

МИНИСТЕРСТВО
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ КАЗНИТУ им. К.И. САТПАЕВА МОН РК

ОРТАЛЫҚ АЗИЯНЫҢ СУ РЕСУРСТАРЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ПАЙДАЛАНУ

БҰҰ жариялаған «Су – өмір үшін»
онжылдығының қорытындысына арналған
Халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференциясының
МАТЕРИАЛДАРЫ

Қазақстан, Алматы, 22–24 қыркүйек, 2016 жыл

2 к і т а п

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

МАТЕРИАЛЫ
Международной научно-практической конференции,
посвященной подведению итогов объявленного ООН десятилетия
«Вода для жизни»

г. Алматы, Казахстан, 22–24 сентября 2016 года

К н и г а 2

WATER RESOURCES OF CENTRAL ASIA AND THEIR USE

MATERIALS
International Scientific-Practical Conference
devoted to the summing-up of the "Water for Life"
decade declared by the United Nations

Almaty, Kazakhtan, September 22–24, 2016

V o l u m e 2

Алматы
2016

АЛЕКСАНДР В. ЧЕРЕДНИЧЕНКО, Р. И. ГАЛЬПЕРИН, С. К. ДАВЛЕТГАЛИЕВ,
АЛЕКСЕЙ В. ЧЕРЕДНИЧЕНКО, В. С. ЧЕРЕДНИЧЕНКО,
Р. Г. АБДРАХИМОВ, А. С. НЫСАНБАЕВА

НИИ Проблем биологии и биотехнологии, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ПОВЕРХНОСТНЫЙ СТОК В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

Температура мен жауын-шашын климаттық өзгерістерінің әсерінен Қазақстандағы беткі ағындының динамикасы талданды. Аумақ бойынша температура мен жауын-шашын өзгерістерінде синхрондылық және өзара бірізділік болмағандықтан Республиканың барлық аумағы бойынша беткі ағындының климаттық өзгерістеріне болжам жасау мүмкін емес, әр алап бойынша ағынды мен климаттық өзгерістердің динамикасына жеке түрде талдау жасалу керек. Мысал ретінде Жайық өзені алабы бойынша ағынды өзгерістерінің динамикасына талдау жасалып, 2040 жылға дейінгі кезеңге дейін ағынды өзгерістерінің сценарийі құрастырылды. Аридті зонадағы өзен ағындыларының климаттық өзгерістерге өте сезімтал екені көрсетілді.

Проанализирована динамика поверхностного стока в Казахстане под влиянием климатических изменений температуры и осадков. Показано, что в связи с отсутствием синхронности и согласованности в изменениях температуры и осадков по территории прогноз климатических изменений поверхностного стока по всей территории Республики невозможен, необходим анализ климатических изменений и динамики стока для каждого бассейна в отдельности. На примере бассейна р. Урал (Жайык) выполнен анализ динамики и построен сценарий изменения стока на период до 2040 г. Показана высокая чувствительность поверхностного стока рек аридной зоны к климатическим изменениям.

The dynamics of surface runoff in Kazakhstan under the impact of climate change temperature and precipitation analyzed. It is shown that in the absence of synchrony and coherence in the climate changes in temperature and precipitation throughout the territory of the Republic for the forecast of climatic changes in surface runoff it is necessary to analyze the climatic changes and the dynamics of runoff for each basin separately. For example the analysis of the dynamics and the constructed scenario runoff changes for the period up to 2040 for basin Ural River (Zhaiyk) was fulfilled. The high sensitivity of surface runoff of rivers of the arid zone to climate change was received.

Введение Республика Казахстан расположена в центре Евразийского материка (рисунок 1) и занимает девятое место в мире по площади своей территории (около 2,72 млн км²) но примерно шестое место по величине поверхностного стока. Причиной этого являются значительная удалённость территории от океанов, в первую очередь от Атлантического (более 5000 км), и особенности общей циркуляции атмосферы, способствующие выносу сухого тропического воздуха в течение тёплой части года и влиянию Сибирского антициклона в зимний период, тоже не способствующего облако- и осадкообразованию.

В результате только на крайнем северо-западе и севере территории количество осадков достигает 400 мм или несколько более при испаряемости, превышающей 800 мм/год на всей территории республики. Только для предгорных и горных районов юго-востока и Казахского Алтая характерны осадки, превышающие 400 мм [1]. Из-за недостаточного количества осадков и регулярного выноса на территорию республики сухих тропических воздушных масс на долю пустынь и полупустынь приходится до 58% территории. Ещё около 10% территории заняты горными системами: Алтай на востоке, Иле и Жетысу Алатау на юго-востоке. Центральную часть территории занимает Казахский мелкосопочник, а на северо-западе расположен Южный Урал с его продолжением к югу – Мугоджарами с максимальными высотами до 700 м [2].

Общий средний многолетний поверхностный сток составляет 100,5 км³. Из них только 56,5 км³ формируется на территории республики, а остальные 44 км³ поступают из сопредельных территорий: из Китая – 18,9 км³, из Узбекистана – 14,6 км³, из Киргизии – 3,0 км³, из России – 7,5 км³ [3]. Межгодовая изменчивость поверхностного стока велика. В многоводные годы она может быть в два раза выше нормы, а в маловодные – в три раза ниже нормы. Кроме



Рисунок 1 – Расположение Республики Казахстан в Северном полушарии

того, велика и внутригодовая асимметрия в распределении стока. До 90% стока степных рек приходится на весенний период и до 70% стока горных рек – на летний. Удельная водообеспеченность в Казахстане составляет 37 тыс. км³/км², или около 6 тыс. м³ на одного жителя в год. Это самая низкая обеспеченность среди всех стран СНГ. По сути, все отрасли хозяйственной деятельности в республике испытывают недостаток в воде, а для некоторых, например для сельского хозяйства, недостаток воды является ограничением для развития. Обеспечение населения, сельского хозяйства и промышленности водой необходимого качества является важнейшей стратегической задачей для государства.

Согласно оценкам, выполненным российским ГГИ в начале девяностых годов прошлого века, средний многолетний сток оценивался в 126,0 км³, из которых местный сток составлял 66,8 км³ и 59,8 км³ – трансграничный. Следовательно, поверхностный сток уменьшился за это время примерно на 25,3 км³, из которых местный сток снизился на 10,3 км³ и трансграничный – на 15,2 км³. Причинами такого изменения стока принято считать как интенсификацию хозяйственной деятельности, особенно в зарубежье, так и изменение климата. Отсюда следует, что оценка возможного изменения стока на ближайшие десятилетия на территории республики в связи с изменением климата очень важна. Этой проблеме и посвящено наше исследование.

Представлялось наиболее целесообразным придерживаться следующего порядка исследований:

- на примере бассейна реки Урал выполнить анализ климатических колебаний временных рядов температуры и осадков в течение прошлого века и оценить чувствительность поверхностного стока к таким колебаниям, найти соответствующие количественные связи;

- затем построить сценарий климатических изменений температуры и осадков на ближайшие десятилетия для бассейна реки Урал как предлагаемый пример аналогичных расчётов для других бассейнов;

- далее, построить сценарии изменения температуры и осадков для всей территории республики;

- оценить в принципе возможность прогнозирования поверхностного стока по всей территории Казахстана;

- на основе ожидаемых климатических изменений температуры и осадков сделать общие выводы относительно динамики поверхностного стока под влиянием климатических изменений.

Материалы и методы. Данные. В работе использованы, прежде всего, официальные данные Национальной гидрометеорологической службы Казахстана о средних месячных темпера-

турах и количестве осадков по станциям в течение двадцатого века и по настоящее время. Кроме казахстанских были использованы также данные по югу Западной Сибири и Южного Урала. Все исходные данные прошли строгий технический и критический контроль. Использовались также результаты нескольких экспедиционных исследований, выполненных в бассейне р. Урал на территории Казахстана, и любезно нам предоставленные.

Методы. При изучении временной динамики температуры и осадков мы аппроксимировали наши ряды полиномом шестой степени, который, с одной стороны, хорошо сглаживает временной ряд, сохраняя, однако, климатические экстремумы, а с другой – полином достаточно чутко реагирует на изменение знака динамики всего за несколько лет. Одновременно с аппроксимацией временного ряда полиномом шестой степени мы широко использовали гармонический анализ рядов, который, как известно, подразумевает разложение исходного временного ряда на тригонометрические функции [4].

Если полином шестой степени сглаживает временной ряд, быстро реагируя на тенденции в его динамике, то гармоники характеризуют внутреннюю структуру ряда. Каждую из гармоник, по крайней мере, основных, принято интерпретировать как результат воздействия определенной группы факторов. Нет оснований считать, что факторы, существовавшие в процессе формирования климата ранее, вдруг исчезнут.

Совпадение направлений аппроксимирующей линии и динамики сумм амплитуд основных гармоник показывает, случайны ли аппроксимируемые изменения или они обусловлены ходом основных гармоник.

Результаты исследований в бассейне реки Урал. Гидрологический режим. В последние десятилетия при определении естественного стока р. Урал и его составляющих имеются значительные трудности, обусловленные влиянием на его величину хозяйственной деятельности. Поэтому восстановление естественного стока р. Урал на границе с Российской Федерацией представляет для Республики Казахстан важнейшее значение при решении вопросов совместного использования водных ресурсов рассматриваемой трансграничной реки [5-7].

Восстановление естественного стока р. Урал в створе г. Оренбурга проводилось нами путем прибавления к наблюдаемому бытовому стоку величины забора воды на хозяйственные нужды в его бассейне в размере $25 \text{ м}^3/\text{с}$ в год согласно [5] и др.

Суммарный приток воды из России по р. Урал оценивается как сумма стока рек Урал – г. Оренбург, Сакмара – с. Карагала (Сакмара), Шаган и др. Среднее многолетнее значение стока этих притоков равно 8674 млн м^3 , из них 4510 млн м^3 поступают по реке Урал и 3312 млн м^3 – по реке Сакмара. За период глобального потепления климата, т.е. с 1980 г., водные ресурсы исследуемого района увеличились в среднем до $10,8 \text{ км}^3/\text{год}$, или на 10% по сравнению с периодом 1936–1977 гг. На территории России формируется около $8,5 \text{ км}^3/\text{год}$ стока, а в пределах Республики Казахстан – до $1,6 \text{ км}^3/\text{год}$.

