

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 666—679.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):666—679.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [556.555.2:551.583](282.255.5)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-666-679

Уровенный режим озера Балхаш и его изменения в условиях нестационарного климата

***Валерий Сергеевич Вуглинский, Валерия Александровна Сушкова,
Любовь Сергеевна Курочкина***

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, vvuglins@mail.ru

Аннотация. Изучение динамики уровней воды крупных озер имеет важное научное значение, поскольку уровень является интегральным показателем состояния водных ресурсов водоема. В статье представлены результаты исследования закономерностей уровенного режима крупного бессточного озера Балхаш за период с 1944 г. по 2020 г. Предложены приемы заполнения пропусков в многолетних рядах уровней воды, использования спутниковой информации для их продления, восстановления многолетних рядов с учетом антропогенного влияния. Выполнен анализ значимости наклонов линий трендов в многолетних рядах уровней воды за период с 1979 г. по 2020 г. Даны количественная оценка изменений среднегодовых уровней озера за последние 40 лет в условиях нестационарной климатической ситуации.

Ключевые слова: озеро Балхаш, уровень воды, восстановление многолетнего ряда, изменчивость уровня, нестационарный период.

Для цитирования: Вуглинский В. С., Сушкова В. А., Курочкина Л. С. Уровенный режим озера Балхаш и его изменения в условиях нестационарного климата // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 666—679. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-666-679.

HYDROLOGY

Original article

Water level regime of lake Balkhash and its changes in conditions of a non-stationary climate

Valery S. Vuglinsky, Valeria A. Sushkova, Lyubov S. Kurochkina

State Hydrological Institute, Russia, vvuglins@mail.ru

Summary. Studying the water level dynamics of large lakes is of significant scientific importance, as the level is an integral indicator of the state of the reservoir water resources. This article presents the results of a study of the water level patterns of Lake Balkhash, a large endorheic lake. To study the long-

© Вуглинский В. С., Сушкова В. А., Курочкина Л. С., 2025

term dynamics of the water level of Lake Balkhash, the period from 1944 to 2020 was selected, divided into two half-periods: with a conditionally stationary climate (1944—1978) and a non-stationary climate (1979—2020). The main characteristics of the water level of Lake Balkhash were the average monthly and average annual values obtained from ground-based observations, averaged for the entire water body. In addition to the long-term water level series, similar long-term series of climate characteristics (precipitation and air temperature) were generated for joint analysis. Methods are proposed for filling gaps in long-term water level series, using satellite information to extend them, and restoring long-term series, taking into account anthropogenic influence. An analysis of the significance and slopes of trend lines in long-term water level series for the period from 1979 to 2020 was performed. A quantitative assessment of changes in average annual lake levels over the past 40 years under non-stationary climatic conditions was provided. It showed that, under real conditions, the increase in the average annual level of Lake Balkhash for the period from 1979 to 2020 (the period of non-stationary climatic situation) compared to the previous period (1944—1978) was +1.56 m. An analysis of changes in the average annual air temperature for the Lake Balkhash region revealed an increase in air temperature in the lake area for the period from 1979 to 2020 by +1.2 °C compared to the previous calculation period.

Keywords: Lake Balkhash, water level, restoration of a long-term series, quantitative assessment of changes, non-stationary period.

For citation: Vuglinsky V. S., Sushkova V. A., Kurochkina L. S. Water level regime of lake Balkhash and its changes in conditions of a non-stationary climate *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydro-meteorology and Ecology*. 2025;(81):(666—679). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-666-679. (In Russ.).

Введение

Согласно мнению ученых, климат на нашей планете, начиная со второй половины XX века, начал меняться, вследствие чего многие природные процессы и явления стали отличаться от тех, которые были характерны для предшествующего столетия со стационарным климатом [1, 2]. Эта ситуация коснулась и динамики уровней воды крупных озер, поскольку уровень воды является результатом сложившегося соотношения между компонентами водного баланса озера, многие из которых прямо или косвенно зависят от климатических условий, сложившихся над акваторией озера и его водосбором.

Озеро Балхаш — бессточное озеро в Балхаш-Алакольской котловине на юго-востоке Казахстана. Главные питающие его реки — Или, Карагат и Аксу обеспечивают до 80 % притока в озеро. В табл. 1 представлены основные физико-географические и морфометрические характеристики озера [3].

Таблица 1

Основные географические и морфометрические характеристики оз. Балхаш

Main geographical and morphometric characteristics of Lake Balkhash

Местоположение		Морфометрические характеристики*					
Широта, град. СШ	Долгота, град. ВД	Площадь водосбора, км ²	Объём, км ³	Площадь зеркала, км ²	Средняя глубина, м	Длина, км	Средняя ширина, км
46,54	74,88	413000	94	17500	5,8	614	до 30

* При отметке уровня воды 341,41 м.

Уровенный режим озера претерпевал значительные изменения за последние 80—100 лет, связанные как с климатическими изменениями, так и с антропогенным влиянием. Особо следует отметить период длительного наполнения

Капчагайского водохранилища на р. Или, в течение которого озеро ежегодно недополучало части годового стока, которая расходовалась на заполнение указанного водохранилища. Как следствие, уровни озера в этот период ежегодно снижались, ухудшая водохозяйственную и экологическую ситуацию в районе озера [4].

