Научная статья / Scientific paper

УДК: 556.5

DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.333

Факторы многолетних колебаний водности трансграничного озера Ханка (юг Дальнего Востока России)

Р.С. Шайгузов, В.В. Шамов, С.Ю. Лупаков

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

e-mail: vlshamov@yandex.ru

Аннотация. В изучении гидрологического режима трансграничного оз. Ханка ключевыми остаются вопросы о причинах высоких уровней воды, которые наблюдались в последнее десятилетие, о соотношении естественного и антропогенного вклада в повышение уровней воды, а также о роли такого фактора, как сток в озеро подземных вод. В настоящей работе оценивалось влияние атмосферных осадков и речного притока на колебания уровня воды в озере в многолетнем разрезе по тесноте корреляционной связи текущего среднегодового уровня воды с суммарным объёмом этих составляющих водного баланса за различные продолжительности предшествующих лет. За период с 1951 по 2020 гг. тесная связь уровней воды отмечается с суммами осадков от 4 до 9 лет (максимальная корреляция 0,82 за 6 лет), а с речным притоком от 3 до 6 лет (0,81 за 5 лет). В разностных интегральных кривых соответствующих рядов прослеживается синхронность с некоторой задержкой уровней воды по отношению к этим составляющим. Тем самым уровень воды в оз. Ханка во многом зависит от предшествующего увлажнения его водосбора, в общем определяемого многолетними циклами муссонной циркуляции разной интенсивности. Предполагается, что в течение 3 лет (по прошествии которых связь уровня воды с речным притоком становится тесной) на водосборе происходит накопление подземных вод и затем их постепенная разгрузка в Ханку, что отражается в многолетней динамике уровня воды в озере и в корреляции годового речного притока с осадками, которая нелинейно уменьшается 3-годичными периодами по мере нарастания в прошлое суммарных осадков. Таким образом, продолжительная разгрузка подземных вод в озеро вносит значимый вклад в колебания его уровня.

Ключевые слова: озеро Ханка; уровень воды; речной сток; подземный сток; атмосферные осадки; гидрологический режим.

Для цитирования: Шайгузов Р.С., Шамов В.В., Лупаков С.Ю. Факторы многолетних колебаний водности трансграничного озера Ханка (юг Дальнего Востока России) // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 4. С. 333–354. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.333.

Factors of Long-Term Water Level Fluctuations in the Transboundary Khanka Lake (the South of the Russian Far East)

Ruslan S. Shaiguzov, Vladimir V. Shamov, Sergey Yu. Lupakov

Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

e-mail: vlshamov@yandex.ru

Abstract. The reasons of high water level in Lake Khanka that have been observed over the past decade, the ratio of natural and anthropogenic contributions to water level rise, and the role of groundwater runoff remain the key issues in studying the hydrological regime of this lake. We have estimated the impact of precipitation and river inflow on long-term water level fluctuations in the lake with the linear correlation of the current annual average water level with the summary values of these water balance constituents over different durations of previous years. For the period from 1951 to 2020, water level is closely correlated with precipitation amounts from 4 to 9 years (the maximum correlation is 0.82 for 6 years) and with river inflow from 3 to 6 years (0.81 for 5 years). The synchronicity with some delay in water level relative to these constituents is observed in the difference integral curves of the corresponding comparisons. Thus, the water level in Lake Khanka largely depends on the previous long-term moistening of its catchment, determined by the cycles of monsoon circulation of varying intensity. We assume that for 3 years (after which the water level -inflow connection becomes close) groundwater accumulates in the lake catchment and then gradually discharges into the lake. This is reflected in the long-term dynamics of water level in

the lake and in the correlation of annual river inflow with precipitation, which decreases non-linearly in the form of 3-year periods as total precipitation increases in the past. Thereby long-term groundwater discharge into Lake Khanka also contributes to water level fluctuations.

Keywords: the Khanka Lake; water level; river runoff; groundwater runoff; precipitation; hydrological regime.
For citation: Shaiguzov R.S., Shamov V.V., Lupakov S.Yu. Factors of Long-Term Water Level Fluctuations in the Transboundary Khanka Lake (the South of the Russian Far East). Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 4, pp. 333–354. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.4.333. (In Russian; abstract in English).

Введение

Озеро Ханка – крупнейший пресноводный водоём в Северо-Восточной Азии, занимающий трансграничное положение между Россией (Приморский край) и Китаем (провинция Хэйлунцзян). Оно имеет важное экономическое и экологическое значение – в его бассейне уже многие десятки лет ведётся активная хозяйственная деятельность, основу которой составляет орошаемое земледелие. Сам водоём богат рыбными запасами, а примыкающие к нему водно-болотные угодья частично включены в биосферный заповедник «Ханкайский». В силу своих географических особенностей озеро характеризуется значительными многолетними колебаниями уровней воды (УВ), которые периодически приводят к обширному затоплению прибрежных территорий. Данная проблема вызвала активное обсуждение в последнее десятилетие, когда к 2016 г. среднегодовой УВ в озере достиг исторического максимума и сохранялся на высоких отметках последующие несколько лет, что нанесло серьёзный ущерб хозяйственной деятельности на побережье. В научном сообществе стали выдвигаться различные гипотезы о причинах беспрецедентного подъема УВ и предлагаться пути решения сложившейся ситуации [1, 2].

Настоящая статья посвящена выявлению естественных закономерностей в гидрологических и метеорологических процессах в бассейне озера Ханка за многолетний период в контексте их влияния на УВ. Проанализированы проблемы, которые затрудняют изучение гидрологического режима озера. Использованы режимные данные мониторинга речного стока, УВ в озере и осадков в бассейне Ханки.

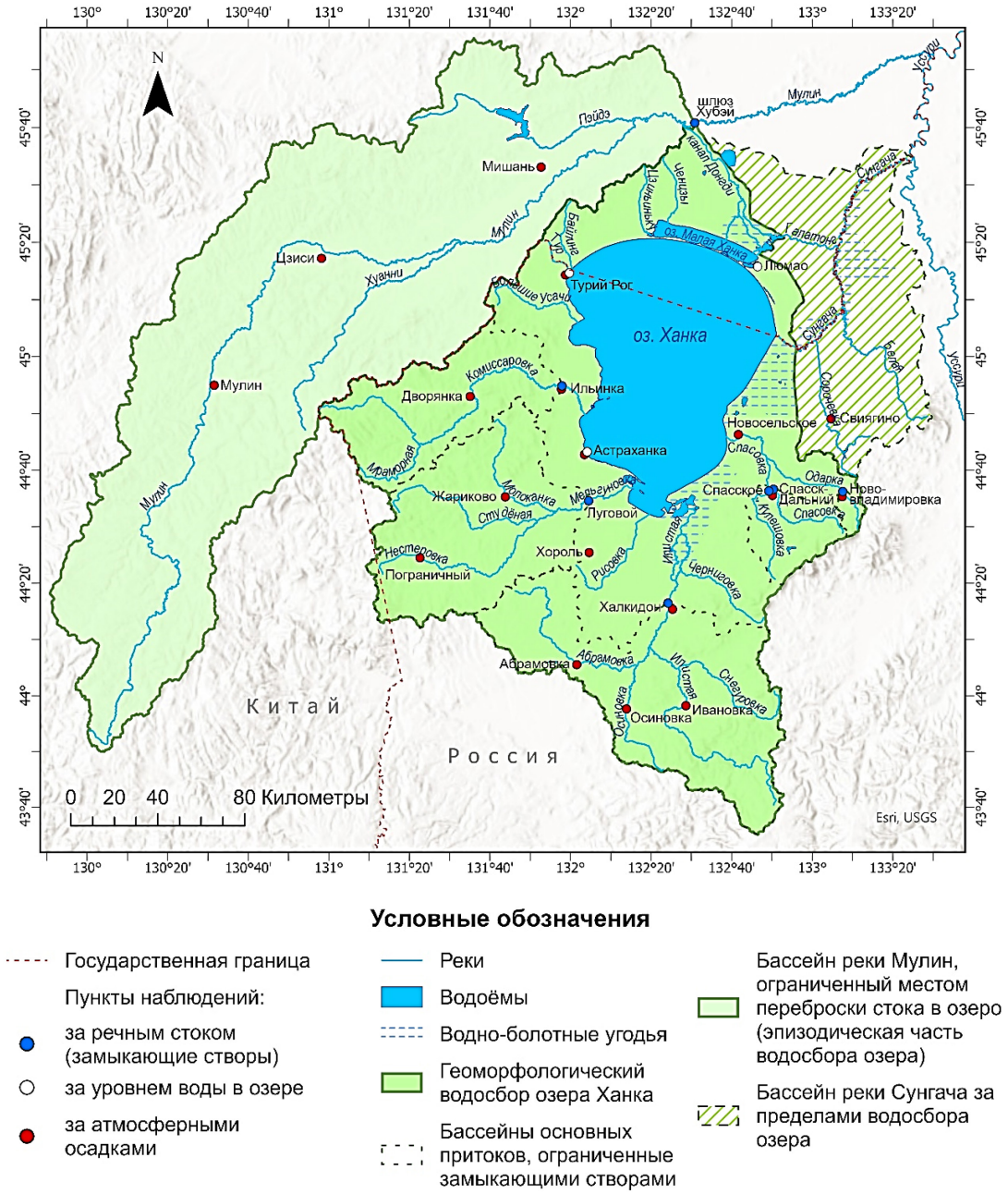
Характеристика объекта исследований

Бассейн оз. Ханка преимущественно расположен в пределах Приханкайской низменности, окружённой в приводораздельных районах низко- и среднегорьями с высотами до 900–1000 м. Площадь геоморфологического водосбора озера (без водного зеркала) составляет 16,9 тыс. км^2 (рисунок 1). Само озеро состоит из двух водоёмов – собственно оз. Ханка и оз. Малая Ханка, разделённых узкой песчаной косой. В среднем площадь зеркала Ханки составляет около 4 тыс. км^2 (Мал. Ханки – 140 км^2), а объём воды при таких размерах около 18 км^3, чему соответствует среднемноголетний УВ в 300 см (относительный) или 68,9 м (абсолютный). Вследствие многолетних колебаний УВ эти величины значительно изменяются: площадь зеркала от 3,9 тыс. до 5 тыс. км^2, объём воды от 12,7 до 24,8 км^3 (УВ от 150 до 390 см (435 см в 2016 г.) соответственно). Озеро мелководное: средняя глубина составляет 4,5–6,5 м, максимальная – 11,6 м [3, 4].

Климат в бассейне Ханки умеренный муссонный с выраженными континентальными чертами. Средняя температура июля достигает плюс 20–21 °С, а января минус 17–21 °С. За год в бассейне выпадает в среднем 600–630 мм осадков (от 500 мм в западном до 700–1000 мм в восточном и юго-восточном районах), подавляющая их часть приходит с летним муссоном. Межгодовая амплитуда осадков может достигать 300 мм в летние месяцы и до 40 мм в зимние, что связано с интенсивностью муссонной циркуляции. Испарение с поверхности суши в бассейне составляет от 570 до 690 мм в год, а с зеркала озера оценивается в 630 мм [3, 4].

