

Климатические условия функционирования карбонового полигона в Приказанском регионе

Ю. П. Переведенцев , К. М. Шанталинский, Н. А. Мирсаева, Т. Р. Аухадеев,
А. А. Николаев, В. В. Гурьянов, Г. И. Шишкин

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Институт экологии и природопользования, Российская Федерация
(420097, г. Казань, ул. Товарищеская, 5)

Аннотация. Цель – оценка современного и будущего климатического состояния Приказанского региона в интересах функционирования карбонового полигона.

Материалы и методы. Информационной базой послужили ежедневные метеорологические и актинометрические данные станции Казань, университет и станция Вязовые за 1966-2021 годы. Для выявления долгопериодных климатических изменений использовались среднемесячные значения температуры на станции Казань, университет в период 1828-2021 годы. Индексы экстремальности оценивались по данным реанализа ERA5. Главное внимание уделено анализу ряда радиационных, климатических, агрометеорологических и экстремальных характеристик температурно-влажностного режима, что позволило получить комплексное описание климатического состояния региона.

Результаты и обсуждение. Получена динамика изменчивости радиационных характеристик, многолетнего хода температуры и атмосферных осадков, дана оценка степени увлажненности и засушливости территории, показателей вегетационного периода. Анализ индексов, рекомендованных Всемирной Метеорологической организацией, позволил выявить наиболее экстремальные климатические ситуации в период 1980-2020 годов.

Выводы. Наибольшая скорость потепления в Казани наблюдалась в 1981-2016 годы, что привело к росту сумм положительных температур в вегетационный период на 362,1 °С. Выявлено уменьшение суммы атмосферных осадков в 1986-2021 годах на 87,18 мм со скоростью 24,9 мм/10 лет. Продолжительность вегетационного периода возросла за счет его более раннего наступления весной и более позднего завершения осенью. Наблюдается рост засушливости в районе в летний период.

Ключевые слова: карбоновый полигон, парниковые газы, потепление климата, температура воздуха, атмосферные осадки, тенденции изменения.

Источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ и Кабинета Министров Татарстана в рамках научного проекта №22-27-20080.

Для цитирования: Переведенцев Ю. П., Шанталинский К. М., Мирсаева Н. А., Аухадеев Т. Р., Николаев А. А., Гурьянов В. В., Шишкин Г. И. Климатические условия функционирования карбонового полигона в Приказанском регионе // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2023, № 2, с. 72-85. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/2/72-85>

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с активной фазой глобального потепления в мировом сообществе усилился интерес как к проблеме изучения причин этого явления, так и оценки негативных последствий для природных и социально-экономических систем. В октябре 2018 года был принят специ-

альный доклад *Межправительственной группы экспертов по изменению климата* «Глобальное потепление на 1,5 °С», в котором рассмотрены пути смягчения изменения климата и климатообусловленные риски для естественных и антропогенных систем. Чтобы ограничить глобальное антропогенное потепление уровнем 1,5 °С, необходимо, по



мнению авторов специального доклада, во-первых, уменьшить глобальную антропогенную нетто-эмиссию парниковых газов в атмосферу и, во-вторых, заниматься активным удалением парниковых газов из атмосферы [1]. В России 30.12.2021 году вступил в силу Федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов» (от 02.07.2021 № 296-ФЗ). В Татарстане проблемой инвентаризации объемов выбросов и поглощения парниковых газов занимается непосредственно Министерство экологии и природных ресурсов.

В [8] показано, что наибольшие уровни содержания CO_2 характерны для регионов с развитой хозяйственной деятельностью, при этом внутригодовая изменчивость имеет регулярный сезонный характер. В работе [3] отмечено, что специалисты сконцентрировали усилия в первую очередь на подробной оценке годичного цикла углерода, ответственного за баланс важнейших парниковых газов – углекислого газа и метана. Республика Татарстан относится к числу наиболее развитых промышленных и сельскохозяйственных регионов России, где проживает более 3 млн. человек, поэтому проблеме мониторинга парниковых газов здесь уделяется большое внимание. В частности, вблизи Казани в естественных условиях создается карбоновый полигон (КП) с целью наблюдения за концентрацией антропогенной и естественной эмиссии парниковых газов.

Основанием для создания КП послужил приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 05.02.2021 (№74) о создании на территории регионов России карбоновых полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса, системы мониторинга парниковых газов в экосистемах России.

КП расположен в широколиственном лесу, состоящим из волосисто-осокового липняка с елью и дубом на дерново-подзолистых почвах, расположенных на аллювиально-делювиальных четвертичных отложениях третьей террасы крупных рек, испытывающей антропогенное давление средней интенсивности; высота над уровнем моря составляет 103 м. Для оценки метеорологической обстановки на полигоне установлены две метеорологические автоматические станции. Ближайшие стационарные станции к КП – метеостанция Казань, университет и станция Вязовые.

