

Мониторинг многолетнего хода уровня озер Иссык-Куль и Чатыр-Куль по измерениям альтиметрическими инструментами и оптическим снимкам спутников.

Мандычев А.Н., ЦАИИЗ.

Мониторинг уровня озера Иссык-Куль

Наблюдения за изменением уровня Иссык-Куль имеют длительную историю и представлены результатами инструментальных измерений с 1927 года. В настоящее время эти наблюдения выполняются Кыргызской гидрометеорологической службой (КГМ) путем непосредственного измерения уровня воды озера. Однако, с 1993г., с появлением альтиметрических спутников, появилась возможность определения уровня озера по результатам их измерений. На рисунке 1 показаны результаты измерений многолетнего хода уровня озера Иссык-Куль, как по данным КГМ, в Балтийской системе высот (BSH), так и радарных альтиметрических спутников с системами высот: EGM 2008(USDA), EIGEN-6C-static(GFZ).

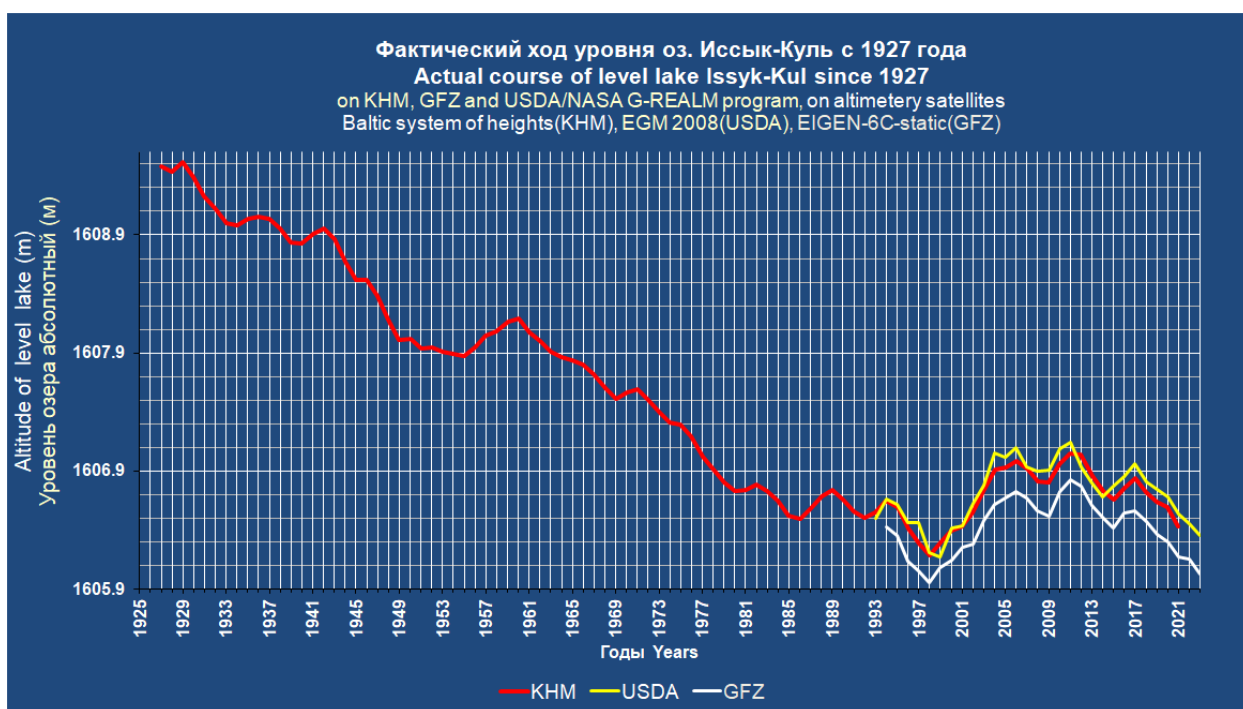


Рис. 1 Изменение уровня озера Иссык-Куль по инструментальным измерениям КГМ и спутниковой альтиметрии за период 1927-2023гг.

В данном случае, для анализа изменения уровня озера Иссык-Куль по спутниковым данным, использовались результаты обработки первичной радарной альтиметрической спутниковой информации, полученные группой USDA (U.S. Department of Agriculture) /NASA/SGT/UMD, на основе данных AVISO data center at CNES and the NASA Physical Oceanography DAAC (Lake USDA/NASA G-REALM program at https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/). А так же результаты обработки спутниковой информации, полученные GFZ (Deutsche GeoForschungs Zentrum, Tilo Schöne, tschoene@gfz-potsdam.de) из Системы хранения сенсорных данных ЦАИИЗ (SDSS, http://sdss.caiag.kg/sdss/index.php?&page=measure_page). В обоих случаях использовались результаты измерения спутников «Торех/Poseidon» (Nasa/Cnes 1992-2002), «Jason 1,2,3» (Cnes/Nasa/Eumetsat/Noaa, 2002-2008; 2008-16, 2016 – настоящее время), «Sentinel 6» (ESA/ Eumetsat/EU/ Cnes/ Noaa/Nasa/JPL, 2016- настоящее время). С начала 2021 года уровни озера измеряются спутником «Sentinel 6», а до марта 2022 г.

использовались так же данные спутника «Jason 3». Временной диапазон использования данных разных радарных спутников для измерения уровня озера Иссык-Куль показан на рисунке 2.

Треки спутников или траектории на поверхности земли, по которым происходит измерение абсолютной высоты, пересекают озеро в субмеридианальном направлении, как это видно на рисунке 3, для случая спутника «Sentinel 6A» (<https://www.altimetry-hydro.eu/oltc>).

