

МНОГОЛЕТНИЕ ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В БАССЕЙНЕ ОЗЕРА ХАНКА

Р.С. Шайгузов^{1,2}, В.В. Шамов²

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

²Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток

Аннотация. Озеро Ханка характеризуется колебаниями уровня воды, вклад в которые вносят естественные и антропогенные факторы. Однако, механизмы естественных колебаний остаются недостаточно изученными. Обсуждается высокая тесная связь уровня воды в озере с предшествующим за многолетний период увлажнением бассейна, представленного в виде атмосферных осадков и речного притока. На основе статистических методов сделано предположение, что многолетняя задержка отклика среднегодового уровня воды на выпавшие атмосферные осадки связана с их удержанием озёрным водосбором и медленной отдачей воды в озеро в виде подземного стока.

Ключевые слова: озеро Ханка, водосбор озера, колебания уровня воды, подземные воды, удержание осадков водосбором, циклы водности.

LONG-TERM HYDROCLIMATIC PROCESSES IN THE KHANKA LAKE BASIN

Shaiguzov R.S.^{1,2}, Shamov V.V.²

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok

²Pacific Institute of Geography FEB RAS, Vladivostok

Abstract. Khanka lake is characterized by fluctuations in the water level, which are influenced by natural and anthropogenic factors. However, the mechanisms of natural fluctuations remain insufficiently studied. It's discussed that the water level is closely related to the previous humidification in the basin (represented in the precipitation and river inflow) over a long period of years. Based on statistical methods, it's assumed that a multiyear delayed response of the annual water level is related to the retention of precipitation by the lake catchment and generation of slow groundwater runoff.

Key words: Khanka Lake, lake catchment, fluctuations in the water level, groundwater, precipitation retention by catchment, cycles of water content.

Введение. Озеро Ханка – крупнейший пресноводный водоём в Северо-Восточной Азии. Оно занимает трансграничное положение между Приморским краем в России и провинцией Хэйлунцзян в Китае. В среднем площадь водной поверхности составляет 4070 км², а объём воды – 18,3 км³, однако в зависимости от колебаний уровня воды эти значения изменяются (от 3940 до 5010 км² и от 12,7 до 24,8 км³ соответственно); наибольшие глубины достигают 5–6,5 м. Водосбор озера является частью бассейна р. Амур и расположен преимущественно в пределах Приханкайской равнины; его площадь без учёта зеркала равняется 16890 км², большая часть которой сосредоточена на территории России [3].

Основными приходными составляющими водного баланса озера являются осадки, выпадающие на зеркало, и речной приток. В среднем за многолетний период в пределах бассейна ежегодно выпадает около 600 мм осадков, а суммарный речной приток составляет 2,1 км³. Основные расходные составляющие – испарение с зеркала (также около 600 мм) и сток через р. Сунгача (1,5 км³) [3].

Ханке, в силу своей большой площади и малой глубины, свойственны значительные колебания уровня воды: как среднемноголетние (с амплитудой до 2 м), зависящие от приходных составляющих, так и суточные (с амплитудой до 1,5 м) вследствие ветровых

денивеляций (сгоны и нагоны). И если последние отражают случайность события, то первые – фазы водности, обусловленные цикличностью атмосферного увлажнения, а также, на наш взгляд, некоторые слабо изученные процессы. Вклад в колебания вносят и антропогенные факторы (сброс и забор при водопотреблении, спуск паводковых вод из оз. Малая Ханка), но в меньшей степени, чем естественные причины [3].

Анализу механизмов естественных колебаний уровня воды в озёрах посвящён ряд исследований [4,10]. Так, японскими авторами [10] утверждается: если осадки, выпадающие на зеркало озера, напрямую влияют на изменение уровня воды в нём, то осадки, выпадающие на поверхность водосбора, могут затрачивать много времени на инфильтрацию в подземные воды и миграцию в область их разгрузки (от нескольких месяцев для стока верховодки до нескольких лет для стока глубоких грунтовых вод), чтобы оказать влияние на уровень. Этими же авторами отмечается, что определение времени удержания водосбором выпавших осадков (периода задержки отклика уровня воды в озере на выпадение осадков) успешно применяется для рек, но не для озёр.