Сток периода 1974–2007 гг. мало отличается от многолетнего. В среднемаловодные годы 75 % обеспеченности поступление воды с территории России уменьшается до 6024 млн м^3 . В очень маловодные годы (97 % обеспеченности) такие ресурсы на эти моменты времени составляют 2349 и 3280 млн м^3 соответственно [5,6].

На бесприточном 587-километровом участке от поста «Кушум» до поста «Махамбет» величина стока с обеспеченностью 50% снижается на 24%, т.е. в среднем на 4% на 100 км, и составляет в среднем 6500 млн м^3 . В маловодные годы величина стока уменьшается с обеспеченностью 75 % до 5456 млн м^3 и с обеспеченностью 97 % до 3006 млн м^3 [7]. На 118-километровом участке от поста «Махамбет» до Гурьева (Атырау) сток уменьшается всего на 3–4%.

При зарегулированном стоке реки установить связь между количеством осадков, выпадающих в ее бассейне, и величиной стока очень сложно. Водоохранилища сглаживают естественные колебания стока. Поэтому тщательному анализу был подвергнут период не зарегулированного стока. За такой период стока р. Урал принято считать ряд до 1958 г., когда началось заполнение Ириклинского водохранилища многолетнего регулирования, завершившееся в 1966 г. Полный объем водохранилища составляет $3,26 \text{ км}^3$, а полезный – $2,8 \text{ км}^3$. Многолетнее регулирование стока обеспечивалось с гарантированной отдачей воды до $0,5 \text{ км}^3/\text{год}$, или $15,1 \text{ м}^3/\text{с}$. Позже были построены также Верхнеуральское и Магнитогорское водохранилища меньшей емкости. В многочисленных водохранилищах России аккумулируется до $3,5 \text{ км}^3$ воды.

Нами установлено, что в условиях глобального потепления произошли заметные внутригодовые перераспределения величин стока, а именно увеличился сток в осенне-зимний период, что заметно снизило изменчивость годовых его значений. Изменчивость стока в районе Оренбурга ранее оценивалась $C_v=0,86$, а в настоящее время мы получили величину 0,55.

В створе поста «Кушум» средний из годовых максимальных расходов воды снизился примерно вдвое, а стандартное отклонение – почти в 2,5 раза. Наличие Ириклинского водохранилища – не единственная причина уменьшения максимального стока. С середины семидесятых годов двадцатого века началось глобальное потепление, и это сказалось на величинах стока рек Уральского хребта.

С введением в строй Ириклинского водохранилища трансформация максимальных расходов воды стала еще большей. Расчеты показывают, что после 1974 г. т.е. по заполнении водохранилища, максимальный расход обеспеченностью 1% на участке Кушум–Тополи снижается со скоростью примерно 11% на 100 км русла. На участке от поста «Тополи» до Атырау (118 км) среднее снижение максимального стока составляет всего 3,3%.

После 1974 г. максимальный уровень воды вдоль всей реки тоже уменьшился, на отдельных участках снижение превышает 2 м. Пойма реки стала затопляться значительно реже. Для оценки ширины реки использовались данные гидрометрических постов, а также данные ряда экспедиционных обследований поймы. Ширина затопления зависит от морфологии поймы. Ниже Атырау русло расширяется от 200 до 300–500 м в настоящее время, хотя по данным, полученным до семидесятых годов, в нижнем течении пойма затоплялась на 6–8 км, а местами до 15 км [7].

Создание Ириклинского водохранилища значительно изменило режим максимальных уровней и расходов воды в нижнем течении р. Урал, снизив угрозу затопления территорий. Максимальные расходы воды при этом сократились в 1,5–2,0 раза. Сказалось также потепление климата, проявившееся в основном через потери на испарение и инфильтрацию вдоль русла, а также в увеличении забора воды и последующие потери.

Анализ климатических факторов. Температура и осадки. При исследовании зависимости величины стока от климатических условий представлялось необходимым сначала попытаться найти связь между количеством осадков, выпадающих на территориях формирования стока, и величиной стока. Для этого мы попытались привлечь данные станций Уфы, Свердловска (Екатеринбурга), Магнитогорска и др., расположенных в районах формирования стока. Оказалось, однако, что на официальных сайтах территориальных управлений гидрометеорологических служб такие данные, т.е. временные ряды температуры и осадков за XX век, имеются, но все они по разным причинам содержат пропуски. Поэтому для анализа условий мы использовали данные двух станций «Уральск» и «Костанай», расположенных на территории Казахстана, но близко к регионам формирования стока. Станция «Уральск» близка к западному водосбору, а станция «Костанай» – к восточному. Поскольку станции «Уральск» и «Костанай» находятся достаточно близко к районам водосборов, то они должны достаточно хорошо отражать крупномасштабные метеорологические условия формирования стока западнее и восточнее Южного Урала. Для анализа мы выбрали период с 1932 по 1958 г., когда сток р. Урал не был еще зарегулирован. Затем были вычислены годовые суммы осадков по двум станциям, после чего был построен корреляционный график связи между суммарными осадками и величиной стока р. Урал в районе поста «Кушум», т.е. уже на территории Казахстана, ниже впадения притока р. Сакмара (рисунок 2).

Из рисунка 2 можно видеть, что между кривыми суммарного количества осадков и стоком р. Урал имеется неплохое согласование, особенно в годы максимальных стоков. Следовательно, выбор станций, по осадкам которых мы изучаем процессы в обоих районах формирования стока, оказался удачным.

Наибольший сток имеет место, когда на обеих станциях выпадает максимальное количество осадков. Срабатывает также подмеченная в [8] закономерность, что после малого количества осадков в бассейне резкий их рост не приводит к такому же увеличению стока, так как часть осадков уходит на увлажнение почвы, наполнение озер, впадин и др.

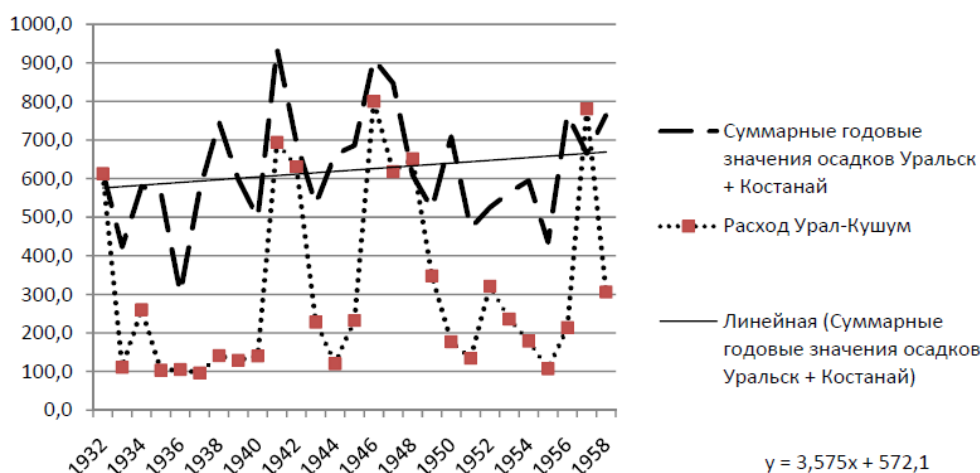


Рисунок 2 – Сравнение суммарных годовых значений осадков станций «Уральск» и «Костанай» и расхода воды р. Урал (пост «Кушум»)

Замечено также, что резкое уменьшение количества осадков после максимума не приводит к такому же уменьшению стока, так как накопленные ранее водозапасы поддерживают сток. Линейный тренд суммарного количества осадков на станциях «Уральск» и «Костанай» указывает, что имеет место их заметный рост (уравнение регрессии приведено на рисунке 2). Это хорошо согласуется с исследованиями [5], согласно которым сток тоже увеличился.

Динамика стока. Далее были исследованы связи между временными рядами осадков и температуры в Западном Казахстане, с одной стороны, и колебаниями стока реки Урал – с другой.

Временной ход расхода воды на станции «Кушум», расположенной почти на входе реки Урал на территорию Казахстана, показывает, что за 1921–2007 гг. значения годового расхода воды изменялись от 89,1 до 800,0 м³/с (рисунок 3).

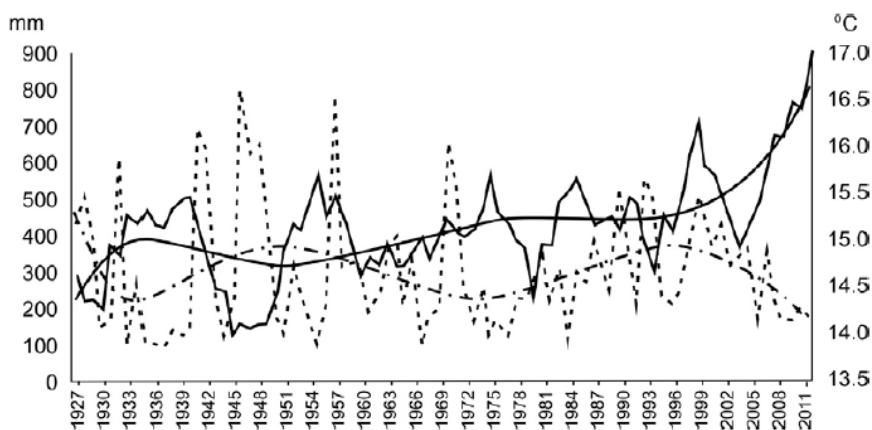


Рисунок 3 – Временной ход расхода воды р. Урал и средней температуры воздуха за теплый период на МС «Уральск», рассчитанный за скользящий пятилетний период. - - - - расход воды р. Жайык; - средняя температура воздуха за теплый период на МС «Уральск», рассчитанная за скользящий трехлетний период; — линия тренда средней температуры воздуха за теплый период, - - - - линия тренда расхода воды

Можно заметить большую его изменчивость от года к году, особенно до 1973 г. При этом полиномиальный тренд показывает, что около 1930 и 1977 гг. имели место климатические минимумы осадков, а около 1950 и 1998 гг. – климатические максимумы. С 2003 по 2007 г. отмечалось уменьшение расхода воды.