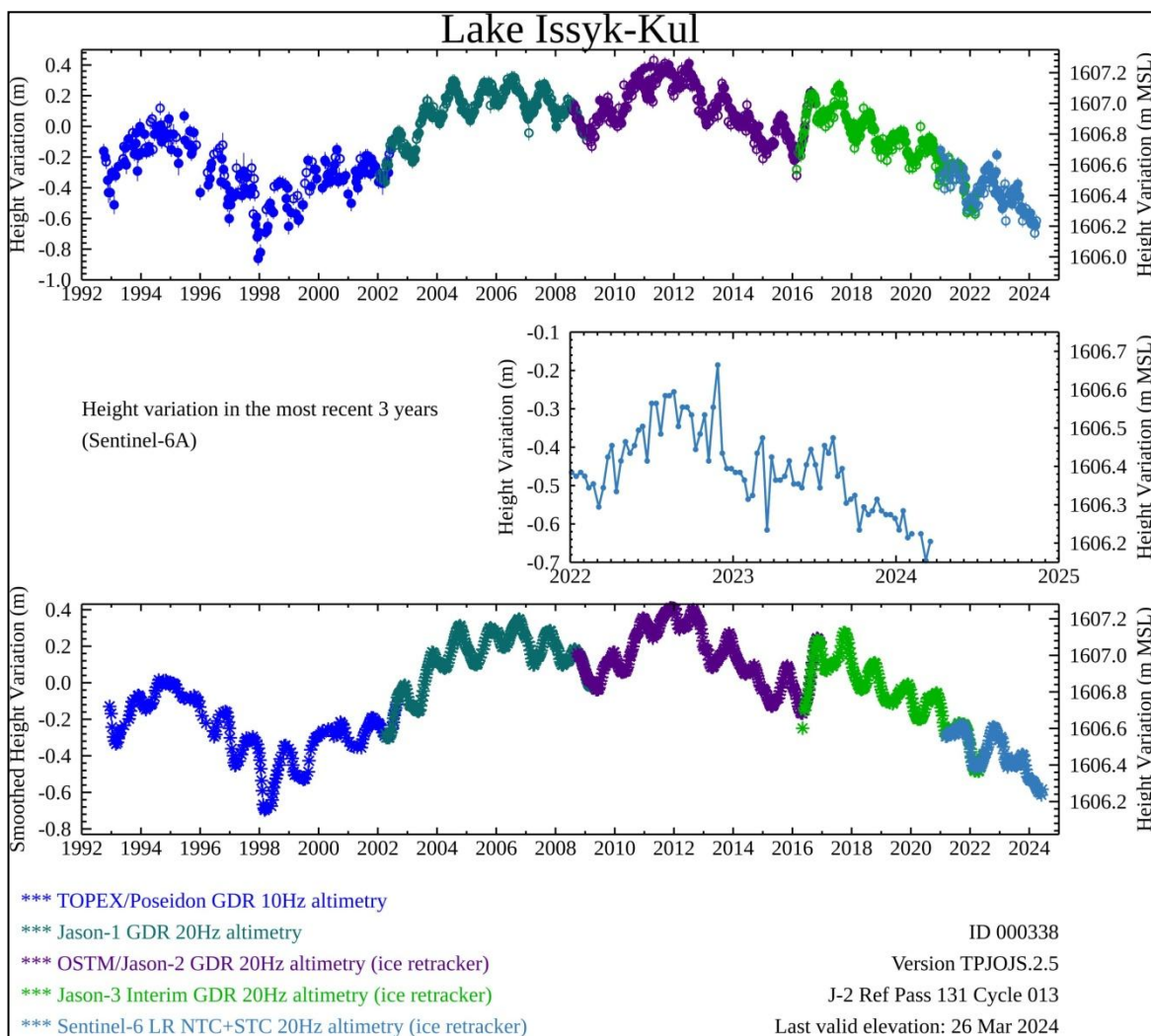


Рис. 2 Изменение уровня озера Иссык-Куль по альтиметрическим спутникам с 1993 по 2024 г. (источник: USDA и др.)

Повторяемость пролетов над одной и той же точкой на поверхности земли, рассматриваемых спутников 10 дней. Инструментальная точность измерения альтиметрами рассматриваемых спутников абсолютной высоты находится в диапазоне 3-5см, однако точность непосредственных измерений зависит от многих факторов, которые необходимо учитывать для внесения поправок в конечный результат. На точность измерений влияют параметры атмосферы, характер рельефа поверхности земли, вариации диаметра радарного луча на поверхности земли и другие. По этой причине, среднеквадратичные отклонения измеренных значений, могут варьировать от 10 см для больших открытых озер, до 20 см для небольших, защищенных от ветра озер и до многих десятков сантиметров для водоемов, расположенных в узких глубоких долинах. Для озера Иссык-Куль, имеющего большую площадь и пологие борта озерной впадины, характерен

вариант с минимальными значениями стандартного отклонения измеряемой абсолютной высоты [1,2].



Рис. 3 Расположение треков спутника «Sentinel 6А» на акватории озера Иссик-Куль (<https://www.altimetry-hydro.eu/oltc>).

Общий характер разброса измеренных величин альтитуды озера Иссик-Куль виден на верхнем графике рисунка 2, в отличие от нижнего сглаженного графика. Величины среднеквадратичных отклонения измеренных спутниками альтитуд озера Иссик-Куль по данным GFZ показаны на рисунке 4. В этом случае, использовались данные тех же спутников, что использовали USDA и др..

