

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 504.38. 470.55/.58

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В БАСЕЙНЕ РЕКИ УРАЛ

© 2023 г. Ж. Т. Сивохип^{1,*}, В. М. Павлейчик¹, академик РАН А. А. Чибилёв¹

Поступило 25.11.2022 г.

После доработки 22.12.2022 г.

Принято к публикации 28.12.2022 г.

Представлены результаты анализа региональных изменений климата (температура приземного слоя и атмосферные осадки) за 70-летний период (1950–2020) в бассейне реки Урал. Выводы о трансформации основных параметров регионального климата в исследуемом бассейне получены на основе стандартных методов статистического анализа данных, а также расчета интегральных индексов аномальности климата. Статистически значимые значения коэффициентов линейного тренда иллюстрируют устойчивый рост среднегодовой температуры воздуха в бассейне реки Урал. Наибольший вклад в рост данного параметра вносят первые три месяца календарного года (январь–март) и осенние месяцы (октябрь–ноябрь). Многолетний ход значений количества атмосферных осадков характеризуется отсутствием однонаправленных и статистически значимых трендов. Важной макрорегиональной тенденцией динамики режима атмосферных осадков является увеличение доли осадков холодного периода. В заключение отмечено что выявленные тенденции трансформации регионального климата свидетельствуют о том, что данные изменения являются отражением изменения климатических условий глобального масштаба.

Ключевые слова: температурный режим, атмосферные осадки, линейный тренд, аномалии, региональные тенденции

DOI: 10.31857/S2686739722602691, **EDN:** NYPJGS

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что водный режим рек отражает пространственно-временную специфику поступления воды с поверхности речного бассейна, определяющую устойчивое чередование фаз повышенного и пониженного стока. В свою очередь тип водного режима определяется сезонными различиями в источниках питания рек, обусловленных многолетними и сезонными изменениями погодно-климатических условий. В частности, накопление осадков в виде снега и особенно температуры режима холодного периода определяют главные черты водного режима рек бассейна р. Урал – наличие весеннего половодья и зимней межени [1].

Главной приходной составляющей речного стока являются атмосферные осадки, в связи с этим многолетние колебания рассматриваются в качестве основного фактора развития циклов высокой или низкой водности. В отличие от атмосферных осадков, температура приземного слоя

относится к косвенным факторам формирования речного стока. Вместе с тем изменение температурного режима приводит к трансформации процессов влагообмена и вещественного обмена между элементами высотно-пространственной дифференциации речных бассейнов (атмосферой, растительностью, зоной аэрации и зоной насыщения) [2]. В итоге климатические условия определяют изменчивость сезонных осадков и испарения, а также основные черты внутригодовой изменчивости, аккумуляции и расходования запасов влаги на территории речного бассейна [3].

Долгосрочные трансформации климата (прежде всего повышение среднегодовых значений температуры воздуха) являются неоспоримым и подтвержденным фактом. В глобальном масштабе наиболее интенсивное потепление прослеживается в течение последних 30–40 лет – начиная с 1980 гг. каждое последующее десятилетие было более теплым, чем среднее за предыдущий период (с 1850 г.) [4]. В пределах территории России рост составил более 0.45°C/10 лет [5], а к середине XXI века ежегодный прирост может достичь от 0.7 до 2.6°C, в зависимости от времени года и региона [6]. Так же для территории России характерно преобладание тенденции к увеличению годовых сумм осадков – в среднем за период 1976–2019 гг.