В оз. Ханка впадает более 30 рек, самые крупные из которых – Илистая, Мельгуновка, Комиссаровка и Спасовка с площадями водосборов от 5470 до 1260 км^2 и длиной от 220 до 80 км соответственно. Со стороны Китая к

озеру проложен канал Донгди (40–50 км) от р. Мулинхэ, в связи с чем последняя также считается крупным, но искусственным притоком Ханки. Из озера вытекает единственная р. Сунгача (210 км), впадающая в р. Уссури. Среднегодовой речной приток в озеро составляет 2 км^3, в том числе 1,87 км^3 с российской части водосбора. От маловодных к многоводным годам эти значения меняются в пределах 0,4–5,0 км^3. Среднегодовой сток по р. Сунгача оценивается в 1,5 км^3 с межгодовой вариацией от 0,8 до 2,5 км^3 [4–6].



Условные обозначения

- Государственная граница
- Пункты наблюдений:
  - за речным стоком (замыкающие створы)
  - за уровнем воды в озере
  - за атмосферными осадками
- Реки
- Водоёмы
- Водно-болотные угодья
- Геоморфологический водосбор озера Ханка
- Бассейны основных притоков, ограниченные замыкающими створами
- Бассейн реки Мулин, ограниченный местом переброски стока в озеро (эпизодическая часть водосбора озера)
- Бассейн реки Сунгача за пределами водосбора озера

Рисунок 1. Водосбор оз. Ханка и примыкающие бассейны рек Сунгача и Мулинхэ (составлено по: [4, 8–10])[1][2]

Figure 1. The Lake Khanka catchment and the adjacent Sungacha and Muling river basins

[1] NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM GL1) Global 30 m. OpenTopography, 2013. Available at: https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSRTM.082015.4326.1.

2 Global Surface Water Explorer. Available at: https://global-surface-water.appspot.com/#features.

Гидрологический режим непосредственно озера Ханка описан в монографиях [3, 4]. Условное время водообмена озера составляет 10 лет, в связи с чем оно относится к слабопроточному водоёму. В силу большой площади водной поверхности и малых глубин озеру свойственны колебания УВ – многолетние с амплитудой до 2 м и суточные с амплитудой до 1,5 м. Последние зависят от ветровых денивеляций (сгонов и нагонов воды под действием ветра) и носят характер продольных перекосов УВ с синхронным ходом. УВ в озере также испытывают суточные и сезонные малые колебания, связанные с приливами и отливами, которые трудно зафиксировать ввиду наложения сгонно-нагонных явлений, непрерывно изменяющегося речного стока, выпадения атмосферных осадков и др. [7].

Причины многолетних колебаний УВ. До 2010-х гг. исследовательские работы в отношении озера и его состояния появлялись нечасто [3, 11–13]. Фундаментальным исследованием остаётся монография М.Г. Васьковского [3], в которой он оценил водный баланс озера и указал на естественную причину цикличности колебаний УВ – ритмичность и интенсивность муссонной циркуляции, определяющей увлажнённость территории. Примечательным также является вывод К.Г. Баканова [11], разработавшего непрерывную нелинейную вероятностную модель проточного водоёма, об увеличении продолжительности группировок лет различной водности с ростом объёма водопотребления из оз. Ханка, а также о нелинейности связи стока из озера от УВ в нём.

В коллективных монографиях, посвящённых в основном проблемам, связанным с недавним беспрецедентным повышением УВ в оз. Ханка [1, 2], отмечается, что колебания УВ имеют примерно 30-летнюю естественную цикличность, но в последние десятилетия появилась тенденция к сокращению продолжительности цикла (между двумя последними максимумами прошло около 20 лет), при этом региональные и локальные климатические, гидрологические и прочие причины колебания остаются не до конца изученными. После достижения УВ исторически высоких значений в 2015 г. стал подниматься вопрос об антропогенном влиянии на гидрологический режим озера. Согласно оценкам[3], корреляция между накопленными за несколько лет осадками и средним УВ в конкретном году за исторический период достигала 0,9, на основе чего можно заключить, что УВ в озере определяется не за счёт речного стока, формируемого осадками текущего года, а главным образом за счёт подземного притока, формируемого осадками за предшествующие 5–7 лет, однако подобная условно естественная связь с 2000-х гг. стала нарушаться в силу регулируемого сброса паводковых вод из р. Мулинхэ в оз. Ханка через гидротехнические сооружения (ГТС) в оз. Мал. Ханка.

А.Н. Махинов и В.И. Ким [14] указывают на слабую связь колебаний с глобальными климатическими процессами и выдвигают гипотезу о наложении повышенной увлажнённости водосбора озера на повышенный подземный приток, обусловленный предыдущим периодом высокого атмосферного увлажнения на фоне затруднённого стока р. Сунгачи в маловодный период. Идею о затруднённом стоке из озера развивает В.А. Раков [7], связывая высокие УВ с нарушениями местных базисов эрозии рек Сунгача и Уссури: с одной стороны, Сунгача имеет малый уклон и интенсивно меандрирует, а с другой – в районе её устья произошло искусственное сужение русла Уссури, что создаёт подпор воды. Н.Н. Бортин, А.М. Горчаков и Ю.В. Кролевецкая [15] считают, что основная причина повышения УВ – регулярная с 1975 г. переброска в озеро стока р. Мулинхэ, ими же отмечается ограниченность пропускной способности р. Сунгача (бар в районе истока, малый уклон, густая сеть каналов на территории Китая). Ю.Н. Журавлёв и С.В. Клышевская [16]

[3] Кубай Б.В. Проблемы подъёма уровня озера Ханка [Электронный ресурс] // Примпогода. 2015. URL: https://primpogoda.ru/news/comments/boris_kubaj143.

указывают также на периодический подпор со стороны р. Уссури в районе устья р. Сунгачи, что ещё больше затрудняет сток. Помимо этого, было высказано предположение [17], что сейсмические события могут влиять на Приханкайский артезианский бассейн (комплекс подземных вод (ПВ) в бассейне озера) и как следствие изменять баланс водных масс самого озера, а вертикальные движения земной коры могут приводить к подъёму УВ.

Ряд других публикаций также посвящён анализу причин колебания УВ [5, 6, 18–25]. А.Н. Махинов [27] считает, что значимую роль играет изменение гидротермического режима территории бассейна озера в результате сокращения здесь площади лесов. Ю.И. Зуенко, М.Е. Шаповалов и А.С. Курносова [23], подтверждая существующие выводы об увеличении количества осадков на водосборе и затруднённого стока из озера, отмечают, что эти факторы обеспечивают лишь дополнительный механизм современного экстремального роста УВ, и в качестве особой причины выделяют зарегулированность притока воды в озеро: в 2014–2015 гг. в озеро поступил объём притока сверх естественной нормы, а в последующие годы, вследствие изъятия и перенаправления стока, наоборот – меньше нормы. В результате этого УВ после 2016 г. оказался даже ниже, чем мог быть на самом деле. М.В. Болгов и Е.А. Коробкина [25], анализируя водохозяйственную систему Китая в районе оз. Ханка, заключают, что в годы со средней водностью забираемый из р. Мулинхэ сток полностью расходуется на нужды рисосеяния, что на баланс озера может не влиять, так как сбросы воды осуществляются в основном в р. Сунгача. При пониженной водности водных ресурсов Мулинхэ для орошения недостаточно и требуется забор воды насосными станциями (мощностью до 100 м^3/с) из Ханка и Мал. Ханки. В многоводные годы вода из Мулинхэ подаётся в канал Донгди, и для предотвращения затопления территорий все излишки воды сбрасываются в Мал. Ханку, а оттуда, через сбросные ГТС – в Ханку. С учётом предполагаемых характеристик ГТС утверждается [25], что за несколько месяцев при таких перебросках воды в озеро УВ может подняться примерно на 20–25 см.

В 2022 году сотрудниками ГГИ была издана обобщающая монография по гидрологии оз. Ханка [4], где на основе проведённых в течение нескольких лет исследований был уточнён водный баланс озера для периода с 1949 по 2015 гг. Основной вклад в современное повышение УВ, как утверждают авторы, вносят естественные процессы (суммарный речной приток, осадки на поверхность зеркала и испарение с него), доля которых составляет 82 %, доля антропогенных факторов – 18 %. Отмечая наложение одних на другие, авторы объясняют современные экстремально высокие УВ с 2015 г.

Поскольку оз. Ханка является трансграничным, проблема колебаний УВ актуальна и для Китая. В частности, в статье [10] оценивалось влияние антропогенных и естественных факторов на гидрологический цикл оз. Мал. Ханка и сделан вывод, что наибольший вклад в повышение УВ вносит изменение климата, и лишь на втором месте по важности – человеческая деятельность.

В последнее время обилие публикаций о причинах колебаний УВ в оз. Ханка показало, что единства во мнении среди учёных нет – одни авторы выделяют какой-либо ведущий фактор, другие указывают на сочетание как природных, так и антропогенных причин. В то же время полноценный сбор информации о режиме озера и его притоков остаётся затруднённым как вследствие недостаточно развитой сети наблюдений (например, отсутствие регулярных измерений стока р. Сунгачи), так и трудно- или недоступности данных с китайской части водосбора озера, особенно учитывая, что за последние десятилетия эта часть подверглась значительному преобразованию.

Роль подземного стока. Среди прямых факторов водного режима озёр – осадки, речной приток, водохозяйственная деятельность – неочевидным остаётся роль ПВ. Для оз. Ханка подземный сток – неизвестная в количественном отношении переменная. Прямой расчёт его не обеспечен достаточным числом гидрогеологических скважин, и в настоящее время наблюдения на них не ведутся. Сведения о ПВ района содержатся в некоторых публикациях [3, 26, 27], где сообщается следующее.

Приханкайскую низменность занимает Приморский сложный артезианский бассейн, в котором ПВ не имеют сплошного распространения: малые артезианские бассейны взаимосвязанно рассредоточены вокруг озера, первыми от поверхности залегают озёрный водоносный горизонт и трещинно-пластовые воды, ниже – мощный (40–50 м) горизонт с высокой водообильностью. К западу от артезианского бассейна преимущественно развиты трещинные и напорные трещинно-жильные воды с низкой водообильностью. В среднем на Приханкайской низменности глубина залегания грунтовых вод незначительна – от 2 до 10 м, встречаются участки с глубиной до 30 м. Питание ПВ получают за счёт атмосферных осадков преимущественно в горной периферии водосбора озера, откуда движение ПВ направлено к центральной части бассейна, а их разгрузка происходит путём перетекания из нижележащих горизонтов в вышележащие (вплоть до приповерхностных) как в реки, так и возможно, в само озеро. Зона интенсивного водообмена охватывает верхние водоносные горизонты мощностью до 100 м, где сказывается дренирующее влияние речной сети. Здесь приток ПВ в озеро происходит главным образом у западного и южного берега, а движение ПВ по бассейну преимущественно направлено вдоль стока основных рек (Комиссаровки, Мельгуновки, Илистой) и их притоков.

В ранних водобалансовых расчётах подземный сток не учитывался: М.Г. Васьковский [3], например, счёл его незначительным. Последующие исследования, наоборот, стали предполагать существенный объём этой составляющей. Исходя из информации в Диагностическом анализе бассейна оз. Ханка [12], большие запасы ПВ залегают как в китайской, так и в российской частях бассейна, особенно в Приханкайском артезианском бассейне; отмечается также зависимость гидрологического режима озера от притока и оттока ПВ.