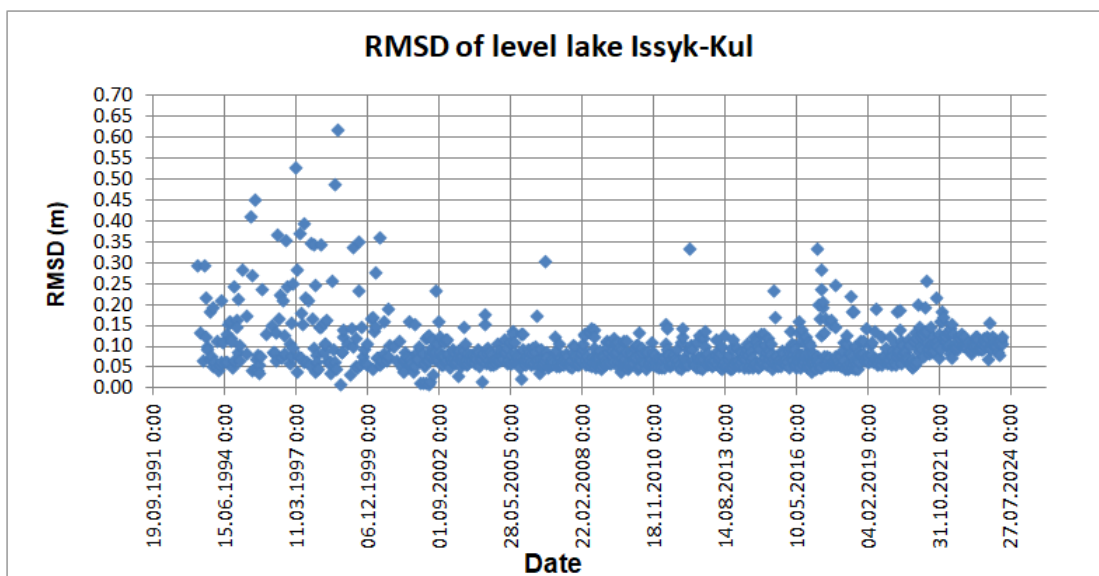


Рис. 4 Среднеквадратичные отклонения измеренных спутниками альтитуд озера Иссик-Куль, по данным GFZ

На рисунке 4 видно, что приблизительно с 2000 г. точность измерения альтитуд улучшилась. Наибольшее число значений среднеквадратичных отклонений находится в диапазоне 0,05-0,15м. Медианное значение RMSD, представленных на графике, на рисунке 4, равно 0,08 м.

Сопоставление альтитуд уровней озера Иссык-Куль, полученных Кыргызгидрометом, USDA и GFZ показано на рисунке 5. Как видно на этом рисунке, разница в величине альтитуд, в основном, имеет систематический характер, связанный с разными нулевыми точками отсчета абсолютной высоты: BSH(КГМ), EGM 2008(USDA), EIGEN-6C-static(GFZ). Средняя величина разницы альтитуд уровня озера, полученных КГМ и GFZ, в период 1994-2021г. составляет 0,24м., при постоянном превышении величин альтитуд, полученных КГМ. Характер различия альтитуд, полученных КГМ и USDA имеет более сложный характер. В этом случае играет роль меньшая разница величин альтитуд из разных источников и наличие ошибок непосредственного измерения уровня и обработки спутниковых данных. Как видно на рисунке 5, наблюдается, в основном, превышение величины альтитуды полученной USDA над величиной полученной КГМ, однако в 1993, 1999, 2012, 2013, 2014 годах это соотношение было обратным, с максимальной разницей в 1999 г., равной 0,12м. Начиная с 2015 г. по 2021 г. характер соотношения альтитуд уровней озера, по данным USDA и КГМ имеет стабильный характер, с устойчивым систематическим превышение уровня первого над вторым в среднем на 0,1м, что связано с использованием более совершенной технологии спутниковой альтиметрии и методов корректировки первичных данных, а так же с корректным непосредственным инструментальным измерением уровня озера. На рисунке 6 показано рассматриваемое устойчивое соотношение величин среднемесячных альтитуд уровня озера по данным Кыргызгидромета и USDA.

Таким образом, величины абсолютных уровней озера, полученные разными методами имеют хорошее совпадение по характеру изменения уровня озера, а полученная величина их взаимного отклонения относительно постоянна, что позволяет, начиная с 2015 г., производить их взаимную коррекцию и осуществлять контроль объективности.

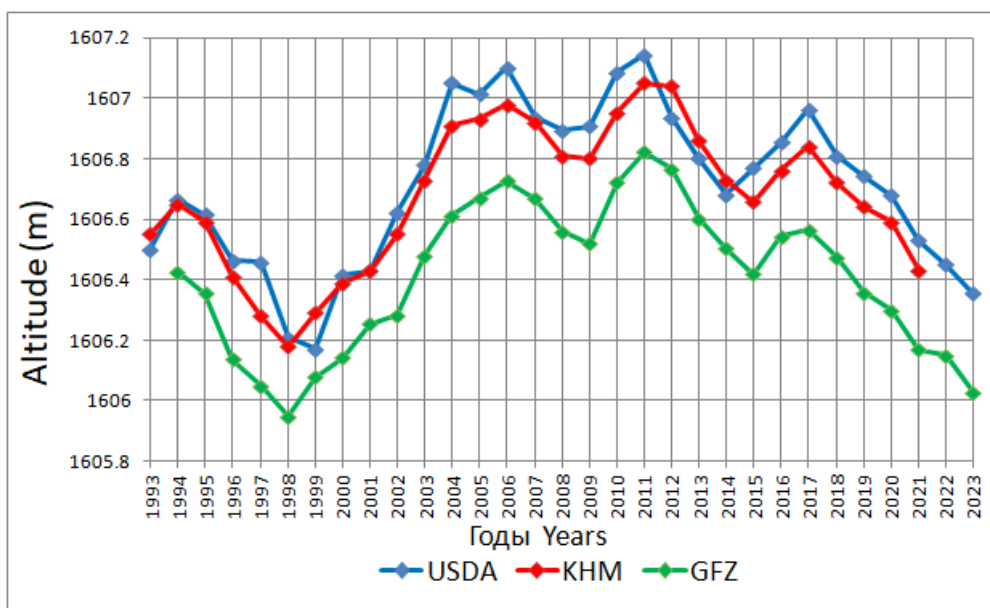


Рис.5 Сравнение альтитуд уровней озера Иссык-Куль, полученных Кыргызгидрометом, USDA, GFZ.