В настоящей статье рассматриваются результаты анализа многолетних колебаний уровня воды оз. Балхаш за длительный период, включающий стационарный климатический период (1944—1978 гг.) и последующий период с нестационарным климатом (1979—2020 гг.), и даются оценки изменений уровня озера за второй период по сравнению с предыдущим. Выбор указанных периодов обусловлен тем, что, по мнению многих исследователей, наиболее ощутимые изменения климата и связанные с ними изменения гидрологических характеристик на территории Евразии, в том числе и на территории бывшего СССР, произошли в конце 70-х — начале 80-х гг. прошлого века [5, 6, 7].

Исходные данные и их корректировка

В качестве основных характеристик уровня воды озера Балхаш рассматривались среднемесечные и среднегодовые значения, полученные по данным наземных наблюдений, осредненные для всего водоема. Для заполнения пропусков в рядах наземных наблюдений и их продления использовались результаты спутниковых наблюдений.

Исходная информация об уровнях воды по данным наземных наблюдений была заимствована из базы данных «ГВК-озера», находящейся в ФГБУ «ГГИ», а также любезно предоставлена РГП «Казгидромет». Дополнительно были использованы синхронные многолетние ряды данных наземных и спутниковых наблюдений за уровнем воды оз. Балхаш, представленные в интегрированной базе данных Международного центра данных по гидрологии озер и водохранилищ (International Data Centre on Hydrology of Lakes and Reservoirs — HYDROLARE), функционирующего в Государственном гидрологическом институте под эгидой Всемирной Метеорологической организации (ВМО). В дополнение к многолетним рядам уровней воды для совместного анализа были сформированы аналогичные многолетние ряды климатических характеристик (осадков и температуры воздуха) с использованием международного архива подразделения климатических исследований в Школе наук об окружающей среде Университета Восточной Англии (University of East Anglia) [8]. Метеорологические данные были получены путем вычисления осредненных значений температуры воздуха и осадков для квадратов сетки размером $0,5^\circ$, в которых расположено озеро.

После первичного анализа сформированного многолетнего ряда среднемесечных уровней воды по данным наземных наблюдений были выявлены существенные пропуски, составившие 4 полных года (с 2017 г. по 2020 г.) и 27 отдельных месяцев. Для получения непрерывных многолетних рядов среднемесечных и среднегодовых значений уровня воды озера было выполнено заполнение пропусков в рядах с применением следующих приемов:

- линейная интерполяция между соседними членами ряда;

— подбор года-аналога с близкими значениями имеющихся крайних членов ряда;

— использование спутниковых данных.

Первый прием применялся в случае пропусков в рядах, не превышающих пяти месяцев. Второй прием применялся в случае пропусков в рядах от шести до десяти месяцев. При этом соблюдалось условие, что после заполнения пропусков среднегодовое значение уровня воды в восстановленном ряду должно быть близким к аналогичному значению принятого года-аналога. С использованием указанных двух приемов были восстановлены пропуски в рядах среднемесячных и среднегодовых значений за период с 1944 г. по 2016 г.

Для получения среднемесячных и среднегодовых значений уровней воды за период с 2017 г. по 2020 г. были использованы данные спутниковых наблюдений. Основы методики корректировки спутниковых данных по уровню воды крупных озер с использованием данных наземных наблюдений были разработаны Лабораторией космических исследований в области геофизики и океанографии (LEGOS) Национального центра космических исследований Франции (CNES) [9]. В дальнейшем методика получила развитие в совместных работах указанной лаборатории и Государственного гидрологического института [10]. Среднемесячные уровни воды по спутниковым данным рассчитываются как средние арифметические значения из результатов спутниковых измерений за месяц.

В распоряжении авторов имелись многолетние ряды среднемесячных уровней воды оз. Балхаш, полученные по результатам спутниковых наблюдений за период с 1992 г. по 2020 г. В них, как и в наземных рядах, также имелись пропуски — не было данных за 14 месяцев. Таким образом, для получения непрерывных спутниковых рядов требовалось заполнить указанные пропуски. Для этого был использован следующий методический подход. На основании выбора в хронологическом порядке, начиная с данных за 1992 г. всех месяцев с наличием как наземных, так и спутниковых значений уровней воды, были составлены комбинированные параллельные ряды среднемесячных значений наземных и спутниковых данных. Затем были построены совместные хронологические графики изменений среднемесячных уровней воды, чтобы оценить размах отклонений между спутниковыми и наземными данными. Особенно четко на таких графиках проявляются односторонние тенденции завышения или занижения спутниковых данных по сравнению с наземными. Такие графики, построенные для оз. Балхаш, представлены на рис. 1.

На графиках чётко прослеживается синхронность в рядах спутниковых и наземных наблюдений. В то же время очевидны систематические отклонения спутниковых данных от наземных. В отдельные месяцы эти отклонения достигали 50 см. С целью исключения выявленных систематических погрешностей в спутниковом ряду все его значения были скорректированы путем введения коэффициента, полученного как частное от деления средних значений в параллельных комбинированных рядах. Для оз. Балхаш этот коэффициент составил 0,99. Путём умножения значений наземных данных на указанный коэффициент были заполнены пропуски в спутниковом ряду.