На рисунке 3 представлен временной ход расхода воды р. Урал и средней температуры воздуха за теплый период на МС «Уральск», рассчитанный за скользящий пятилетний период.

Из рисунка 3 видно, что имеет место обратная корреляция, а именно повышению температуры воздуха соответствует уменьшение расхода воды, с 1941 по 1957 г. понижению средней температуры воздуха соответствует увеличение расхода воды. Вычисленная корреляционная связь между стоком и температурой воздуха за теплый период для станции «Уральск» показала, что такая связь слабая, коэффициент корреляции составляет только -0,30. Заметим, что при определении корреляционной связи между годовым расходом воды и температурой воздуха за теплый период были удалены начальные (1926–1930 гг.) и конечные (1999–2003 гг.) пять лет, чтобы исключить влияние неопределенности, характерной для концов временного ряда.

Между годовой суммой осадков и расходом воды р. Урал наблюдается более тесная связь, но корреляционная связь прямая, что вполне естественно. Так, временной ход годовой суммы осадков на МС «Уральск» повторяет ход расхода воды даже при количестве осадков, рассчитанном за скользящий трех- и пятилетний период (рисунок 4).

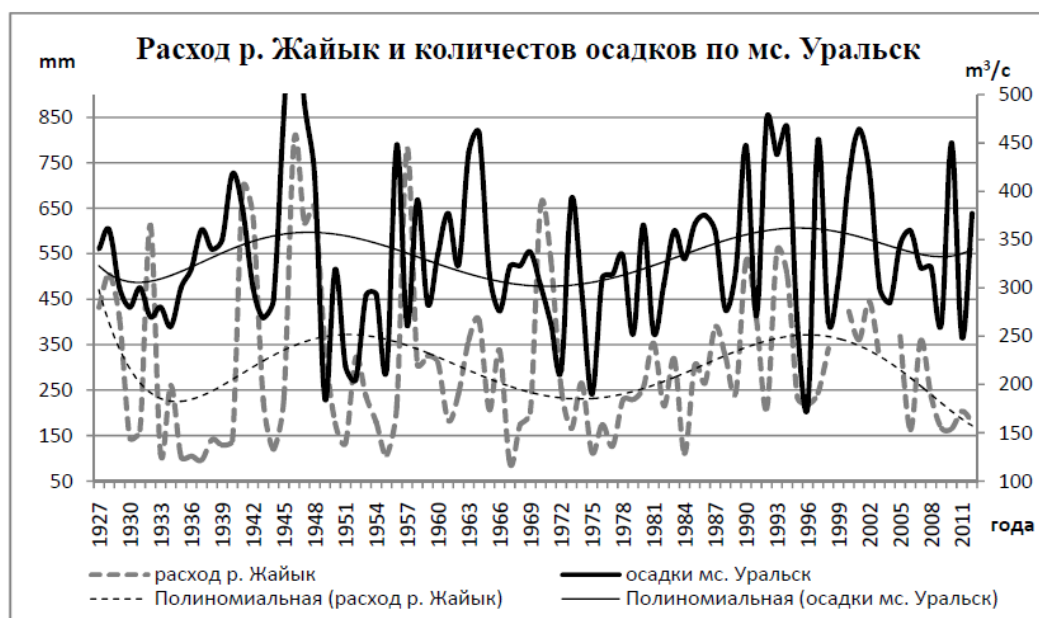


Рисунок 4 – Временной ход расхода воды р. Урал и годовой суммы осадков на МС «Уральск», рассчитанный за скользящий пятилетний период

Исключая начало и конец рядов, мы можем констатировать, что на всем их протяжении ряд расхода воды повторяет временной ход количества осадков. Поэтому временной ряд количества осадков, так же, как и временной ряд температуры, хорошо отражает временной ход стока, и в задачах по оценке изменения стока под влиянием глобальных изменений климата, по крайней мере, на уровне общих оценок, эти данные можно использовать, не прибегая к другой информации.

Анализируя чисто качественно временной ход расхода воды и температуры (см. рисунок 3), а также расхода воды и осадков (см. рисунок 4), нельзя не отметить, что в первом случае имеет место неплохая обратная, а во втором – положительная связь. В связи с этим мы попытались

оценить тесноту связи между сглаженными временными рядами расхода воды и температуры и расхода воды и осадков.

Для этого параметры соответствующих величин снимались нами со сглаженных кривых. В этом случае коэффициент отрицательной корреляции между расходом воды и температурой воздуха в Уральске увеличился до $-0,68$, а коэффициент положительной корреляции между расходом воды и количеством осадков в Уральске возрос до $0,87$. Коэффициенты детерминации равны $0,46$ и $0,66$ соответственно. При понижении (росте) климатической температуры на $0,5^{\circ}\text{C}$ расход воды увеличивается (понижается) примерно на $60 \text{ м}^3/\text{с}$, а при уменьшении (увеличении) количества осадков на 10 мм/год расход воды сокращается (увеличивается) на $20 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таким образом, несмотря на относительно низкую корреляцию ежегодных величин расхода воды с ежегодными величинами температуры воздуха и осадков, корреляция сглаженного хода расхода воды с температурой и особенно с осадками в Уральске высокая. Поскольку климатическими колебаниями принято считать сглаженные отклонения от средних в течение $8-10$ лет, то полученные нами связи вполне подходят для использования в климатических оценках.

Очевидна, высокая чувствительность стока даже от слабых климатических колебаний температуры и осадков. Оказалось возможным вычислить количественно величину связи: при понижении (росте) климатической температуры на $0,5^{\circ}\text{C}$ расход воды увеличивается (понижается) примерно на $60 \text{ м}^3/\text{с}$, а при уменьшении (увеличении) количества осадков на 10 мм/год расход воды снижается на $20 \text{ м}^3/\text{с}$. Экстремумы в осреднённых временных рядах осадков и стока в зоне его формирования наблюдаются почти одновременно, в противофазе.

Аналогичный анализ взаимосвязей между температурой воздуха и стоком, осадками и стоком мы выполнили также для станции «Атырау», расположенной в дельте р. Урал, но уже данные расхода воды были взяты нами по станции «Махамбет», расположенной рядом с Атырау (рисунок 5).

Временной ход годового стока в Атырау практически повторяет ход стока в Уральске. Это подтверждает тезис о том, что на участке от Уральска до Атырау имеют место только какие-то потери стока на фильтрацию и испарение, оцененные нами выше, не влияющие существенно на временной ход стока.

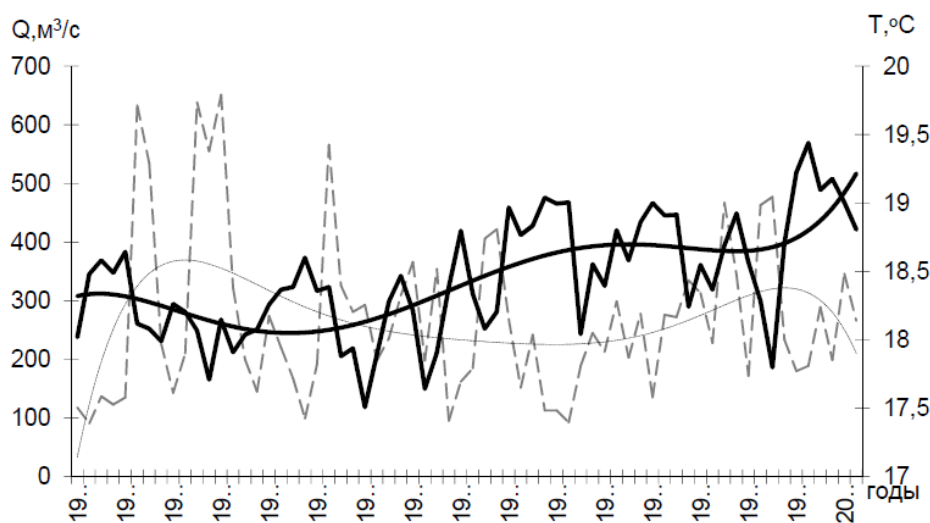


Рисунок 5 – Временной ход расхода воды р. Жайык и средней температуры воздуха за теплый период на МС «Атырау», рассчитанный за скользящий трехлетний период.
 - - - - расход воды р. Жайык; - средняя температура воздуха за теплый период на МС «Атырау», рассчитанная за скользящий трехлетний период; — линия тренда средней температуры воздуха за теплый период, - - - - линия тренда расхода воды

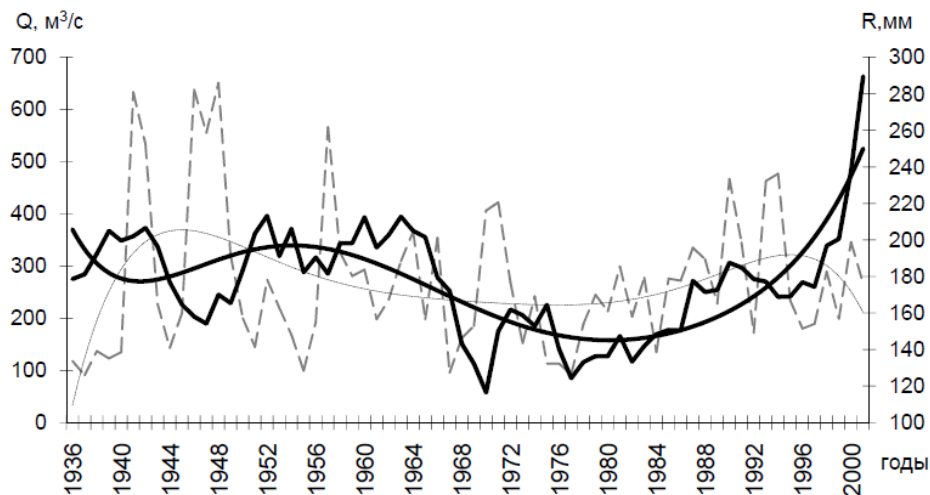


Рисунок 6 – Временной ход расхода воды р. Жайык и годовой суммы осадков на МС «Атырау», рассчитанный за скользящий пятилетний период.
 - - - - расход воды р. Жайык; - годовое количество осадков на МС «Атырау», рассчитанное за скользящий пятилетний период; — линия тренда осадков, - - - - линия тренда расхода воды

Совместный анализ временного хода температуры и осадков в Уральске и Атырау показывает, что экстремумы в них не совпадают, особенно осадки (рисунок 6). Максимум количества осадков имел место в Уральске в 1948, 1965 и 1994 гг. В Атырау максимум едва заметен в 1942, 1952, 1963 гг., в то время как в Атырау основной максимум был в 2001 г. Таким образом, в Атырау временные ряды температуры и осадков не коррелируют с величиной стока. Представляло интерес установить причину.