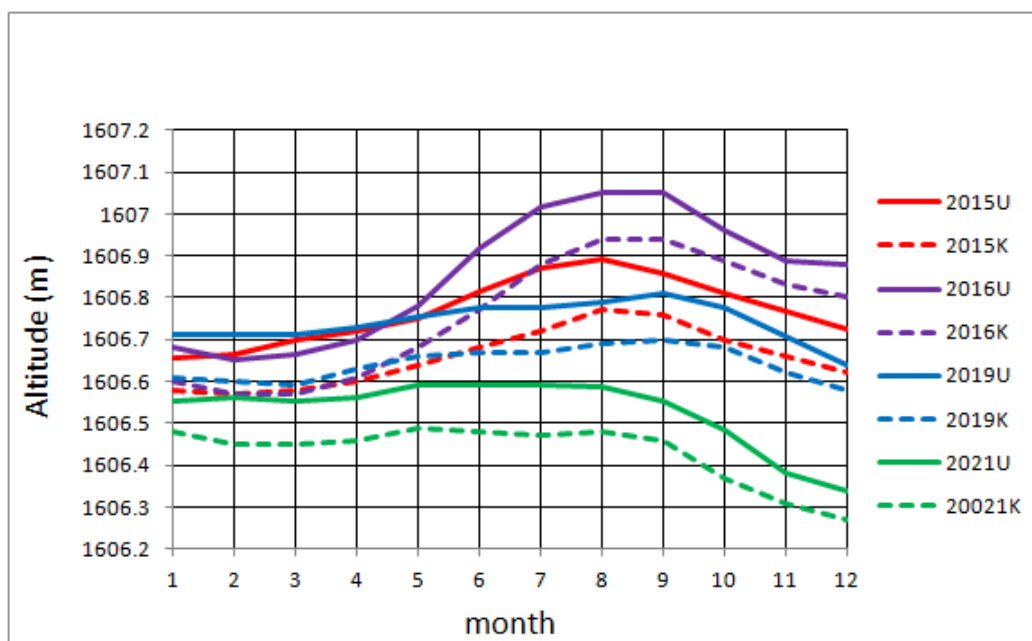


Рис.6 Соотношение среднемесячных альтитуд уровней озера Иссык-Куль, по данным Кыргызгидромета (К) и USDA (U), в период 2015-2021гг.

Анализ изменения среднего многолетнего хода уровня озера Иссык-Куль за весь период инструментальных измерений с 1927 г. показал (рис.1), что понижение уровня озера с 1927 по 2023 год составило 3,22 м (1609,48м (КГМ) - 1606,26м(USDA-0,1м)). На фоне этой общей тенденции понижения уровня, начиная с 1998 г. по 2004 г. произошел наибольший, за весь период наблюдения, подъем уровня озера Иссык-Куль с амплитудой 0.8 м. В предыдущие годы, так же наблюдались кратковременные небольшие подъемы уровня, наибольший из которых, с амплитудой 0,32 м, был зафиксирован в период с 1955 по 1960 г.. С 2004 по 2017 год, на протяжении 14 лет, тенденция подъема уровня сменилась на относительную стабилизацию, при которой наблюдались короткопериодные, порядка 3-4 лет разнонаправленные колебания уровня с амплитудой около 0,4 м.. Начиная с 2017 по 2023 г., уровень озера имеет тенденцию к понижению, на 0,61м, приближаясь к положению в 1998 г.. Этот факт, возможно, означает начало нового цикла устойчивого понижения уровня озера после относительной стабилизации в период с 2004 по 2017 год. Таким образом, водный баланс озера в период с 2017 по 2023 г. является отрицательным, отражая превышение расходной статьи в виде, в основном, испарения над приходной статьей в виде притока речных и подземных вод. Учитывая продолжающееся многолетнее повышение температуры воздуха в бассейне озера Иссык-Куль, в соответствии с глобальным потеплением, представляется, как наиболее вероятное, продолжение тенденции снижения уровня озера в последующие годы. Это означает необходимость учитывать в дальнейшей хозяйственной деятельности отступление береговой линии озера и обмеление отдельных прибрежных участков акватории.

Помимо рассмотренных выше результатов, спутниковые альтиметрические измерения так же позволили выявить такую особенность топографии уровня озера Иссык-Куль, как прогиб уровня в его центральной субширотной части. Этот феномен наблюдается по данным всех альтиметрических спутников, в разные годы и сезоны года. В частности, он определен по трекам альтиметрического спутника "CryoSat 2" (<https://visioterra.net/VtCryoSat/>). Этот радарный спутник, запущен в 2010 г. и действует по настоящее время, он имеет период повторения цикла измерений равный 369 дням. Результаты его измерений свидетельствуют об устойчивости пониженного положения уровня в центральной части озера на величину около 1,3м (рис.7,8). Пониженное

положение среднего уровня озера в 2019 году относительно уровня в 2017, 2018 годах, как это видно на рисунке 7, обусловлено более отрицательным водным балансом озера в 2019 г, по сравнению с предыдущими годами.