¹ Институт степи Уральского отделения
Российской академии наук, Оренбург, Россия

*E-mail: sivohip@mail.ru

Таблица 1. Сценарные прогнозы роста температуры приземного слоя воздуха в пределах бассейна р. Урал (российская часть) на основе моделей СМІР 5 [12]

Периоды	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
RCP 4.5					
2011–2031	+1.6	+1.4	+1.3	+1.3	+1.4
2041–2060	+3.2	+2.9	+2.4	+2.4	+2.7
2080–2099	+4.3	+3.7	+3.1	+3.2	+3.6
RCP 8.5					
2011–2031	+1.7	+1.7	+1.4	+1.4	+1.5
2041–2060	+3.9	+3.4	+3.1	+3.2	+3.4
2080–2099	+7.6	+6.1	+5.8	+5.8	+6.3

оно составляет 2.2%/10 лет. Наибольшее увеличение осадков отмечается весной (5.7%/10 лет), а наименьшее – летом (0.7%/10 лет) [4]. В целом по данным Всемирной метеорологической организации период 2011–2020 гг. был самым теплым десятилетием за всю историю наблюдений. Необходимо отметить, что 2020 г. стал самым теплым в России – за 130 лет регулярных метеорологических наблюдений. Практически для всех федеральных округов (кроме Северо-Кавказского) был достигнут абсолютный температурный максимум [4].

Глобальные изменения климата обуславливают изменение компонентов гидрологического цикла и, в первую очередь, увеличение влагоемкости атмосферы и интенсивности осадков [7]. Установлено, что интенсивность осадков, как и влагоемкость атмосферы, возрастает при потеплении климата [8]. Тем не менее для современного потепления характерны уменьшение градиента температуры между полюсом и экватором, ослабление региональной циркуляции, увеличение повторяемости событий атмосферного блокирования [9].

Глобальные трансформации климата характеризуются значительными региональными особенностями [10]. Важно отметить, что региональный отклик на долгосрочное повышение средней температуры климатической системы неоднороден, что обусловлено взаимодействием местных погодно-климатических и физико-географических условий (рельеф, ландшафтная структура, степень лесистости и др.). Для степных водосборных территорий р. Урал рост средней температуры и дефицита влажности воздуха играет существенное значение в теплый период, что сказывается, в первую очередь, на сокращении объемов речного стока и увеличение компенсационных потерь подземных вод. Кроме того, зафиксированный устойчивый рост температур зимнего сезона является основным фактором увеличения доли стока межени на реках исследуемого бассейна.

В связи с вышесказанным, целью данного исследования является выявление региональных откликов изменения температуры приземного слоя воздуха и условий атмосферного увлажнения в пределах водосборной территории р. Урал.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных данных приняты ряды метеонаблюдений за 70-летний период (1950–2020 гг.) по 14 метеостанциям (МС), расположенным в бассейне р. Урал и на прилегающих территориях, находящихся в пределах крупных географических регионов – Общий Сырт, Предуралье, Южный Урал, Зауралье. В качестве анализируемых параметров приняты данные по температуре приземного слоя воздуха и сумме атмосферных осадков в суточном, месячном и годовом выражении. Выводы о региональных особенностях и тенденциях изменения климата в исследуемом бассейне сформулированы на основе стандартных методов статистического анализа. Рассчитаны коэффициенты линейного тренда и оценена их статистическая значимость через коэффициент детерминации (R^2) с учетом двух уровней достоверности – $p < 0.01$ (1%) и $p < 0.05$ (5%).

Для отдельных МС проведен расчет отклонений от нормы по рассматриваемым метеорологическим параметрам. Согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации (ВМО) в качестве базового принят 30-летний период 1961–1990 гг. Рассчитаны показатели аномальности – коэффициент Н.А. Багрова и индекс В.Г. Токарева [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Территория бассейна р. Урал по интенсивности роста среднегодовых температур относится к единой с европейской частью России зоне, для которой характерны значения 0.4–0.5°C/10 лет [5]. Согласно мультимодельным оценкам ожидается, что, по сравнению с базовым периодом (1980–2000 гг.), к 2030 г. годовая температура в бассейне р. Урал возрастет на 1.6°C [6]. Устойчивый рост приземной температуры в пределах исследуемой территории подтверждают сценарные прогнозы, полученные на основе расчета данных ансамбля глобальных климатических моделей СМІР 5 (табл. 1).