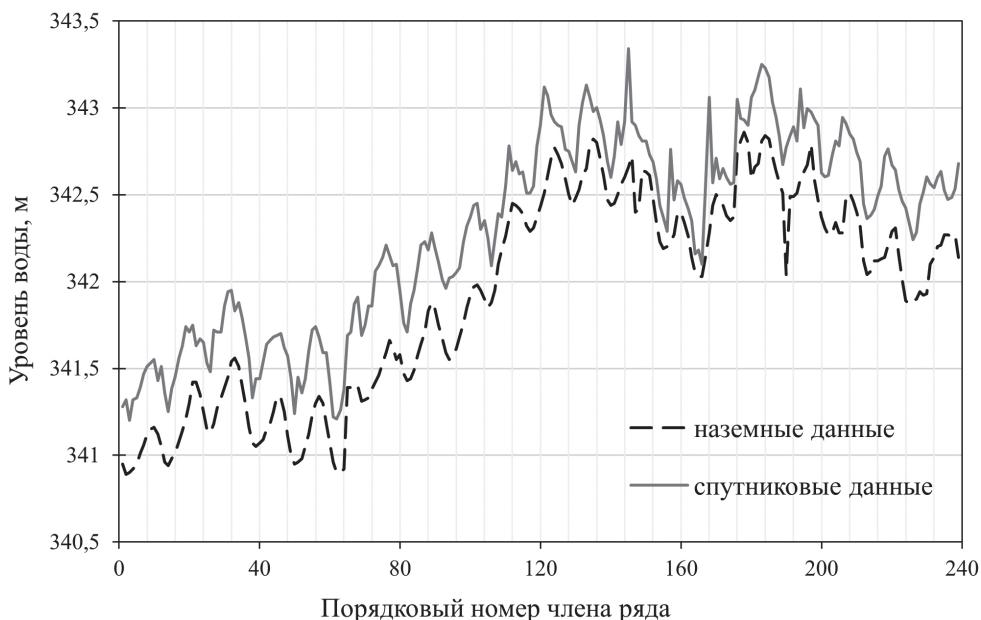


Рис. 1. Совместные комбинированные графики колебаний уровней воды оз. Балхаш за период с 1992 г. по 2016 г.

Fig. 1. Combined graphs of fluctuations in the water levels of Lake Balkhash for the period 1992–2016.

Для того, чтобы оценить репрезентативность полученного непрерывного спутникового ряда среднемесячных уровней воды за период с 1992 г. по 2016 г. и удалить возможные сомнительные и ошибочные значения, он был подвергнут статистическому анализу. В качестве статистических характеристик были определены средние, максимальные и минимальные значения многолетнего ряда, а также среднеквадратическое отклонение. Для удаления сомнительных и ошибочных значений был использован статистический способ выбраковки величин, выходящих за пределы полуторного размаха интерквартильного интервала между первым и третьим квартилями [11]. Все значения, лежащие за пределами полуторного размаха этого интервала, превышают допустимую статистическую ошибку разброса членов ряда, рассматриваются как случайные «выбросы» и подлежат удалению из ряда. В табл. 2 приведены статистические характеристики откорректированного многолетнего спутникового ряда среднемесячных значений уровня воды оз. Балхаш.

На рис. 2 представлены результаты квантильного анализа в виде «ящика с усами», построенного по данным откорректированного многолетнего ряда среднемесячных значений уровня воды оз. Балхаш, с помощью которого несложно определить «выбросы».

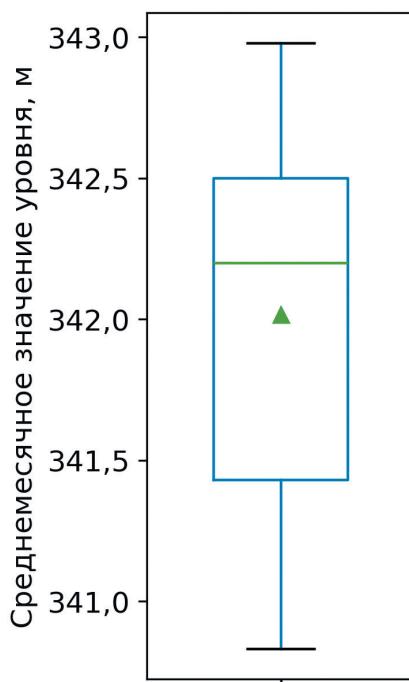


Рис. 2. «Ящик с усами», характеризующий разброс среднемесячных значений уровней воды оз. Балхаш в спутниковом откорректированном ряду.

Fig. 2. “Boxplot” characterizing the “spread” of the average monthly values of Lake Balkhash water levels in the satellite-corrected series.

Таблица 2

Статистические характеристики многолетнего спутникового ряда среднемесячных значений уровня воды оз. Балхаш за период с 1992 г. по 2016 г.