Цель настоящей статьи – оценка современного и будущего климатического состояния Приказанского региона в интересах функционирования карбонового полигона. Следует отметить, что в

более ранних работах авторов [6, 9] дана оценка происходящим климатическим изменениям на территории Татарстана в последние десятилетия на фоне глобального потепления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ современных изменений климата в период 1966-2021 годов в Приказанском регионе выполнен с привлечением данных 2-х метеорологических станций, расположенных вблизи карбонового полигона: станция Казань, университет и станция Вязовые. Результаты многолетних метеорологических наблюдений на станции Казань, университет (1828-2021 годы) использовались для выявления долгопериодных колебаний в регионе. Для оценки индексов экстремальности климатических изменений использовались данные реанализа ERA5 за 1980-2020 годы. С целью прогноза температуры воздуха в Казани до конца XXI века использовались климатические модели CMIP6.

Исходные данные подвергались статистической обработке – находились средние значения, средние квадратические отклонения (СКО), линейные тренды температуры и осадков, нормированные аномалии температуры воздуха и атмосферных осадков. Выделение низкочастотного компонента (НЧК) в рядах осуществлялось с помощью низкочастотного фильтра Поттера с точкой отсечения 15 лет и более. Достоверность результатов оценивалась с помощью известных статистических методов.

С целью оценки условий теплого периода, когда биосферные процессы протекают наиболее активно, находились следующие характеристики: продолжительность вегетационного периода, сумма температур, индексы сухости и увлажнения, тренды и другие.

По методике Д. А. Педя [7] определялись даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха (ССТ) через 0, 5, 10 и 15 °С весной и осенью, продолжительность периодов, превышающих указанные ССТ, а также суммы положительных температур.

Для характеристики увлажненности района рассчитывались индекс сухости Будыко (ИС), гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) и коэффициент увлажнения Сапожниковой (КУ) [5]:

$$\text{ИС} = \frac{0,18 \sum T_{>10^{\circ}\text{C}}}{R_{I-XII}}, \quad (1)$$

$$\text{ГТК} = \frac{R_{VI-VIII}}{0,1 \sum T_{VI-VIII}}, \quad (2)$$

$$КУ = \frac{0,5R_{X-III} + R_{IV-IX}}{0,18\sum T_{IV-IX}}, \quad (3)$$

где T – среднесуточная температура, °C, R – сумма осадков, мм.

Фотосинтетическая активная радиация (ФАР) рассчитывалась по формуле [2]:

$$\sum Q_{\text{ФАР}} = 0,43 \sum S' + 0,57 \sum D, \quad (4)$$

где $\sum Q_{\text{ФАР}}$ – суммарная ФАР, МДж/м², $\sum S'$ – сумма прямой солнечной радиации, МДж/м², $\sum D$ – сумма рассеянной радиации, МДж/м².

Биологическая эффективность климата оценивалась с помощью индекса биологической эффективности климата (БЭК) [4]:

$$\text{БЭК} = (0,01 \sum T_{>10^{\circ}\text{C}}) \cdot КУ, \quad (5)$$

где $КУ$ – коэффициент увлажнения, который находится как отношение годового количества осадков (R , мм) к годовой испаряемости (E , мм).

Ежемесячные данные испаряемости находят по формуле Н. Н. Иванова:

$$E_{\text{мес.}} = 0,0018(25 + t)^2(100 - f), \quad (5)$$

где t – среднемесячная температура воздуха, °C, f – среднемесячная относительная влажность воздуха, %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим вначале характеристики радиационного режима в Приказанском регионе по данным актинометрической станции Казань, университет в период 1960-2020 годов.

При реальных условиях облачности годовой приход прямой солнечной радиации составляет в среднем 1941 МДж/м² и колеблется в пределах 1611-2027 МДж/м² за рассматриваемый период. При этом наибольшее количество прямой радиации 364-385 МДж/м² поступает в июне-июле, в январе и декабре оно оказывается наименьшим в году (11-18 МДж/м²). Следует также отметить, что возрастание прямой радиации весной идет более равномерно, чем спад ее осенью. Так, весной возрастание притока радиации от месяца к месяцу, в период март-июнь включительно, составляет в среднем 246 МДж/м². Осенью, начиная с сентября, уменьшение ее более резкое. Так, от августа к сентябрю прямая радиация уменьшается

в среднем на 128 МДж/м², от сентября к октябрю – на 84 МДж/м².

Сравнивая годовой ход прямой и рассеянной радиации, можно отметить, что, начиная с сентября по март включительно, месячные суммы рассеянной радиации превышают соответствующие значения прямой радиации. В остальное время года прямая радиация превышает рассеянную. При этом в наибольшей степени превышение прямой радиации над рассеянной (193 МДж/м²) отмечается в июне. В целом в период апрель – сентябрь прямая радиация составляет 82-91 %, а рассеянная – 68-77 % от их годовых сумм. В течение года сумма рассеянной радиации меняется от 32 (декабрь) до 283 (июнь) МДж/м². Годовая сумма ее составляет 1938 МДж/м².

Облачность значительно снижает поступление прямой радиации (за год примерно на 42% от возможной) и увеличивает (более чем на 30%) рассеянную радиацию. В результате – при действительно наблюдавшейся облачности – суммарная радиация в целом за год составляет 3343-4505 МДж/м².