В работах [9-11] была выполнена типизация всей территории Казахстана по особенностям временного хода климатической температуры. Северо-запад отнесен ко второму типу, а юго-запад, где находится Атырау, – к четвертому. Следовательно, было зафиксировано принципиально разное изменение климатической температуры в этих районах. Сходный результат получен в [12] для района Алматы.

Из теории общей циркуляции атмосферы [13,14 и др.] известно, что режим осадков севернее и южнее 50° с. ш. сильно различается, поскольку вдоль этой широты расположена ось климатического гребня давления. Соответственно, севернее 50° с. ш. максимум осадков имеет место летом, а южнее (Атырау) – в весенний период [4]. Вековые колебания положения осей ложбин и гребней формируют положение экстремумов температуры во временном ходе, но эти экстремумы в разных регионах наступают не одновременно, что и зафиксировано в делении территории на типы в [9– 11]. Таким образом, климатические колебания температуры и осадков южнее пятидесятой широты на величину стока р. Урал практически не влияют, так как области его формирования расположены севернее 52° с. ш. восточнее и западнее Южного Урала.

Связь количества осадков с формами циркуляции. Представляют интерес не только количество осадков, выпавшее в течение года, но и макросиноптические условия, при которых эти осадки выпадали, поскольку близкой или отдаленной целью любых исследований в нашей области является прогнозирование таких условий. Средняя годовая характеристика макроциркуляционных условий для этой цели малопригодна. Поэтому мы взяли ежемесячные данные об осадках, месяцы при необходимости объединялись в холодный и теплый периоды. При этом в холодный период были включены семь месяцев с октября по апрель включительно. В северных районах Казахстана, для которых осуществлялся анализ, снег, выпавший с октября по апрель, сходит в последней декаде апреля, обеспечивая весенний паводок [4].

Были рассмотрены колебания стока реки Урал во взаимосвязи с повторяемостью типов макропроцессов как элементов общей циркуляции, обуславливающим выпадение большего или

меньшего количества осадков на территории водосбора. Из большого числа работ, посвященных изучению осадков в районе горного хребта и прилегающих территорий, выделим работу А. С. Шкляева [8] как наиболее полную, содержащую максимальное количество информации о такой связи для рек Среднего и Северного Приуралья. С тех пор проблемой связи между формами атмосферной циркуляции и величинами стока рек Приуралья практически никто не занимался. Правда недавно вышла работа [15], в которой выполнена обстоятельная оценка изменений температуры воздуха и осадков Среднего и Южного Урала в XX веке, которую можно считать дальнейшим развитием направления исследований, заявленных в [8].

Мы осуществили поиск связей между месячным количеством осадков для станций «Уральск» и «Костанай» и типом макропроцессов по Г. Я. Вангенгейму. Для этого было вычислено среднее количество осадков холодного и теплого периодов, оно близко к 22–32 мм/мес для холодного и 37–46 мм/мес для теплого периодов для обеих станций. Затем месячное количество осадков было разбито на градации по 10 мм в большую и меньшую стороны от «нормы». Для каждой из градаций была подсчитана средняя повторяемость каждого из трех типов макропроцессов в числе дней, т.е. суток по [13, 18].

Было получено, что и для теплого, и для холодного сезонов количество осадков слабо коррелирует с изменением повторяемости типов циркуляции, если осадки изменяются в небольших пределах. Мы это объясняем тем, что не учитывается интенсивность типов процессов.

В связи с отмеченными особенностями мы решили задачу изменить, сократив количество градаций осадков до двух. Далее нами рассмотрена средняя повторяемость типов макропроцессов для случаев, когда осадки «выше нормы» и когда они «ниже нормы». При этом градацию, в которую попадает норма, мы исключили из подсчетов аномалий вообще, в результате сумма отклонений повторяемости типов перестала равняться нулю. Данные о норме используются только в анализе для сравнения. Представлялось, что это обеспечит большие различия в повторяемости типов для данных градаций. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1– Типы циркуляции при осадках «ниже нормы» и «выше нормы», Уральск

Типы циркуляции	Сезоны					
	Холодный			Теплый		
	Осадки, мм			Осадки, мм		
	<20	норма	>30	<20	норма	>30
W	9,2	8,8	10,5	7,9	9,0	7,2
E	12,4	10,1	7,7	13,9	11,7	9,8
C	10,8	10,2	12,3	8,6	9,7	13,9

Рассмотрим данные для Уральска (см. таблицу 1). Сравнивая данные таблицы 1 и повторяемость типов для нормы, можно отметить следующее. В холодный период количество всех осадков «выше нормы» наблюдается при существенно разной повторяемости типов, чем «норма». Так, повторяемость типов W, E и C при «норме» составляет 8,8; 10,1 и 10,2 дня соответственно, а при осадках «выше нормы» повторяемость этих же типов равна 10,5; 7,7 и 12,3 дня соответственно, т.е. при всех осадках выше нормы повторяемость типа W возросла на 1,7, типа C – на 2,1 дня, а повторяемость типа E понизилась на 2,4 дня.

При осадках холодного периода «ниже нормы» повторяемость типов составила 9,2, 12,4 и 10,8 дня соответственно, т.е. повторяемость W снизилась на 1,2 дня, типа C несколько возросла – на 0,6 дня, а типа E заметно возросла на 2,3 дня.

В теплый период при осадках «выше нормы» в Уральске повторяемость типов W, E, C составляет 7,2, 9,8 и 13,9 дня соответственно, т.е. повторяемость типа C возрастает на 4,2 дня, а типа W понижается на 1,8 дня. Повторяемость типа E понижается на 1,9 дня.

При осадках ниже нормы повторяемость типов C и W снижается незначительно – на 1,1 дня, а повторяемость типа E возрастает на 2,2 дня. Обобщая данные для Уральска, следует отметить, что и в холодную, и в теплую части года осадки выше нормы наблюдаются при заметном росте повторяемости типа C (2,1 и 4,2 дня соответственно) и снижении повторяемости

типа Е (2,4 и 1,9 дня соответственно). Повторяемость типа W зимой возрастает на 1,7 и 1,8 дня соответственно.

При осадках ниже нормы и в холодную, и в теплую часть года прежде всего заметно возрастает повторяемость типа Е – на 2,3 и 2,2 дня соответственно. В холодную часть года снижения повторяемости типов С и W при осадках ниже нормы нет, а летом уменьшение повторяемости типов С и W составляет 1,1 дня.

Аналогичный анализ выполнен и для станции «Костанай». Рассмотрим эти данные.

В Костаная в теплый период осадки выше нормы имеют место при повышенной по сравнению с нормой повторяемостью типа Е, как и осадки ниже нормы, в то время как в холодный период осадки выше нормы наблюдаются при пониженной повторяемости типа Е, а ниже нормы – при повышенной.

Осадки «выше нормы» в теплый период имеют место при по сути неизменной повторяемости типа С, а ниже «нормы» – при значительном её снижении. В холодный период все наоборот: осадки выше «нормы» – при заметном росте типов Е и С, а ниже «нормы» – при почти неизменной повторяемости типа С и заметном росте типа Е. Как мы видели, в Уральске осадки выше нормы в теплый период имеют место только при заметном росте С, а также W и одновременном падении типа Е. Осадки «ниже нормы» – при заметном росте Е и снижении С, а также W. В холодный период тенденции изменения типа Е такие же, как и в теплый, а повторяемость типов С и W при осадках «ниже нормы» несколько даже возрастает. Следовательно, в пределах одного бассейна реки Урал, но в разных его частях, экстремальные осадки в Уральске и Костаная имеют место при несколько разных макросиноптических условиях.

Связь стока реки Урал с формами циркуляции. Анализ экстремумов расхода воды р. Урал показал, что минимум стока в тридцатые годы имел место при преобладающих макропроцессах W(9) + E(15). При этом тип C(-26) имел наименьшую повторяемость.

Максимум стока в пятидесятые годы имел место при преобладающих процессах C(+9) + E(18). Повторяемость типа W(-19) была очень низкой. На факт, что восточнее Южного Урала при повышенной повторяемости типа Е формируются условия для выпадения осадков «выше нормы», сообщалось ещё в [17]. Из таблицы 2 следует, что в районе Костаная в теплую часть года осадки «выше нормы» имеют место при повышенной повторяемости типа Е и пониженной – типа W. Сходство имеется и в условиях, когда наблюдались осадки «ниже нормы» и имел место минимальный сток реки Урал. Строгая зависимость невозможна ввиду наличия двух водосборов западнее и восточнее Южного Урала с несколько разными условиями формирования экстремумов осадков, как нами было показано.

Таблица 2– Связь величины стока р. Урал с формами циркуляции (дни)*

Вид экстремума	Годы	Тип циркуляции	
		Типы для периодов экстремумов стока	По Вангенгейму (эпохи)
min	1928-30	W (9), C(-26), E(15)	Е
max	1949-58	W (-19), C(+9), E(18)	Е+С
min	1970-1984	W(-37), C(-25), E(64)	Е
max	1998-2002	W(41), C(-14), E(-26)	W

* В скобках дано среднее (в пересчете на год) отклонение повторяемости типа от нормы в числе дней.