Ожидаемое потепление климата в исследуемом бассейне будет обусловлено ростом температур во все сезоны года, но максимальный прирост температуры прогнозируется для зимы и весны, что в целом согласуется с современными региональными тенденциями для территории Европейской России. К периоду 2080–2099 гг. в пределах бассейна р. Урал ожидается прирост годовых значений температуры воздуха от +3.6°C (сцена-

рий RCP 4.5) до $+6.3^{\circ}\text{C}$ (сценарий RCP 8.5) с максимумами в зимний период $+4.3^{\circ}\text{C}$ и $+7.6^{\circ}\text{C}$ соответственно.

Установлено, что тенденции изменения среднегодовой температуры приземного слоя воздуха статистически значимы — трендовая составляющая (R^2) изменяется от 12% (Кувандык) до 25–26% (Айдырля, Беляевка) и 36–42% (Бреды, Уральск, Оренбург, Атырау). Многолетняя динамика годового и сезонного количества атмосферных осадков характеризуется отсутствием однонаправленных и статистически значимых трендов.

Потепление климата подтверждается статистически значимыми коэффициентами линейного тренда среднемесячных температур (рис. 1). Для большинства МС значения коэффициентов находятся в диапазоне $0.30\text{--}0.38^{\circ}\text{C}/10$ лет. Исключение составляет МС Кувандык (0.15), занимающая специфическое котловинное местоположение, и 3 МС в различных частях бассейна (Шарлык, Беляевка и Актобе) со значениями $0.27\text{--}0.29^{\circ}\text{C}/10$ лет. Наибольший прирост температур отмечен в нижнем секторе бассейна (МС Илек, Уральск, Атырау), а также в Зауралье (МС Бреды) — $0.33\text{--}0.34^{\circ}\text{C}/10$ лет. Максимальный вклад в рост среднегодовых температур вносят первые три месяца календарного года (январь—март) и осенние месяцы (октябрь—ноябрь). Наиболее значимый и повсеместный прирост температур наблюдается в марте (в среднем $0.70^{\circ}\text{C}/10$ лет).

В целом зафиксированные изменения температуры приземного слоя воздуха в бассейне р. Урал соответствуют макрорегиональным тенденциям, установленным для Европейской территории России [13].

Необходимо обратить внимание, что зимний период важен для накопления снежных и водных ресурсов в предполоводный период, а также для пополнения запасов подземных вод, питающих реку в летнюю межень.

Результаты исследований показывают, что рост температур в холодный период года приводят к повсеместному увеличению частоты наступления, продолжительности и интенсивности оттепелей. Многолетний ход показателей, отражающих наступление оттепелей, для разных МС в пределах исследуемого бассейна специфичен и определяется в первую очередь особенностями их географического положения. В то же время, несмотря на пространственную неоднородность, временное распределение дат наступления оттепелей имеет общий и синхронный характер. Ниже представлены диаграммы значений сумм положительных температур воздуха за декады зимних месяцев в пересчете на 10 лет, распределенных по 30-летним периодам (рис. 2).

Зафиксирована устойчивая тенденция роста интенсивности оттепелей в современный период (1991–2019). Прежде всего обращает внимание увеличение суммы положительных температур для первой декады декабря, достигающее максимальных значений для МС Оренбург — 49.2 (за 1961–1990 гг. — 36.5). Практически идентичная ситуация наблюдается в феврале, преимущественно в третью декаду — максимальное значение получено для МС Зилаир — 30.0 (для периода 1961–1990 — 8.7).

Одно из следствий изменения температурного режима зимнего сезона, в том числе и в бассейне р. Урал — увеличение водности рек в период зимней межени [14]. В итоге происходит трансформация основных характеристик водного режима рек казахстанского типа — сокращение доли весеннего половодья и увеличение доли меженных периодов, что обуславливает в свою очередь определенное выравнивание гидрографа годового стока.