Проблемой остаётся то, что в существующих водобалансовых расчётах для Ханки подземный сток, по которому можно было бы точно оценить время его разгрузки, не учитывается. Ранние работы указывают на его практическое отсутствие [2], тогда как более поздние исследования стали предполагать субаквальную разгрузку подземных вод в озеро [8], чему, в действительности, должны способствовать существование сложного артезианского бассейна [7] и процессы гидроморфизма почв в тёплый период года [6] в пределах Приханкайской равнины.

Заметным прорывом в этом вопросе стала работа [1], в которой с помощью гидрологической модели HBV авторам удалось рассчитать временной интервал разгрузки грунтового стока в Ханку, составляющий 2–3 года. Добегание осадков, выпавших на водосбор в предыдущие 2–3 года, в совокупности с повышенным речным притоком обеспечивают повышение уровня воды в озере.

Материалы и методы. Для того, чтобы в приближённом виде отобразить атмосферное увлажнение в бассейне за предшествующий многолетний период, достаточно, на наш взгляд, прибегнуть к простой операции – суммированию формирующих увлажнение переменных. Основной в этой категории является количество выпавших за год осадков (P , мм). Отдельно стоит учитывать и ежегодный речной сток (Q , км³), поскольку он отражает те же выпавшие осадки, но за исключением испарения и транспирации [4]. Таким способом суммирование проведено для нарастающих от текущего года в прошлое комбинаций лет увлажнения (двухлеток, трёхлеток, четырёхлеток и т.д.). Длина выборок при таких манипуляциях изменяется незначительно, поэтому полученные ряды принимаются статистически однородными, что позволяет их сравнивать без потери достоверности.

Сравнение сумм осадков и стока проводилось с запасом воды в озере, выраженным величиной среднегодового уровня воды за текущий год (WL , см). Для этого применялся коэффициент корреляции r . Он находится в интервале $-1 \leq r \leq 1$, и чем ближе к единицам, тем сильнее связь между сравниваемыми рядами (отрицательные значения говорят об обратной связи). Принято считать, что достаточная для практических целей теснота связи определяется значениями r не менее $\pm 0,75$ [5], поэтому примем эту величину за граничное условие.

За основу брались данные гидрометеорологических наблюдений в бассейне озера за период с 1960 по 2020 гг., выполняемых Приморским УГМС. Регулярные (с 1947 г.) измерения уровня воды проводятся на 2 озёрных постах – Астраханка и Турий Рог (рисунок 1). В силу их расположения исключительно на западном берегу и влияния ветровых денивеляций они могут лишь с неопределённой долей приближения отражать действительный, а точнее осреднённый по площади зеркала для данного момента уровень воды. В работе использован ряд уровней воды с исключением сгонов и нагонов, полученный ранее с помощью некоторых статистических методов [1]. И действительно, при дальнейшем сравнении с осадками и стоком этот ряд смог показать более тесную связь, в отличие от натурных данных. Для удобства отображения на графике уровень между постами был усреднён.