Второй минимум стока в 70-е – 80-е годы имел место в эпоху Е при преобладающей повторяемости этого типа, E(64), при примерно такой же повторяемости типа C(-25). Тип W(-37) был выражен тоже слабо. Сравнивая эти условия с условиями формирования осадков «ниже нормы», отметим, что западнее Южного Урала при преобладании типа Е осадки ниже нормы независимы от времени года, а восточнее они «ниже нормы» только в холодную часть года. Важно при этом распределение типов, соответственно и осадков в течение года. Следовательно, имевшие место два минимума стока р.Урал наблюдались при довольно разных сочетаниях типов.

Максимум двухтысячных годов имел место при преобладании типа W(41), низкой повторяемости типов C(-14) и E(-26). Следовательно, и максимальный сток р. Урал может иметь место при довольно разном сочетании типов циркуляции (таблица 3).

Таким образом, выводы, полученные А. С. Шкляевым [8], и наши в общем хорошо согласуются. Поскольку имеются по сути два водосбора, один восточнее, а другой западнее Южного Урала, а условия выпадения экстремального количества осадков в каждом из водосборов, как мы показали, разные, то сочетание двух типов макропроцессов, обеспечивающих экстремумы стока, является ожидаемой ситуацией. Минимумы стока имеют место при максимальной повторяемости типа E с низкой повторяемостью типа C и W. Максимум стока отмечаются при типе C или W с довольно высокой повторяемостью и при низкой повторяемости типа E. Вместе с тем связь между годовыми колебаниями стока и числом дней за год определенного типа циркуляции часто оказывалась слабой, что мы отмечали по ходу анализа. Годы наибольшей и наименьшей водности подготавливаются в течение длительного периода и наступают, как правило, в конце той эпохи, которая обуславливает наиболее благоприятные или неблагоприятные условия формирования стока в данном районе. Эти условия формируются в том числе и в динамике повторяемости величины и сочетаний типов макропроцессов.

Наши исследования показывают, что для прогнозирования ситуаций «осадки выше нормы» и осадки «ниже нормы» использование повторяемости макротипов синоптических процессов целесообразно.

Ожидаемые изменения температуры, осадков и стока р. Урал на перспективу. *Температура.* Нами выполнен гармонический анализ временных рядов температуры, осадков в бассейне реки и самого стока р. Урал. На рисунке 3 представлены временной ход температуры, аппроксимированный полиномом шестой степени для станции Уральск, а на рисунке 7 – результаты гармонического анализа этого же ряда.

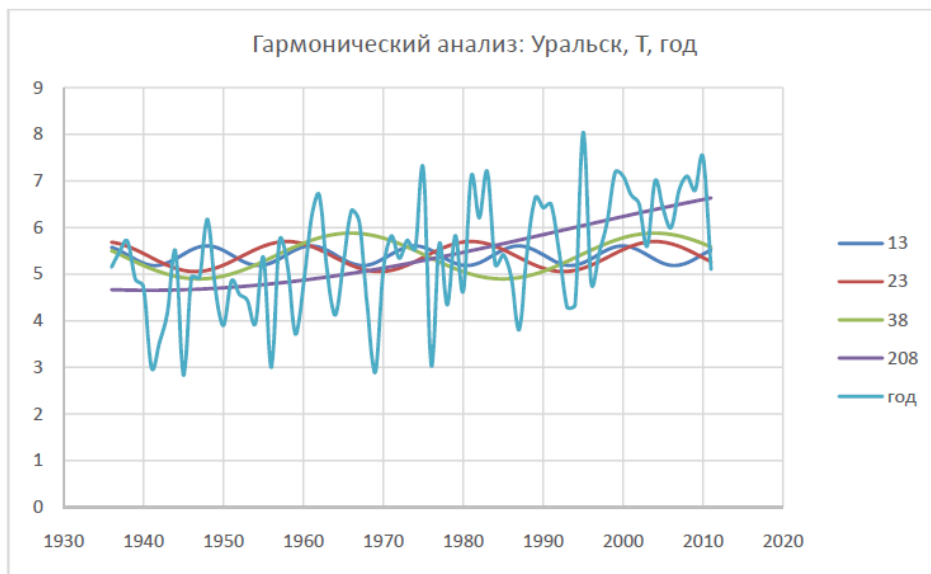


Рисунок 7 – Уральск. Гармоники в рядах температуры

Аппроксимированная кривая является, по сути, результатом сложения основных гармоник временного ряда температуры за период наблюдений. Можно видеть, что в течение анализируемого периода имели место как потепления, так и климатические похолодания. Гармонический анализ ряда (см. рисунок 4) показывает, что основными гармониками являются вековая (20 лет), а также гармоники 38, 23 и 13 лет. Сложение основных гармоник, выделение и учёт тренда осуществлены по методу А. В. Бабкина, который широко применяется в гидрологии для построения сценариев изменения стока [19].

Амплитуды первых трёх гармоник примерно одинаковы в обоих пунктах: 1,2–1,4; 0,8–1,2 и 0,5 °С соответственно.

Анализируя временной ход гармоник температуры, можно видеть, что начиная с 2005–2006 гг. 38- и 23-летняя гармоника, достигнув максимума, начали уменьшаться по амплитуде. Их минимум ожидается через 11–19 лет, т.е. с 2016 по 2024 г. Следовательно, примерно до 2016 г. снижение температуры будет происходить довольно быстро под воздействием двух гармоник, а затем, до 2024 г., под воздействием только одной 38-летней гармоник.

Общее снижение температуры составит примерно 2,1 °С, т.е. оно будет равно сумме амплитуд двух гармоник. Восемилетняя гармоника имела максимум в 2013 г., после чего её амплитуда уменьшится до минимума в 2017 г., однако амплитуда этой гармоник не превышает 0,41 °С и её вклад во временной ход температуры будет слабым.

Совершенно аналогично выполнен анализ временного ряда температуры для станции «Костанай». Ввиду сходства результатов рисунки не приводятся. Поскольку в Костаное амплитуда основных гармоник такая же, как и в Уральске, и время наступления их максимумов (2005 г.) совпадает, то следует ожидать такого же хода температуры, как и в Уральске, т.е. понижения в ближайшие одно-два десятилетия на 1-1,5 и 1 °С соответственно.

Следовательно, температурный фон в районе водосбора через 15–25 лет будет ниже современного и потери влаги на испарение тоже будут ниже современных.

Осадки. Рассмотрим далее временные ряды осадков и их гармоник для станции «Уральск» (рисунки 5, 6), а также для станции «Костанай» (рисунки 4, 8).

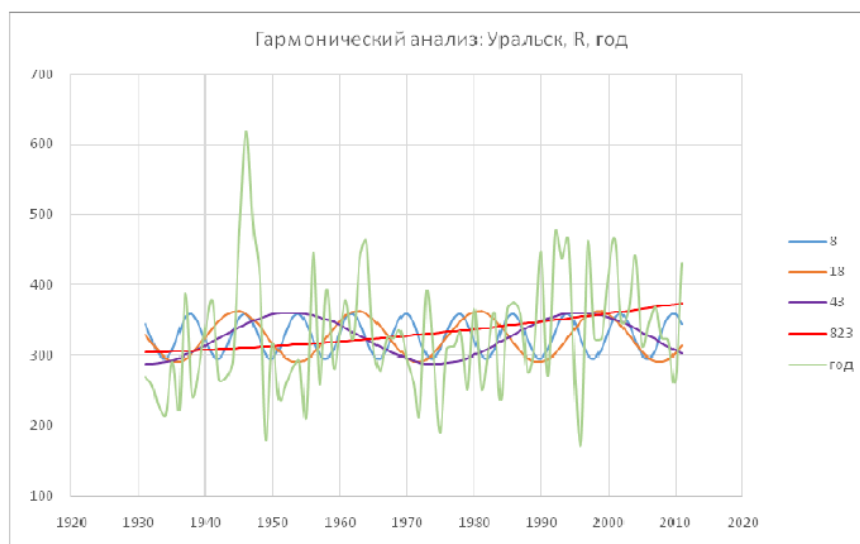


Рисунок 8 – Уральск. Результаты гармонического анализа временного ряда осадков

Из рисунке 4 видно, что во временном ряде осадков тоже имели место климатические экстремумы. Во временном ряде осадков станции «Уральск» имеют место гармоник продолжительностью 43, 18 и 8 лет, амплитуды которых 100, 70 и 45 мм соответственно (см. рисунок 6). Во временном ряде осадков в Костаное имеют место 38-, 23- и 8-летняя гармоник с амплитудами 55, 50, и 25 мм соответственно. Однако амплитуды основных гармоник в Уральске почти в два раза больше, чем в Костаное [11,18]. Соответственно условия формирования стока в регионах будут разные.

Гармонический анализ ряда показал, что в осадках на станциях «Уральск», «Костанай» и практически на всей территории Казахстана отсутствуют вековые гармоник, что затрудняет построение сценариев. Западнее Южного Урала (станция «Уральск») максимум 43-летней гармоник имел место около 1998 г. и до 2020 г. её амплитуда будет уменьшаться. Это снижение с

2008 г. в значительной степени компенсируется ростом 18-летней гармоники, а с 2013 г. – и 8-летней гармоникой. В результате до конца текущего десятилетия количество осадков может понизиться в пределах 10 мм, а в следующем десятилетии следует ожидать роста до 50 мм за счёт роста основной 43-летней гармоники, который начнётся в начале третьего десятилетия.

На станции «Костанай» максимум 38-летней гармоники имел место около 1998 г. и до 2020 г. её амплитуда будет уменьшаться.

