

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТРАНСГРАНИЧНОЙ РЕКИ ТУМАННАЯ (РОССИЙСКАЯ ЧАСТЬ)

Горбатенко Л.В.

*ФГБУН Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, e-mail: glv@tigdvo.ru*

Рассматривается гидрологический режим трансграничной реки Туманная за 1960–2020 гг. Практически вся часть водосбора реки находится на территории КНР и КНДР, створ наблюдений за уровнями воды расположен в 17 км от устья. Оценивалась динамика среднегодовых, максимальных и минимальных в году, а также среднемесячных значений уровней воды. Пропущенные значения данных наблюдений заполнены с использованием средних значений, методов линейной регрессии и интерполяции. Анализ данных показал, что многолетним рядом большинства рассматриваемых уровней характеристик свойственно наличие отрицательного тренда. Исключение составляют ряды максимальных в году уровней и средних уровней мая. Согласно критерию Фишера неоднородными по дисперсии являются ряды среднегодовых и минимальных в году уровней воды и уровней за отдельные месяцы. Применение статистических критериев Стьюдента и Манна – Уитни выявило, что ряды значений среднегодовых, минимальных в году и среднемесячных за март, апрель и октябрь – декабрь уровней воды реки в створе п. Хасан не являются однородными (стационарными), после 1985 г. достоверно изменились их средние значения. Достоверный тренд среднемесячных уровней по критерию Стьюдента подтвержден для апреля, июня и октября. В последние 10 лет (2010–2020 гг.) участились случаи превышения уровнем воды отметки опасного явления. Максимальное превышение имело место в 2016 г. во время тайфуна Лайонрок, при этом был размыв берег реки на ширину от 3 до 10 м, а построенное в 2008 г. берегоукрепление было частично разрушено.

Ключевые слова: река Туманная, гидрологический режим, статистические критерии, неоднородность рядов, уровни воды, отрицательный тренд

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE TRANSBOUNDARY TUMEN RIVER (RUSSIAN PART)

Gorbatenko L.V.

*Pacific Geographical Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, e-mail: glv@tigdvo.ru*

The hydrological regime of the transboundary basin of the Tumen River in 1960–2020 is considered. Most of the river watershed is located on the territory of the PRC and the DPRK. The water level gauging station is placed in 17 km from the mouth. The dynamics of average annual, maximum and minimum per year, as well as average monthly water levels were assessed. Missing values in observational data are imputed using means, linear regression and interpolation methods. Analysis of the data showed that the long-term series of most of the considered parameters are characterized by the presence of a negative trend. The exception is the series of the year maximum levels and average levels in May. According to the Fisher criterion, the series of average annual and minimum annual water levels and levels for certain months are not homogeneous in dispersion. The application of the Student and Mann-Whitney statistical tests revealed that the series of values of the average annual, year minimum and average monthly for March, April and October-December river water levels at the Khasan station are not homogeneous; after 1985 their average values significantly changed. In the last 10 years (2010–2020), cases of water levels exceeding the marks of a dangerous phenomenon have become more frequent. The maximum excess occurred in 2016 during Lionroc Typhoon, when the river bank was washed away to a width from 3 to 10 m, and the bank protection built in 2008 was partially destroyed.

Keywords: Tumen River, hydrological regime, water levels, statistical criteria, non-homogeneous of data series, negative trend

Изменения режима рек вследствие климатических, а также нередко и антропогенных причин происходят во многих регионах мира, в частности на территории РФ. У динамики различных гидрологических характеристик водотоков территории России нет единых закономерностей. Так, например, для европейской части страны прослежена тенденция небольшого увеличения годового стока; в то же время установлено снижение максимального стока для рек бассейнов нижней Волги, Дона, Днепра, южной части бассейна Оки, для