В исследовании В.А. Чудаевой [13] предполагается, что в западной части Ханкайской депрессии подземный сток может быть сопоставим с поверхностным, а в юго-восточной части подземные горизонты (обнаруженные на глубине 15 м) могут пополняться озёрными водами. Указывается общее направление движения ПВ от юго-западной части бассейна озера к северо-восточной, а их поступление в водоём может происходить как по разломам в коренных породах, так и по аллювиальным отложениям, что оказывает влияние на химический состав поверхностных вод. Так, на удалении от берега в озёрных водах В.А. Чудаевой зафиксировано повышенное содержание некоторых металлов и редкоземельных элементов, что указывает на их разгрузку непосредственно в озеро через дно. Также вблизи глубинных разломов (район устья р. Спасовка) на песчаном дне озера был отмечен выход пузырьков газа, что могло быть связано с субаквальной разгрузкой подземных вод.

Подземному стоку в озеро способствуют и другие факторы. В Атласе почв юга Дальнего Востока [28] отмечается, что в холодный период благодаря термическому градиенту сезонно-мёрзлый слой почв насыщается влагой до полной влагоёмкости, т.е. запасы воды в нём становятся высокими, а в тёплый период за счёт обильных муссонных дождей образуется верховодка и в суглинистых почвах получают развитие процессы гидроморфизма.

Оценка подземного стока в озеро была получена с помощью гидрологической модели HBV [29], при этом время транзита основной части грунтовых вод, сосредоточенной в возвышенных западной и южной частях бассейна озера, достигает 2–3 лет. Сама разгрузка происходит как через речную сеть, так и, возможно, субаквально у западного берега, сложенного песчаными и супесчаными отложениями. Авторы связывают длительное стояние высокого УВ в озере с наложением периода повышенного речного притока и времени разгрузки объёма ПВ, накопленного за предыдущие 2–3 года.

Материалы и методы

Факторы влияния на УВ в водоёмах имеют уникальную временную и пространственную частоту, что усложняет причинно-следственные связи колебаний УВ, однако эти факторы часто рассматриваются как линейные – другими

словами, колебания УВ являются следствием отдельных составляющих водного баланса [30]. Так, в механизме колебаний УВ оз. Ханка можно выделить следующие главные составляющие: в приходной части – осадки, выпадающие на зеркало озера, и речной приток, который в совокупности с подземным притоком представляет собой просочившуюся часть осадков, выпадающих на водосбор озера (без его зеркала); в расходной – испарение с зеркала и речной сток по р. Сунгача. В пределах российской части водосбора наблюдения осуществляются сетью Приморского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (рисунок 1): в 14 пунктах – за осадками (из которых 7 метеостанций и 7 отдельных осадкомеров); на нескольких гидрологических постах – за речным стоком (6 из которых – замыкающие створы); непосредственно за УВ в озере – на двух озёрных постах. Измерение испарения в бассейне озера производится только на двух береговых метеостанциях, что не совсем точно отражает эту величину для поверхности водоёма, а наблюдения за стоком р. Сунгача производилось эпизодически [4]. В связи с этим расходные составляющие имеют оценочный характер, поэтому в анализе не учитывались. На китайской территории наблюдения проводятся в бассейне р. Мулинхэ в трёх осадкомерных пунктах, нескольких гидрологических постах и одном озёрном посту на оз. Мал. Ханка [10], однако данные этих наблюдений отсутствуют в открытом доступе и учесть их не представляется возможным. На основе имеющихся российских данных для анализа выбран период в 70 лет – с 1951 по 2020 гг.

Измерения осадков в бассейне оз. Ханка отличаются нерегулярностью. Половина пунктов наблюдений содержит пропуски разной периодичности, особенно это характерно до 1955 г. (отсутствие измерений) и с 2016 г. (некруглогодичные). Поскольку для оценки общего увлажнения в бассейне осадки следует усреднить, то во избежание некорректности результата пропуски были восстановлены с помощью глобальной базы данных климатического реанализа CRU-TS-4.09[4] [31], представленной в виде растровых ячеек с пространственным разрешением в 2,5 минуты градусной сетки, которые содержат ежемесячные величины выпавших на этом участке осадков. С помощью инструментов программного обеспечения ArcGIS данные из растровых ячеек были извлечены в виде годовых сумм осадков в точечные объекты с координатами пунктов наблюдений.

Слой осадков, измеренный в нескольких неравномерно распределённых по большой площади пунктах, может лишь приблизительно характеризовать поле генетически однородных осадков и их реальное количество на определённой территории. В связи с этим данные климатического реанализа извлекались не только в точки, но и в площадные объекты, что позволило охватить весь водосбор озера и учесть территории, данные наблюдений с которых отсутствуют в открытом доступе (бассейн р. Мулинхэ). Помимо этого, поскольку площадь зеркала озера ежегодно колеблется в зависимости от УВ, то при помощи глобальной базы данных по поверхностным водам [9], отображающей местоположение и временное распределение водных объектов за период 1984–2021 гг., был выделен вариант зеркала при высоких стояниях УВ с площадью 4314 км^2 (за исключением подверженных затоплению водно-болотных угодий к востоку от озера, так как они не составляют с зеркалом единого целого из-за обилия сплавин). Для этой площади осадки извлекались отдельно. Таким способом получены смоделированные усреднённые ряды осадков над зеркалом озера и его водосбором (рисунок 2).

За объём речного притока в озеро брались значения стока на замыкающих створах. Для основных притоков озера они расположены на следующем расстоянии от устья: 25 км у рек Комиссаровка и Мельгуновка, 60 км – у Илистой и Спасовки. Для последних существует недоучёт полного стока, так как створы расположены выше

[4] Historical monthly weather data. WorldClim. Available at: https://www.worldclim.org/data/monthlywth.html.

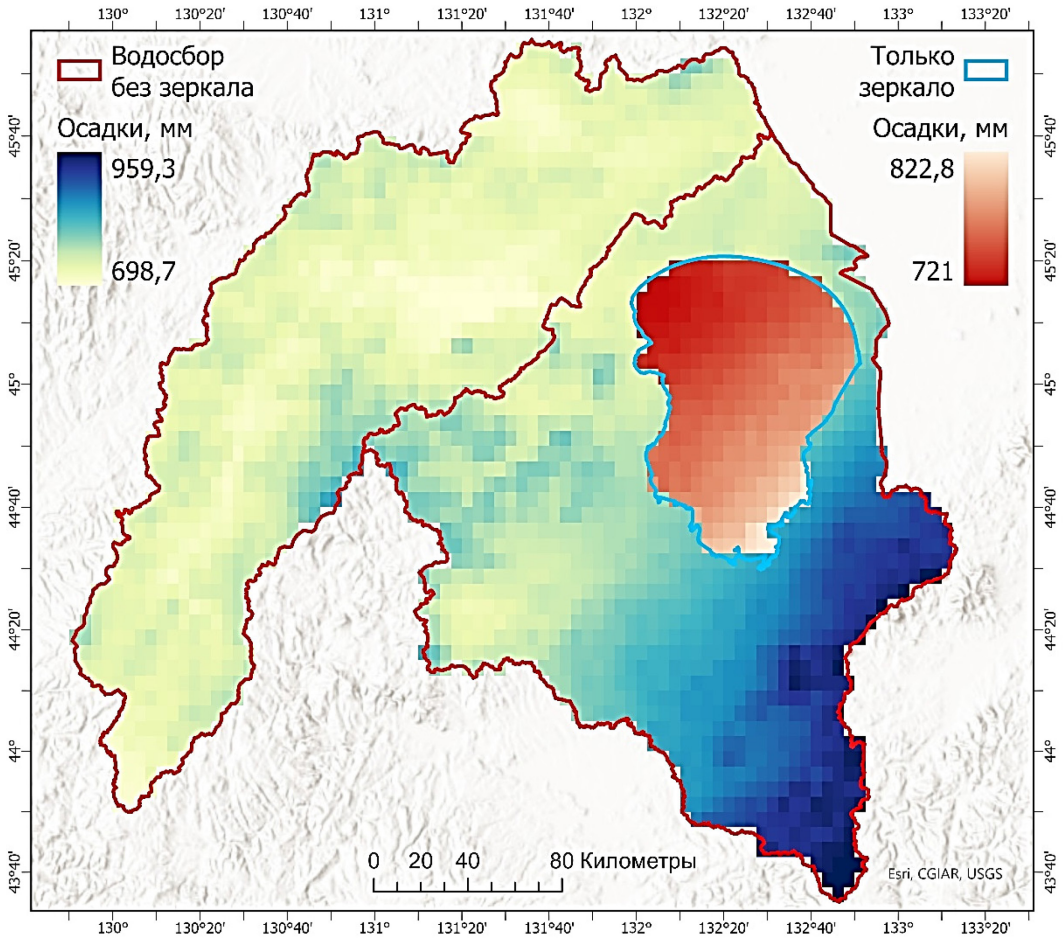


Рисунок 2. Извлечение растровых ячеек с данными климатического реанализа CRU-TS-4.09 на примере суммы осадков (в мм) за 2020 г. (составлено по [9, 31])

Figure 2. Extraction of raster cells with climate reanalysis data using the precipitation amount (mm) for 2020 as an example

впадения их относительно крупных притоков: на Илистой – выше впадения рек Березянка, Черниговка и Дмитриевка; на Спасовке – выше впадения рек Кулешовка и Одарка. На притоках Спасовки, однако, имеются стоковые посты, поэтому сток этих притоков суммирован со стоком основной рекой.

Наблюдения за стоком также характеризуются пропусками. Полный ряд имеется только для рек Комиссаровка и Илистая, тогда как на р. Мельгуновка измерения прекращены с 1996 г. (пост ныне не действует), на р. Спасовка в сумме с её притоками – нет данных до 1974 г. Для восстановления пропусков выбран метод гидрологической аналогии с последующим приведением данных к длительному периоду аналитическим способом (с помощью регрессионного анализа) [32, 33]. Реки-аналоги для расчётных створов были подобраны в пределах водосбора оз. Ханка, так как между собой географические условия бассейнов этих рек преимущественно совпадают [3]: для Мельгуновки – смежная река-аналог Комиссаровка, для Спасовки – Илистая, для Кулешовки и Одарки – Спасовка. В дополнении к анализу из монографии [4] взят рассчитанный тем же методом ряд речного притока в совокупности с российской и китайской частей водосбора Ханки. Поскольку этот ряд ограничен 2015 г. для восстановления данных за 2016–2020 гг. в качестве ряда-аналога выбран суммарный приток рек Комиссаровки, Мельгуновки, Илистой и Спасовки, т.к. они составляют подавляющую долю притока в озеро.

Озёрные посты Астраханка и Турий Рог, на которых измеряют УВ, в силу своего расположения на западном берегу Ханки, не могут отражать истинную величину УВ,

усреднённую по всей площади зеркала озера на заданный момент. Дополнительные погрешности вносят ветровые денивеляции, и это характерно не только для противоположных берегов, когда, например, в суточном разрезе на западном наблюдается сгон, а на восточном – нагон, но и для одного западного берега, когда в Турьем Роге (север) наблюдается сгон, а в Астраханке (юг) – нагон [3]. Для устранения влияния денивеляции использован ряд УВ с исключением сгонов и нагонов, полученный в работе [29] с помощью методов регрессии и декомпозиции.