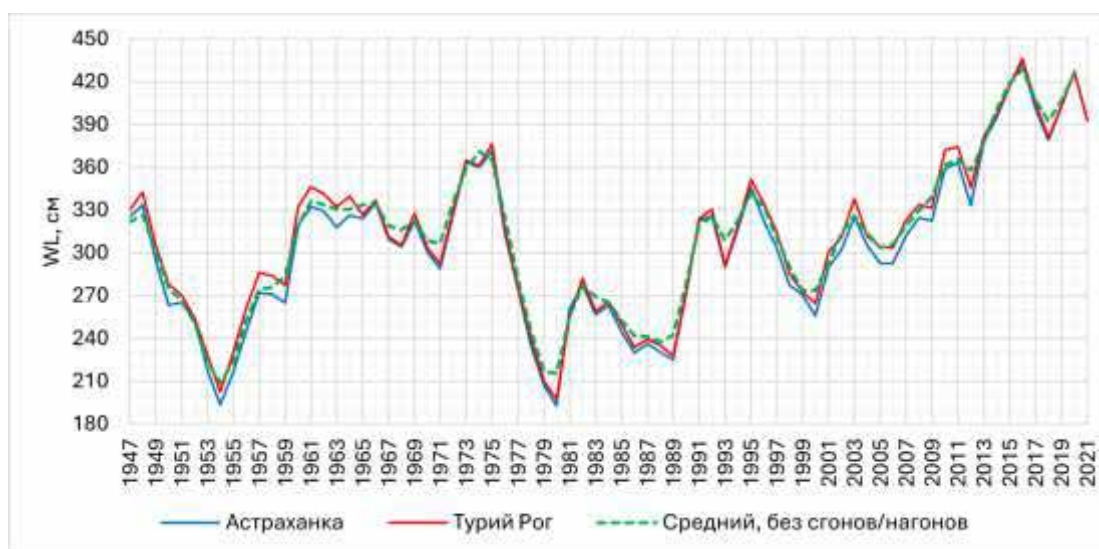


Рис. 1. Среднегодовые уровни воды на озёрных постах с 1947 по 2021 гг.

В пределах бассейна расположены 15 метеостанций, измерения осадков на которых отличаются нерегулярностью. Только половина из них имеет полный ряд наблюдений, тогда как остальные содержат пропуски в несколько лет. Поскольку для оценки общего увлажнения в бассейне осадки требуется усреднить, то во избежание некорректности результата пропуски были восстановлены с помощью глобальной базы данных о климате [9]. Они показали высокую связь с реальными данными за совместный период наблюдений, в связи с чем замена пропусков прошла без потери достоверности. Но стоит иметь в виду, что слой осадков, измеренный на нескольких неравномерно распределённых по большой площади метеостанциях, может лишь приблизительно характеризовать поле генетически однородных осадков и их реальное количество, выпавших на водосборе.

Данные о совокупном речном притоке в озеро взяты из монографии [3], поскольку они содержат сток как с российской части водосбора, так и с китайской, однако выборка оттуда ограничена по 2015 г. На основе имеющихся более современных наблюдений за стоком основных рек-притоков (Мельгуновка, Комиссаровка, Илистая и Спасовка) в их замыкающих створах, с помощью метода гидрологической аналогии ряд данных восстановлен до 2020 г.

Результаты и их обсуждение. Проведённые расчёты позволили выявить практическое отсутствие связи уровня воды (без сгонов и нагонов) с выпавшими на его водосбор осадками и речным притоком только за какой-либо один рассматриваемый год. Если же учитывать осадки и приток в сумме с предыдущими годами, то связь с уровнем воды за текущий год усиливается. Это отражено в увеличении коэффициента корреляции по мере нарастания комбинаций лет предшествующего увлажнения (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты корреляции r между среднегодовыми уровнями воды и суммами приходных составляющих озера с учётом предшествующих лет за период 1960–2020 гг.

WL	Y_1	ΣY_2	ΣY_3	ΣY_4	ΣY_5	ΣY_6	ΣY_7	ΣY_8	ΣY_9	ΣY_{10}
Осадки, выпавшие на водосбор										
Астраханка	0,304	0,563	0,722	0,790	0,820	0,844	0,807	0,785	0,753	0,723
Турый Рог	0,290	0,547	0,707	0,778	0,808	0,830	0,793	0,770	0,738	0,707
Усреднённый	0,297	0,556	0,715	0,785	0,814	0,837	0,800	0,778	0,745	0,715
Речной приток с водосбора										
Астраханка	0,463	0,685	0,799	0,813	0,822	0,798	0,742	0,702	0,664	0,629
Турый Рог	0,448	0,670	0,785	0,800	0,808	0,784	0,728	0,687	0,648	0,611
Усреднённый	0,456	0,678	0,792	0,807	0,815	0,791	0,735	0,695	0,656	0,620

Обозначения: ΣY_i – сумма показателей за i количество лет (1 – только за текущий год, 2 – сумма за текущий и предыдущий, 3 – сумма за текущий и два предыдущих, и т.д.).

