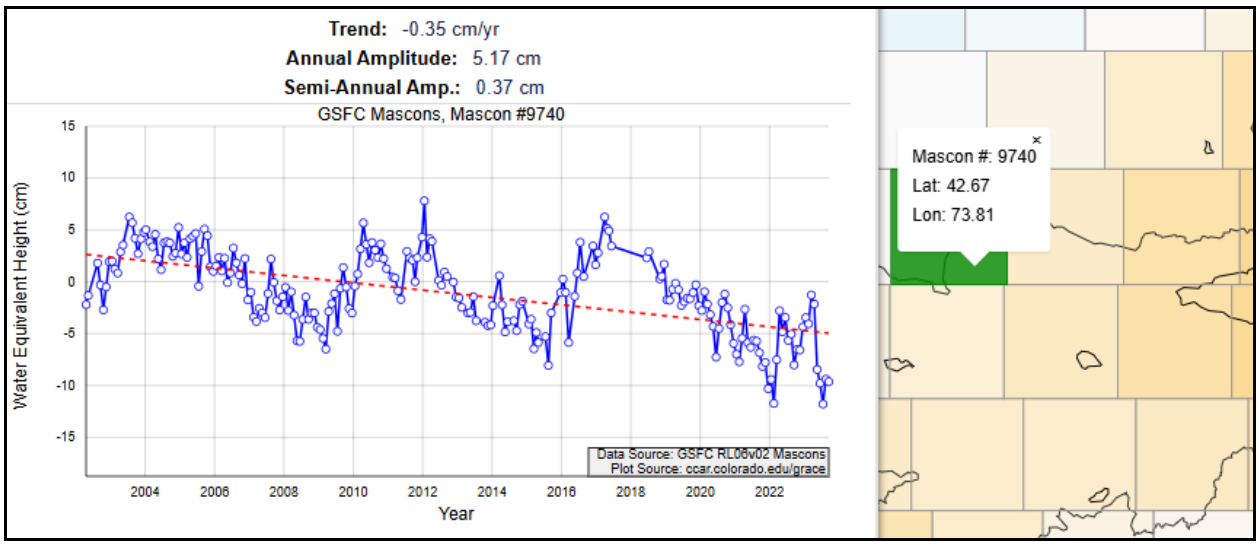

Рис.17 Тренд СИВМ по маскону на севере Кыргызстана, 2002-2023гг., данные GSFC. Градиент - 0,35 см/год. Цикличность порядка нескольких лет.