В годовом ходе максимум суммарной радиации приходится на июнь и равен 665 МДж/м². В декабре суммарная радиация наименьшая в году – 55 МДж/м². Подобно прямой радиации, для суммарной радиации характерно резкое возрастание месячных сумм от февраля к марту, а также уменьшение их от августа к сентябрю.

На долю радиационного баланса приходится 40-45 % суммарной радиации. Средний годовой радиационный баланс в регионе равен 1344 МДж/м². Период с положительным радиационным балансом составляет порядка 8 месяцев. Переход радиационного баланса от отрицательных значений к положительным происходит в марте или в отдельные годы в апреле. Смена знака радиационного баланса осенью отмечается в третьей декаде октября.

Максимальная сумма радиационного баланса наблюдается в июне (330 МДж/м²), при этом в соседние месяцы, мае и июле, радиационный баланс имеет значения близкие к максимальным. К осени, наряду со снижением прихода солнечной радиации, уменьшается и доля радиационного баланса: в августе он равен 223 МДж/м², а в сентябре – 108 МДж/м². В декабре и январе значения отрицательного радиационного баланса составляют порядка 45 МДж/м².

Таблица 1

Распределение ФАР (МДж/м²) по месяцам в Казани
[Table 1. Distribution of photosynthetic active radiation (PAR) (MJ/m²) by month in Kazan]

Месяц / Month	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
ФАР	38,5	90,3	165,5	229,4	298,6	327,4	315,3	249,3	158,8	79,2	33,6	23,7

Были рассчитаны значения фотосинтетической активной радиации (ФАР). Как видно из таблицы 1, значения ФАР достигают своего максимума в вегетационный период (апрель-сентябрь).

По данным наблюдений на метеообсерватории КФУ фактическая продолжительность солнечного сияния составляет 12-56 % от возможной (годовая величина ~ 1916 часов). Наиболее солнечным яв-

ляется период с апреля по август, когда число часов солнечного сияния составляет 231-321 часов. С сентября по октябрь происходит резкое уменьшение продолжительности солнечного сияния с 160 до 92 часов. В зимний период продолжительность солнечного сияния наименьшая. В таблице 2 представлены характеристики продолжительности солнечного сияния по месяцам.

Таблица 2

Продолжительность солнечного сияния в Казани (час)

[Table 2. Duration of sunshine in Kazan (hour)]

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Среднее / The average	41,8	79,6	145,6	207,9	286,7	299,7	307,8	253,0	157,7	80,4	37,1	26,1
Максимум / Maximum	100	177	256	298	385	373	431	334	244	163	82	59
Минимум / Minimum	2	9	51	127	198	192	212	163	80	24	4	2
СКО / SD	23,0	32,6	43,5	37,7	37,8	45,5	44,1	41,0	38,8	31,5	17,3	15,2
КНЛТ / LTSC	-3,81	7,24	4,25	0,83	-0,47	2,85	1,02	0,76	-1,85	-0,14	1,18	0,06

Примечание. СКО – среднее квадратическое отклонение, КНЛТ – коэффициент наклона линейного тренда, час/10 лет.

[Note. SD – standard deviation, LTSC – the slope coefficient of the linear trend, hour / 10 years].

О качестве атмосферного воздуха в Приказанском регионе можно составить представление, используя данные ежедневного мониторинга УГМС РТ в пределах города Казань.

Согласно данным государственных докладов «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан», уровень загрязнения атмосферы в Казани в 2017-2019 годах характеризовался как «повышенный». Среднегодовая концентрация формальдегида составила 1,50 ПДКс.с. Средние концентрации остальных вредных примесей за год не превышали санитарно-гигиенических норм.

В течение 2019 года в Казани было зафиксировано 444 случаев превышения максимально-разовой ПДК, из них: по оксиду углерода – 23; по диоксиду азота – 41; по сероводороду – 27; по фенолу – 1; по ацетону – 2; по хлорбензолу – 3; по этилбензолу – 12; по формальдегиду – 284; по аммиаку – 51. В целом среднегодовые концентрации оксида углерода, диоксида серы, оксида азота и тяжелых металлов не превышали санитарно-гигиенические нормативы.

В период 2015-2019 годов к числу наиболее значимых относятся следующие загрязняющие вещества: формальдегид, аммиак, диоксид азота, сероводород, оксид углерода, этилбензол, ацетон, взвешенные вещества.

Рассмотрим вначале климатические характеристики, рассчитанные для активной фазы (ССТ>10 °С) вегетационного периода для станции Казань, ЦГМС и станции Вязовые (расположенной в 40 км западнее Казани) для периода 1966-2021 годов. Весной ССТ переходит через значение 10 °С в Казани на 123 (3 мая), а в Вязовых на 124 день от начала года (4 мая), осенью активная фаза вегетационного периода завершается на обеих станциях на 270 день от начала года (27 сентября), продолжительность вегетационного периода составляет соответственно 148 и 147 день. Сумма положительных температур для этого периода для Казани равна 2476 °С, а для Вязовых 2424 °С, то есть показатели почти не отличаются друг от друга.