Кроме устойчивого и статистически значимого увеличения среднегодовой температуры воздуха, свидетельством долгосрочных изменений регионального климата в бассейне р. Урал являются положительные значения нормированных аномалий (табл. 2).

Согласно данным табл. 3, нормированные аномалии среднегодовой температуры воздуха (1991–2020) для МС, расположенных в пределах разных участков бассейна р. Урал, имеют положительный знак — от 0.8 (Актобе) до 1.1 в нижнем течении р. Урал (Атырау, Уральск). Индексы аномальности также подтверждают установленную тенденцию долгосрочных изменений температурного режима в пределах исследуемого бассейна. В первую очередь необходимо отметить устойчивый рост индекса Токарева — максимальный прирост дней с аномально высокими значениями температуры наблюдается в период с 1991 по 2020 г. В данный период для всех МС значения индекса Токарева имеют положительный знак, изменяясь от 1.28 и 1.30 на МС Оренбург и Беляевка соответственно до 1.56, 1.89 и 1.90 в МС Уральск, Атырау и Зилаир.

Как было отмечено выше, ведущую роль в формировании стока рек играет пространственно-временная специфика годовых и сезонных значений сумм атмосферных осадков. В отличие от устойчивого роста температур приземного слоя воздуха, для многолетней динамики атмосферных осадков в бассейне р. Урал аналогичных тенденций не установлено. В годовом выражении отмечается статистически значимое увеличение годового количества атмосферных осадков только в западной части бассейна р. Урал (МС Илек — $10\text{ мм}/10$ лет; Шарлык — $13\text{ мм}/10$ лет) и на сопредельных территориях (МС Бузулук — $18\text{ мм}/10$ лет).