Это снижение с 2012 г. в значительной степени компенсируется ростом 23-летней гармоники, а с 2013 г. – и 8-летней гармоникой. В результате до конца текущего десятилетия количество осадков может понизиться в пределах 10 мм. В то же время благодаря ожидаемому снижению температуры воздуха испарение с поверхности водосбора уменьшится, что должно компенсировать уменьшение количества осадков. Соответственно сток р. Урал должен сохраниться около нынешних значений.

В следующем десятилетии следует ожидать роста до 50 мм за счёт роста основной 38-летней гармоники, который начнётся в начале третьего десятилетия. Сравнивая амплитуды гармоник и время наступления экстремумов, не трудно найти, что снижение осадков в текущем и следующем десятилетии составит около 25 мм. После 2030 г. количество осадков начнёт возрастать.

Согласно расчётам в следующем, третьем, десятилетии ожидается рост количества осадков в восточной части водосбора на 25–30 мм и в западной – на 40–50 мм при пониженном по сравнению с настоящим периодом температурном фоне. В результате сток р. Урал должен увеличиться.

Выполненный нами анализ последних трендов температуры, однако, показал, что климатический рост температуры в данном регионе прекратился. Этот результат потребует уточнений через три-пять лет и, если тренд будет подтверждён, то никакие адаптационные шаги не потребуются. Однако поскольку данный регион, включая его северную часть, относится к зоне рискованного земледелия, то адаптационные шаги уже не к изменению климата, а к большей межгодовой изменчивости осадков и засухам всё-таки будут очень желательны.

Как можно приложить результаты, полученные для бассейна реки Урал, к оценке ожидаемого изменения поверхностного стока по всей территории Казахстана? Для этого нужно знать, как изменяются климатические колебания температуры и осадков по всей территории. В работах [9–11] нами было показано, что синхронности в изменении этих параметров нет. Рассмотрим поэтому конкретнее, как эти параметры изменялись в прошлом и какие изменения ожидаются в ближайшие десятилетия.

Климатические колебания температуры и осадков в прошлое столетие на всей территории Казахстана и сценарий ожидаемых изменений до 2050 г. Проблема достаточно обстоятельно изложена в работе одного из соавторов [11]. Ограничимся поэтому только изложением результата на основе данных таблицы 3.

Максимальную амплитуду имеет вековая гармоника 2,7–1,5 °С. Амплитуды вторых гармоник повсеместно меньше. Время наступления экстремумов вековых гармоник заметно различается по территории.

Установлены связи каждого из случаев климатических похолоданий и потеплений с характеристиками общей циркуляции атмосферы [11].

Представляло интерес рассмотреть внутригодовую структуру нынешнего похолодания. Первые признаки похолодания появились в декабре 1995 г., и к концу 2010 г. суммарное похолодание в этот месяц составило 3 °С. В январе похолодание появилось всего на год позже, в 1996 г., но к 2010 г. оно составило 9 °С. В феврале похолодание начало фиксироваться только с 2000 г., т.е. через пять лет после его первого появления в декабре, и к 2010 г. было 6 °С. В марте похолодание началось только в 2006 г. и составило 2,5 °С до контрольного срока. В апреле похолодание начало отмечаться только с 2007 г. и равнялось к 2010 г. всего 0,2 °С.

Таким образом, с декабря по апрель похолодание, впервые проявившись в декабре 1995 г., постепенно распространялось на последующие месяцы до апреля включительно в течение 12 лет. За это время наиболее значительные понижения температуры произошли в зимние месяцы в декабре (3 °С), январе (9 °С) и феврале (6 °С).

Таблица 3 – Амплитуды климатических колебаний температуры, °С

Станции	Экстремумы						
	max 30-40 г.	min 40-50 г.	max 65-75 г.	min 80-90 г.	max 2003 г.	Вековая гармоника	0,5 веков. гарм., годы
Уральск	0,7	0,8	0,3	0,3	1,2	2,2	60
Иргиз	0,3	0,5	0,1	0,3	0,7	2,0	54
Караганда	0,3	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5	51
Жезказган	0,6	0,6	0,2	0,3	0,1	2,4	53
Семипалатинск	1,0	1,0	0,1	0,1	1,5	1,5	51
Усть-Каменгорск	1,2	1,0	0,3	0,2	1,0	1,2	50
Кзылорда	0,9	0,9	0,1	0,2	0,3	2,3	50
Аральское море	0,6	0,5	0,1	0,1	1,0	2,7	50
Павлодар	0,2	0,3	0,1	0,1	1,3	1,9	42
Балкаш	0,3	–	0,3	–	0,1	1,4	–
Костанай	0,8	0,9	0,3	0,3	0,7	2,4	54
Астана	0,2	0,3	0,2	0,3	0,8	2,1	54
Талдыкорган	0,4	0,5	0,3	0,2	0,7	2,2	52
Шымкент	1,0	0,6	0,3	0,4	0,3	1,8	50
Форт Шевченко	1,0	0,9	0,4	0,6	0,3	1,7	60

В остальные месяцы года похолодание распространялось без выраженной закономерности.

Сценарий ожидаемых изменений температуры до 2050 г. По результатам гармонического анализа временных рядов температуры и осадков по станциям Казахстана выделены наиболее значимые по амплитуде гармоник с периодом, превышающим 10 лет, и на их основе построены сценарии изменения температуры и осадков к 2050 году. Температура к тому времени понизится практически на всей территории на 1,1–3,0 °С, опустившись до уровня шестидесятых годов XIX века.

Используя информацию, содержащуюся в работе [18], мы выполнили такие расчеты на основе гармонического анализа в предположении, что обнаруженные во временных рядах температуры и осадков основные гармоник сохраняются.

На рисунке 9 представлена карта пространственного распределения средних годовых величин температуры (числитель) и ожидаемого изменения средней годовой температуры с момента начала похолодания, т.е. примерно за 40 лет (знаменатель). Она построена по методике [19], в основе которой лежит предположение, что имеющиеся место гармоник сохраняются и в будущем.

Можно видеть, что на всей территории республики температуры понизятся. Понижения следует ожидать от 1,0 до 3,0 °С. Величины похолодания примерно соответствуют имевшим место в последние десятилетия величинам потепления [11]. Это и естественно, поскольку основной вклад в колебания температуры вносит вековая гармоника (около 110 лет), максимум которой имел место около 2000 г. Соответственно самое значимое похолодание до 3 °С ожидается в районе Туркестана, а также на юго-востоке республики –1,5–1,8 °С. Такой же величины похолодание ожидается на северо-востоке в районе Астаны–Павлодара–Семипалатинска. Над центральными и западными районами ожидается несколько меньшее понижение температуры –1,1–1,3 °С.

Средние годовые температуры воздуха к 2050 г. опустятся до нормы, рассчитанной за период наблюдений, предшествующий росту температур в конце XX века.

Климатические колебания осадков и осадков в прошлое столетие и сценарий ожидаемых изменений до 2050 г. В таблице 4 представлено время наступления экстремумов осадков в сравнении с экстремумами температуры.

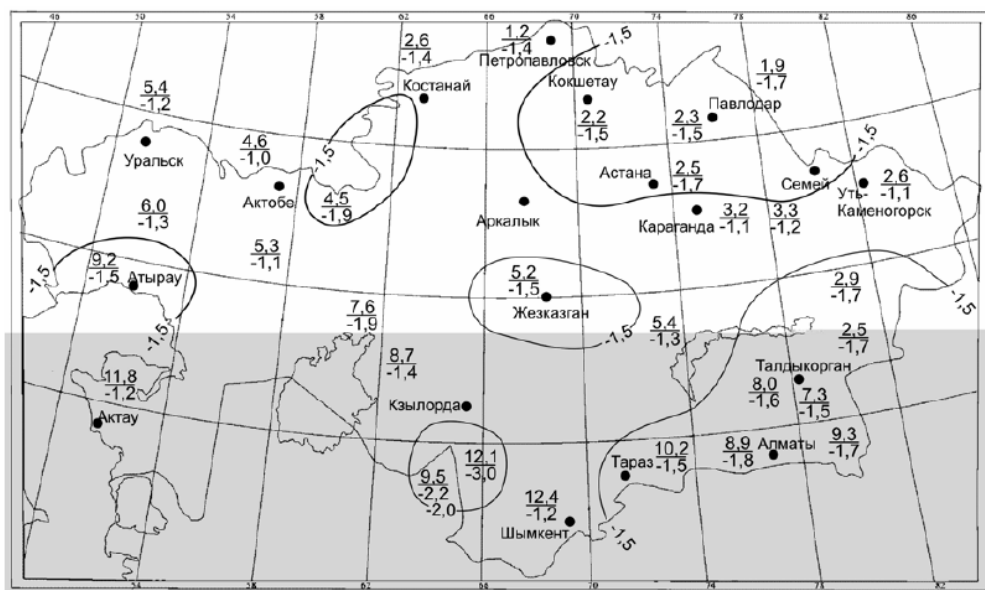


Рисунок 9 – Сценарий изменения поля температуры по территории Казахстана к 2050 г.

Таблица 4 – Чередование экстремумов температуры (t) и осадков (Q),годы

Станции	Экстремумы									
	max t	min Q	min t	max Q	max t	min Q	min t	max Q	max t	
Павлодар	39	–	54	64	74	–	85	98	0,2	
Уральск	35	48	44	48	68	72	88	99	98	
Туркестан	37	37	52	59	69	84	84	05	06	
Жаркент	42	41	57	58	76	78	91	92	06	
Астана	39	–	49	60	72	85	88	03	05	
Куйган	42	40	58	70		88		06		
Самарка	42	36	59	56	–	82	88	98	03	
Атырау	38	37	51	51	72	76	89	02	06	
Караганды	40	39	51	59	73	81	88	04	04	
Жамбыл	40	38	54	58	74	82	88	03	06	
Усть-Каменогорск	42	37	58	68	77	92	92	07	06	
Костанай	35	42	43	56	66	76	84	00	04	

Из таблицы 4 следует важный для прогноза вывод, что экстремумы температуры и осадков по территории республики между собой не связаны ни временем наступления, ни тенденцией.