большинства из них значительное. Сток рек Сибири и Дальнего Востока, впадающих в северные моря, растет, сток рек восточнее р. Колыма, включая реки полуострова Камчатка, рек южных частей водосборов Оби, Енисея и Лены, крупных притоков р. Селенга снижается. Рост годовых расходов воды отмечен для рек южного Приморья [1]. Минимальный сток (зимний и периода открытого русла) значимо увеличился на большинстве створов в бассейнах р. Ангары и Лены [2]. Снижился годовой сток одного из главных притоков трансграничной

р. Амур – р. Сунгари. Отмечено снижение после 1985 г. и стока р. Туманная, второй по площади водосбора после р. Амур трансграничной реки на территории Дальнего Востока [3]. Часто наряду с изменениями режима рек отмечается повышение частоты катастрофических гидрологических событий. Предполагается, что в ближайшие десятилетия рост повторяемости максимальных паводков согласно модельным прогнозам можно ожидать на реках Сибири и Дальнего Востока [1].

Исток р. Туманная находится на восточном склоне г. Чанбайшань, общая длина реки составляет 549 км, площадь водосбора 33,8 тыс. км² [4], основные притоки на китайской стороне – р. Гайя и Хуньчунь. На российской территории площадью 26 км² находится всего 17 км устьевое участка реки, по фарватеру которой проходит государственная граница между РФ и КНДР. Основная часть бассейна реки

(70%) расположена в Яньбэнь-Корейском автономном округе провинции Цзилинь КНР, 30% – в провинции Хамген КНДР. Среднегодовой сток реки по данным китайской станции Цюаньхэ (площадь водосбора 31 800 км²), расположенной на расстоянии 40 км от устья, равен 215 м³/с [5].

Российская часть бассейна реки составляет около 0,1%, но она испытывает серьезные последствия от наводнений, формирующихся выше по течению на территории КНР и КНДР. На пограничном участке реки во время крупных паводков происходят значительные русловые деформации, разрушение российского берега, что приводит к прямым территориальным потерям РФ. На отдельных участках русла с 1950 г. уже произошло смещение берега на 250–300 м. В 2008 г. для предотвращения сдвига фарватера реки были построены берегоукрепительные сооружения длиной более 13 км.