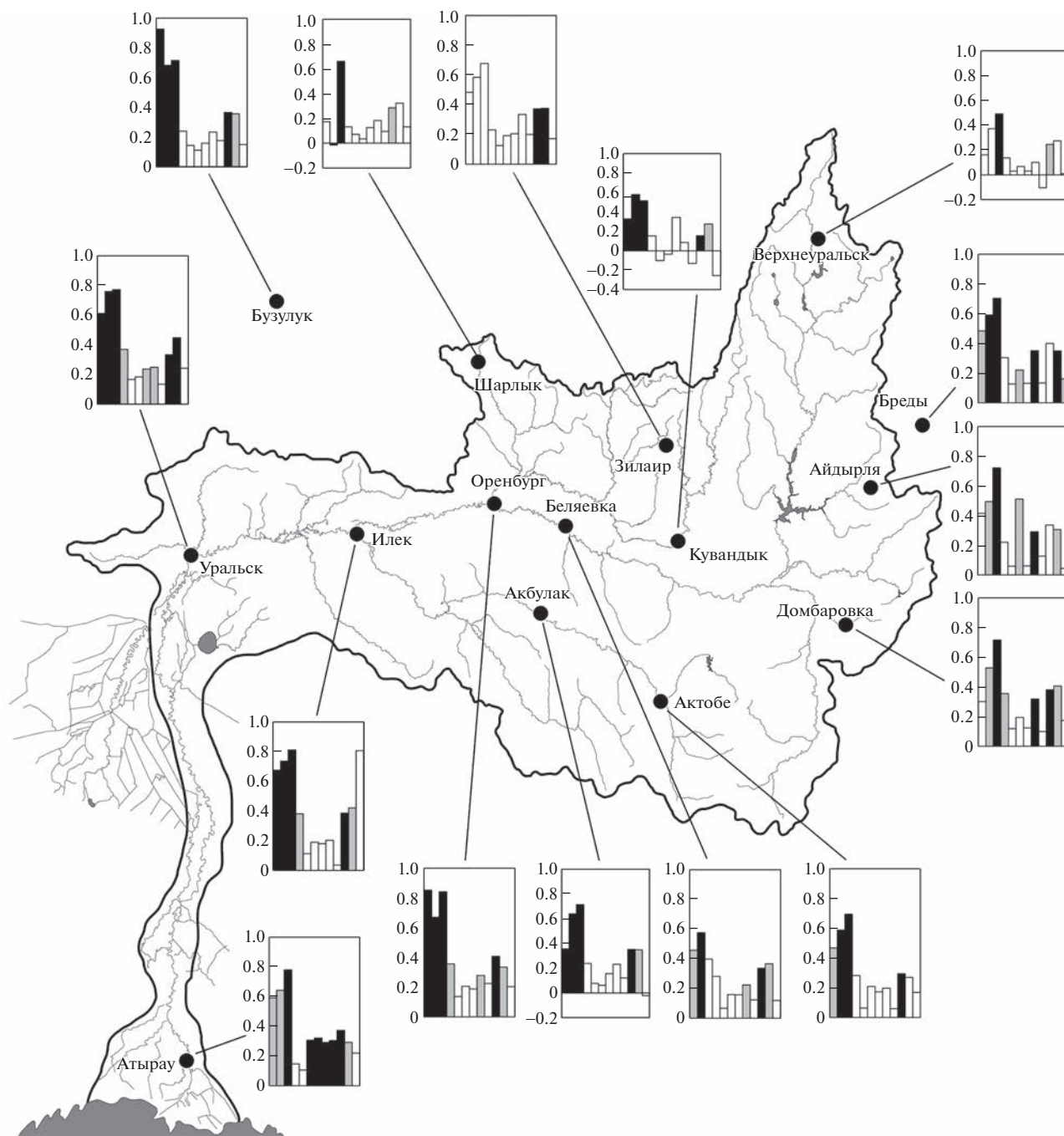


Рис. 1. Диаграммы помесечных значений коэффициентов линейного тренда сезонных температур за период 1950–2020 гг. (в пересчете на 10 лет). Черные столбцы – 1%, серые – 5% уровня достоверности; белые – не имеющие статистической достоверности.

Для остальной территории не выявлено статистически значимых изменений в условиях атмосферного увлажнения. Отсутствие статистически значимых трендов в годовом и сезонном увлажнении степных регионов Европейской России объясняется взаимной компенсацией разнонаправленных изменений увлажнения в разные сезоны [15].

Внутригодовое распределение осадков в бассейне р. Урал характеризуется несогласованным

ходом изменения нормированных значений аномалий атмосферных осадков (рис. 3).

Отрицательные величины нормированных аномалий атмосферных осадков зафиксированы для летнего и осеннего сезонов. Так, для МС Оренбург средние значения за период 1990–2020 гг. составили –14.3 мм и –4.6 мм соответственно. Напротив, величины нормированных аномалий осадков весны и зимы за указанный период ха-