Данные по среднегодовым значениям УВ (с исключением сгонов и нагонов), годовым суммам осадков и объёмам речного притока с восстановлением пропусков подвергались проверке на однородность с помощью статистических критериев (экстремальных значений, средних и дисперсий), а также на наличие автокорреляции и тренда [34]. Для критериев средних и дисперсий ряды разбивались на 2 выборки, а годом нарушения между ними выбран 1975 год, с которого отмечается расширение площади орошаемого земледелия в бассейне Ханки и увеличенный объём переброски вод р. Мулинхэ в озеро [4]. Смоделированные данные прошли верификацию и валидацию, для чего были выбраны 4 пары рядов (смоделированные по отношению к наблюдённым): a) УВ, усреднённый между постами – без сгонов/нагонов и с ними; b) осадки, осреднённые по 14 пунктам наблюдений – с восстановлением пропусков и без; c) осадки, усреднённые по всему водосбору (за исключением зеркала) и по 14 пунктам с восстановлением пропусков; d) осадки, усреднённые по зеркалу и по двум береговым пунктам. Предполагается, что если смоделированные осадки для геоморфологического водосбора озера соответствуют наблюдённым, то и смоделированные осадки для бассейна р. Мулинхэ тоже будут близки к действительным. Верификация производилась с помощью общепринятых статистических метрик [35–38]: среднеквадратические отклонение (σ), средние систематическая (ME), абсолютная (MAE) и квадратическая (RMSE или S) ошибки; валидация – с помощью коэффициентов корреляции (R) и эффективности Нэша-Сатклиффа (NSE), а также отношения среднеквадратической ошибки к среднеквадратическому отклонению (S/σ). Категории значений для метрик валидации принимаются следующими: «хорошо» при $R \geq 0{,}87$, $NSE \geq 0{,}80$, $S/\sigma \leq 0{,}5$; «удовлетворительно» при $R = 0{,}86 \ldots 0{,}61$, $NSE = 0{,}79 \ldots 0{,}36$, $S/\sigma = 0{,}51 \ldots 0{,}80$; «плохо» при $R = 0{,}60 \ldots 0{,}31$; $NSE \leq 0{,}35$, $S/\sigma = 0{,}81 \ldots 1{,}00$; «бесполезно» при $R \leq 0{,}30$ и $S/\sigma \geq 1{,}01$.

В многолетнем разрезе отклики УВ на осадки и речной приток могут иметь нелинейный характер [11]. Так, в многоводные годы запасы влаги в бассейне накапливаются, а в маловодные годы срабатываются [32]. Тем самым представляется, что озёрный запас воды, который можно выразить в виде среднегодового УВ, обусловлен не только приходными составляющими этого года, но и их накоплением за предыдущий период и последующей сработкой. В связи с этим накопленный объём отдельных приходных составляющих рассчитывался как сумма за предшествующие годы и представлялся в виде суммарных выборок лет (2-, 3-, 4-леток и т.д.), нарастающих от текущего года к прошедшим. Количество таких лет зависит от ситуации – конкретно для оз. Ханка можно ограничиться десятью предшествующими годами в связи с временем водообмена, оцененным в 10 лет. Длина выборок при таких манипуляциях изменяется незначительно – с 70 лет при сравнении текущих лет до 60 лет при сравнении текущего года с десятью предыдущими, поэтому полученные ряды принимаются репрезентативными и однородными, что позволяет их сравнивать без потери достоверности.

Сравнение суммарных продолжительностей осадков и речного притока с текущим УВ в озере проводилось методом корреляционного анализа [32]. В целом принято считать, что достаточная теснота связи определяется значениями коэффициента корреляции (R) не менее 0,75 [39], поэтому эта величина принята за граничное условие оценки тесноты связи. Визуально многолетнюю

динамику процессов и их сравнение в наилучшем виде отображают разностные интегральные кривые, так как они сглаживают межгодовые колебания, позволяя отследить многолетние циклы и отдельные тенденции; метод расчёта ординат интегральных кривых ($\int(t)$) приведён в [39].

Учитывался также следующий момент. Накопление влагозапаса в бассейне происходит как в самом водоёме, так и в виде запаса ПВ [30, 40]. Влияние последних на УВ в озере не является очевидным: если осадки, выпадающие на зеркало озера, напрямую контролируют УВ в нём, то осадки, выпадающие на поверхность водосбора, требуют какого-то времени на инфильтрацию в ПВ и на миграцию в область их разгрузки: от нескольких месяцев для почвенно-грунтовых вод до нескольких лет для вод глубоких водоносных горизонтов. Можно оценить такую величину запаздывания отклика УВ в озере на предшествующее увлажнение [30], в связи с чем осадки, выпадающие на водосбор и на зеркало озера, анализировались по отдельности.

Результаты и их обсуждение

Анализ исходных данных. Динамика наблюдённых, восстановленных и смоделированных осадков на водосборе оз. Ханка представлена на рисунке 3, где прослеживается синхронность их хода.

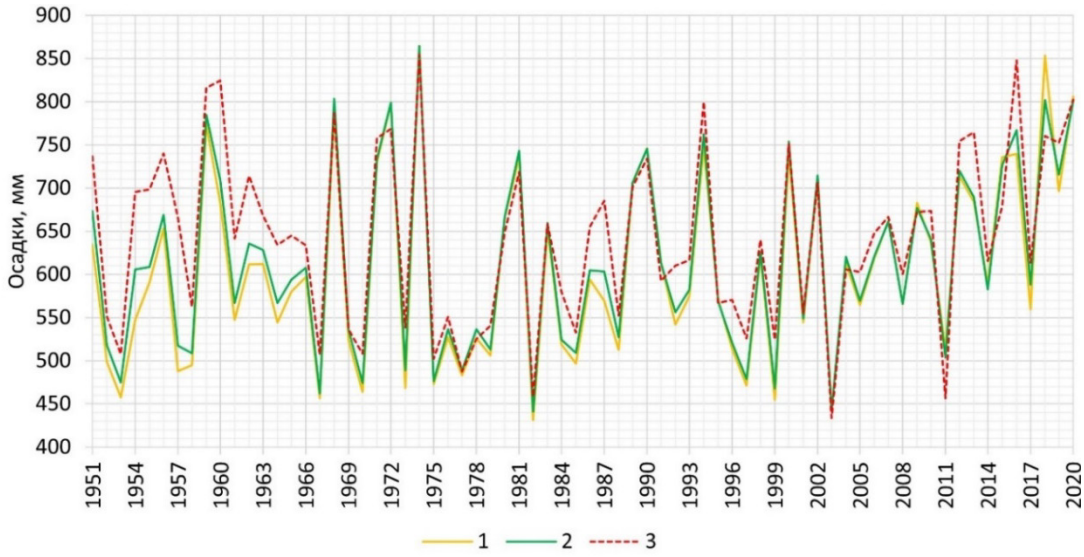


Рисунок 3. Динамика годового слоя осадков (в мм) на водосборе оз. Ханка с 1951 по 2020 гг.: 1 – осреднённый по 14 пунктам ряд осадков с пропусками; 2 – осреднённый по 14 пунктам ряд осадков с восстановлением пропусков; 3 – осреднённый по водосбору ряд смоделированных осадков
Figure 3. Dynamics of the annual precipitation depth (mm) in the Lake Khanka catchment from 1951 to 2020: 1 – a series of precipitation averaged over 14 stations with skips; 2 – a series of precipitation averaged over 14 stations with the restoration of skips; 3 – a series of simulated precipitation averaged over the catchment

Также между измеренными и восстановленными осадками периодически наблюдается небольшая разница в их величине, что связано с числом пунктов наблюдений с пропусками за конкретный год. Полностью смоделированный ряд данных как по отдельным годам, так и за весь период также в целом соответствует данным наблюдений. До 1966 г., однако, заметно расхождение смоделированных и наблюдённых данных, что, скорее всего, объясняется не применёнными к исходным данным поправочными коэффициентами на смачивание и выдувание, без которых существовала погрешность в измерении осадков приборной базой тех лет [4].

Результаты оценки объективности выбора рек-аналогов и последующего восстановления пропусков удовлетворяют условиям – коэффициенты корреляции составляют не менее 0,8, а ошибки коэффициента регрессии не

превышают критического значения. Ошибки восстановленных норм стока рек не превышают 10 %, тем самым пропуски приведены к многолетнему периоду с высоким уровнем достоверности. Динамика восстановленных рядов стока отдельных притоков и совокупного стока со всего водосбора отображена на рисунке 4. Прослеживается синхронность стока рек, что говорит о преобладании единых тенденций в пределах бассейна Ханки.

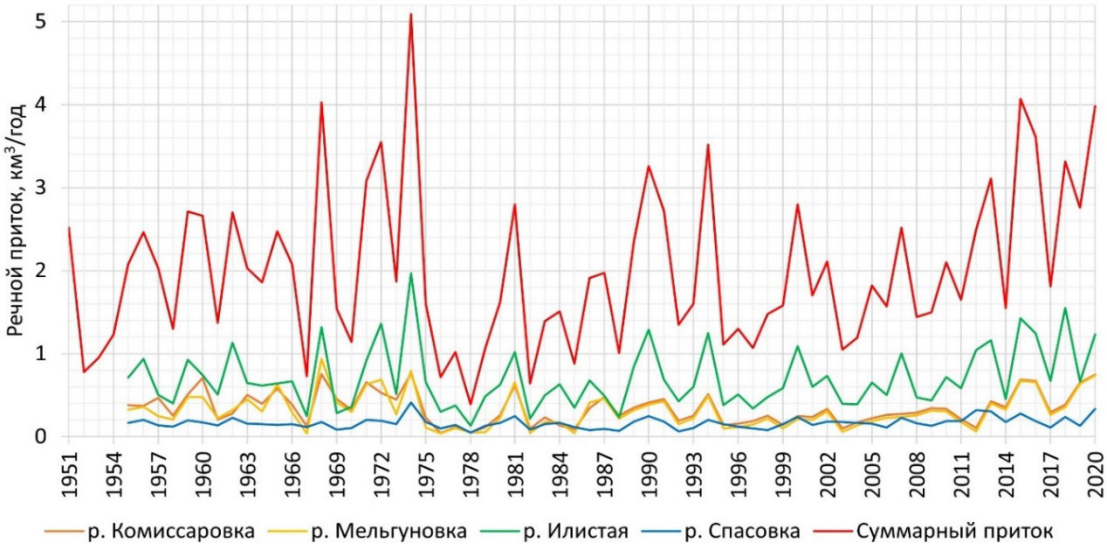


Рисунок 4. Динамика речного притока (в км^3) в оз. Ханка с 1951 по 2020 гг.
Figure 4. Dynamics of river inflow (km^3) to Lake Khanka from 1951 to 2020