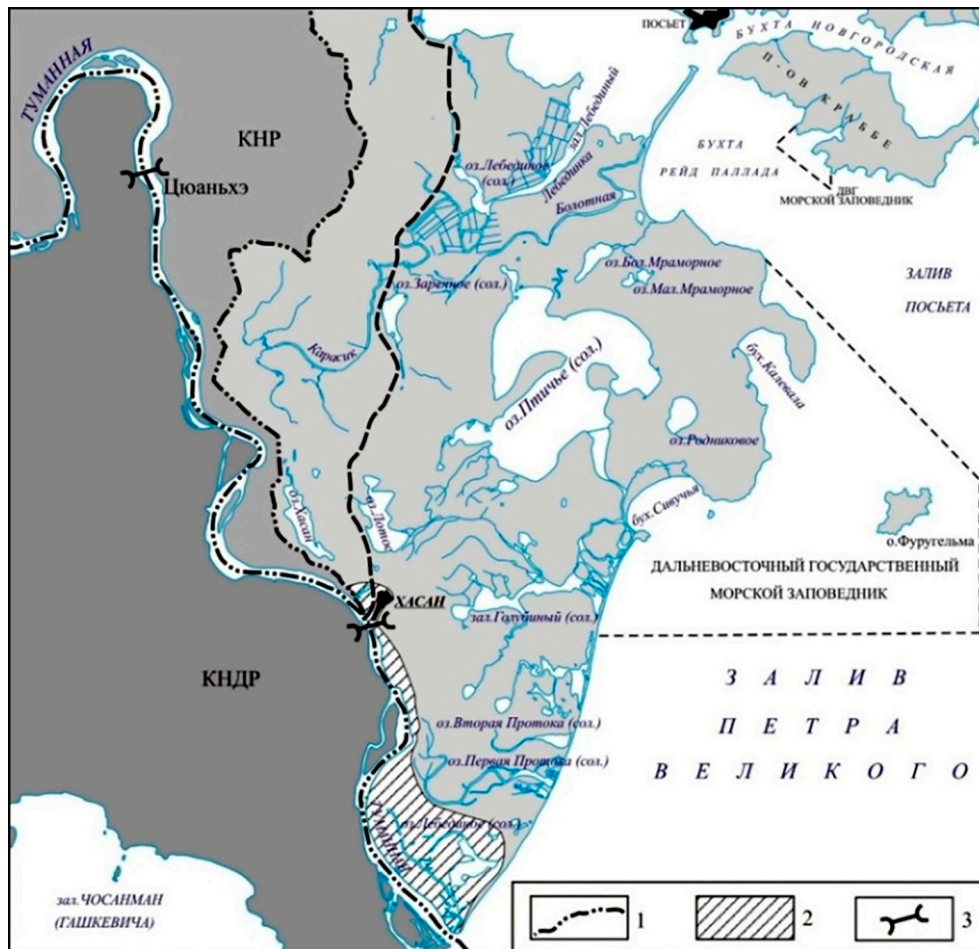


Рис. 1. Российская часть бассейна р. Туманная и прилегающие территории: 1 – граница бассейна реки; 2 – российская часть бассейна; 3 – гидрологические посты наблюдений

В связи с этим актуально проанализировать гидрологический режим реки, его особенности, приводящие к негативному воздействию вод. Цель исследования заключается в оценке многолетних колебаний различных характеристик уровня режима р. Туманная и их изменений. До настоящего времени подобные оценки для российской части бассейна реки не проводились.

Материалы и методы исследования

Гидрологический режим р. Туманная в устьевой части (рис. 1) проанализирован на основе данных об уровнях воды (среднегодовых, минимальных и максимальных среднесуточных в году, среднемесячных), так как российский пост наблюдений только уровень. Он находится на западной окраине железнодорожной станции Хасан. На участке поста долина реки резко расширяется, пойма имеет ширину 6 км, затапливается при уровне 700 см, отметка опасного явления – 750 см. Поскольку до 15 октября 1959 г. створ находился в 200 м выше, использованы данные об уровнях воды за 1960–2020 гг.

Ряды данных наблюдений не являются непрерывными, слабо коррелированы между собой, за исключением среднемесячных уровней ноября – декабря и января – марта, автокорреляция среднегодовых значений уровней в многолетнем ряду слабая. Для зимних месяцев пропуски в рядах среднемесячных значений уровней заполнены с использованием метода линейной регрессии. Для остальных месяцев, а также для средних за год значений для этой цели использовались осредненные величины уровней воды, а также интерполяция. Проверка рядов наблюдений на однородность при уровне значимости 0,05 проводилась с использованием широко применяемых статистических критериев Фишера, Стьюдента и Манна – Уитни [6–8], на значимость трендов – критерия Стьюдента по отношению к коэффициенту регрессии. Общий ряд наблюдений, с учетом данных, изложенных в [3], был разбит на подпериоды: 1960–1985 и 1986–2020 гг.

Результаты исследования и их обсуждение

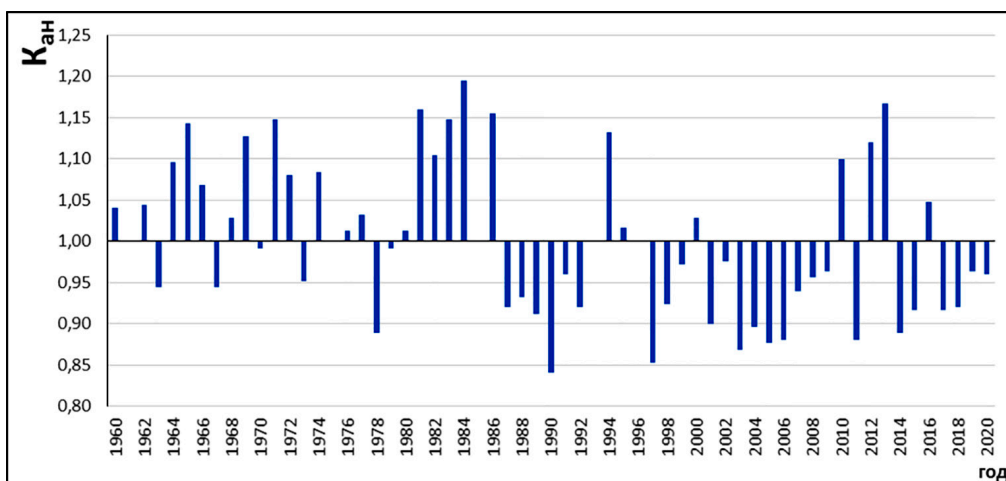
Диапазон колебаний среднегодовых и минимальных в году зимних уровней воды р. Туманная у п. Хасан в целом за 1960–2020 гг. не очень значителен: 212–301 см и 162–265 см соответственно. Наибольшим он был у многолетних колебаний макси-