Statistical characteristics of the long-term satellite series of average monthly water levels in Lake Balkhash from 1992 to 2016

σ	Статистические параметры			Квартили		
	Среднее значение, м	Максимальное значение, м	Минимальное значение, м	25 % (первый квартиль)	50 % (медиана)	75 % (третий квартиль)
0,57	342,08	343,33	340,83	341,43	342,20	342,56

Верхние и нижние стороны «ящика» характеризуют значения 75 % и 25 % квартилей, а горизонтальная линия внутри его — это среднее (медианное) значение многолетнего ряда. Все значения, лежащие за пределами полуторного размаха разницы между первым и третьим квартилями (1,7 см), превышают допустимую ошибку и подлежат удалению. Эта разница отнимается от значения 25 % ($343,43 - 1,7 = 339,73$ см). Поскольку полученное значение меньше минимального

значения в ряду, то принимается последнее — 340,83 см. Тот же алгоритм действий и при работе с 75 % квартilem ($342,56 + 1,7 = 343,69$ см). Так как полученное значение превышает максимальное по ряду, то принимается последнее — 343,33. На рис. 2 эти границы обозначены горизонтальными отрезками на вертикальных линиях, проведенных от нижней и верхней сторон «ящика с усами». Для многолетнего спутникового ряда уровней воды оз. Балхаш «выбросы» установлены не были и удалять их не пришлось.

Репрезентативность откорректированного спутникового ряда для оз. Балхаш оценивалась на основе сопоставления двух статистических параметров, полученных для наземного и спутникового рядов: среднеквадратического отклонения σ и коэффициента корреляции r [10, 12]. Величины среднеквадратических отклонений должны быть близкими между собой, а коэффициент корреляции должен составлять не менее 0,85. Указанные параметры для оз. Балхаш представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения статистических параметров многолетних рядов для оз. Балхаш
Values of statistical parameters of long-term series for Lake Balkhash

Вид многолетнего ряда	Среднеквадратическое отклонение σ	Коэффициент корреляции r
Наземные наблюдения	0,60	0,98
Спутниковые наблюдения	0,58	

Из таблицы видно, что откорректированный многолетний спутниковый ряд среднемесячных уровней воды оз. Балхаш за период с 1992 г. по 2016 г. соответствует принятым критериям и является репрезентативным. Результаты спутниковых наблюдений были использованы для заполнения периода с отсутствием наземных данных (с 2017 г. по 2020 г.). Среднемесячные значения уровней воды за этот период были рассчитаны на основании спутниковых данных путем введения соответствующего корректирующего коэффициента.

Сводный расчетный многолетний ряд среднемесячных уровней воды оз. Балхаш за период с 1944 г. по 2020 г. был сформирован на базе имевшегося наземного ряда с заполнением в нем пропусков и его продлением с использованием вышеизложенных методических подходов.

Преобразование расчетного многолетнего ряда среднегодовых уровней воды озера с учетом антропогенного воздействия

Уровенный режим оз. Балхаш был нарушен при строительстве Капчагайской ГЭС на впадающей в озеро р. Или, сопровождавшемся заполнением Капчагайского водохранилища, которое началось в 1970 г. Общая ёмкость водохранилища — 28,14 млрд м³, полезный объём — 6,6 млрд м. Чтобы резко не снизить уровень озера, заполнение водохранилища продолжалось 17 лет и завершилось в 1987 г. Согласно литературным источникам [4, 13, 14], с 1970 г. по 1987 г. среднегодовой уровень воды озера снизился на 2,2 м, а объём — на 30 км³.

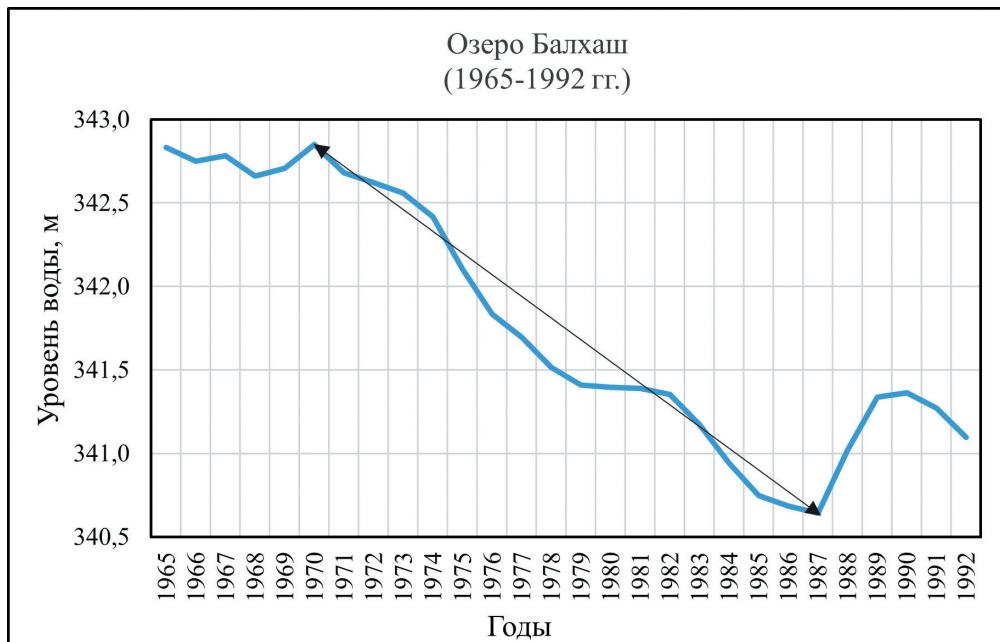


Рис. 3. Хронологический график изменений среднегодового уровня оз. Балхаш за период с 1965 г. по 1992 г. с линией тренда за период с 1980 г. по 1987 г.