В рассматриваемый период в Казани в среднем выпадает 73,36 мм осадков, а в Вязовых – 71,27 мм. При этом важно отметить, что, согласно расчетам коэффициента наклона линейного тренда (КНЛТ), указанных показателей, продолжительность вегетационного периода в Казани растет со скоростью 1,62, в Вязовых – со скоростью 0,57 день/10 лет. Сумма температур растет со скоростью 73,44 °С/10 лет в Казани и со скоростью 51,09 °С/10 лет в Вязовых. Однако, если на западе (станция Вязовые) наблюдается увеличение суммы осадков со скоростью 5,68 мм/10 лет, то в Казани, наоборот, слабое ее уменьшение (КНЛТ = -1,16 °С/10 лет).

Индекс Селянинова (ГТК) по многолетним данным в Казани равен 1,07, а в Вязовых – 1,01. При этом наблюдается его слабое уменьшение в Казани со скоростью $-0,4$ ед./10 лет (в Вязовых КНЛТ = 0). Индекс сухости Будыко, рассчитанный для периода ССТ >10 °С, в Казани равен 2,70, а в Вязовых 3,00, при этом наблюдается его слабый рост со скоростью 0,16 и 0,04 ед./10 лет соответственно. Коэффициент увлажнения Сапожниковой в Казани (для ССТ >10 °С) составляет 0,92, а в Вязовых 0,83. Величина КУ уменьшается в Казани со скоростью $-0,2$ ед./10 лет, а в Вязовых не меняется. Таким образом, согласно рассчитанным КНЛТ для трех

индексов наблюдается увеличение засушливости в вегетационный период, что подтверждается ростом и годовой испаряемости. При этом показатели 2-х станций не имеют заметных различий.

Долгопериодные характеристики климата Приказа́нья рассчитывались по данным длинно-рядной станции Казань, университет для двух периодов 1828-2021 и 1900-2021 годов. Согласно данным рисунка 1, происходит рост среднегодовой температуры воздуха СГТВ в Казани в 1828-2021 годах со скоростью $0,17$ °С/10 лет, что повысило СГТВ по линейному тренду с $2,2$ до $5,5$ °С, а по кривой НЧК – с $2,1$ до $6,5$ °С.

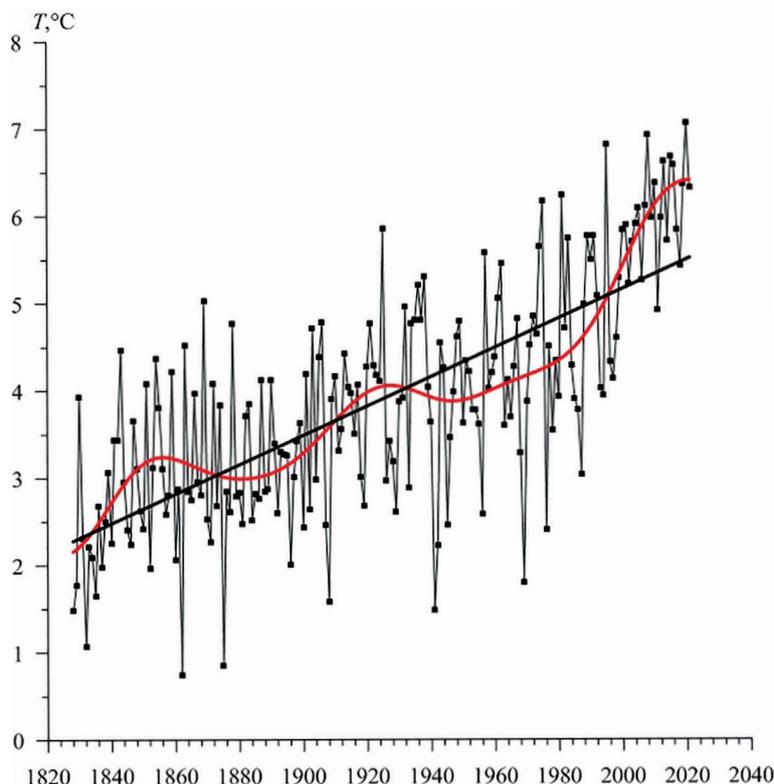


Рис. 1. Многолетний ход средней годовой температуры воздуха (°С) на станции Казань, университет
 [Fig. 1. The long-term variation of the average annual air temperature (°C) at station Kazan, University]

При этом в длительный период с 1947 по 2021 годы (74 года) СГТВ увеличилась на $2,53$ °С со скоростью $0,34$ °С/10 лет. Среднее значение СГТВ составило $3,90$ °С, а значение СКО – $1,32$ °С. Сумма положительных температур в период IV-IX возросла по линии тренда с 2300 до 2850 °С (рис. 2).