мальных в году среднесуточных уровней (299–863 см), в среднем они превышали меженные зимние почти в 3 раза (2,8), в отдельные годы это превышение достигало 3,5–4 раз. Наибольшее превышение максимального уровня (863 см, 2016 г.) над уровнем зимней межени (162 см, 1968 г.) за весь анализируемый период составило более 7 м.

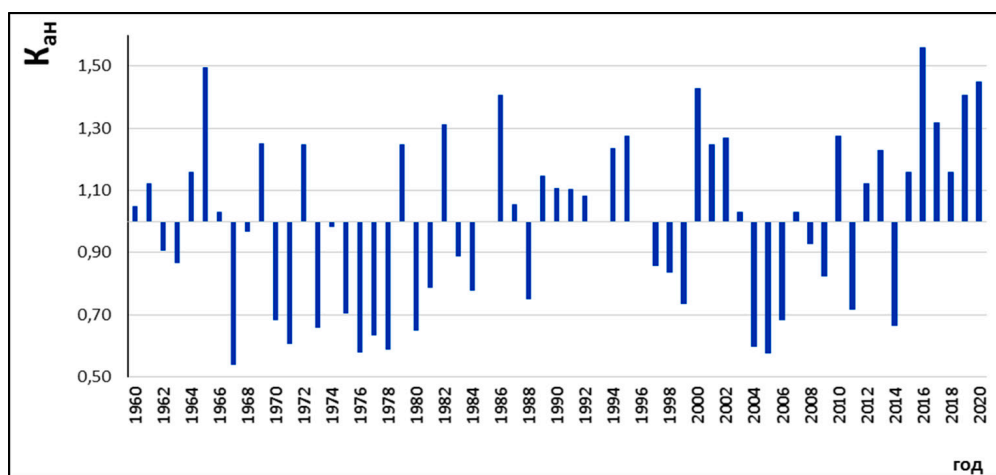
Анализ характера чередования многоводных и маловодных лет в многолетней динамике среднегодовых уровней воды р. Туманная, проведенный с помощью коэффициентов аномалий их значений (отношение значения уровня i -го года к среднему за период), показал, что выделяются два периода с четкими различиями в величинах уровней (рис. 2, а). После 1986 г. фиксируется маловодный период, характеризующийся преобладанием значений годовых уровней ниже среднемноголетних величин (71%). До 1986 г. включительно в ряду годовых уровней преобладали значения выше среднемноголетних, их количество составляет 65%. Рассчитанные коэффициенты аномалий максимальных в году уровней свидетельствуют, что с 2010 г. наблюдается почти непрерывная группировка лет с их повышенными значениями, превышающими среднемноголетние (553 см) на 12–56% в зависимости от года. Исключение составляют 2011 и 2014 гг., когда значения максимальных уровней были ниже средних за рассматриваемый период (рис. 2, б).

Визуальный анализ графического отображения многолетней динамики данных характеристик дает основания предположить, что ряды их значений не являются однородными (рис. 3, а и б).