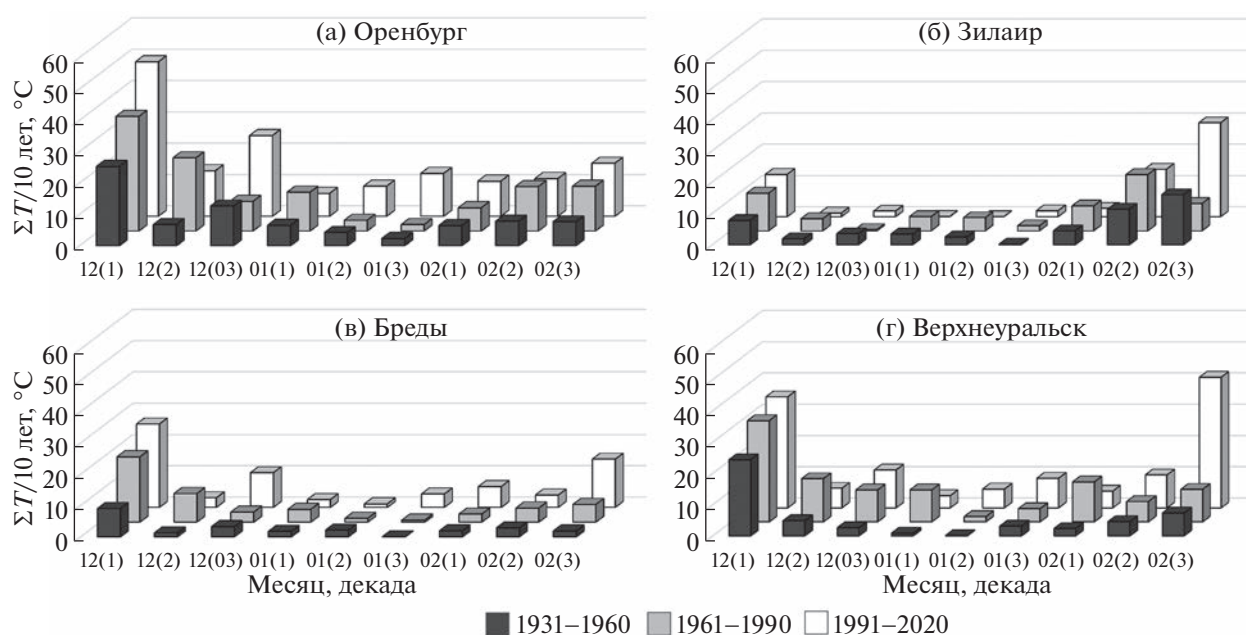


Рис. 2. Распределение сумм положительных температур воздуха за декады зимних месяцев (XII–II) по 30-летним периодам.

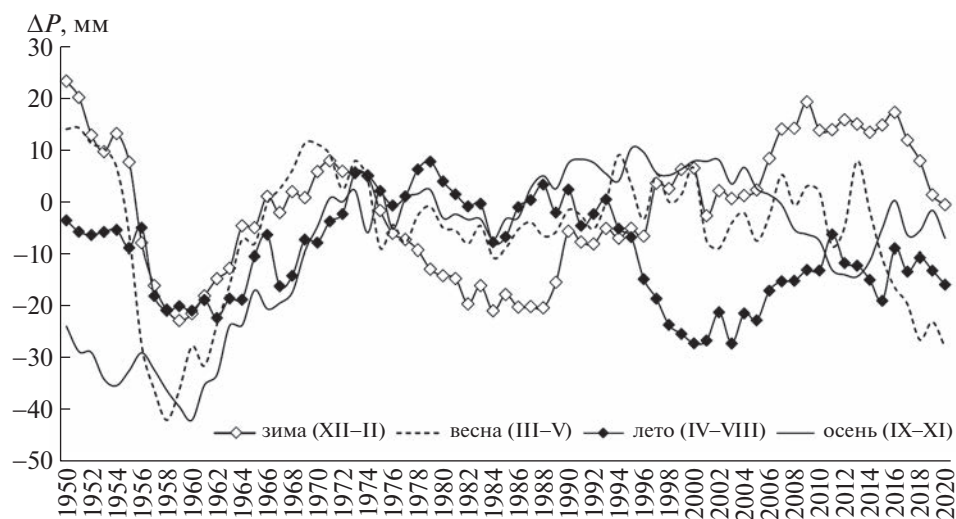


Рис. 3. Сезонные отклонения суммы атмосферных осадков от нормы (1961–1990). МС Оренбург.

рактизуются преобладанием положительных значений (5.1 и 0.3 мм соответственно).