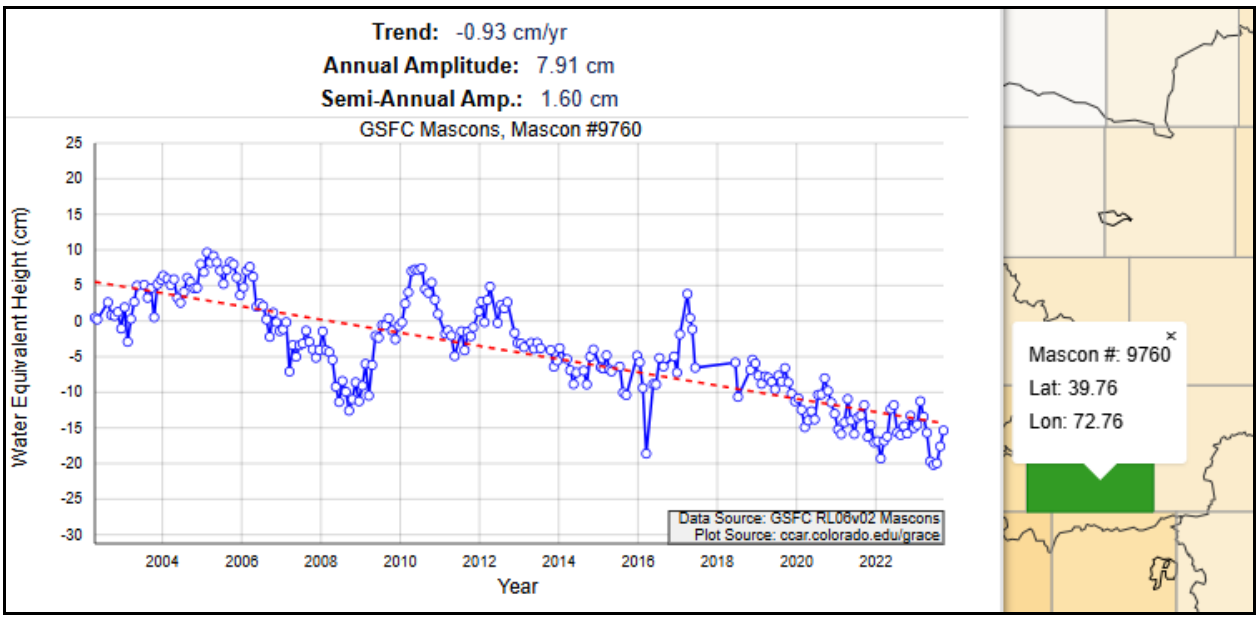

Рис.18 Тренд СИВМ по маскону на юге Кыргызстана, 2002-2023гг., данные GSFC. Градиент - 0,93 см/год. Цикличность порядка нескольких лет, с 2013 г. не проявлена.

Как видно на рисунках 16,17,18, по данным миссии GRACE, на территории Кыргызстана наблюдается цикличность в изменение водности с периодичностью порядка нескольких лет. Эти результаты согласуются с известной периодичностью маловодных и многоводных периодов на территории Кыргызстана. На рисунке 19 показана аналогичность периодичности изменения водности по маскону № 9740, расположенному на севере Кыргызстана (рис.17) и изменению водности в бассейне р. Нарын по вариации уровня Токтогульского водохранилища, полученной по данным альтиметрических спутников NASA и ESA с интернет ресурсов: https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/, http://sdss.caiag.kg/sdss/index.php?&page=measure_page. На рисунке 20 показан трек альтиметрического спутника “Sentinel 3B” в западной части Токтогульского водохранилища по которому производилось измерение абсолютной высоты поверхности водоёма. Факт аналогичной периодичности изменения водности, полученной двумя разными методами, означает возможность использования данных GRACE для краткосрочного прогноза изменения водности и оценки тенденции долгосрочного ее изменения. Так, на территории Кыргызстана, устойчивый тренд на снижение водности за весь период 2002-2023гг. указывает на то, что в перспективе будущих 20 лет он будет, с высокой вероятностью, продолжаться, осложняясь относительными повышениями водности с периодами в несколько лет, которые будут по амплитуде меньше предыдущих. В настоящее время, Кыргызстан находится в состоянии перехода к фазе относительного увеличения водности.