Проверка многолетних рядов годовых значений, среднесуточных минимальных и максимальных в году уровней воды на однородность по критериям Фишера и Стьюдента показала, что неоднородными по дисперсии являются ряды значений среднегодовых и минимальных в году уровней, а неоднородными по среднему являются ряды всех трех характеристик. В 1986–2020 гг. (второй интервал разбиения исходного ряда) размах колебаний среднегодовых уровней незначительно увеличился по отношению к значениям за 1960–1985 гг., минимальных и максимальных в году уровней снизился. Средние значения годовых и минимальных в году уровней снизились с 264 до 243 и с 209 до 188 (на 8 и 10% соответственно); значения максимальных в году уровней увеличились с 505 до 589 см (на 17%).



а) среднегодовые уровни



б) максимальные в году уровни

Рис. 2. Коэффициенты аномалий значений уровней воды р. Туманная (ст. Хасан)

Таблица 1

Многолетние характеристики уровней воды по месяцам, см

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
среднее (I)	217	217	225	245	260	293	301	336	315	258	244	241
среднее (II)	201	200	204	222	251	265	288	309	292	229	214	207
снижение, см (%)	16 (7)	17 (8)	21 (9)	23 (9)	9 (3)	28 (10)	13 (4)	27 (8)	23 (7)	29 (11)	30 (12)	34 (14)
SD (I)	26	28	25	25	33	60	52	61	59	29	29	34
SD (II)	35	30	23	25	44	47	55	74	74	39	45	40
изменение, см/%	9 (35)	2 (7)	-2 (-8)	0 (0)	11 (33)	-13 (-22)	3 (6)	13 (21)	15 (25)	10 (34)	16 (55)	6 (18)

Примечание. I, II – подпериоды (1960–1985, 1986–2020 гг.); SD – стандартное отклонение.

Использование критерия Манна – Уитни не подтвердило неоднородности рядов значений только максимальных в году уровней

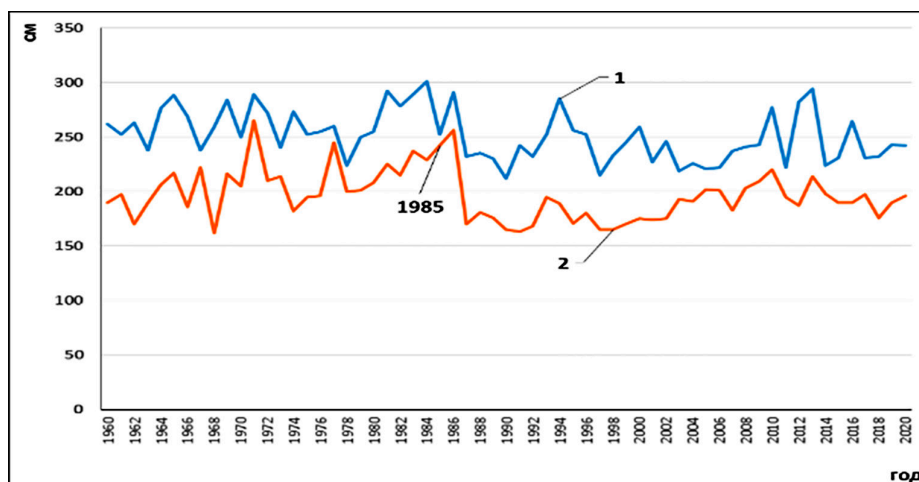
воды. Достоверным по критерию Стьюдента является линейный тренд на снижение для годовых уровней.

Режим уровней внутри года по месяцам. Многолетние колебания среднемесячных уровней значительно различаются. Коэффициенты вариации рядов значений изменяются от 0,11 (март, апрель) до 0,21–0,23 (август, сентябрь). Рассчитанные уравнения линейного тренда показывают, что для всех месяцев, за исключением мая, тренд отрицательный. Наиболее всего среднемесячные уровни воды снизились в октябре – декабре (более чем на 10%) (табл. 1).