Наибольшая скорость потепления отмечается в период 1981-2016 годов (35 лет), когда прирост суммы ТВ составил $362,1$ °С (КНЛТ = $103,5$ °С/10 лет). Годовая амплитуда температуры уменьшилась в рассматриваемый период с 36 до 34 °С (рис. 3). НЧК выделяет колебания в изменении амплитуды ТВ с квазисорокалетним периодом.

Атмосферные осадки в теплый период (IV-IX) (средняя сумма за 1880-2021 годы составила $288,9$ мм) в теплый период (IV-IX) имеют слабую тенденцию к росту с 1880-2021 годов со скоростью $2,8$ мм/10 лет. Однако в последние десятилетия с 1986 по 2021 годы произошло заметное уменьшение суммы осадков на $87,18$ мм со скоростью $24,91$ мм/10 лет (рис. 4).

Для более позднего интервала времени 1900-2021 годов для Казани рассчитывались следующие характеристики: начало и конец периода с $T >10$ °С, продолжительность периода с $T >10$ °С, сумма температур периода с $T >10$ °С. В среднем вегетационный период начинается на 124 день

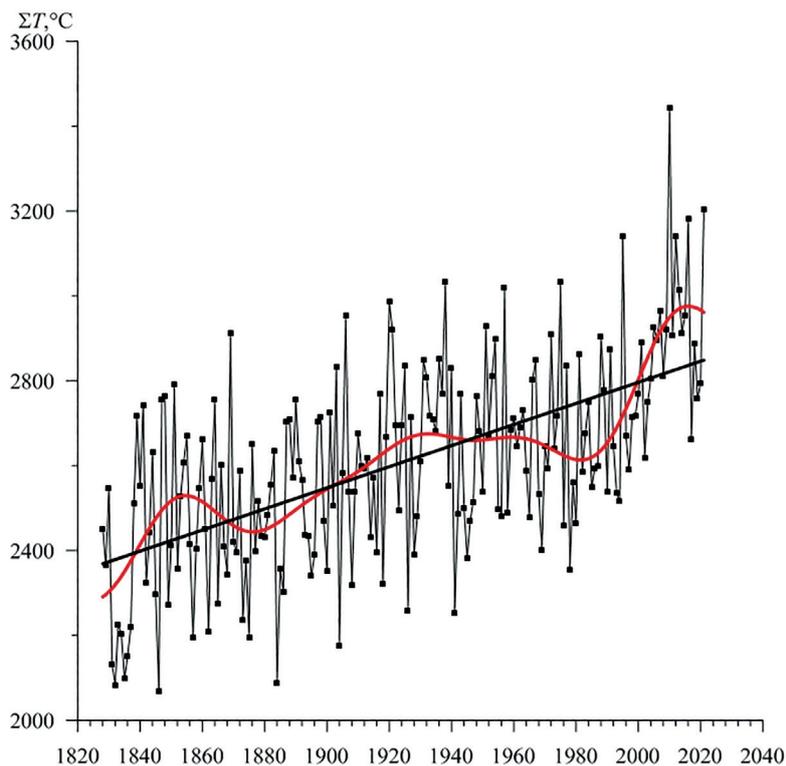


Рис.2. Многолетний ход сумм температур в период с апреля по сентябрь (°C) на станции Казань, университет [Fig.2. The long-term variation of temperature sums in the period from April to September (°C) at station Kazan, University]

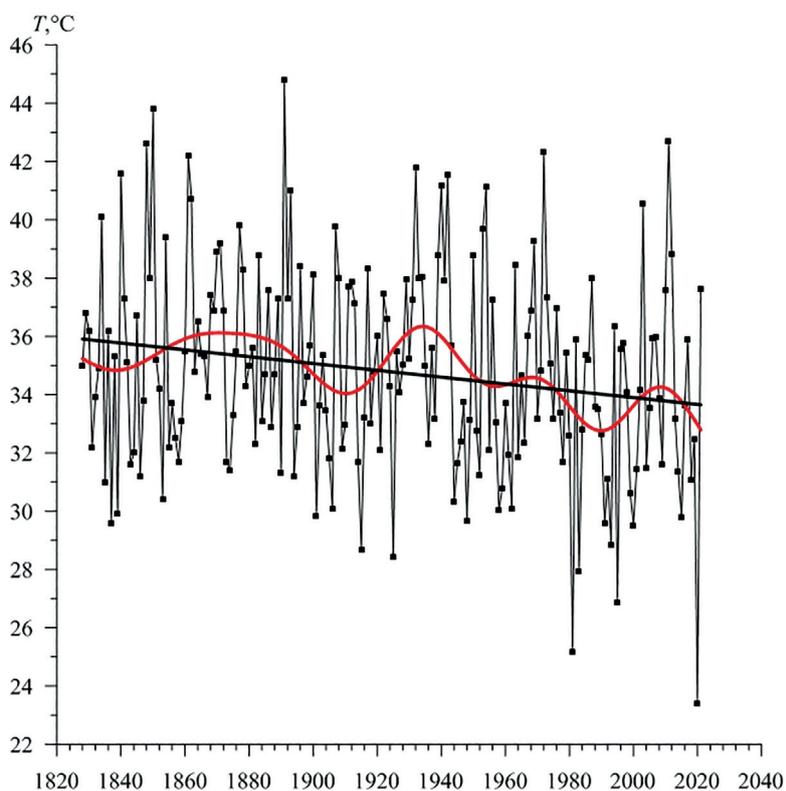


Рис.3. Многолетний ход годовой амплитуды температуры воздуха (°C) на станции Казань, университет [Fig.3. The long-term variation of the annual amplitude of air temperature (°C) at station Kazan, University]