Fig. 3. Chronological graph of changes in the average annual level of Lake Balkhash for the period from 1965 to 1992. With a trend line for the period from 1980 to 1987.

До строительства Капчагайской ГЭС уровень озера испытывал циклические колебания в основном между отметками 341 м и 342 м. В 1987 г. наблюдался минимальный уровень — 340,64 м. В последующие годы уровень начал повышаться, что некоторые специалисты объясняли большим количеством осадков, выпавших в 90-е гг. XX в. Очевидно, что в период с 1970 г. по 1987 г. естественный режим колебаний уровня озера был нарушен и, как следствие, нарушена однородность многолетнего ряда. Для восстановления однородности ряда была выполнена его корректировка.

На рис. 3 представлен хронологический график среднегодовых уровней воды оз. Балхаш за период с 1965 г. по 1992 г. В 1969 г. уровень озера находился на отметке 342,74 м, а в 1987 г., как уже отмечалось, на самой низкой отметке за период наблюдений, т. е. на отметке 340,64 м. Падение уровня составило 2,10 м.

Представленная на рисунке линия тренда с 1970 г. по 1987 г. отчетливо отражает близкий к равномерному характер снижения уровня воды оз. Балхаш в период наполнения Капчагайского водохранилища. Кривая хода уровня за рассматриваемый период не имеет существенных отклонений от линии тренда. Чтобы получить однородный ряд, в величины среднегодовых уровней воды в период с 1970 г. по 1987 г. равномерно по годам были введены нарастающим итогом

однородные положительные поправки около 0,12 м в год, составившие в сумме на конец 1987 г. +2,10 м. Полученные восстановленные значения уровня оз. Балхаш приведены ниже (табл. 4).

Таблица 4

Восстановленные среднегодовые уровни оз. Балхаш за период с 1970 г. по 1987 г.

Reconstructed average annual levels of Lake Balkhash for the period from 1970 to 1987.

Годы	Уровень воды, измеренный	Уровень воды, восстановленный	Годы	Уровень воды, измеренный	Уровень воды, восстановленный	Годы	Уровень воды, измеренный	Уровень воды, восстановленный
1970	342,85	342,97	1976	342,10	342,90	1982	341,35	342,84
1971	342,68	342,91	1977	341,83	342,75	1983	341,17	342,77
1972	342,62	342,96	1978	341,70	342,73	1984	340,94	342,66
1973	342,56	343,02	1979	341,51	342,66	1985	340,75	342,59
1974	342,42	342,99	1980	341,41	342,67	1986	340,69	342,64
1975	342,10	342,79	1981	341,40	342,78	1987	340,64	342,71

В годы после 1987 г. каждое последующее значение ряда корректировалось на разность между среднегодовыми значениями текущего и последующего годов (по данным измерений). Таким образом был получен однородный восстановленный многолетний ряд среднегодовых уровней воды оз. Балхаш, который использовался в дальнейших расчетах. На рис. 4 приведены хронологические графики изменения среднегодового уровня воды оз. Балхаш за период с 1944 г. по 2020 г., построенные по исходному и восстановленному ряду.

Проверка однородности исходного и восстановленного многолетних рядов среднегодовых уровней воды за период с 1944 г. по 2020 г. по критериям Стьюдента (*t*-критерий) и Фишера (*F*-критерий) показала, что исходный ряд по обоим критериям оказался неоднородным, а восстановленный — однородным.

Количественная оценка изменений уровня воды озера Балхаш в условиях нестационарного климата

Для количественной оценки изменений уровня воды оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. первоначально было необходимо установить значимость и направление линейного тренда за указанный период. Для оценки значимости тренда были использованы следующие методы: метод линейного тренда (*linear_trend*), метод Манна-Кендалла (*mk_trend*), метод Спирмана (*spearman_rho*) и ADF-тест [15]. Все четыре метода однозначно указали на значимость тренда в многолетнем восстановленном ряду среднегодовых уровней воды оз. Балхаш за рассматриваемый период. Для количественной оценки тренда был выполнен анализ наклона линий тренда с использованием следующих методов: линейная регрессия (МНК), метод Сена (Theil-Sen), RANSAC-регрессия и LAD-регрессия (метод наименьших модулей) [16, 17, 18]. На рис. 5 представлен график с линиями тренда, полученными с использованием указанных методов.