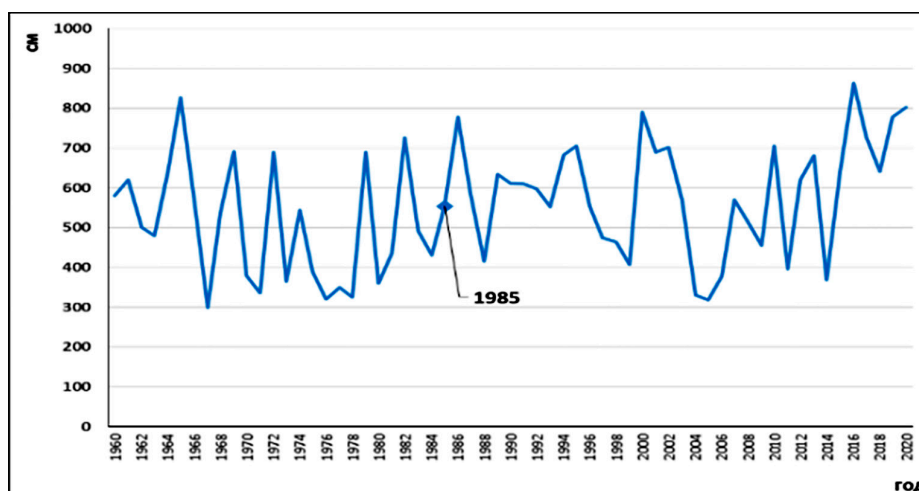
Проверка рядов среднемесячных значений уровней воды по критериям Стьюдента (с учетом разности дисперсий) и Манна – Уитни показала, что неоднородными по среднему значению являются ряды уровней в марте, апреле и октябре – декабре, для этих месяцев априорные результаты применения критериев совпадают. Значимость тренда по критерию Стьюдента подтверждена

только для апреля, июня и октября (табл. 2). Наибольшими темпами значения уровней воды в р. Туманная за период с 1960 по 2020 г. снижались в июне и августе, в среднем на 0,82 и 0,96 см в год (рис. 4).

Опасность наводнений. За период с 1960 по 2020 г. вода р. Туманная выходила на пойму 11 раз, при этом отметки опасного явления (750 см) за рассматриваемый период были превышены в 1965, 1986, 2000, 2016, 2019 и 2020 гг. на величину от 28 до 113 см, т.е. половина случаев наводнений на российской части бассейна наблюдалась в период с 2010 по 2020 г. Максимальное за 61-летний период наблюдений превышение имело место в 2016 г. во время тайфуна Лайонрок, когда уровень воды достигал 863 см (обеспеченность 1,64%) и был размыв берег реки на ширину от 3 до 10 м, построенное берегоукрепление частично разрушено.



а) среднегодовые (1) и минимальные в году (2) уровни воды



б) максимальные в году уровни воды

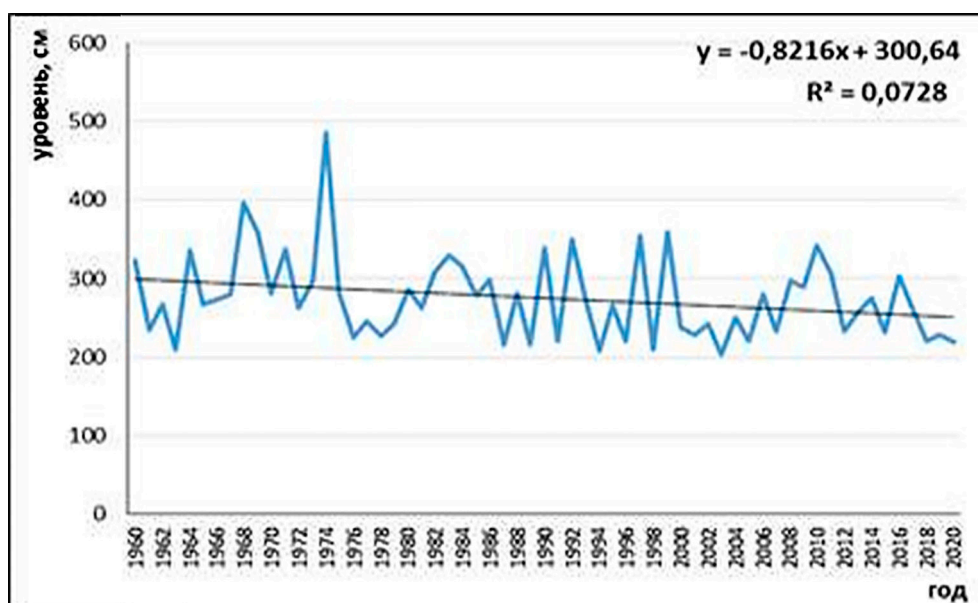
Рис. 3. Характеристики гидрологического режима р. Туманная, 1960–2020 гг.