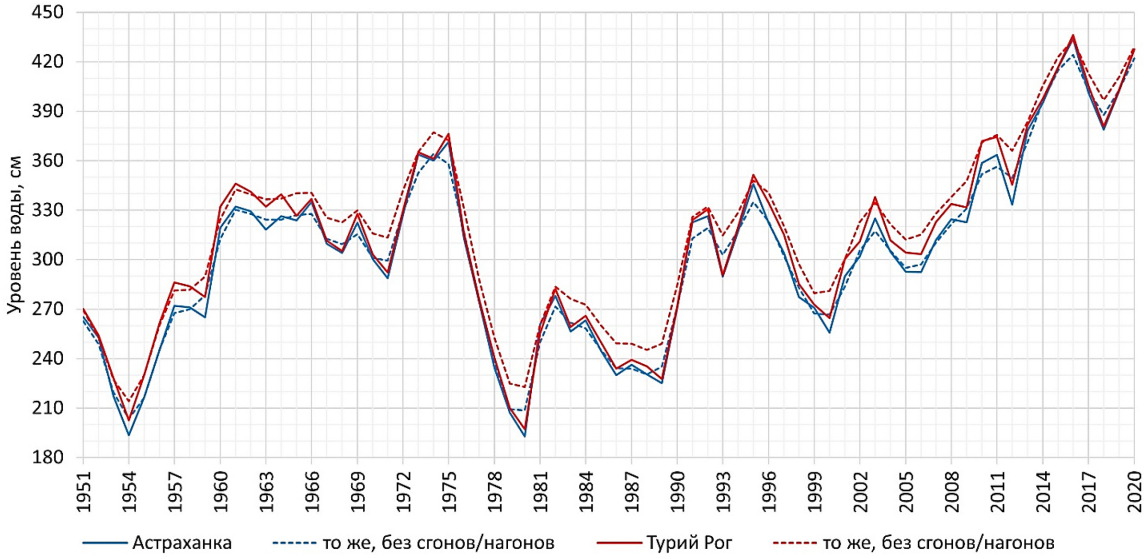


Рисунок 5. Динамика среднегодового УВ (в см) на двух постах оз. Ханка с 1951 по 2020 гг.
Figure 2. The dynamics of the average annual WL (cm) at the two stations of Lake Khanka from 1951 to 2020

Динамика наблюдённых и скорректированных среднегодовых УВ представлена на рисунке 5: в среднегодовом разрезе влияние ветровой денивеляции бывает весьма существенным – разница между УВ, измеренными на постах, периодически то увеличивается на несколько сантиметров (с 1957 по 1964, с 2000 по 2012 гг.), то полностью исчезает. Скорректированный ряд сглаживает межгодовые колебания, вызванные завышением или занижением УВ вследствие сгонов и нагонов, а также устраняет периодичность в разнице между постами, стабильно оставляя её в пределах нескольких сантиметров за весь рассматриваемый период, при этом в Турьем Роге УВ в среднем выше, чем в Астраханке.

На графике в многолетних колебаниях УВ прослеживаются два цикла водности: либо по границам маловодных лет – с 1955 по 1980 гг. и с 1981 по 2006 гг. с максимумами в 1975 и 1995 гг. соответственно, либо по границам многоводных лет – с 1976 по 1995 гг. и с 1996 по 2016 гг. с минимумами в 1980 и 2000 гг. соответственно. Так как УВ зависит от осадков и речного притока, то для последних двух выделяются аналогичные циклы. Ряд с большим количеством лет наблюдений и наличием минимум одного или двух многолетних циклов колебаний водности позволяет считать репрезентативным (согласно [32]) выбранный по имеющимся данным период с 1951 по 2020 г.

Значительная автокорреляция из года в год присутствует только у значений УВ (0,94), тогда как у осадков и речного притока она близка к нулю, что отражает их случайность. Ошибки автокорреляции показывают соответствующие значения – наибольшая у УВ (12 %, но в целом приемлемая), наименьшая у осадков и речного притока (2 % и 6 % соответственно). Отмечается положительный тренд во всех трёх рядах, однако значимым он оказался только для УВ. Рассчитанные статистики критериев экстремальных значений, средних и дисперсий оказались меньше критических, соответственно в последних двух антропогенное вмешательство не повлияло на однородность данных.

Все четыре смоделированных ряда также демонстрируют хорошие результаты тестов (таблица 1). Верификация не выявила каких-либо значимых ошибок: средние между сравниваемыми рядами и их σ отличаются незначительно – у УВ и осадков на водосборе (a, b, c) смоделированные средние несколько выше наблюдённых, у осадков на зеркале (d) ниже, поэтому ME показывает соответственно понижение разницы для первых и повышение для последних; σ для всех данных ниже наблюдённых, что говорит об уменьшении рассеивания в смоделированных данных; MAE и RMSE внутри пар рядов достаточно близки по значениям – выбросы не привели к увеличению ошибки, поэтому везде она меньше 10 % от среднего. Наилучший результат в валидации показали смоделированные ряды по УВ и осадкам (a, b) – R и NSE практически равны единице, а S/σ близка к 0, соответственно УВ без сгонов/нагонов и восстановленные осадки достоверны. Метрики у осадков по реанализу (c, d) несколько ниже предыдущих, но в такой же категории «хорошо» – R>0,9, NSE>0,8, S/σ<0,5, соответственно, пространственно-смоделированные осадки также достоверны.

Таблица 1. Результаты качества смоделированных рядов данных
Table 1. Quality results of the modeled data series

Статистические метрики	**a**		**b**		**c**		**d**	
	x	**y**	**x**	**y**	**x**	**y**	**x**	**y**
Среднее значение	306,4	310,1	604,8	614,3	614,3	641,9	604,8	602,6
σ	55,5	53,5	108,9	105,7	105,7	103,2	106,3	95,4
ME	-3,7		-9,5		-27,6		2,2	
MAE	6,2		12,2		36,9		32,2	
RMSE (S)	7,8		16,6		46,8		44,4	
R	0,99		0,99		0,93		0,91	
NSE	0,98		0,98		0,80		0,82	
S/σ	0,15		0,16		0,45		0,46	

Обозначения: усреднённые данные по: a – УВ между постами (x – наблюдённые, y – без сгонов/нагонов); b – осадкам на 14 пунктах (x – наблюдённые, y – восстановленные); c – осадкам на водосборе (x – восстановленные, y – данные реанализа); d – осадкам на зеркале (x – восстановленные на 2 береговых пунктах, y – данные реанализа)

Designations: averaged data: a – WL between stations (x – observed, y – except for wind setup); b – precipitation at 14 stations (x – observed, y – restored); c – precipitation in the catchment (x – restored, y – reanalysis data); d – precipitation on the water lake surface (x – restored at 2 coastal stations, y – reanalysis data)

Стоит отметить, что смоделированные осадки, усреднённые по площади зеркала (d), сравнивались со средним значением только между двумя береговыми пунктами наблюдений – Турий Рог и Новосельское, так как они находятся на противоположных берегах. Между ними условно можно провести линию, которая практически совпадает с направлением уменьшения выпадения осадков на поверхность озера с юго-востока на северо-запад (рисунок 2). Тем самым осадки в пункте Новосельское примерно отражают наибольшее их количество над озером, а в Турьем Роге – наименьшее. Включение в расчёт пункта Астраханка (что встречается в публикациях [3, 4]) сместит область тяготения в усреднении осадков в сторону юго-запада и увеличит погрешность результата: RMSE повышается на 1 % от среднего, S/σ и NSE переходят из разряда «хорошо» в «удовлетворительно» (0,52 и 0,77 соответственно), R также понижается (0,89), хотя и остаётся в той же категории.

Анализ влияния метеорологических факторов. Расчёты демонстрируют практическое отсутствие связи среднегодового УВ в оз. Ханка с выпавшими в любом том же году осадками, усреднёнными по 14 пунктам наблюдений. Если же учитывать осадки, накопленные за предыдущие годы, то их связь с УВ усиливается. Это выражается в увеличении коэффициента корреляции по мере нарастания суммарной продолжительности предшествующих лет (таблица 2).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между УВ в оз. Ханка и суммами осадков на его водосборе с учётом предшествующих лет за период 1951–2020 гг. и отдельные циклы водности

Table 2. Correlation coefficients between the WL in Lake Khanka and precipitation amounts in its catchment, considering previous years for the period 1951–2020 and individual cycles of water content

Период, гг.	$\sum Y_1$	$\sum Y_2$	$\sum Y_3$	$\sum Y_4$	$\sum Y_5$	$\sum Y_6$	$\sum Y_7$	$\sum Y_8$	$\sum Y_9$	$\sum Y_{10}$
1951–2020	0,283	0,549	0,710	0,771	0,802	0,824	0,797	0,786	0,764	0,732
1971–2020	0,314	0,586	0,726	0,795	0,824	0,846	0,807	0,787	0,769	0,747
1955–1980	0,111	0,419	0,674	0,777	0,792	0,812	0,718	0,737	0,614	0,480
1981–2006	-0,099	0,079	0,304	0,464	0,574	0,648	0,647	0,558	0,591	0,511
1976–1995	0,014	0,289	0,598	0,713	0,843	0,910	0,810	0,647	0,604	0,485
1996–2016	0,361	0,614	0,721	0,854	0,873	0,921	0,868	0,814	0,772	0,766

Обозначения: ∑Yi – сравнение с суммой приходной составляющей за i количество лет, где i=1…10 (1 – только за текущий год; 2 – за последние два года (включая текущий); 3 – за последние три года; и т.д.)

Designations: ∑Yi is a comparison with the amount of the incoming component of the water balance for the i number of years, where i=1...10 (1 – for the current year only; 2 – for the last two years (including the current one); 3 – for the last three years; etc.)

Тесная связь УВ в озере отмечается с суммой осадков за предшествующий период от 4 до 9 лет, максимальная корреляция с коэффициентом 0,82 достигается с суммой за 6 лет. После достижения максимума связь с каждым последующим добавлением года постепенно уменьшается. Если рассмотреть отдельный период в 50 лет (с 1971 по 2020 гг.), то связь за аналогичные выборки лет несколько улучшается (до 0,85 за 6 лет), что можно объяснить сравнительно симметричным распределением циклов водности в этом промежутке. При рассмотрении отдельных циклов, если привязывать их границы к маловодным годам (строки 3–4 таблицы 2), то связь между УВ и суммарными осадками поддерживается только в первый из них (0,81 за 6 лет), тогда как во втором она падает до 0,65. В целом заметно, что такой вариант цикла водности в последние десятилетия нарушился, и минимум УВ в 2006 г. отличается по величине от аналогичных в 1954 и 1980 гг. (рисунок 5), поэтому переход из маловодной в многоводную фазу растягивается. Однако если брать циклы с границами по многоводным годам (строки 5–6 таблицы 2), то коэффициент корреляции в обоих циклах возрастает до 0,91–0,92.

Таким образом объём осадков, выпавших на водосбор озера в течение предшествующих лет, значимо влияет на средний УВ в текущем

году. Это также отражается в разностных интегральных кривых, на которых видна синхронность хода УВ с суммами осадков – наибольшая прослеживается для 6-летней суммы осадков (рисунок 6). Также заметно, что УВ запаздывает по синхронности с осадками за меньшие выборки лет, а особенно с осадками текущего года (в среднем на 3 года). Например, во время первой многоводной фазы более интенсивное увеличение количества среднегодовых осадков началось с 1968 г., достигнув своего максимума в 1974 г., что через 6 лет от начала увеличения прямо отразилось на высоких УВ в озере в 1975–1977 гг. Аналогичные ситуации с задержкой и откликом происходили и в следующие многоводные фазы: с 1989 г. также в течение 6 лет нарастание количества осадков и высокие стояния УВ в 1995–1997 гг.; и с 2012 г. – нарастание с максимумом в 2016 г.