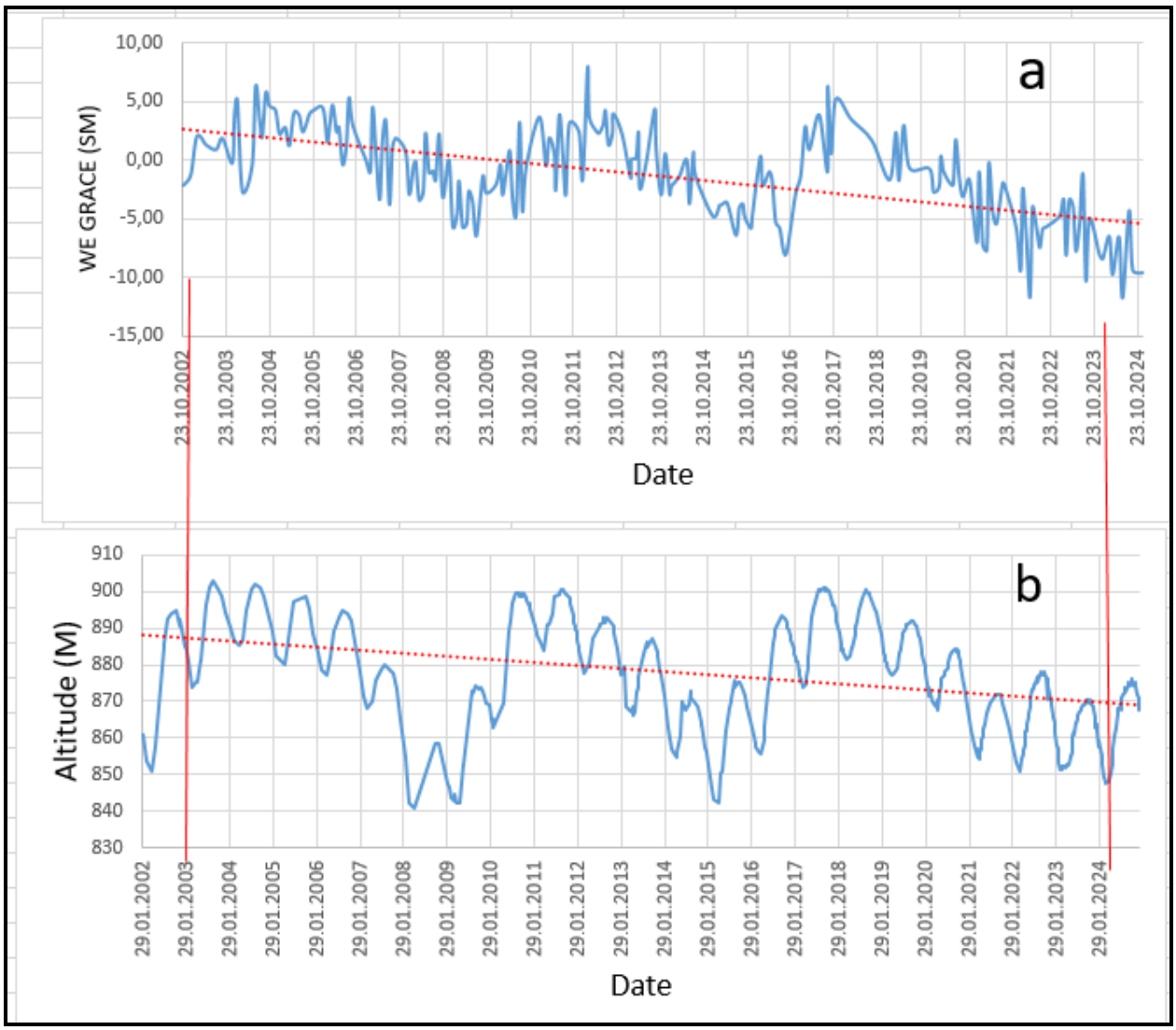

Рис.19 Соотношение периодичности водности на территории Кыргызстана по данным GRACE (a) и альтиметрических спутников “Jason 1,2,3”, “Sentinel 3B”(b).

Рис. 20 Трек альтиметрического спутника “Sentinel 3B” в западной части Токтогульского водохранилища.

Таким образом, анализ данных миссии GRACE показал, что этот метод оценки изменения во времени водных ресурсов в региональном масштабе хорошо согласуется с имеющимися данными по формированию водного баланса под воздействием известных процессов перераспределения воды в водном цикле. Этот метод позволяет определять не только потери, но и накопление водной массы на отдельных территориях. Многолетние данные по скорости изменения водной массы позволяют дополнить и уточнить имеющиеся представления о цикличности изменения водных запасов и выполнять экстраполятивный прогноз на ближайшие несколько лет с учетом долговременной основной тенденции.