Выраженная связь уровня воды с суммой осадков отмечается в комбинациях с 4 по 8 лет, а с суммой притока – с 3 по 6 лет. В этих периодах максимальная корреляция достигается суммами за 6 и 5 лет соответственно (рисунок 2) и в среднем между озёрными постами составляет 0,84 и 0,82. После достижения максимума связь с каждой последующей суммой постепенно уменьшается, но не так резко, как при её нарастании в первых комбинациях лет.

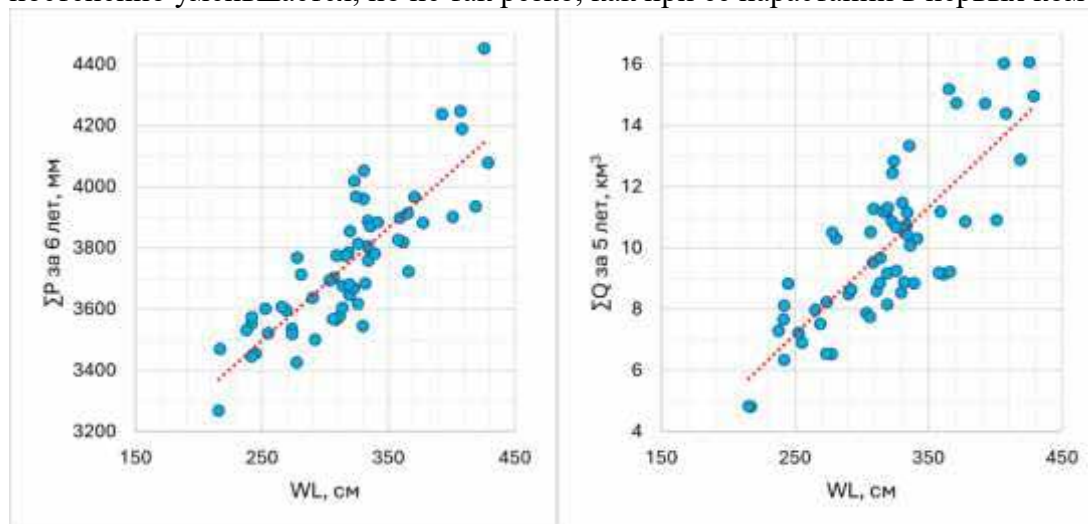


Рис. 2. Графики связи уровней воды с суммами выпавших на водосбор осадков за 6 лет и речным притоком с водосбора за 5 лет

Тем самым предшествующее увлажнение в бассейне озера значительно влияет на текущий уровень воды в нём. Дополнительно это отражается разностными интегральными кривыми рассматриваемых показателей, на которых видна синхронность хода уровня воды с суммами осадков и притока (рис. 3).

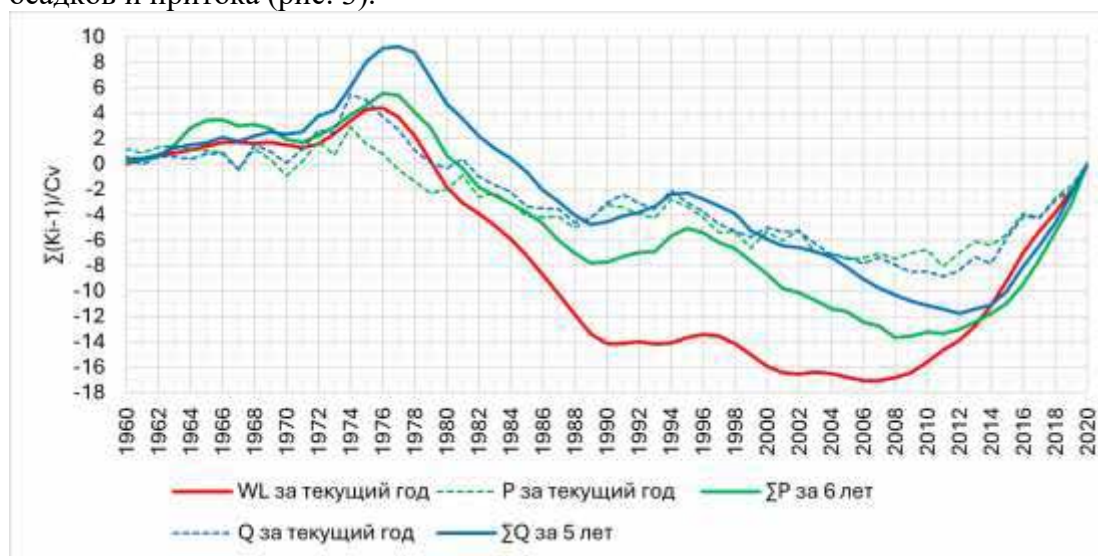


Рис. 3. График разностных интегральных кривых уровня воды и приходных составляющих озера за период 1960–2020 гг.