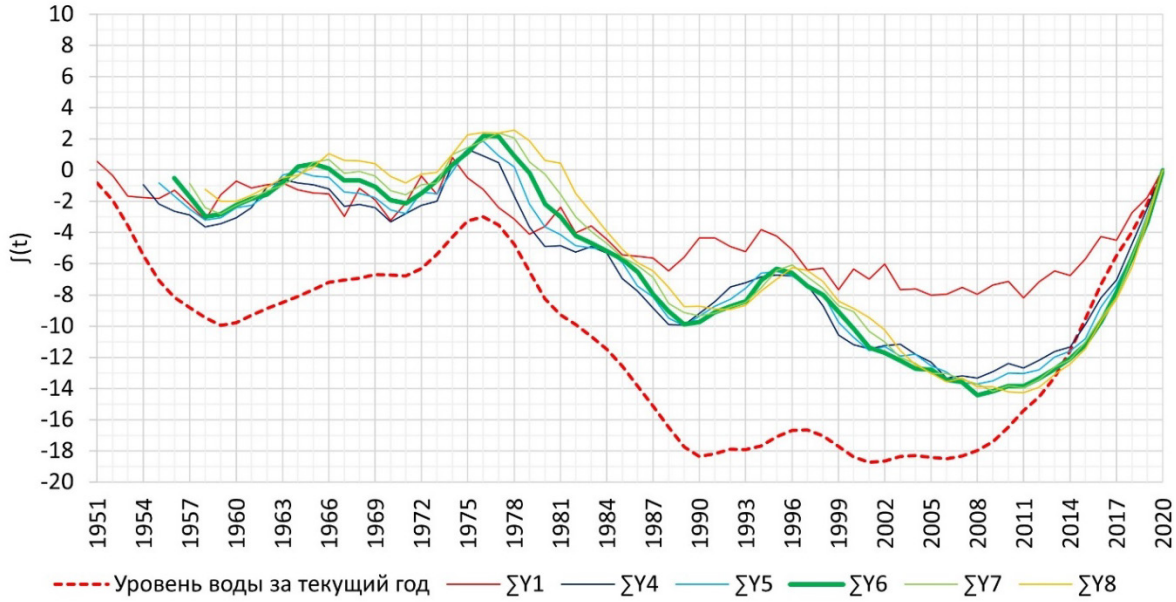


Рисунок 6. Разностные интегральные кривые УВ в оз. Ханка и сумм осадков на его водосборе за 1951–2020 гг.

Figure 6. Differential integral curves of the WL in Lake Khanka and precipitation amounts in its catchment for 1951–2020

Усреднение смоделированных осадков по водосбору (a), отдельно по зеркалу (b), и вместе (c) приводит к получению схожих значений корреляции с осреднёнными по 14 пунктам наблюдений за те же суммарные продолжительности лет, достигая 0,82–0,83 за 6 лет при выборке с 1971 г. (таблица 3). Тем самым смоделированные данные, хоть и исключают пространственную неоднородность осадков, не показывают, как ожидалось, более высокой величины корреляции в связи с УВ. Между собой эти три ряда также практически не различаются по величине корреляции, что говорит о сопоставимости влияния на УВ осадков, выпадающих отдельно на водосбор и отдельно на водное зеркало озера.

Включение в осреднение осадков в бассейне р. Мулинхэ (таблица 3d) для всей выборки отражается на связи хуже (R=0,68), поскольку приращение бассейна реки к водосбору озера, как указывалось ранее, происходит в отдельные годы, когда на этой реке формируются высокие паводки. Корреляция возрастает до 0,77, если включить в усреднение осадки (e), выпавшие в бассейне Мулинхэ только за годы, когда сток с оз. Малая Ханка выше среднего (при среднем значении 0,09 км^3, минимуме 0,01 км^3 и максимуме 0,29 км^3 за период 1951–2015 гг., в котором 24 года были со стоком выше среднего [4], что с большой вероятностью означает сброс в оз. Ханка больших объёмов паводковых вод). Эта корреляция меньше величины связи по сравнению с осреднением по геоморфологическому водосбору, поскольку не весь сток Мулинхэ, даже повышенный, сбрасывается в озёра [4, 10, 25] – часть его

расходуется на орошение прилегающих сельскохозяйственных полей. Поэтому осадки, выпавшие в бассейне р. Мулинхэ, в полной мере не отражают объёма воды, достигшего Ханки, и тем не менее связь между их бассейнами статистически подтверждается.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между УВ в оз. Ханка и суммами смоделированных осадков на его водосборе с учётом предшествующих лет за периоды 1951–2020 гг. и 1971–2020 гг.
Table 3. Correlation coefficients between the WL in Lake Khanka and modeled precipitation amounts in its catchment, considering previous years for the periods 1951–2020 and 1971–2020

Период, гг.	$\sum Y_1$	$\sum Y_2$	$\sum Y_3$	$\sum Y_4$	$\sum Y_5$	$\sum Y_6$	$\sum Y_7$	$\sum Y_8$	$\sum Y_9$	$\sum Y_{10}$
a) Усреднённые по водосбору (в естественных границах и без зеркала)										
1951–2020	0,231	0,454	0,587	0,630	0,659	0,670	0,650	0,642	0,621	0,614
1971–2020	0,325	0,580	0,722	0,789	0,811	0,824	0,782	0,758	0,742	0,739
b) Усреднённые по зеркалу										
1951–2020	0,242	0,462	0,581	0,621	0,642	0,643	0,612	0,591	0,559	0,544
1971–2020	0,341	0,600	0,731	0,797	0,813	0,818	0,764	0,720	0,690	0,674
c) Усреднённые по водосбору с зеркалом										
1951–2020	0,237	0,460	0,586	0,628	0,653	0,660	0,634	0,620	0,594	0,582
1971–2020	0,334	0,592	0,729	0,796	0,816	0,826	0,777	0,744	0,722	0,713
d) Осреднённые по водосбору, включая бассейн р. Мулинхэ										
1951–2020	0,220	0,396	0,501	0,528	0,550	0,550	0,527	0,512	0,486	0,469
1971–2020	0322	0,510	0,623	0,664	0,681	0,671	0,624	0,591	0,565	0,541
e) то же, что и «d», но только за годы повышенного сброса паводковых вод										
1951–2020	0,216	0,413	0,531	0,570	0,601	0,605	0,578	0,562	0,535	0,520
1971–2020	0,312	0,537	0,669	0,736	0,763	0,768	0,716	0,679	0,654	0,636

Таким образом, нарастание тесноты связи УВ с предшествующим объёмом выпавших осадков и синхронность этих рядов подтверждает выявленную разными авторами [3, 4] зависимость естественных колебаний УВ в озере от цикличности атмосферного увлажнения в бассейне – в данном случае от многолетних циклов муссонной циркуляции, которые, как показывают расчёты, длятся в среднем 6 лет и отражают интенсивность трендов нарастания или снижения сумм осадков и, соответственно, с задержкой влияют на УВ.

Анализ влияния гидрологических факторов. Связь среднегодового УВ в оз. Ханка с речным притоком только за какой-либо один год практически отсутствует, тогда как учёт суммарного притока за несколько предыдущих лет усиливает эту связь (таблица 4). Тесная связь УВ отмечается с суммарным речным притоком за период от 3 до 6 лет с максимальной корреляцией (0,81–0,82) за 5 лет. При разделении выборки на отдельные циклы водности (строки 3–6 таблицы 4) результат оказывается аналогичным анализу осадков: в циклах с границами по многоводным годам коэффициент корреляции УВ с притоком возрастает до 0,87–0,88, а в циклах с границами по маловодным годам корреляция нарушается.

По сравнению с суммами осадков, тесная связь УВ с суммарным притоком достигается за меньшие выборки лет (3–6 вместо 4–9), поскольку влияние речного стока на УВ проявляется в более короткие сроки за счёт действительно измеренного в замыкающем створе объёма притока (другими словами, вследствие потерь измеренного объёма осадков на испарение, транспирацию и пр. [32, 41]). Отсюда разностные интегральные кривые речного притока выглядят более сглаженными за тесно связанные выборки лет (рисунок 7) по сравнению с аналогичными для осадков (рисунок 6). Также синхронность кривых стока и УВ выстраивается несколько лучше за все суммарные выборки лет (кроме текущих) в отличие от кривых осадков и УВ.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между УВ в оз. Ханка и суммарным речным притоком с учётом предшествующих лет за период 1951–2020 гг. и отдельные циклы водности

Table 4. Correlation coefficients between the WL in Lake Khanka and the total river inflow, considering previous years for the period 1951-2020 and individual cycles of water content

Период, гг.	**∑Y₁**	**∑Y₂**	**∑Y₃**	**∑Y₄**	**∑Y₅**	**∑Y₆**	**∑Y₇**	**∑Y₈**	**∑Y₉**	**∑Y₁₀**
1951–2020	0,437	0,667	0,781	0,799	0,811	0,793	0,739	0,698	0,654	0,616
1971–2020	0,478	0,687	0,791	0,808	0,818	0,793	0,736	0,694	0,660	0,627
1955–1980	0,354	0,675	0,851	0,871	0,877	0,855	0,735	0,666	0,524	0,407
1981–2006	-0,077	0,186	0,412	0,581	0,694	0,759	0,760	0,693	0,687	0,633
1976–1995	0,136	0,500	0,772	0,845	0,870	0,799	0,651	0,514	0,465	0,403
1996–2016	0,566	0,687	0,772	0,839	0,879	0,864	0,769	0,680	0,610	0,553

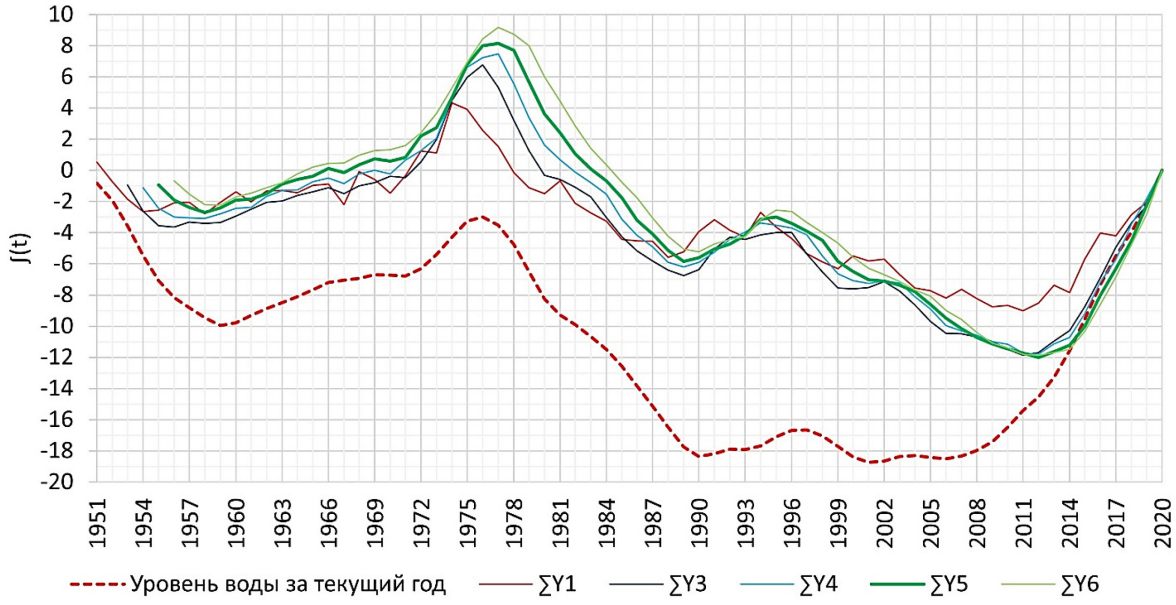


Рисунок 7. Разностные интегральные кривые УВ в оз. Ханка и суммарного речного притока с его водосбора за 1951–2020 гг.