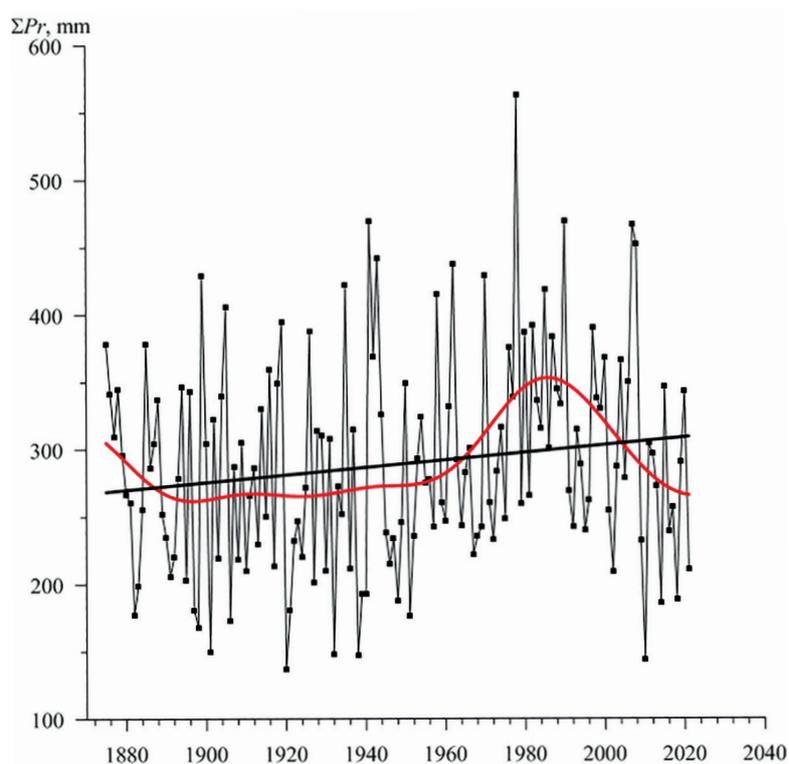


Рис. 4. Многолетний ход сумм осадков (мм) теплого периода (IV-IX) на станции Казань, университет
[Fig. 4. The long-term variation of precipitation amounts (mm) of the warm period (IV-IX) at station Kazan, University]

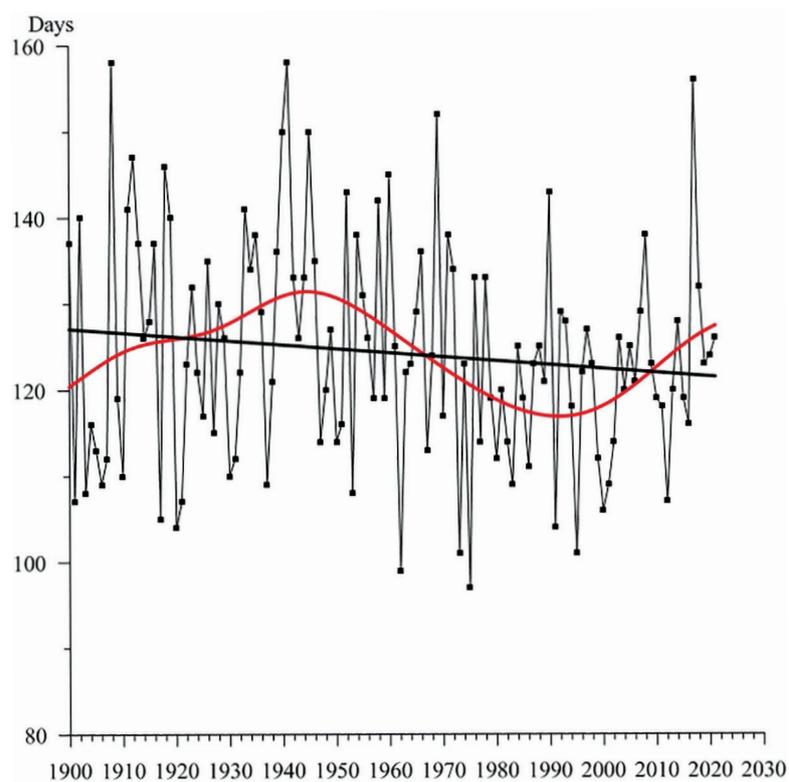


Рис. 5. Многолетний ход дат начала (дни) периода с температурой более 10 °С на станции Казань, университет
[Fig. 5. The long-term variation of the dates of the beginning (days) of the period with a temperature of more than 10 °C at station Kazan, University]

от начала года (4 мая) и завершается на 270 день (27 сентября).