В целом, по рассмотренным характерным масконам и речным бассейнам наблюдается долговременная общая тенденция уменьшения запасов воды с периодичностью изменения СИВМ порядка нескольких лет, за исключением территорий, где происходит накопление водной массы. Отрицательные градиенты СИВМ изменяются по величине под влиянием глобального потепления в зависимости от географического и орографического расположения рассматриваемых территорий. Средние отрицательные градиенты СИВМ, по Центрально-Азиатским бассейнам водного стока, находятся в диапазоне **-0,2 ÷ -0,72 см/год**, минимальное значение наблюдается в Сыр-Дарьинском бассейне.

Публикации

1. Ф.В. Ландерер, СК Свенсон. Точность масштабированных оценок запасов наземных вод, полученных с помощью спутника GRACE. 27 апреля 2012 г. **https://doi.org/10.1029/2011WR011453**

2. Лутке С.Б., Т.Дж. Сабака, Б.Д. Лумис и др., 2013 г., Эволюция наземного льда в Антарктиде, Гренландии и заливе Аляска на основе повторного глобального масконского решения GRACE, J. Glac. 59(216), 613-631, номер документа:10.3189/2013JoG12J147 .

3. Hrishikesh A. Chandanpurkar, James S. Famiglietti , Kaushik Gopalan, David N. Wiese, Yoshihide Wada, Kaoru Kakinuma, John T. Reager, Fan Zhang. Unprecedented continental drying, shrinking freshwater availability, and increasing land contributions to sea level rise | Science Advances. SCIENCE ADVANCES. 25 Jul 2025. Vol 11, Issue 30, DOI: 10.1126/sciadv.adx0298

4. Data in Action: GRACE and GRACE-FO are used by California's Department of Water Resources for Groundwater Management Information.

https://gracefo.jpl.nasa.gov/news/286/data-in-action-grace-and-grace-fo-are-used-by-californias-department-of-water-resources-for-groundwat/

5. Цуй, Б., Сюэ, Д., Гуй, Д., Лю, Ц., Абд-Эльмабод, С.К., Чен, Х. и др. (2025), Масштабированные данные GRACE показывают антропогенное доминирование в снижении запасов подземных вод в оазисах Китая, Экологические индикаторы, 179. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114209 .

6. Дистанционное зондирование , Чжан Л., Гэн Ю., Ма Дж., Чжао Х., Хэ Дж. и Чен Дж. (2025), Разделение климатических и антропогенных факторов изменения грунтовых вод в засушливом внутреннем бассейне: данные из бассейна реки Шуле, Северо-Западный Китай, Дистанционное зондирование, 17(18). https://doi.org/10.3390/rs17183188 .

7. Разработка геофизических моделей , Ян, Ф., Шумахер, М., Ретеги-Шиеттекатте, Л., ван Дейк, А., и Фороотан, Э. (2025), PyGLDA: мелкомасштабная глобальная система ассимиляции данных о суше на основе Python для интеграции спутниковых гравиметрических данных в гидрологические модели, Разработка геофизических моделей, 18(18), 6195-6217. https://doi.org/10.5194/gmd-18-6195-2025 .

8. Журнал гидрологии , Шелига, А., Джиротто, М., и Герляйн-Сафди, К. (2025), Антропогенные процессы и вклад повышения уровня моря в ассимиляцию данных о запасах наземных вод GRACE и GRACE-FO, Журнал гидрологии, 663, 17. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134048 .

9. Письма геофизических исследований, Гетирана, А., Кумар, С., и Роделл, М. (2025), Несоответствия в оценке запасов подземных вод на основе GRACE — призыв к правильному использованию моделей поверхности суши, Geophysical Research Letters, 52(19), 4. https://doi.org/10.1029/2025gl119197 .

10. Журнал гидрологии – региональные исследования , Ромеро, П., и Пинья, А. (2025), Анализ устойчивости грунтовых вод в тропиках на основе данных GRACE, Журнал гидрологии – региональные исследования, 62, 19. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102756 .