В таблице 5 представлены результаты гармонического анализа временных рядов осадков по некоторым станциям Казахстана. Приведены данные по трём основным гармоникам. Прежде всего, можно видеть, что во временных рядах осадков вековая гармоника отсутствует. Для первой гармоники характерен период 33–48 лет, который известен как брикнеровский цикл. Период второй гармоники равен 23 года. Амплитуды первой и второй гармоник близки – от 20 до 90 мм осадков. Период третьей гармоники неустойчив по территории и изменяется от 8 до 18 лет, амплитуда этой гармоники несколько меньше, чем двух первых.

Таблица 5 – Основные гармоники (период, годы) в рядах осадков и их амплитуды, мм

Станции	Первая		Вторая		Третья	
	период	амплитуда	период	амплитуда	период	амплитуда
Куйган	43	10	23	20	13	18
Алматы	42	25	27	30	18	18
Жаркент	68	20	28	40	18	40
Талдыкорган	33	30	23	35	–	–
Жамбыл	38	105	23	30	13	30
Туркестан	–	–	–	–	–	–
Шымкент	38	65	–	–	–	5
Казалинск	36	15	21	10	15	20
Аральское море	–	–	28	30	8	40
Кызылорда	33	25	–	–	13	30
Самарка	53	60	23	40	13	30
Катон-Карагай	48	100	23	90	8	90
Усть-Каменгорск	–	–	23	35	–	–
Аягуз	33	50	–	–	18	40
Караганда	—	80	–	–	13	55
Маргук	38	60	–	–	13	40
Новосибирск	43	120	23	65	8	20
Темир	33	60	–	–	18	40
Актобе	38	35	–	–	–	75
Ф.-Шевченко	48	30	28	30	8	35
Атырау	33	30	–	–	18	20
Уральск	43	65	–	–	18	65
Баянаул	38	45	–	–	8	15
Павлодар	–	–	–	–	15	38–50
Щербакты	33	30	–	–	8	20
Астана	43	50	23	40	8	40
Кокшетау	–	–	28	65	18	65
Костанай	38	35	23	35	8	15

Сделаем краткий вывод. Для временных рядов осадков характерными являются гармоники полuveковые, в половину и в треть от полuveковых. Вековые гармоники с периодом 100–120 лет для временных рядов осадков, в отличие от временных рядов температуры, не характерны.

Амплитуду гармоник можно проанализировать на основе данных таблицы 5. Амплитуда первой гармоники наибольшая только в 50% станций, в остальных самую большую амплитуду имеет вторая гармоника или даже третья. Этот факт существенно снижает достоверность прогностических сценариев на перспективу.

Установлена связь колебаний количества осадков с типами макропроцессов и гармониками в их рядах [9–11].

Сценарий изменения поля осадков на перспективу. Изменение количества осадков к 2050 г. будет неоднозначным (рисунок 10).

Здесь в числителе приведена норма количества осадков, а в знаменателе – их ожидаемые изменения к 2050 г. Как видно из рисунка 1, количество осадков претерпит разнонаправленные изменения. По северу, востоку и юго-западу республики осадки увеличатся на 20–30 мм, а на западе и юго-востоке они примерно на столько же уменьшатся. На востоке республики количество осадков возрастает на 10–50 мм. Примерно такое же увеличение осадков ожидается над Северным Казахстаном –20–40 мм. В районе Арала – Кызылорды осадки тоже повысятся на 10–25 мм.

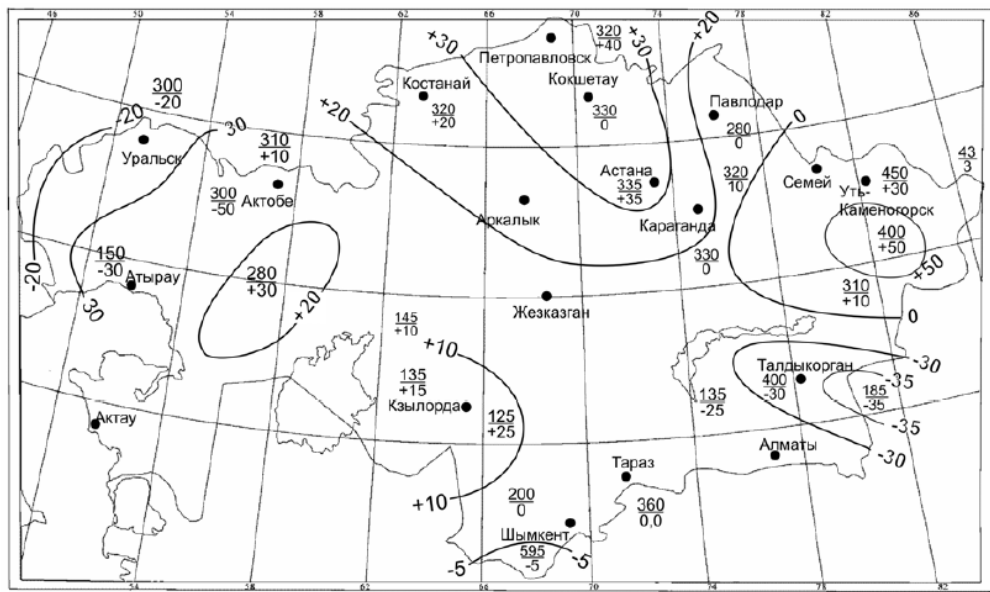


Рисунок 10 – Сценарий изменения поля осадков по территории Казахстана к 2050 г.

В полосе Павлодар-Шымкент изменения количества осадков не ожидается. На западе республики, а также на юго-востоке ожидается уменьшение количества осадков на 20–35 мм/год.

Только на небольшой части территории Казахстана количество осадков к 2050 г. Изменится более чем на 10% от нормы. На северо-западе республики ожидаемое снижение несколько превышает эту долю. В основном земледельческом районе, Северном Казахстане, количество осадков даже увеличится. Следовательно, условия для сельскохозяйственной деятельности останутся, как и в настоящее время, не простыми, но они не ухудшатся.

Обсуждение. Вывод о том, что на территории Казахстана началось похолодание, не является совсем неожиданным. По крайней мере, с 2011 г. национальная метеослужба Российской Федерации фиксирует начало похолодания на севере европейской части России, а также по югу Западной Сибири и юго-востоку Восточной Сибири в зимнее время [20]. Несколько меньшее похолодание отмечается на этих же территориях весной и летом. Только осенью оно отсутствует. Мы отмечали, и это подтверждается большинством исследователей, что основная часть потепления имела место в зимний период. Начало заметного похолодания в этом сезоне компенсирует имевшее место потепление.

Мы в нашем исследовании исключили из анализа горные районы, поскольку для этого требуются другие подходы. Однако в работе [21] показано, что на леднике Туйыксу в горах Илейского Алатау (юго-восток Казахстана) тоже началось похолодание. При этом там увеличилось количество осадков в твёрдой фазе.

В исследованиях Занди Рахмана, диссертацию которого мы рецензировали, показано, что в Иране, в провинции Хузестан, в холодный период года рост температуры прекратился [22]. Имеется ряд других исследований, подтверждающих тенденции к похолоданию на Евразийском континенте.

Как нами показано, начавшееся похолодание происходит в основном зимой и на фоне роста вековой гармоничности зонального переноса (тип W). Известно, что усиление зонального переноса обычно приводит к выносу тёплых масс с океана на континент, что должно способствовать потеплению. На самом деле зональный перенос приводит к активизации циклогенеза, но циклоны перемещаются вдоль 65 параллели, осуществляя вынос тёплого воздуха в Арктику. В тылу этих циклонов, однако, поступает холодный воздух в умеренные широты, где и располагается Казахстан [23]. Конкретные механизмы реализации волновых колебаний нами не

рассматривались. Как сказано в той же работе [22], «вопрос о физических причинах, вызывающих эти колебания, остаётся открытым».

Чувствительность рек в засушливом регионе к изменению климата очень высока. Сток чутко реагирует на весьма незначительные климатические колебания температуры и осадков на границе зоны формирования стока. Антропогенные воздействия на компоненты окружающей среды в бассейне реки могут оказать на неё самое неблагоприятное воздействие.

В работе [15] авторы, изучая климатические изменения температуры воздуха и осадков на территории Среднего и Южного Урала в XX веке, сделали вывод «...о неоднозначности тенденции изменения климатических характеристик в XX столетии на территории Урала. Установлены ритмические особенности изменений температуры воздуха и осадков». К полученным авторами результатам, сходным с нашими, мы можем только добавить, что на территории Казахстана, примыкающей к водосборам р.Урал, и в казахстанской части её бассейна вплоть до Каспия мы зафиксировали тоже только колебания климата. Поскольку методы анализа у нас другие, то мы зафиксировали «ритм» разной продолжительности: вековые, близкие к полувековым (брикнеровские) и более короткие. Вековой цикл, имевший наибольшую амплитуду, закончился, а в анализируемом районе заканчивается, однако за счёт более коротких гармоник и здесь климатический тренд температуры уже стал отрицательным. В других районах Казахстана климатическое похолодание началось раньше [11 и др.].

В работе [23] методами моделирования изучалось влияние глобального изменения климата на гидрологическую систему Аральского моря, расположенного, по сути, в центре Евразии. Несмотря на то, что область формирования стока находится на расстоянии около полутора тысяч км от моря, а система учёта потребляемой воды на этом участке ненадёжна, авторы всё же пришли к выводу, что влияние изменения климата на процессы в бассейне Арала значимо. Водоёмы аридной зоны чувствительны к малейшим климатическим колебаниям температуры и осадков.

В [24] авторы изучали влияние изменения климата на подземное питание рек в Великобритании. И хотя Великобритания находится вне аридной зоны, авторами отмечено, что такая зависимость существует. Это указывает на довольно сильную зависимость поверхностного стока от климатических колебаний температуры и осадков независимо от природной зоны. Существующий баланс между осадками и температурой, с одной стороны, и поверхностным стоком – с другой, будучи достаточно устойчивым на временном промежутке от одного года до нескольких, очень чувствителен к климатическим изменениям, т.е. изменениям на временном отрезке до 10 лет.