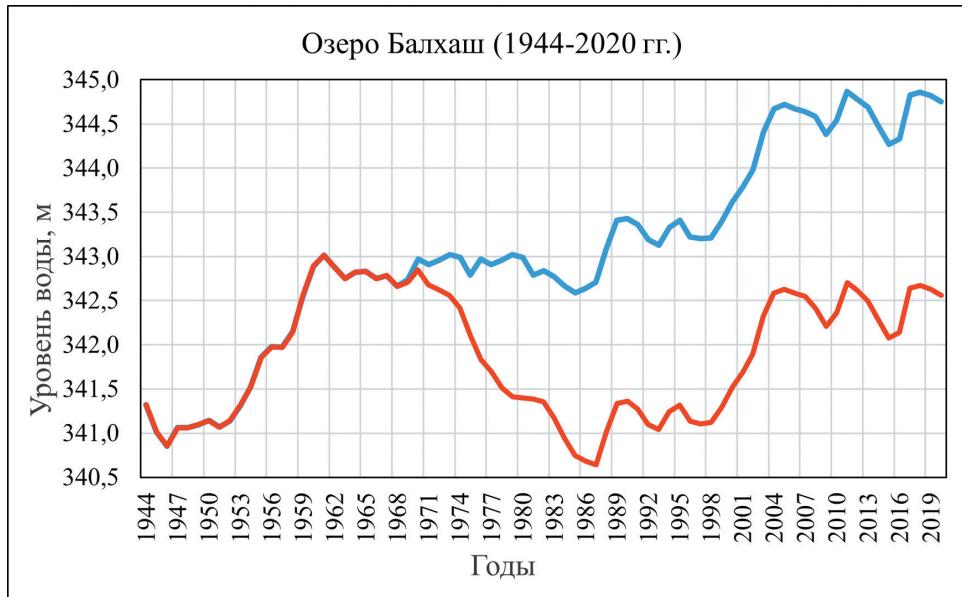


Рис. 4. Хронологические графики изменений среднегодового уровня оз. Балхаш, построенные по исходному (красный цвет) и восстановленному (синий цвет) рядам.

Fig. 4. Chronological graphs of changes in the average annual lake level of Lake Balkhash, constructed using the original (red) and reconstructed (blue) series.

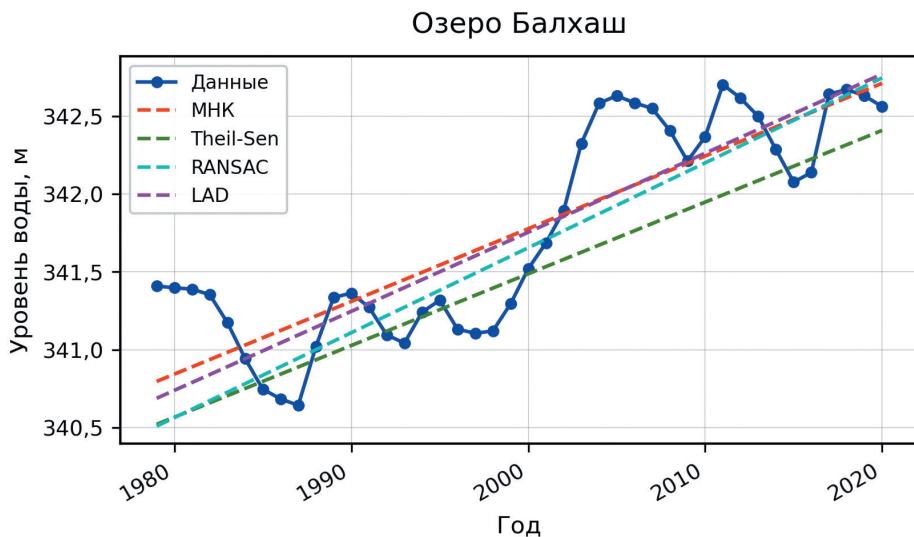


Рис. 5. График с линиями тренда, полученными с использованием различных методов.

Fig. 5. Graph with trend lines obtained using different methods.

Как видно из рисунка, все линии демонстрируют положительный характер тренда и три из них параллельны друг дугу, а наклон четвертой — не сильно отличается от остальных. Количественные оценки наклона линий тренда, полученные по каждому из четырех использованных методов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Значения наклонов линий тренда, полученные с использованием разных методов для многолетнего восстановленного ряда уровней воды оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г.

Slopes of trend lines obtained using different methods for the long-term reconstructed series of Lake Balkhash water levels for the period 1979—2020.

Значения наклонов линий тренда, м/год				Среднее значение наклона, м/год
Линейная регрессия (МНК)	Метод Сена	RANSAC-регрессия	LAD-регрессия	
0,047	0,046	0,052	0,051	+ 0,049

Исходя из полученного среднего значения наклона линий тренда, изменение восстановленного уровня оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. по тренду составило: $0,049 \times 42 = 2,06$ м. Сравнение средних значений среднегодовых уровней воды озера за периоды с 1944 г. по 1978 г. и с 1979 г. по 2020 г. показало, что во второй период средний уровень был выше на 18 см. Таким образом, в естественных условиях (при отсутствии потерь воды р. Или на наполнение Капчагайского водохранилища), повышение среднегодового уровня оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. (период нестационарной климатической ситуации) по сравнению с предыдущим периодом (с 1944 г. по 1978 г.) составило бы +2,24 м. В реальных условиях изменение уровня оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. по тренду составило +1,85 м. Однако среднегодовой уровень озера за период с 1944 г. по 1978 г. был выше уровня за период с 1979 г. по 2020 г. на 29 см. Соответственно, в реальных условиях повышение среднегодового уровня оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. (период нестационарной климатической ситуации) по сравнению с предыдущим периодом (с 1944 г. по 1978 г.) составило +1,56 м, что в какой-то мере компенсировало антропогенное снижение уровня озера, вызванное заполнением Капчагайского водохранилища.