Figure 7. Differential integral curves of the WL in Lake Khanka and the total river inflow from its catchment for 1951–2020

Тесная связь УВ и речного притока прослеживается с довольно малой выборки – 3 лет. Если ранее обнаружено, что основное влияние на УВ оказывает объём осадков, выпавших за предшествующие 6 лет, то тесная связь за первые несколько лет предположительно основывается на постепенной разгрузке в озеро накопившихся на водосборе ПВ. Это можно объяснить следующим образом. Помимо испарения и транспирации потери стока происходят также за счёт просачивания воды в почву и подземные водоносные горизонты. В силу меньшего объёма (относительно речного стока), неравномерного распределения по бассейну и медленной скорости стекания ПВ не успевают разгрузиться в озеро в течение всего лишь одного года. Стоит учитывать и удалённую от водоёма возвышенную периферию водосбора, являющуюся преимущественной областью питания ПВ бассейна озера, в связи с чем ПВ требуется немалое время миграции к зонам разгрузки.

Связь предшествующих сумм осадков, выпадающих на водосбор, с суммарным притоком и притоком отдельных рек в озеро по мере нарастания выборок лет уменьшается неравномерно (рисунок 8). Максимальная корреляция притока и осадков достигается за 1 год (0,70–0,86), что естественно, поскольку большая часть речного стока формируется осадками за короткие периоды и сезоны в пределах одного года. С нарастанием суммарных

выборок лет связь ослабевает, но происходит это 3-летними стадиями (ступенями), что тоже может указывать на вероятную разгрузку ПВ в течение этих 3-летних периодов. При этом бассейны отдельных рек оказываются близки по времени разгрузки ПВ. Таким образом предполагается, что накопившийся в течение трёх лет запас ПВ, постепенно разгружаясь, влияет на УВ в озере, что отражается как в 3-летней задержке отклика УВ на осадки и приток за текущий год (см. рисунки 6, 7), так и вполне согласуется с результатами прежних исследований [29].

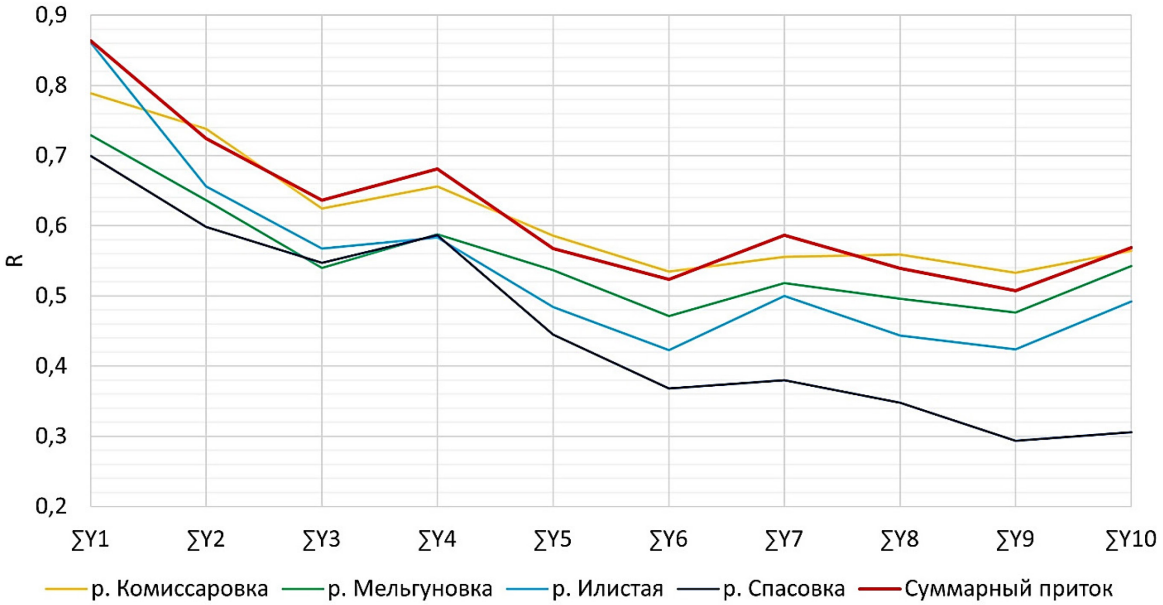


Рисунок 8. Коэффициенты корреляции между речным притоком в оз. Ханка и суммами осадков за нарастающие продолжительности предшествующих лет

Figure 8. Correlation coefficients between the river inflow in Lake Khanka and precipitation amounts for increasing durations of previous years

В проведённом анализе все данные были приведены к календарному, а не к гидрологическому году (для бассейна Ханки такой считается с декабря предыдущего по ноябрь текущего года). Использование последнего несколько уменьшало тесноту связи как осадков с речным притоком, так и УВ в озере с ними. Ухудшение связи можно объяснить тем, что, во-первых, подавляющая часть осадков на водосборе выпадает в летний период, а во-вторых, осадки и речной сток текущего года целиком не определяют средний УВ в озере того же года. Тем самым в многолетнем разрезе смещение границ расчётного года с календарного на гидрологический малозначимо влияет на результат расчёта.

Заключение

Характерные географические условия бассейна озера Ханка – преобладание равнинных ландшафтов с обширными водно-болотными угодьями, муссонный климат с континентальными чертами, развитость орошаемого земледелия – определяют специфику гидрологического режима озера и разнообразные факторы, влияющие на компоненты его водного баланса. В изучении этого режима остаётся ряд дискуссионных вопросов. Так, не до конца складывается единое мнение о причинах многолетних колебаний УВ в озере и их соотношении между собой, поскольку УВ контролируется множеством процессов, а вклад некоторых из них без соответствующих измерений подтвердить не представляется возможным. Это особенно касается подземного стока.

В работе выполнена статистическая оценка роли приходных составляющих водного баланса озера в формирование УВ и выявлены закономерности. Анализ показал, что за период с 1951 по 2020 гг. тесная связь между текущими среднегодовыми УВ и предшествующими суммами осадков отмечается в выборках от 4 до 9 лет, максимальная корреляция (0,82) – в 6-летних выборках, а в разностных интегральных кривых соответствующих рядов прослеживается

синхронность, но с 3-летней задержкой УВ по отношению к осадкам текущего года. По влиянию на УВ осадки, выпадающие на зеркало озера и на водосборы его притоков, оказываются сопоставимы по величине. Тем самым УВ в оз. Ханка во многом зависит от предшествующего увлажнения его водосбора, в общем определяемого режимом муссонной циркуляции, отдельные 6-летние фазы которой отражают разную интенсивность выпадения осадков. Связь УВ озера с осадками в бассейне р. Мулинхэ в годы сброса паводковых вод в озеро также статистически значима.

Связь между УВ и предшествующим суммарным объёмом речного притока отмечается для выборок от 3 до 6 лет с максимальной корреляцией (0,81) за 5 лет. Данная связь становится тесной раньше, чем с выборками лет осадков, что можно объяснить в том числе стоком ПВ и временем их разгрузки. Предполагается, что в течение 3 лет, после которых связь УВ с притоком становится высокой, происходит накопление подземного влагозапаса и его постепенная разгрузка в озеро, что заметно как в многолетней динамике УВ в озере с 3-летним откликом на осадки и приток за текущий год, так и в корреляции предшествующих сумм осадков с текущим речным притоком, которая с нарастанием продолжительности выборок нелинейно уменьшается в виде 3-летних стадий. Таким образом, продолжительная разгрузка ПВ в озеро вносит дополнительный вклад в колебания его УВ.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-47-00022).

Acknowledgments

The work is financially supported by the Russian Scientific Foundation (project 25-47-00022).

Литература / References

1. Трансграничное озеро Ханка: причины повышения уровня и экологические угрозы / Отв. ред. Ю.Н. Журавлёв, С.В. Клышевская. Владивосток: Дальнаука, 2016. 286 с.
   Transboundary Khanka Lake: causes of water rise and ecological threats. In Zhuravlev, Yu.N., and Klyshevskaya, S.V. (eds.). Vladivostok, Dalnauka, 2016. 286 p.
2. Трансграничное озеро Ханка: современное состояние и перспективы развития / Отв. ред. С.В. Клышевская, Т.В. Никулина. Владивосток: ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН, 2021. 296 с.
   Transboundary Khanka Lake: current state and prospects of development of the region. In Klyshevskaya, S.V., and Nikulina, T.V. (eds.). Vladivostok, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, 2021. 296 p.
3. Васьковский М.Г. Гидрологический режим озера Ханка. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 175 с.
4. Водный баланс озера Ханка и его изменения под влиянием природных и антропогенных факторов / Под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2022. 272 с.
   The water balance of the Khanka Lake and its changes under the influence of natural and anthropogenic factors. In Georgievsky V.Y. (ed.). St. Petersburg, State Hydrological Institute, 2022. 272 p.
5. Ананьева Е.Е. Озеро Ханка: колебания уровня и их причины // Астраханский вестник экологического образования. 2016. № 4. С. 48–57.
   Ananyeva E.Ye. Lake Khanka: level fluctuations and their causes. Astrakhan Bulletin of Ecological Education, 2016, no. 4, pp. 48–57.
6. Бортин Н.Н., Горчаков А.М. Причины экстремально высокого уровня воды трансграничного озера Ханка // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 62–84.
   Bortin N.N., Gorchakov A.M. The reasons for the extremely high water level of the transboundary Lake Khanka. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 2016, no. 4, pp. 62–84.
7. Раков А.А. Колебания уровня воды в озере Ханка в связи с изменениями базиса эрозии рек Сунгача и Уссури // Трансграничное озеро Ханка: причины повышения воды и экологические угрозы. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 223–233.

Rakov A.A. Fluctuations in the water level in Lake Khanka due to changes in the erosion basis of the Sungacha and Ussuri rivers. Transboundary Khanka Lake: causes of water rise and ecological threats. Vladivostok, Dalnauka, 2016, pp. 223–233.