Преобладание положительных аномалий атмосферных осадков весеннего и зимнего сезонов в бассейне р. Урал совпадает с макрорегиональной тенденцией увеличения доли осадков холодного периода, общей для большей части территории Европейской России. В пределах исследуемого бассейна данная тенденция выявлена для всех секторов водосборной территории, кроме нижнего течения (МС Атырау). Для периода

1990–2020 гг. максимальное увеличение доли осадков холодного периода зафиксировано для среднего течения р. Урал (МС Оренбург +10%, Акбулак +13%) и для горнолесных водосборных территорий (МС Кувандык +7%, Зилаир +10%).

Вместе с тем необходимо обратить внимание, что важное значение для водности рек казахстанского типа имеют условия увлажнения предзимнего периода, что обусловлено достаточно быстрым установлением устойчивых отрицательных температур. В частности, стаивание временного

Таблица 2. Изменение индексов аномальности температуры приземного слоя воздуха в бассейне р. Урал

МС	Период	Нормированная аномалия	Индекс Багрова	Индекс Токарева
Оренбург	1940–1960	–1.07	3.22	–2.16
	1961–1990	–0.08	2.86	–0.29
	1991–2020	0.89	2.55	1.28
Беляевка	1940–1960	–0.96	3.02	–1.83
	1961–1990	–0.02	3.11	–0.07
	1991–2020	0.81	2.99	1.30
Акбулак	1940–1960	–0.88	2.93	–1.72
	1961–1990	0.01	2.99	–0.35
	1991–2020	0.88	2.93	1.54
Зилаир	1940–1960	–0.58	1.29	–2.05
	1961–1990	–0.001	2.93	–0.39
	1991–2020	1.08	2.93	1.90
Актобе	1940–1960	–0.80	3.01	–1.85
	1961–1990	0.004	3.07	–0.19
	1991–2020	0.77	2.95	1.34
Уральск	1940–1960	–0.91	3.19	–1.87
	1961–1990	0.01	3.10	–0.53
	1991–2020	1.12	2.98	1.56
Атырау	1940–1960	–0.56	3.32	–1.41
	1961–1990	0.01	2.99	–0.40
	1991–2020	1.15	3.34	1.89

снежного покрова при невысоких положительных значениях температуры воздуха и слабом испарении способствует увеличению запасов влаги в почвенном покрове [16]. В исследуемом бассейне последние 30 лет характеризуются ухудшением условий естественного увлажнения предзимнего периода, о чем свидетельствует повсеместное преобладание отрицательных значений нормированных аномалий атмосферных осадков ноября. Максимальные отклонения выявлены для горно-лесных районов (МС Кувандык – 24.6 мм, Зилаир – 27.5 мм), минимальные – для нижнего течения (МС Атырау – 8 мм). Отметим, что сокращение атмосферных осадков в предзимний период проходит на фоне устойчивого и статистически значимого роста средних температур приземного слоя воздуха.

ВЫВОДЫ

Анализ региональных эффектов глобальных изменений климата в бассейне р. Урал подтверждает наличие устойчивых тенденций трансформации температурного режима, отчетливо проявляющихся на параметрах речного стока. В частности, рост температур в холодный период года приводят к повсеместному увеличению частоты и