Заключение

В течение последних 80—100 лет происходили существенные колебания уровня оз. Балхаш, связанные как с климатическими изменениями, так и с антропогенным влиянием. Длительное наполнение Капчагайского водохранилища на р. Или вызвало продолжительное антропогенное снижение уровня воды озера в период с 1970 г. по 1987 г. Для изучения многолетней динамики уровня озера Балхаш был выбран период с 1944 г. по 2020 г., разделенный на два полупериода: с условно стационарным климатом (с 1944 г. по 1978 г.) и нестационарным климатом (с 1979 г. по 2020 г.). В связи с наличием пропусков в рядах наземных наблюдений за уровнем были применены методы, позволившие не только заполнить

пропуски в наземных рядах данных, но и продлить эти ряды с использованием спутниковых наблюдений. В последнем случае была применена методика корректировки спутниковых данных, адаптированная применительно к многолетним рядам среднемесячных и среднегодовых уровней озера, что позволило получить восстановленные ряды уровней за весь выбранный расчетный период. Однородность восстановленного ряда среднегодовых уровней была подтверждена соответствующими статистическими критериями.

Для того, чтобы получить количественную оценку изменений среднегодовых уровней воды оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. первоначально была оценена значимость тренда за указанный период с использованием четырех различных статистических подходов. Все четыре метода однозначно указали на значимость тренда в многолетнем восстановленном ряду среднегодовых уровней воды оз. Балхаш за рассматриваемый период. Непосредственная оценка изменений уровня воды оз. Балхаш за указанный период была получена на основании анализа наклона линий (коэффициентов) тренда также с использованием различных статистических подходов. В итоге было установлено, что в естественных условиях (при отсутствии потери воды р. Или на наполнение Капчагайского водохранилища), повышение среднегодового уровня оз. Балхаш за период с 1979 г. по 2020 г. (период нестационарной климатической ситуации) по сравнению с предыдущим периодом (с 1944 г. по 1978 г.) составило бы +2,24 м.

Интересно отметить, что анализ изменений среднегодовой температуры воздуха для района оз. Балхаш с использованием тех же четырех критериев оценки линий наклона тренда, выявил рост температуры воздуха в районе озера за период с 1979 г. по 2020 г. на +1.2 °C по сравнению с предыдущим расчетным периодом. В то же время корреляционная связь между многолетними рядами среднегодовых уровней воды и среднегодовой температурой воды за рассматриваемый период оказалась слабой.

Таким образом, основная научная задача, поставленная авторами статьи, была успешно решена. Предложенные в статье приемы заполнения пропусков в многолетних рядах уровней воды, использования спутниковой информации, восстановления многолетних рядов с учетом антропогенного влияния, анализа значимости и наклонов линий трендов при оценке количественных изменений уровня могут найти успешное применение при аналогичных исследованиях. Результаты количественной оценки изменений среднегодового уровня озера за последние десятилетия, показавшие интенсивный его рост, могут быть использованы при планировании водохозяйственных мероприятий в бассейне озера, при реализации мер, связанных с использованием водных запасов озера, а также для оптимизации мероприятий, связанных с динамикой его уровня (судоходство, водозaborы, прибрежная инфраструктура и др.).

Список литературы

1. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том I. Изменения климата. М.: Росгидромет. 2008. 227 с.
2. Climate change 2023: AR6 synthesis report: summary for policymakers. IPCC, 2023. 36 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

3. Турсунов Э. А., Мадибеков А. С., Кулебаев К. М. Современные морфометрические характеристики оз. Балкаш // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2014. № 34. С. 43—47.
4. Проблемы гидроэкологической устойчивости в бассейне озера Балхаш. Под. ред. А. Б. Самаковой // Алматы: Каганат. 2003. 583 с.
5. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004. №4, С.50—66.
6. Climate change 2014. Synthesis Report. Summary for policymakers. IPPC. 2014. 31 p.
7. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И. А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт. 2008. 600 с.
8. Climatic Research Unit (CRU) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.uea.ac.uk/groups-and-centres/climatic-research-unit> (дата обращения: 15.10.2023).
9. Ricko M., Birkett C. M., Carton J. A. et al., Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry // Journal of Applied Remote Sensing. 2012. 6(1). P. 1710. DOI: 10.1117/1.JRS.6.061710.
10. Vuglinsky V. S., Cretaux J-F, Izmailova A. V. et al. Prospects for using satellite information to determine the water level of large lakes and reservoirs (using the example of water bodies in Russia) // Meteorology and Hydrology. 2024. No. 1. P. 5—16. DOI: 10.3103/S1068373924010011.
11. Crétaux J.-F., Birkett C. Lake studies from satellite altimetry // C R Geoscience, 2006. Vol. 338. P. 1098—1112. DOI: 10.1016/j.crte.2006.08.002.
12. Berry P. A. M. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry // Geophys. Res. Lett. 2005. 32(16). P. 4. DOI: 10.1029/2005GL022814.
13. Actual hydrometeorological problems of the Balkhash Lake and its region / edited by I. I. Skotzelas, St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 1995. P. 103—170.
14. Ivkina N. I. Water level variation on the Balkhash lake in the modern period // Гидрометеорология и экология. Казгидромет. 2022, №3. P. 6—13. DOI: 10.54668/2789-6323-2022-106-3-6-13.
15. Bianchi M., Boyle M., Hollingsworth D. Comparison of Trend Estimation Methods // Applied Economics. Letters. 1999. (2). P. 103—109. DOI: 10.1080/135048599353726.
16. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau // Journal of the American statistical association. 1968. Vol. 63. No. 324. P. 1379—1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
17. Fischler M. A., Bolles R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Communications of the ACM. 1981. Vol. 24, No. 6. P. 381—395. DOI: 10.1145/358669.358692.
18. Koenker R. Quantile Regression. Cambridge: Cambridge University Press. 2005. 360 p. DOI: 10.1017/CBO9780511754098.