Таблица 2

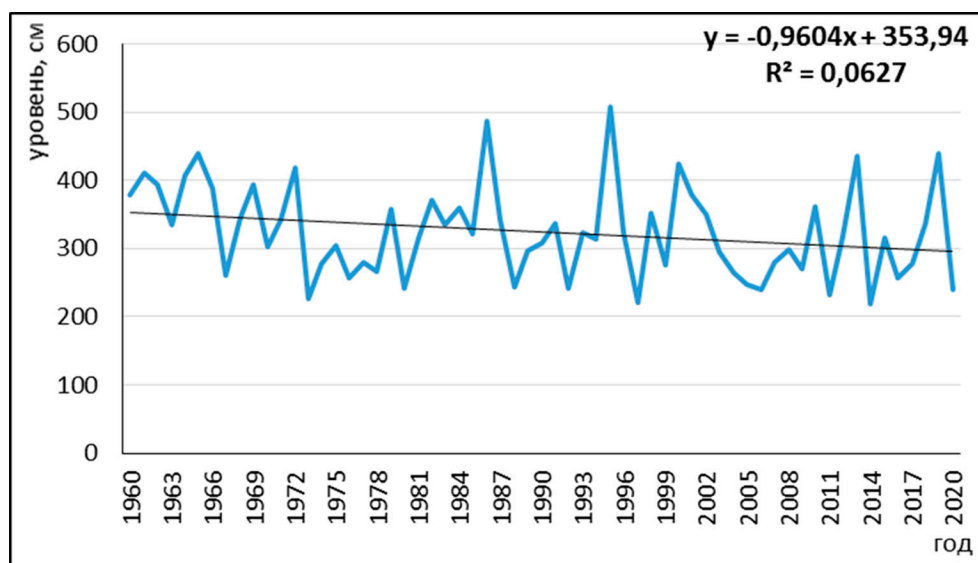
Оценка однородности и значимости трендов рядов наблюдений за уровнями воды по месяцам воды на р. Туманная – п. Хасан

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Оценка однородности													
Критерий Фишера ($p = 0,05$)	О	О	О	Н	Н	О	Н	Н	Н	Н	О	Н	
Критерий Стью-дента ($p = 0,05$)	О	Н	Н	Н	О	Н	О	О	О	Н	Н	Н	
Критерий Манна – Уитни	О	О	Н	Н	О	О	О	О	О	Н	Н	Н	
Оценка значи-мости трендов	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-	-

Примечание. О – однородный; Н – неоднородный; «+» – тренд значимый; «-» – незначимый.



а) июнь, 1960–2020 гг.



б) август, 1960–2020 гг.