Отмечается тенденция по линейному тренду к более раннему (рис.5) началу вегетационного периода (КНЛТ = -0,5 день/10 лет) и позднему (рис.6) его завершению (КНЛТ = 0,6 день/10

лет). Однако, согласно НЧК, этот процесс имеет колебательный характер и начиная с 1992 по 2021 годов происходит его более позднее наступление со скоростью 3,6 дня/10 лет, в заключительный период 2013-2021 годов (8 лет) также отмечается слабое запаздывание периода с $T > 10^\circ\text{C}$ на 1 день.

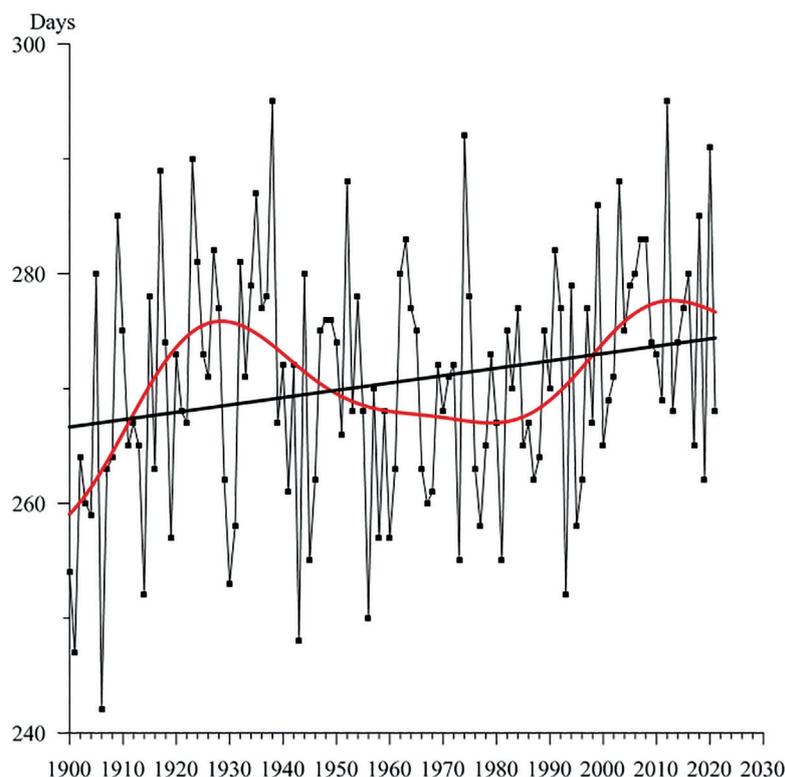


Рис.6. Многолетний ход дат конца (дни) периода с температурой более 10°C на станции Казань, университет [Fig.6. The long-term variation of the dates of the end (days) of the period with a temperature of more than 10°C at station Kazan, University]

Продолжительность активной фазы вегетационного периода растет в целом в период 1900-2021 годов со скоростью 1,1 день/10 лет, в среднем она составляет 147 дней, однако в последние годы (2003-2021 годы), согласно НЧК, (18 лет) наблюдается его сокращение \sim на 7 дней со скоростью -3,9 день/10 лет. Сумма температур в рассматриваемый период растет (в среднем она составляет 2515°C) со скоростью $29,3^\circ\text{C}/10$ лет, но в заключительный период 2012-2021 годов она уменьшалась на 53°C со скоростью ($58,9^\circ\text{C}/10$ лет).

Сумма осадков в вегетационный период с 1900 по 2021 годов имела тенденцию к росту со скоростью 5,5 мм/10 лет, и в среднем она составила 246,3 мм. В последние десятилетия 1992-2021 годов (29 лет) она уменьшилась на 85,26 мм со скоростью 29,4 мм/10 лет, что представляет значительную величину. В связи с этим уменьшилось и значение ГТК в период 1988-2021 годов (33 года) на 0,43. Среднее значение ГТК за весь

123-летний период = 0,99, КНЛТ = 0,01 ед./10 лет, то есть, согласно ГТК, в последние десятилетия усиливается засушливость.

Индекс сухости (ИС), рассчитанный по годовым данным, имеет тенденцию к снижению (среднее значение 0,93), скорость уменьшения $A = -0,02$ ед./10 лет. В летний период ИС испытывает колебания, его среднее летнее значение 3,05, наблюдается по НЧК слабая тенденция его уменьшения ($A = -0,01$ ед./10 лет). В период 1986-2021 годов наблюдается, наоборот, рост на 1,77 со скоростью 0,5 ед./10 лет.

Коэффициент увлажнения в период апрель-сентябрь при среднем значении 0,84, растет со скоростью 0,01 ед./10 лет, однако в период 1983-2021 годов (38 лет) величина КУ уменьшилась на 0,33, что свидетельствует об увеличении засушливости в регионе.