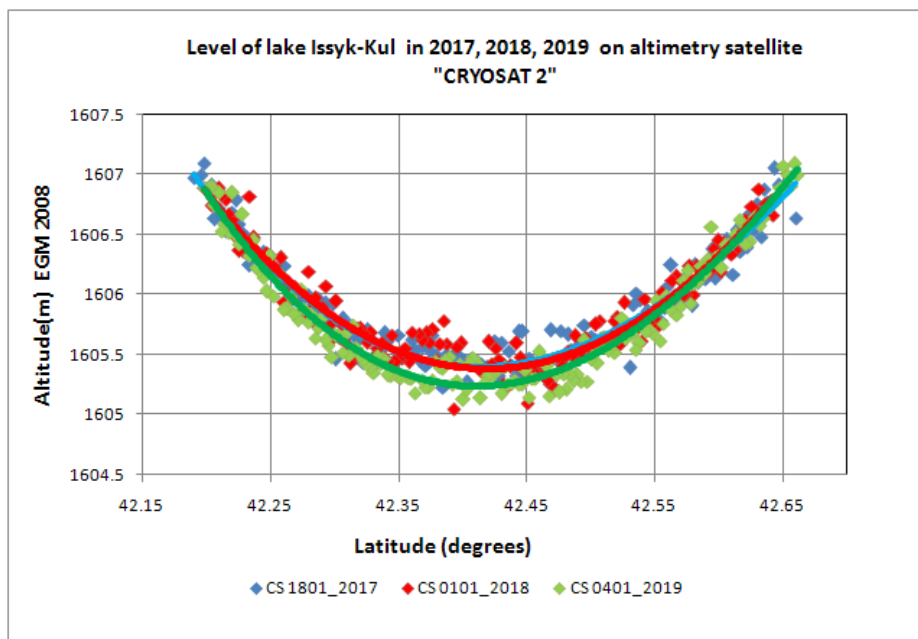


Рис. 7 Уровень озера Иссык-Куль по данным альтиметрического спутника “CryoSat 2” по субмеридиональным профилям А (01.01.2018; 04.01.2019) и В (18.01.2017) (см. рис. 8)

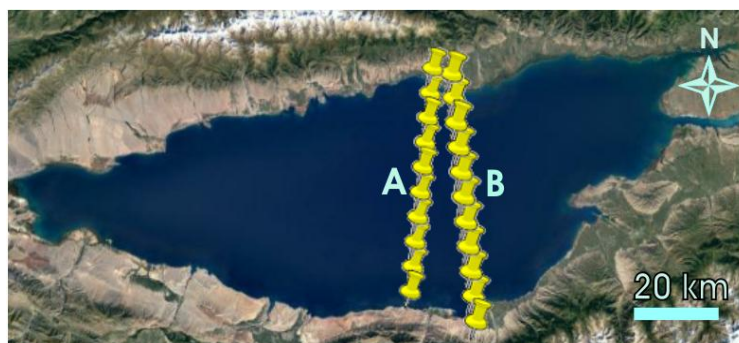


Рис. 8 Альтиметрические профили по трекам спутника “CryoSat 2” на озере Иссык-Куль.

Аналогичный результат получен по измерениям альтиметрического спутника «IceSat 2», имеющего лазерный дальномер с точностью положения по горизонтали 3,6 м, а также точностью по вертикали лучше 0,1м. Его период повторяемости измерений от 91 дня, с вариациями, (<https://openaltimetry.earthdatacloud.nasa.gov/data/icesat2/>. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center). Этот спутник обеспечивает высокую точность измерения альтитуды земной поверхности, но результаты зависят от наличия облачности. На рисунках 9,10 показаны результаты измерения альтитуды уровня озера Иссык-Куль этим спутником по одному из треков №66, с тремя парами лучей измерения, а именно, по паре лучей gt3r и gt3l. На графике, на рисунке 9, при альтитуде уровня озера на южном и северном урезе берега, равной 1606,2 м., максимальный прогиб уровня составляет 0,58 м., в точке с альтитудой 1605,62 м.. При этом, медианное значение стандартного отклонения измерения альтитуды, по двум лучам, соответственно равно: gt3l=0,024м, gt3r=0.027м. Эта величина прогиба уровня озера, полученная спутником «IceSat 2», по соответствующим позициям треков, наиболее корректна, из-за большей точности измерения лазерного дальномера, по сравнению с

радаром. По трекам спутниковых измерений альтитуды уровня озера, расположенным в восточной и западных частях озера, величина прогиба меньше, от нескольких сантиметров до 0,10-0,12 м. То есть, максимальный прогиб уровня имеет место в центральной части озера Иссык-Куль.

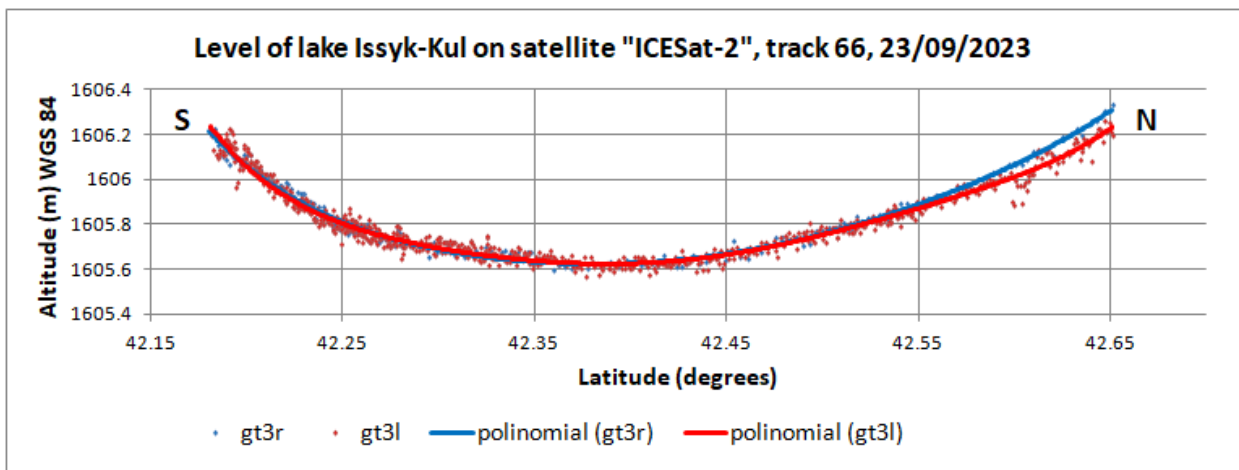


Рис. 9 Результаты измерения спутником «IceSat 2» альтитуды уровня озера Иссык-Куль по треку №66, по паре лучей gt3r и gt3l.