Во время первой многоводной фазы за анализируемый период заметное увеличение количества среднегодовых осадков началось с 1968 г., достигнув максимума в 1974 г., что через 6 лет от начала увеличения прямо отразилось на высоком стоянии уровня воды в озере в 1974–1977 гг. В маловодную фазу, с 1975 г., также в течение 6 лет происходило понижение уровня воды, которое достигло своего минимума в 1980 г. Аналогичные ситуации с задержкой и откликом происходили в последующие фазы водности на границе 1995 г. (нарастание осадков с 1989 г., высокий уровень воды в 1995 и низкий в 2000 гг.) и 2016 г. (нарастание

осадков с 2012 г., максимальный за всю историю наблюдений уровень в 2016 г. и последующий спад).

Существующая закономерность указывает на наличие долговременной «памяти» озера, запоминающей гидрометеорологические события предшествующих лет. Условно такую «память» можно выразить теснотой связи уровня воды с осадками и речным притоком, сформированными и накопившимися за предыдущее время. Синхронность же хода этих рядов подтверждает высказанную разными авторами [2,3] зависимость естественных колебаний уровня воды в озере от цикличности атмосферного увлажнения в бассейне – в данном случае, от многолетних циклов и ритмов муссонной циркуляции, отдельные фазы которой длятся в среднем 6 лет и отражают интенсивность трендов нарастания или снижения выпадения осадков (и, соответственно, уровня воды).

Однако выпавшие на водосбор осадки имеют свойство накапливаться посредством подземных вод. Большая часть выпавших осадков, как известно, питает водооток и тратится на испарение и транспирацию растениями, а оставшаяся небольшая их часть путём инфильтрации уходит в грунтовые воды или, если инфильтрация затрудняется подстилающими породами, питает преимущественно приповерхностные воды. Этот остаток в силу своего небольшого объёма, неравномерного распространения и медленной скорости стекания за один год разгрузиться в озеро не успевает (особенно если периферия водосбора находится на достаточном удалении от водоёма), в связи с чем ему требуется больше времени.

Данное предположение может подтвердить ход комбинаций лет речного притока (рисунок 4). Речной приток характеризует преимущественно поверхностный сток, который достигает водоёма относительно быстро (в пределах нескольких дней-недель, в зависимости от сезона) после его формирования. Но он также учитывает и подземное питание, которое поступает в реки в разных местах на всей их протяжённости, составляя тем самым некоторую небольшую долю в измеренном на гидрологическом створе расходе воды. И если, как указывалось ранее, за один и тот же год связь с уровнем воды отсутствует, то начиная с суммы притока за 3 года эта связь проявляется, по всей видимости, за счёт постепенной разгрузки накопившихся подземных вод, а уже за 5–6 лет – за счёт отражения циклов атмосферного увлажнения. Таким образом, накопившийся и удержанный водосбором в течение 3 лет остаток от выпавших осадков в виде некоторого запаса подземных вод, отражается на текущем уровне воды в озере, что вполне согласуется с результатами в упомянутой работе [1].