В [25] анализируются не только временные, но и пространственные изменения количества осадков на величину стока реки Yangtze за период 40 лет. Полученные результаты подтверждают, что чувствительность водных систем к климатическим изменениям высока даже за пределами аридной зоны. Имеется ряд других работ, посвящённых данной проблеме, но со сходными закономерностями.

Наши результаты для бассейна реки Урал в общих чертах подтверждают полученные для других речных бассейнов общие выводы. Однако ввиду наличия ряда особенностей кроме аридности климата, таких, как наличие двух бассейнов формирования стока, разделённых горами, принципиально разных условий формирования экстремальных осадков в каждом из них и др., мы получили свои особенные связи и ожидаемые сценарии изменения стока на перспективу.

В настоящее время имеются достаточно надёжные данные о расходе воды по гидрологическим постам вдоль реки Урал и практически отсутствуют данные о заборе воды на сельскохозяйственные и хозяйственные нужды. Бассейновый учёт используемой воды и контроль её качества, по сути, отсутствуют. Это затрудняет оценку антропогенного воздействия на сток. В то же время очевидно, что система чувствительна к таким воздействиям. Решение такой задачи ещё предстоит.

Выводы. В результате исследований динамики стока в условиях изменения климата в Казахстане получено следующее:

1. По климатическим колебаниям температуры и осадков:

климатические колебания и температуры, и осадков, формирующие поверхностный сток, имели место не только в настоящее время, но и в прошлом веке; такие колебания никогда не случаются одновременно на всей территории республики, они появляются где-нибудь на её границе, а затем постепенно в течение нескольких лет распространяются на всю территорию;

между климатическими колебаниями температуры и осадков не обнаружено синхронности или согласованности, следовательно, построение сценариев их изменения для всей территории республики возможно только по отдельности и порегионально;

по причинам, указанным выше, построение сценариев климатического изменения стока возможно только для каждой отдельной реки, т.е. по бассейнам;

наблюдавшийся в последние десятилетия рост температуры в начале XXI века прекратился, похолодание началось на северо-востоке и к 2010 г. охватило всю территорию;

во временных рядах температуры имеют место вековая, полувековая и четвертьвековая гармоники, выбирающие до 95% дисперсии. Максимальную амплитуду – до 2,1 °С амплитуда последующих гармоник быстро уменьшает. Данные гармоники могут служить основой для построения сценариев изменения температуры на перспективу;

во временных рядах осадков имеют место полувековая и гармоники меньшей продолжительности; амплитуда первых гармоник не зависит от длины, первые четыре гармоники выбирают до 90% дисперсии и могут служить основой для построения сценариев;

при условии сохранения основных гармоник в рядах температуры и осадков построены сценарии ожидаемых изменений температуры и осадков к 2050 г. температура будет понижаться и достигнет к тому времени минимума, наблюдавшегося около тридцатых годов прошлого века, количество осадков будет колебаться, оставаясь на большей части территории около нормы, межгодовая изменчивость осадков останется значительной.

Наши результаты, в первую очередь данные гармонического анализа и анализ пространственно-временного перемещения климатических экстремумов температуры и осадков, хорошо согласуются с результатами исследований общей циркуляции атмосферы, а также с данными анализа динамики атмосферы по спектральным моделям.

2. По бассейну реки Урал. Нами в качестве примера оценена чувствительность стока в бассейне реки Урал к климатическим колебаниям температуры и осадков. Получено следующее:

расход воды р. Урал очень чувствителен даже к небольшим колебаниям климата, при понижении (росте) климатической температуры на 0,5 °С расход воды увеличивается (понижается) примерно на 60 м³/с, а при уменьшении (увеличении) количества осадков на 10 мм/год расход воды уменьшается на 20 м³/с; экстремумы в осреднённых временных рядах осадков и стока в зоне его формирования наблюдаются почти одновременно, в противофазе; по этой причине можно говорить об определенном взаимовлиянии температуры и осадков на величину стока;

наличие водохранилищ на территории России пока никоим образом не ухудшает поступление воды в Казахстан, более того, в маловодные годы поддерживается достаточно высокий расход воды, который за годы существования водохранилищ ни разу не опускался до того минимума, который часто имел место до построения водохранилищ в 20-е – 50-е годы прошлого века;

анализ последних трендов температуры показал, что климатический рост температуры в данном регионе прекратился, в ближайшие десятилетия следует ожидать постепенного понижения температуры на 2,1 °С; количество осадков может понизиться до 2025 г. в пределах 10 мм, в то же время благодаря ожидаемому снижению температуры воздуха, испарение с поверхности водосбора уменьшится, что должно компенсировать снижение количества осадков; Соответственно сток р. Урал должен сохраниться около нынешних значений; к концу третьего десятилетия ожидается рост количества осадков до 50 мм/год и увеличение стока на фоне понижающейся температуры воздуха.

3. К прогнозу поверхностного стока по территории республики в целом. Несмотря на то, что прогноз поверхностного стока возможен только по отдельным бассейнам, некоторые общие выводы возможны:

поскольку климатические колебания и температуры и осадков по территории Республики происходят не синхронно и не одновременно, то ожидать одновременного климатического падения или роста стока не следует;

начавшееся климатическое понижение температуры по всей территории Казахстана будет способствовать некоторому росту климатического стока;

поскольку климатические колебания температуры и осадков по территории невелики, то межгодовые колебания стока будут существенно превышать климатические, прогноз годового стока в конкретном бассейне и будет главной задачей в данной области.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан, грант 0493/GF-4 (Изменение климата в Казахстане и его влияние на сток, экологические системы и сельскохозяйственную деятельность).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 18. Казахская ССР. Кн. 2. – Л.: Гидрометеонздат, 1989 – 440 с.
- [2] Национальный атлас Республики Казахстан. Т. 1. Природные условия и ресурсы. – Алматы, 2010. – 150 с.
- [3] Водные ресурсы Казахстана в новом тысячелетии. – Астана, 2008. – 35 с.
- [4] Sneyers R. On the statistical analysis of series of observations. WMO. Technical Note, 143, 1990. – 190 p.
- [5] Цыценко К.В. Водные ресурсы бассейна р. Урал и их изменения / К.В. Цыценко // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2011. – № 1. – С. 75-82.
- [6] Давлетгалiev С.К. Поверхностные водные ресурсы рек Урал-Каспийского бассейна в границах Республики Казахстан / С.К. Давлетгалiev // Гидрометеорология и экология. – Алматы. – 2011. – № 1. – С. 56-65.
- [7] Гальперин Р.И., Колча Т.В., Аvezова А. Река Жайык (Урал): угроза наводнений в нижнем течении в современных условиях / Р.И. Гальперин, Т.В. Колча, А. Аvezова // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2008. – № 4. – С. 155-165.
- [8] Шкляев А.С. Особенности распределения осадков и стока на Среднем и Южном Урале и их связь с атмосферной циркуляцией / А.С. Шкляев // Ученые записки Пермского государственного университета им. А. М. Горького. – 1961. – № 112. – С. 108-123.
- [9] Чередниченко А.В. Изменение климата Казахстана и возможности адаптации за счет доступных водо-запасов облачности. – Бишкек: Илим, 2009. – 260 с.
- [10] Чередниченко А.В. Изменение климата Казахстана как отклик на его глобальные изменения / А.В. Чередниченко // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2009. – № 3. – С. 5-14.
- [11] Чередниченко А.В. Динамика климата Казахстана. Начало эпохи похолодания. – Алматы, 2015. – 237 с.
- [12] Alexander Cherednichenko, Alexey Cherednichenko, V.S. Cherednichenko, E.N. Vilesov Climate change in the City of Almaty during the past 120 years./ 2015, Quaternary International journal // homepage: www.elsevier.com/locate/quaint.
- [13] Гирс А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные метеорологические прогнозы. – Л.: Гидрометеонздат, 1971. – 280 с.
- [14] Palmen E., Newton C.W. Atmospheric circulation systems. Their structure and physical interpretation. – New York and London, 1969. – 615 p.
- [15] Шкляев В.А., Шкляева Л.С. Оценка изменений температуры воздуха и осадков Среднего и Южного Урала в XX веке / В.А. Шкляев, Л.С. Шкляева // Вестник Челябинского государственного университета. – 2011. – Вып. 5. – С. 61-69.
- [16] Дмитриев А.А., Белязо В.А. Космос, планетарная климатическая изменчивость и атмосфера полярных регионов. – СПб.: Гидрометеонздат, 2006. – 358 с.
- [17] Байдал М.Х. Долгосрочные прогнозы погоды и колебания климата Казахстана. – Л.: Гидрометеонздат, 1964. – Ч. 1 и 2. – 446 с.
- [18] Временные ряды температуры и осадков. Статистический анализ / Александр В. Чередниченко, Алексей В. Чередниченко, В.С. Чередниченко. – Алматы, 2013. – 365 с.
- [19] Бабкин А.В. Методология оценки периодичностей изменений уровня и элементов водного баланса Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 11. – С. 63-73.
- [20] Об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2011 год. – М.: Росгидромет, 2012 www.meteorf.ru
- [21] Ерисковская Л.А. Изменение континентальности климата за последние годы (на примере ледника Туюксу) // Гидрометеорология и экология. – 2015. – № 1. – С. 29-35.
- [22] Зандидарагарби Рахман. Пыльные бури в Хузестане и их изучение с помощью радаров в условиях современных климатических изменений: Автореф. дис. ... канд. географ. наук. – Казань, 2015. – 23 с.
- [23] Сазонов Б.И. Суровые зимы и засухи. – Л.: Гидрометеонздат, 1991. – 240 с.
- [24] Herra P.M., Hiscok K.M. (2008) The effects of climate change on potential ground water recharge in Great Britain. Hydrological processes 22: 73-86 pp.
- [25] Jiang T., Su B.D., Hartman H. (2007) Temporal and spatial trends of precipitation and river flow in the Yangtze river basin, 1961-2000/ Geomorphology 85: 143-154 pp.