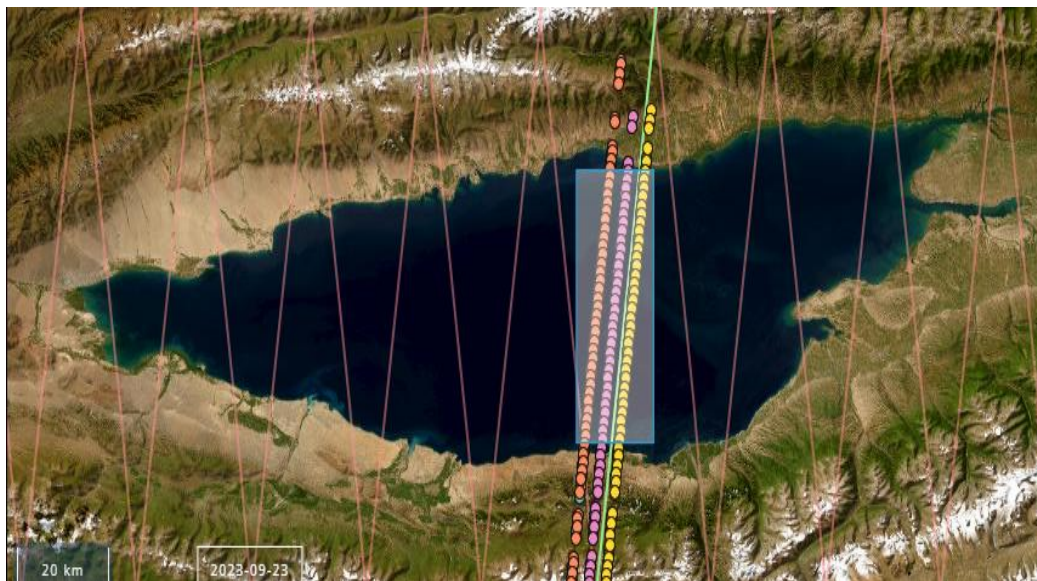


Рис.10 Расположение точек измерения альтитуды трека №66 (паре лучей gt3r и gt3l соответствует левый след луча).

Феномен прогиба уровня озера Иссык-Куль, по нашему мнению, обусловлен гравитационным притяжением двух субширотных хребтов Тескейского и Кунгейского. Некоторое влияние, возможно, также за счет антициклонального течения озерных вод и разницы температурной и солевой плотности воды в прибрежной и центральной частях озера.

Мониторинг уровня озера Чатыр-Куль

В 2023 г. начато наблюдение с помощью спутников за уровнем бессточного озера Чатыр-Куль, расположенного в Центральном Тянь-Шане на абсолютной высоте 3530 м.

Наблюдение за уровнем озера осуществляется по данным спутников: лазерного «IceSat 2» и радарного “Sentinel 3”, запущенного в 2016 г., с повторяемостью измерений - 27 дней и инструментальной ошибкой измерений 0,03м., (Copernicus Data Space Ecosystem). Расположение треков спутников “Sentinel 3” и «IceSat 2» на акватории озера Чатыр-Куль показано на рисунке 11.



Рис. 11 Трек спутника “Sentinel 3” (слева) и трек № 211 спутника «IceSat 2» (справа) на акватории озера Чатыр-Куль.

Мониторинг уровня озера Чатыр-Куль выполнялся с 2016 по 2024 гг. путем обработки в ЦАИИЗ первичных данных измерений спутников “Sentinel 3”, с использованием продукта Level -2 LAN_HY, (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>) и «IceSat 2», (<https://openaltimetry.earthdatacloud.nasa.gov/data/icesat2/>). Кроме этого, в анализе изменения уровня озера использованы результаты обработки измерений спутника “Sentinel 3», выполненные GFZ (Deutsche GeoForschungs Zentrum) из Системы хранения сенсорных данных ЦАИИЗ (SDSS, http://sdss.caiag.kg/sdss/index.php?&page=measure_page).

Из результатов наблюдения, представленных на рисунке 12 следует, что за период с 2016 по 2024 год наблюдается незначительный линейный тренд на снижение уровня (градиент = - 0,00007 м/год) озера Чатыр-Куль. Нелинейный тренд показывает наличие периодичности колебаний уровня, с периодом порядка 5 лет. В целом, режим озера Чатыр-Куль, в рассматриваемый период времени, имеет относительно стабильный характер. Особенностью озера Чатыр-Куль является замерзание, в основном, с октября по апрель, что следует учитывать при интерпретации уровня в зимний период, когда на величину уровня влияют деформации льда, накопление и ветровой перенос снега. Разница в абсолютных высотах уровня озера, по разным источникам, наблюдаемая на рисунке 12 обусловлена различием алгоритмов введения поправок в спутниковые данные и разными моделями геоида, определяющими нулевую отметку абсолютной высоты. Точность определения альтитуды уровня озера по радарному спутнику “Sentinel 3” показана на рисунке 13, где медианное значение RMSD, представленных на графике, равно 0,13м.

По данным предыдущих исследований [3,4], с начала 20-го века по 80-е годы, уровень озера Чатыр-Куль понизился на несколько метров и водный баланс был в основном отрицательным. Однако систематических наблюдений и измерений на озере не

проводилось. С целью уточнения состояния уровня озера в прошлом и по настоящее время, был выполнен анализ оптических снимков спутников.