продолжительности оттепелей, что обуславливает повышение водности рек в период зимней межени. Вместе с тем разнообразие физико-географических условий формирования регионального климата определяет пространственную неоднородность отклика на глобальные и макрорегиональные изменения. Наибольшей устойчивостью отличается климат низкогорий Южного Урала, в пределах которых расположена крупная область формирования речного стока исследуемого бассейна. В целом анализ региональных изменений климата актуален для оперативного решения проблем гарантированного обеспечения водными ресурсами регионов степной зоны и разработки мер по адаптации водопользования к изменяющимся условиям.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Статья подготовлена в рамках выполнения государственной темы ИС УрО РАН № АААА-А21-121011190016-1 “Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты (учебник для университетов по специальности Гидрология). М.: МГУ, 1990. 303 с.
2. Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Особенности реакции рек Русской равнины на изменение температуры воздуха // Известия РАН. Серия Географическая. 2012. № 6. С. 55–62.
3. Закономерности гидрологических процессов / Под ред. Н.А. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2012. 736 с.
4. Изменения климата и экономика России: тенденции, сценарии, прогнозы / Под ред. акад. РАН Б.Н. Порфирьева, член-корр. РАН В.И. Данилова-Данильяна. М.: Научный консультант, 2022. 514 с.
5. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. Т. 2. Последствия изменений климата. М.: Росгидромет, 2014.
6. Мелешко В.П., Голицын Г.С., Говоркова В.А., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Катцов В.М., Малевский-Малевич С.П., Мохов И.И., Надежина Е.Д., Семенов В.А., Спорышев П.В., Хон В.Ч. Возможные антропогенные изменения климата России в 21 веке: оценки по ансамблю климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 38–49.
7. Huntington T.G. Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis // Journal of Hydrology. 2006. V. 319. P. 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>
8. Мохов И.И., Хон В.Ч., Тимажев А.В., Чернокульский А.В., Семенов В.А. Гидрологические аномалии и тенденции изменения в бассейне р. Амур в связи с климатическими изменениями / Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. М.: Росгидромет, 2014. С. 81–120.
9. Мохов И.И. Действие как интегральная характеристика климатических структур: оценки для атмосферных блокингов // Доклады РАН. Науки о Земле. 2006. Т. 409. № 3. С. 403–406.
10. Васильев Д.Ю., Павлейчик В.М., Семенов В.А., Сивохин Ж.Т., Чибилёв А.А. Многолетний режим температуры воздуха и атмосферных осадков на территории Южного Урала // Доклады РАН. Науки о Земле. 2018. Т. 478. № 5. С. 588–592.
11. Переведенцев Ю.П., Гоголь Ф.В., Наумов Э.П., Шанталинский К.М. Глобальные и региональные изменения климата на рубеже XX и XXI столетий // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2007. № 2. С. 5–12.
12. Сценарные прогнозы на основе глобальных моделей CMIP5 / Климатический центр Росгидромета <http://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke>
13. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России // Мат-лы Британско-Российской конференции (13–15 июня, 2007 г., Новосибирск). Барнаул: Изд-во: “Пять плюс”. 2009. С. 143–150.
14. Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М., Падалко Ю.А. Изменение минимального стока в бассейне реки Урал // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 6. С. 900–913. <https://doi.org/10.31857/S2587556621060133>
15. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Известия РАН. Серия Географическая. 2020. № 2. С. 207–217. <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>
16. Галахов Н.Н. Снежный покров в зимы, предшествующие засушливым и влажным периодам / Гидроклиматический режим лесостепной и степной зон СССР в засушливые и влажные годы. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. С. 54–64.

REGIONAL EFFECTS OF GLOBAL CLIMATE CHANGE
IN THE URAL RIVER BASINZh. T. Sivokhip^{a, #}, V. M. Pavleychik^a, and Academician of the RAS A. A. Chibilev^a^a Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation[#] E-mail: sivokhip@mail.ru

The results of the study of regional climate changes (surface layer temperature and precipitation) in the Ural River basin at the current level are presented. Conclusions about the transformation of the main parameters of the regional climate in the studied basin were obtained on the basis of standard methods of statistical data analysis, as well as calculation of integral climate anomaly indices. Statistically significant values of linear trend coefficients illustrate a steady increase in the average annual air temperature in the Ural River basin. The largest contribution to the growth of this parameter is made by the first three months of the calendar year (January–March) and the autumn months (October–November). The long-term course of precipitation values is characterized by the absence of unidirectional and statistically significant trends. An important macro-regional trend in the dynamics of the precipitation regime is an increase in the proportion of precipitation of the cold period. In conclusion, it is noted that the diversity of the physical and geographical conditions of the formation of the regional climate determines the spatial heterogeneity of the response to global and macro-regional changes.

Keywords: temperature regime, precipitation, linear trend, anomalies, regional trends