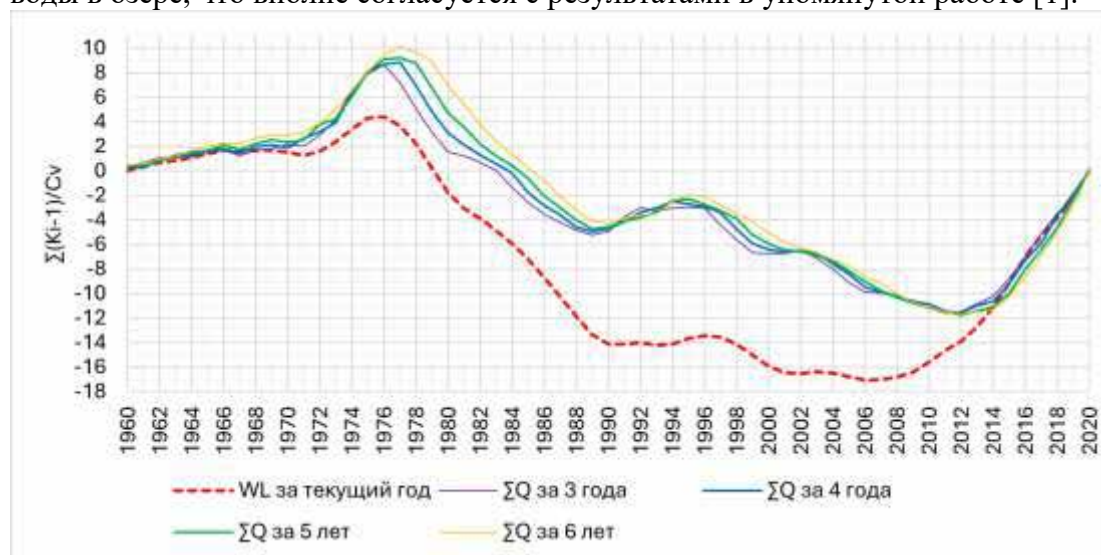


Рис. 4. График разностных интегральных кривых сумм притока за различные комбинации лет за период 1960–2020 гг.

Также стоит принимать во внимание тот факт, что на уровень озера влияют и антропогенные факторы, которые имеют неоднородный и нерегулярный характер. Это вносит некоторый «шум» в тесноту связи, в результате чего она может ухудшаться, показывая тем

самым нарушения в естественных процессах разгрузки подземных вод и отклика уровня воды в озере на них.

Выводы.

На основе выявленных статистических закономерностей в изменениях уровня воды в озере Ханка и предшествующего многолетнего увлажнения в его бассейне, а также высокой тесноты связи между ними, подтверждается существующее мнение о том, что колебания уровня зависят от циклов муссонной циркуляции, выраженных в виде трендов подъёма или спада выпадающих в бассейне осадков длительностью в среднем 6 лет. Поскольку явная корреляция с рассматриваемыми событиями начинает проявляться раньше, мы предполагаем, что это связано с началом разгрузки в озеро подземных вод, накопившихся и удержанных водосбором за предыдущие 3 года, что несёт некоторый отклик на уровень текущего года. Стоит принять во внимание, что полученный результат имеет приблизительный характер из-за некоторых погрешностей в измерениях данных (неоднородность выпавших осадков, вклад антропогенных факторов), учесть которые в полном объёме представляется затруднительным или невозможным. Также мы не ставим цель разработать методики прогнозирования уровня воды в озере, но результаты исследования в таких разработках могут быть учтены.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 24-27-00199).

Литература

1. Бугаец А.Н., Лупаков С.Ю., Гончуков Л.В., Шамов В.В. Анализ взаимосвязи динамики генетических компонентов речного стока и уровней воды оз. Ханка // Водные ресурсы. 2025 (в печати).
2. Васьковский М.Г. Гидрологический режим озера Ханка. Л.: Гидрометеиздат. 1978. 175 с.
3. 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.
4. Выручалкина Т.Ю., Филатов Н.Н., Дианский, А.В. Гусев О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озёр // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 9. С. 3–16.
5. Лучшева А.А. Практическая гидрология. Л.: Гидрометеиздат. 1978. 440 с.
6. Росликова В.И., Рыбачук Н.А., Короткий А.М. Атлас почв юга Дальнего Востока России (Приханкайская низменность). Владивосток: Дальнаука. 2010. 247 с.
7. Рынков В.С. Подземные воды Дальнего Востока. Учебное пособие. Владивосток: ДВПИ. 1988. 88 с.
8. Чудаева В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука. 2002. 392 с.
9. 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. № 7: 109. URL: <https://www.worldclim.org/data/index.html>.
10. 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. № 13(12): 1711. URL: <https://doi.org/10.3390/w13121711>.