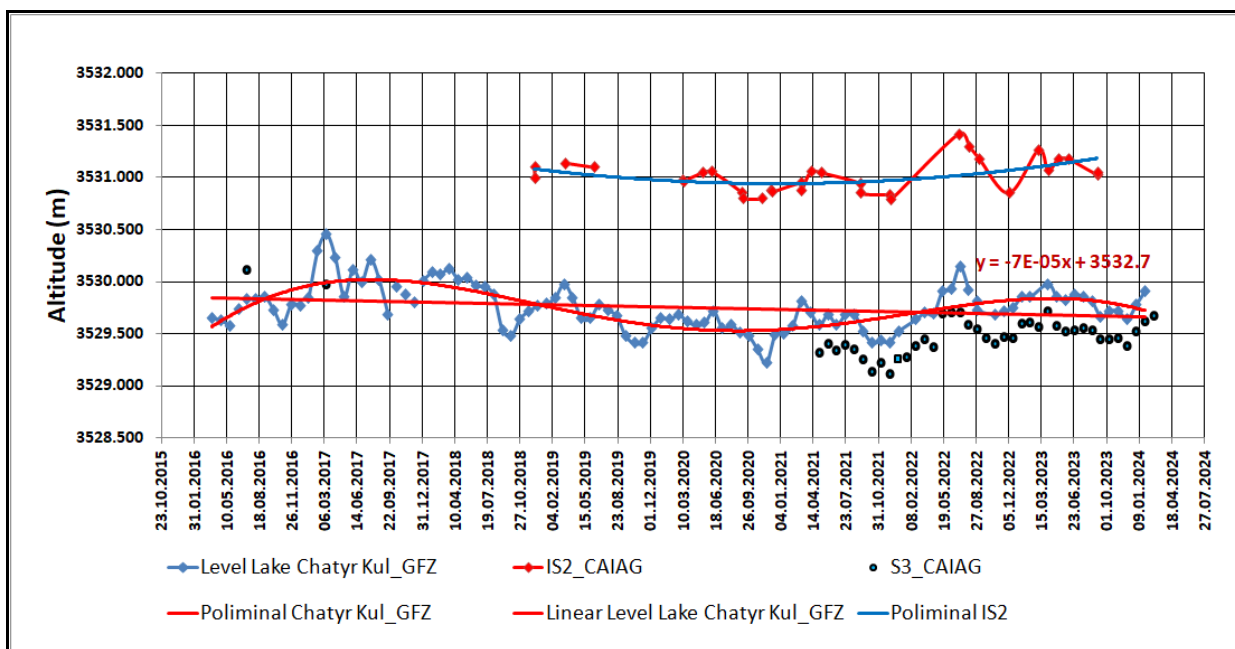


Рис. 12 Многолетнее изменение уровня озера Чатыр-Куль по данным спутников «Sentinel 3», «IceSat 2», по результатам обработки ЦАИИЗ и GFZ.

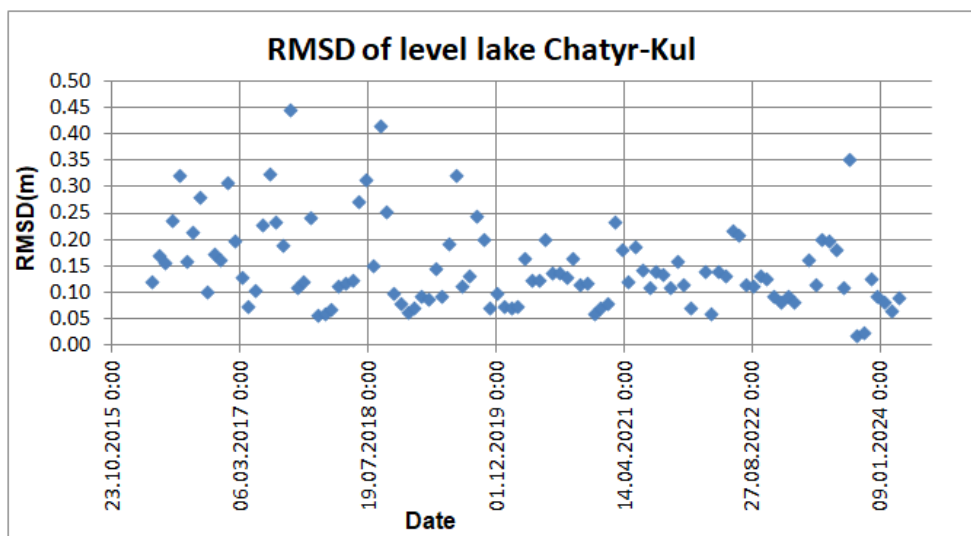


Рис.13 Среднеквадратичное отклонение измеренных величин альтитуды уровня озера Чатыр-Куль по данным GFZ

Для анализа изменения уровня озера Чатыр-Куль были использованы оптические снимки спутников Hexagon KH9 от 04/08/1973г. с разрешением 6 – 9 м/п, «Landsat 1-5» от 1984, 1988 г., 57м/п, «Landsat 4-5» от 1993г., - 30м/п (USGS EROS Archive) и «Sentinel 2» от 2023 г.,-10м/п.(ESA, Copernicus Data Space Ecosystem). Анализ доступных спутниковых снимков показал, как видно из рисунка 14 и таблицы 1, что в 1973 г. площадь озера Чатыр-Куль была близка к таковой в 2023 г. и, соответственно, абсолютная отметка уровня воды озера в настоящее время близка к таковой в прошлом. По топографической карте масштаба 1:100000, с отображенным состоянием местности на 1977 год, урез воды в озере Чатыр-Куль имел абсолютную отметку 3530м в Балтийской системе высот. При этом, среднее значение диапазона абсолютных высот уровня озера, по разным

источникам, по графику на рисунке 12, составляет 3530,25м. Контур озера по этой карте, практически совпадает с контуром, полученным по снимку спутника Hexagon KH9 от 04/08/1973 г.. Таким образом, состояние водного баланса озера в эти моменты времени было аналогичным. Однако, спутниковый снимок от 1984 г. показывает значительное сокращение площади озера Чатыр-Куль. То есть, после 1973-77 гг. произошло изменение баланса озера в сторону преобладания расходной части и такие условия продолжались до 1992-93гг. после чего начался устойчивый подъем уровня до настоящего его положения в 2023 г.. Этот подъем сопровождался периодическими незначительными понижениями уровня в 1995-97 гг., 2008 г., 2013-15 гг., что прослеживается на снимках спутников «Landsat 5,7,8» по изменению контура береговой линии озера в эти годы. Амплитуда этих понижений, приблизительно, была до 0,5 м., она, вероятно, была близка к наблюдаемой на рисунке 12 в 2020-21гг.