8. Xiangcan J., Pingyang Z. Lake Xingkai/Khanka. Experience and Lessons Learned Brief. World Lake Database International Lake Environment Committee (ILEC). Kusatsu, 2006, pp. 447–459. Available at: https://wldb.ilec.or.jp/Lake/ASI-220/datalist.
9. Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature, 2016, no. 540, pp. 418–422. DOI: https://doi.org/10.1038/nature20584.
10. Xiao F., Wang X., Fu C. Impacts of land use/land cover and climate change on hydrological cycle in the Xiaoxingkai Lake Basin. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, no. 47. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101422.
11. Баканов К.Г. Многолетний режим уровня озера Ханка. Автореф. дисс. … канд. тех. наук. М.: Институт водных проблем АН СССР, 1988. 20 с.
12. Diagnostic Analysis of the Lake Xingkai/Khanka basin (People's Republic of China and Russian Federation). In Nakamura T., Xiangcan J., Kachur A. et al. (eds.). Nairobi, UNEP, 2001. 136 p.
13. Чудаева В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2002. 392 с.
14. Махинов А.Н., Ким В.И. Возможные причины колебаний уровня воды в озере Ханка // Трансграничное озеро Ханка: причины повышения воды и экологические угрозы. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 25–30.
Makhinov A.N., Kim V.I. Possible causes of fluctuations in the water level in Lake Khanka. Transboundary Khanka Lake: causes of water rise and ecological threats. Vladivostok, Dalnauka, 2016, pp. 25–30.
15. Бортин Н.Н., Горчаков А.М., Кролевецкая Ю.В. Последствия антропогенного преобразования в трансграничном бассейне озера Ханка // Озёра Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы II Международной конференции. Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2019. С. 40–46.
Bortin N.N., Gorchakov A.M., Kroleveckaja Y.V. Effects of anthropogenic transformation in a transboundary Lake Xingkai/Khanka basin. Lakes of Eurasia: Problems and Solutions. Proceeding of the Second International Conference, Kazan, 2019, pp. 40–46.
16. Журавлёв Ю.Н., Клышевская С.В. Проблема регулирования воды в бассейне озера Ханка (Приморский край) // Вестник ДВО РАН. 2015. № 5. С. 40–52.
Zhuravlev Yu.N., Klyshevskaya S.V. The problem of regulation of the water level in the pool of the Khanka Lake (Primorsky Territory). Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015, no. 5, pp. 40–52.
17. Коломиец А.Г., Герасименко М.Д., Шестаков Н.В. GNSS наблюдения за движениями земной коры в бассейне озера Ханка // Трансграничное озеро Ханка: современное состояние и перспективы развития. Владивосток: ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН, 2021. С. 45–47.
Kolomiets A.G., Gerasimenko M.D., Shestakov N.V. GNSS observations of the Earth's crust movements in the Khanka Lake basin. Transboundary Khanka Lake: current state and prospects of development of the region. Vladivostok, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, 2021, pp. 45–47.
18. Современные возможности и перспективы прогнозирования гидрологического режима бассейна озера Ханка с помощью физико-математического моделирования / А.Н. Бугаец, Ю.Г. Мотовилов, Б.И. Гарцман, А.С. Калугин, Л.В. Гончуков, О.В. Соколов, Н.Л. Фролова, Л.В. Зотов, В.Ю. Григорьев, А.А. Соколов, С.М. Краснопеев, В.В. Шамов, В.И. Ознобихин // Трансграничное озеро Ханка: причины повышения воды и экологические угрозы. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 108–114.
Bugaets A.N., Motovilov Yu.G., Gartsman B.I., Kalugin A.S., Gonchukov L.V., Sokolov O.V., Frolova N.L., Zotov L.V., Grigoriev V.Yu., Sokolov A.A., Krasnopeev S.M., Shamov V.V., Oznobikhin V.I.

Modern possibilities and prospects of forecasting hydrological Lake Khanka basin regime using physical and mathematical modeling. Transboundary Khanka Lake: causes of water rise and ecological threats. Vladivostok, Dalnauka, 2016, pp. 108–114.

19. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л., Болгов М.В., Коробкина Е.А. Многолетние изменения уровня озера Ханка и проблемы его регулирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 3. С. 69–88. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-5.
Georgievsky V.Y., Shalygin A.L., Bolgov M.V., Korobkina E.A. Long-term changes in the level of Lake Khanka and problems of its regulation. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 2017, no. 3, pp. 69–88. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-5.
20. К вопросу о колебаниях уровня озера Ханка / Ю.Н. Журавлёв, С.В. Клышевская, П.А. Новикова, М.А. Гузев, Е.Ю. Никитина, Я.О. Тимофеева // Вестник ДВО РАН. 2018. № 4. С. 88–94.
Zhuravlev Yu.N., Klyshevskaya S.V., Novikova P.A., Guzev M.A., Nikitina E.Y., Timofeeva Ya.O. Study of the Khanka Lake fluctuations. Vestnik of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018, no. 4, pp. 88–94.
21. Сперанская Н.А., Фуксова Т.В. Многолетние изменения основных составляющих водного режима озера Ханка // Метеорология и гидрология. 2018. № 8. С. 53–64. DOI: 10.3103/S1068373918080058.
Speranskaya N.A., Fuksova T.V. Long-term changes in the main components of the water regime of Lake Khanka. Russian Meteorology and Hydrology, 2018, vol. 43, no. 8, pp. 530–538. DOI: 10.3103/S1068373918080058.
22. Балонишникова Ж.А., Цыценко К.В., Крамарева Л.С. Использование водных ресурсов в бассейне озера Ханка // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 3. С. 38–70. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-3-3.
Balonishnikova J.A., Tsytsenko K.V., Kramareva L.S. Water resources use in the basin of the Lake Khanka. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 2019, no. 3, pp. 38–70. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-3-3.
23. Зуенко Ю.И., Шаповалов М.Е., Курносова А.С. Современные изменения уровня озера Ханка и их последствия для промысловых ресурсов // Известия ТИНРО. 2020. № 4. С. 935–350. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-935-950.
Zuenko Y.I., Shapovalov M.E., Kurnosova A.S. Recent changes of water level in Lake Khanka and their consequences for its fisheries resources. Izvestiya TINRO, 2020, no. 4, pp. 935–950. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-935-950.
24. Махинов А.Н. Озеро Ханка: подъём уровня воды, его масштабы и последствия // Природа. 2020. № 11. С. 37–45. DOI: 10.7868/S0032874X20110046.
Makhinov A.N. Lake Khanka: rise in water level, its scale and consequences. Priroda, 2020, no. 11, pp. 37–45. DOI: 10.7868/S0032874X20110046.
25. Болгов М.В., Коробкина Е.А. Оценка характеристик уровенного режима трансграничного озера Ханка в результате реализации проектных решений по расчистке истока реки Сунгача // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 2. С. 53–67. DOI: 10.35567/19994508_2022_2_5.
Bolgov M.V., Korobkina E.A. Assessment of the characteristics of the level regime of the transboundary Lake Khanka as a result of the implementation of project solutions for clearing the source of the Sungacha River. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 2022, no. 2, pp. 53–67. DOI: 10.35567/19994508_2022_2_5.
26. Рынков В.С. Подземные воды Дальнего Востока: учеб. пособие. Владивосток: ДВПИ, 1988. 88 с.
27. Караванов К.П. Подземные воды как источник водоснабжения в Приморском крае: препринт. Хабаровск: Институт водных и экологических проблем ХНЦ ДВО РАН, 1995. 37 с.
28. Росликова В.И., Рыбачук Н.А., Короткий А.М. Атлас почв юга Дальнего Востока России (Приханкайская низменность). Владивосток: Дальнаука, 2010. 247 с.

29. Bugaets A.N., Lupakov S.Yu., Gonchukov L.V., Shamov V.V. Analysis of the relationship between the dynamics of genetic components of river flow and water levels of Lake Khanka. Water Resources, 2025, no. 5. pp. 843–852. DOI: 10.1134/S0097807824605776.
30. Iwaki M., Yamashiki Y., Toda T., Jiao C., Kumagai M. Estimation of the Average Retention Time of Precipitation at the Surface of a Catchment Area for Lake Biwa. Water, 2021, no. 13(12). DOI: 10.3390/w13121711.
31. Harris I., Osborn T.J., Jones P.D., Lister D.H. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Scientific Data, 2020, no. 7. DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
32. Владимиров А.М. Гидрологические расчёты: учебник. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 366 с.
33. Методические рекомендации по определению расчётных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений / Государственный гидрологический институт. СПб., 2004. 67 с.
34. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчётных значений по неоднородным данным / Государственный гидрологический институт. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.
35. Дружинин В.С., Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации: учебное пособие. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2001. 168 с.
36. Moriasi D.N. Model evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE, 2007, no. 3(50), pp. 885–900. DOI: 10.13031/2013.23153.
37. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ. 2015. Вып. 355. 200 с.
Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, 2015, vol. 355, 200 p.
38. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 176–189. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-1-176-189.
Borsch S.V., Simonov Y.A., Khristoforov A.V. Efficiency of streamflow modeling and forecasting. Hydrometeorological Studies and Forecasts, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 176–189. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-1-176-189.
39. Лучшева А.А. Практическая гидрология: учеб. пособие. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 440 с.
40. Zhongpei L., Xiaoqing L., Zhipeng H., Runxiang C., Yuping H., Lin W. Time lag effect of precipitation on groundwater level based on wavelet analysis in the People's Victory Canal irrigation area, China. Scientific Reports, 2025, no. 15, 13 p. DOI: 10.1038/s41598-025-96644-w.
41. Выручалкина Т.Ю., Филатов Н.Н., Дианский Н.А., Гусев А.В. О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озёр // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 9. С. 3–16. DOI: 10.17076/lim480.
Vyruchalkina T.Yu., Filatov N.N., Diansky N.A., Gusev A.V. On forecasting long-term variations of water level in large lakes. Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2016, no. 9, pp. 3–16. DOI: 10.17076/lim480.

Поступила в редакцию / Received 14.11.2025
Принята к публикации / Accepted 16.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шайгузов Руслан Станиславович, ведущий инженер, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН (ТИГ ДВО РАН), г. Владивосток, Россия, SPIN: 7093-9888, https://orcid.org/0009-0001-3246-0955, e-mail: rus-shaiguzov@inbox.ru.

Шамов Владимир Владимирович, доктор географических наук, главный научный сотрудник,

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН (ТИГ ДВО РАН), г. Владивосток, Россия, SPIN: 4913-0239, https://orcid.org/0000-0001-9310-1836, e-mail: vlshamov@yandex.ru.
Лупаков Сергей Юрьевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН (ТИГ ДВО РАН), г. Владивосток, Россия, SPIN: 9365-4537, https://orcid.org/0000-0002-5804-2604, e-mail: rbir@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ruslan S. Shaiguzov, Leading Engineer, Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN-code: 7093-9888, https://orcid.org/0009-0001-3246-0955, e-mail: rus-shaiguzov@inbox.ru.
Vladimir V. Shamov, D.Sc. (Geography), Chief Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN-code: 4913-0239, https://orcid.org/0000-0001-9310-1836, e-mail: vlshamov@yandex.ru.
Sergey Yu. Lupakov, Ph.D (Geography), Leading Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN: 9365-4537, https://orcid.org/0000-0002-5804-2604, e-mail: rbir@mail.ru.