References

1. *Otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyah na territorii Rossiyskoy Federatsii = Report on Climate Change and Its Impacts in the Russian Federation.* Vol. I. Climate Change. M.: Rosgidromet. 2008: 227 p. (in Russ.).
2. Climate change 2023: AR6 synthesis report: summary for policymakers. IPCC. 2023: 36 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
3. Tursunov E. A., Madibekov A. S., Kulebaev K. M. Modern morphometric characteristics of Lake Balkhash. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University.* 2014; (34): (43—47). (in Russ.).
4. *Problemy gidroekologicheskoy ustoychivosti v basseyne ozera Balkhash = Problems of Hydroecological Sustainability in the Balkhash Lake Basin.* Ed. A. B. Samakovai, Almaty: Kaganat. 2003: 583 p. (in Russ.).
5. Gruza G.V., Rankova E.Ya. Detection of climate change: state, variability and extremes of climate. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology.* 2004; (4): (50—66). (in Russ.).
6. Climate change 2014. Synthesis Report. Summary for policymakers. IPPC. 2014: 31 p.
7. *Vodnyye resursy Rossii i ikh ispol'zovaniye = Water resources of Russia and their use.* Ed. I. A. Shiklomanov. 2008: 600 p. (in Russ.).

8. Climatic Research Unit (CRU) Available at: <https://www.uea.ac.uk/groups-and-centres/climatic-research-unit> (accessed on: 15.10.2023).
9. Ricko M., Birkett C. M., Carton J. A. et al. Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2012; 6(1): 1710. DOI: 10.1117/1.JRS.6.061710.
10. Vuglinsky V. S., Cretaux J.-F., Izmailova A. V. et. al. Prospects for using satellite information to determine the water level of large lakes and reservoirs (using the example of water bodies in Russia). *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2024; (1): 5—16. DOI: 10.3103/S1068373924010011.
11. Crétaux J-F and C. Birkett. Lake studies from satellite altimetry. *C R Geoscience*, 2006; (338): 1098—1112. DOI: 10.1016/j.crte.2006.08.002.
12. Berry P. A. M. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. *Geophys. Res. Lett.* 2005; (32): 4. DOI: 10.1029/2005GL022814.
13. Actual hydrometeorological problems of the Balkhash Lake and its region, ed. I.I. Skotzelas, St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 1995; 103—170. (in Russ.).
14. Ivkina N.I. Water level variation on the Balkhash lake in the modern period. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. Kazhydromet. 2022; (3): 6—13. DOI: 10.54668/2789-6323-2022-106-3-6-13.
15. Bianchi M., Boyle M., Hollingsworth D. Comparison of Trend Estimation Methods. *Applied Economics Letters*. 1999; (6): 103—109. DOI: 10.1080/135048599353726.
16. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American statistical association*. 1968; (63): 1379—1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
17. Fischler M. A., Bolles R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*. 1981; (24): 381—395. DOI: 10.1145/358669.358692.
18. Koenker R. Quantile Regression. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 360 p. DOI: 10.1017/CBO9780511754098.

Информация об авторах

Вуглинский Валерий Сергеевич, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Государственный гидрологический институт, vvuglins@mail.ru.

Сушкова Валерия Александровна, аспирант, Государственный гидрологический институт, sushkova.valeriya.98@mail.ru.

Курочкина Любовь Сергеевна, научный сотрудник, Государственный гидрологический институт, plathanthera@gmail.com.

Information about authors

Vuglinskiy Valery Sergeevich, doctor of geographical sciences, professor, chief researcher, State Hydrological Institute, vvuglins@mail.ru.

Sushkova Valeria Aleksandrovna, postgraduate student, State Hydrological Institute, sushkova.valeriya.98@mail.ru.

Kurochkina Lyubov Sergeevna, researcher, State Hydrological Institute, plathanthera@gmail.com.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 01.09.2025
Принята в печать 25.10.2025*

*The article was received on 01.09.2025
The article was accepted on 25.10.2025*