Изменение площади озера Чатыр-Куль

Таблица 1

Годы	1973	1984	1993	2023
Площадь (км ²)	164	130,5	143,6	158,4

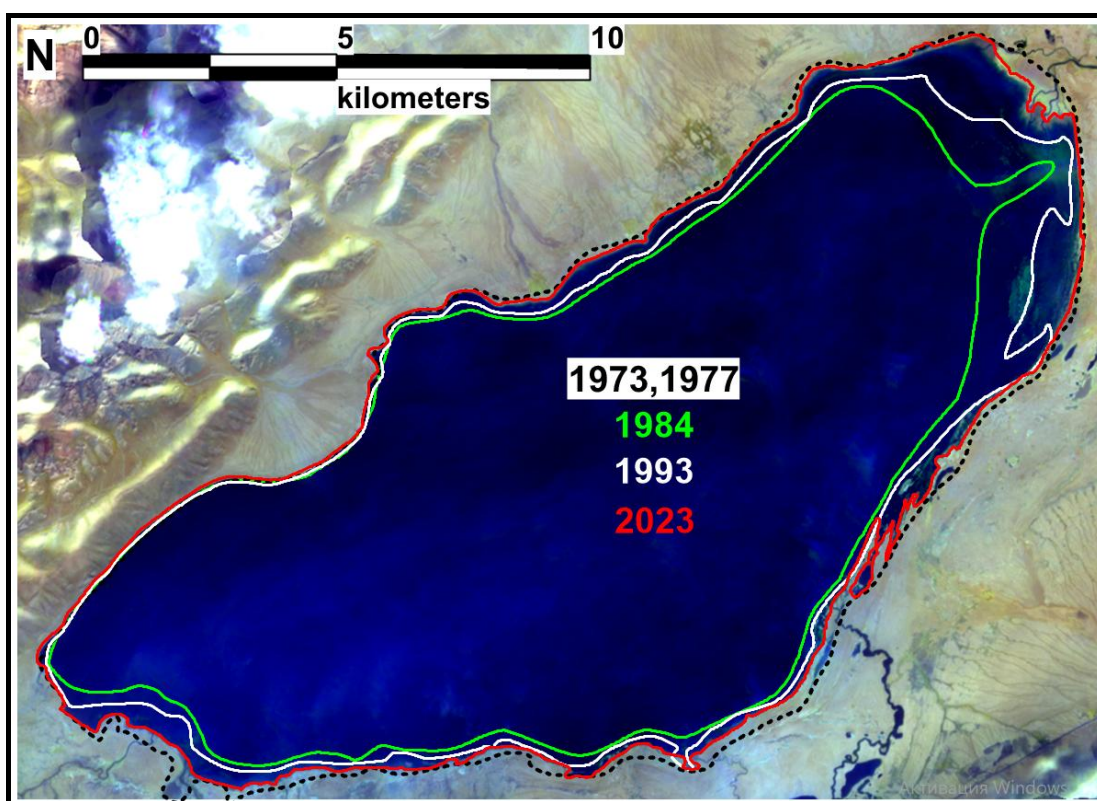


Рис.14 Границы озера Чатыр-Куль в разные годы по спутниковым снимкам

Общая амплитуда повышения уровня озера Чатыр-Куль с 1984 по 2023 год может быть приблизительно оценена по батиметрической кривой озера, представленной в [3] и показанной на рисунке 15, она имеет величину порядка 1м.

Результаты, полученные по режиму уровня озера Чатыр-Куль, свидетельствуют о незначительном влиянии глобального потепления на водный баланс озера, расположенного на больших абсолютных высотах.

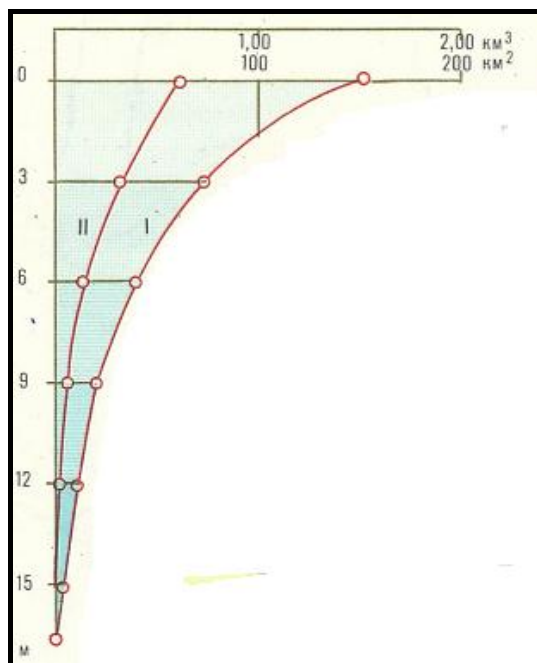


Рис.15 Графики: I – батиграфический и II- объемный озера Чатыр-Куль

Таким образом, использование спутниковой информации позволяет достаточно точно производить многолетний мониторинг уровня озер, изучать закономерности их развития, зависимость водного баланса высокогорных регионов Кыргызстана от климатических изменений.

Литература

1. Jean-François Crétau , Stephane Calmant, Vladimir Romanovski, Anton Shabunin, Florent Lyard, Muriel Bergé-Nguyen, Anny Cazenave, Fabrice Hernandez, Felix Perosanz. An absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain: Lake Issykkul in Central Asia. J Geod. DOI 10.1007/s00190-008-0289-7. 13p. © Springer-Verlag 2008.
2. J.-F. Crétau, S. Calmant, V. Romanovski, F. Perosanz, S. Tashbaeva, P. Bonnefond, D. Moreira, C. K. Shum, F. Nino, M. Bergé-Nguyen, S. Fleury, P. Gegout, R. Abarca Del Rio & P. Maisongrande (2011): Absolute Calibration of Jason Radar Altimeters from GPS Kinematic Campaigns Over Lake Issykkul. Marine Geodesy, 34:3-4, p.291-318.
<http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2011.585110>
3. Атлас Киргизской ССР. Т.1. Природные условия и ресурсы. – М.: ГУГК СССР, 1987. – 157 с.
4. Климатология, гидрология и гидрофизика озер Внутреннего Тянь-Шаня (тенденция природного развития). Л.: «Наука»,. 1981. 244 с.