Рис. 4. Многолетняя динамика уровней воды р. Туманная – п. Хасан по отдельным месяцам

Заключение

Полученные оценки хорошо согласуются с данными о снижении водности р. Туманная, опубликованными ранее китайскими исследователями, но касающимися только годового стока (по данным станции наблюдений Цюаньхэ за 1959–2011 гг.). В результате проведенной работы выявлены изменения различных характеристик гидрологического режима реки, общей закономерностью которых является отрицательный линейный тренд рядов почти всех проанализированных характеристик уровней с темпами их снижения в целом за 1960–2020 гг. от 0,1 до 1 см в год. Исключения составляют максимальные в году уровни, увеличивавшиеся в течение 61 года согласно рассчитанному уравнению регрессии на 2 см в год, и уровни мая с условным ростом 0,05 см в год. Достоверность тренда подтверждена по критерию Стьюдента для средних уровней за год, а также за апрель и октябрь. Размах межгодовых колебаний характеристик, напротив, увеличился, за исключением максимальных и минимальных в году суточных уровней и средних уровней марта и июня. Половина случаев превышения уровней отметки опасного явления (3 из 6) наблюдалась в 2010–2020 гг., что свидетельствует об увеличении их повторяемости. Исторический максимум уровня наблюдался в 2016 г. во время тайфуна Лайонрок, когда во время наводнения при отметке уровня в 863 см (обеспеченность 1,64%) берегоукрепление на российском берегу реки было частично разрушено. Таким образом, максимальные в году суточные уровни – это единственная характеристика, значения которой увеличивались с середины 1980-х гг., при этом выросла частота случаев превышения уровней отметки опасного явления. Все это свидетельствует о возможности в дальнейшем усилении катастрофичности опасных гидрологических событий.

Для подобного рода оценок важно определение предположительной «точки перелома», года, после которого изменяется тенденция динамики гидрологического режима. Практически все исследованные характеристики имели локальные пиковые значения в 1986 г., что расходится с данными по ст. Цюаньхэ, возможно потому, что из-за отсутствия в 1985 г. наблюдений на ст. Хасан пропущенные значения были заменены средними.

Возможно, на формирование неоднородности исследуемых характеристик уровня режима р. Туманная у п. Хасан помимо климатического оказывает влияние и антропогенный фактор, т.е. характер использования территории водосбора реки, а также большое количество построенных на китайской части водохранилищ различной емкости. Зарегулирование притоков реки привело к значительному снижению размаха колебаний минимальных в году (зимних) уровней воды, в меньшей степени оказало влияние на межгодовые вариации максимальных в году их значений из-за небольших размеров водохранилищ и, возможно, отсутствия в них противопаводочной емкости.

Полученные результаты дают определенное понимание закономерностей изменений гидрологического режима р. Туманная и могут быть использованы для прогноза различных характеристик водности реки, а также для обоснования проектов реконструкции защитных берегоукрепительных сооружений.

Список литературы

1. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2021. Т. 7, № 1. С. 36–79. DOI: 10.21513/2410_8758_2021_1_36_79.
2. Кичигина Н.В., Воропай Н.Н. Современные гидроклиматические изменения в Байкальском регионе // *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. 2021. Т. 3. Вып. 4. С. 373–390. DOI: 10.34753/HS.2021.3.4.373.
3. Liu Lu-Liu, Du Jian-Junb. Documented changes in annual runoff and attribution since the 1950s within selected rivers in China // *Advances in Climate Change Research*. 2017. Vol. 8, Is. 1. P. 37–47.
4. Drainage basins of the sea of Okhotsk and sea of Japan [Электронный ресурс]. URL: https://unece.org/DAM/env/water/blanks/assessment/okhotsk_japan.pdf (дата обращения: 07.07.2023).
5. Tian Wei, Yu Muqing, Wang Guoping. Pollution trend in the tumen river and its influence on regional development // *Chinese Geographical Science*. 1999. Vol. 9. № 2. P. 146–150.
6. Наумов В.А. Методы обработки гидрологической информации // *Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования*. 2015. № 7. С. 144–150.
7. Наумов В.А. Результаты статистического анализа региональных гидрологических и климатических рядов // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2016. Т. 2, № 3. С. 1–6.
8. Лепихин А.П., Возняк А.А., Тиунов А.А., Богомолов А.В. К проблеме корректности методов расчетов и задания исходной гидрологической и гидрохимической информации при регламентации техногенных воздействий на водные объекты // *Водное хозяйство России*. 2017. № 1. С. 58–77.