Для оценки экстремальных проявлений в изменениях климата Приказанского региона были

использованы индексы экстремальности, предложенные в 1999 году объединенной рабочей группой Всемирной метеорологической организации (ВМО) по обнаружению изменений климата (ККл/КЛИВАР). В качестве исходных данных использовались ежечасные данные о максимальной и минимальной температуре, количестве осадков в узлах сетки 0,25x0,25 градусов широты и долготы реанализа ERA5 за период 1980-2020 годов. Расчеты выполнены для узла, расположенного на рассматриваемой территории. В результате были получены средние многолетние значения индексов экстремальности и их линейные тренды. Рассмотрим ряд индексов, характеризующие экстремальность температурно-влажностного режима.

Количество морозных дней в году в Казани, когда минимальная суточная температура $< 0^{\circ}\text{C}$, составляет 165 дней, при этом это число дней уменьшается со скоростью 3,8 дней/10 лет. Годовое количество дней со средней суточной температурой выше 5°C (продолжительность вегетационного периода) достигает 179 дней (КНЛТ = 1,3 дней/10 лет). Количество летних дней с максимальной суточной температурой $> 25^{\circ}\text{C}$ равно 31, число которых растет со скоростью 3,2 дней/10 лет. Также возрастает в Казани количество тропических ночей ($\sim 1,0$ дней/10 лет), среднее число которых достигает 8 дней. Максимальное значение ежедневной максимальной температуры воздуха достигает $31,2^{\circ}\text{C}$ (КНЛТ = $0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет). Годовое количество последовательных 6 и более теплых дней, когда держалась экстремально жаркая погода (значения максимальной температуры выше 90 % перцентиля) равно 9,8 дней (КНЛТ = 3 дня/10 лет). Годовое количество холодных ночей, когда держалась экстремально холодная погода, включающая значения минимальной температуры ниже 10 % перцентиля, равно 4 (КНЛТ = $0,8$ дней/10 лет).

Минимальное значение ежедневной минимальной ТВ равно $-29,2^{\circ}\text{C}$ (КНЛТ $\approx 1^{\circ}\text{C}/10$ лет); максимальное значение ежедневной максимальной температуры воздуха достигает $31,2^{\circ}\text{C}$ (КНЛТ = $0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет). Число дней с экстремально жаркой погодой достигает 10 дней (КНЛТ = 3 дня/10 лет).

Годовое количество осадков во влажные дни составило 603 мм при отрицательном тренде (КНЛТ = $-28,12$ мм/10 лет). Количество дней в году с суточной максимальной суммой осадков не менее 10 мм составило 11,2 дня (КНЛТ = $-0,04$ дней/10 лет). Значительно чаще встречаются дни

с суточной максимальной суммой осадков не менее 1 мм (135 дней с трендом $-6,0$ дней/10 лет). Годовая сумма сильных осадков (выше 95 % перцентиля распределения суточных сумм осадков) достигает 115 мм (КНЛТ = $-1,8$ мм/10 лет).

Максимальная длина сухого периода (число последовательных дней с осадками < 1 мм/сутки) равна 8 дням (КНЛТ = $0,09$ дней/10 лет). Максимальное количество осадков в году, выпавших за сутки, достигает 24,6 мм (КНЛТ = $-0,9$ мм/10 лет).

Рассмотренные индексы дают представление о диапазоне изменчивости ряда экстремальных показателей температурно-влажностного режима в Приказанском регионе, свидетельствующих об определенном росте засушливости в регионе.

С целью получения информации о характере долгопериодных изменений ТВ в различные месяцы года по данным станции Казань, университет для 1828-2021 годов находились первые разности низкочастотной компоненты ТВ с периодом более 30 лет, характеризующие скорость низкочастотного изменения температуры.

Как видно из рисунка 7, наиболее резкие изменения ТВ происходили в холодное время года. В последние десятилетия выделяются очаги роста температуры на общем фоне потепления климата. В теплое время года в XIX столетии изменения ТВ были незначительными, затем в 1930-х годах отмечается значительное потепление во всех месяцах года, что повторилось и в начале 1970-х годов. В последние годы также происходит повышение летних температур.

Для комплексной оценки состояния природной среды был использован индекс биологической эффективности климата (БЭК), который рассчитывался по формулам 5, 6 по ежедневным данным о температуре воздуха и относительной влажности. Величина годовой испаряемости по данным станции Казань, университет составила 667,80 мм, в Вязовых – 641,98 мм. При этом годовая испаряемость имеет тенденцию к росту со скоростью 38,3 мм/10 лет в Казани и 27,4 мм/10 лет в Вязовых, что объясняется потеплением климата. Коэффициент увлажнения, рассчитываемый как отношение годового количества осадков (мм) к годовой испаряемости в Казани равен 0,87, в Вязовых – 0,78. Отмечается тенденция уменьшения этой величины в Казани со скоростью $-0,04$ и в Вязовых $-0,02$ ед./10 лет. После этого находилась величина БЭК как произведение суммы активных температур в сотнях градусов на величину КУ [4]. Средняя величина индекса БЭК для Казани, рассчитанного для

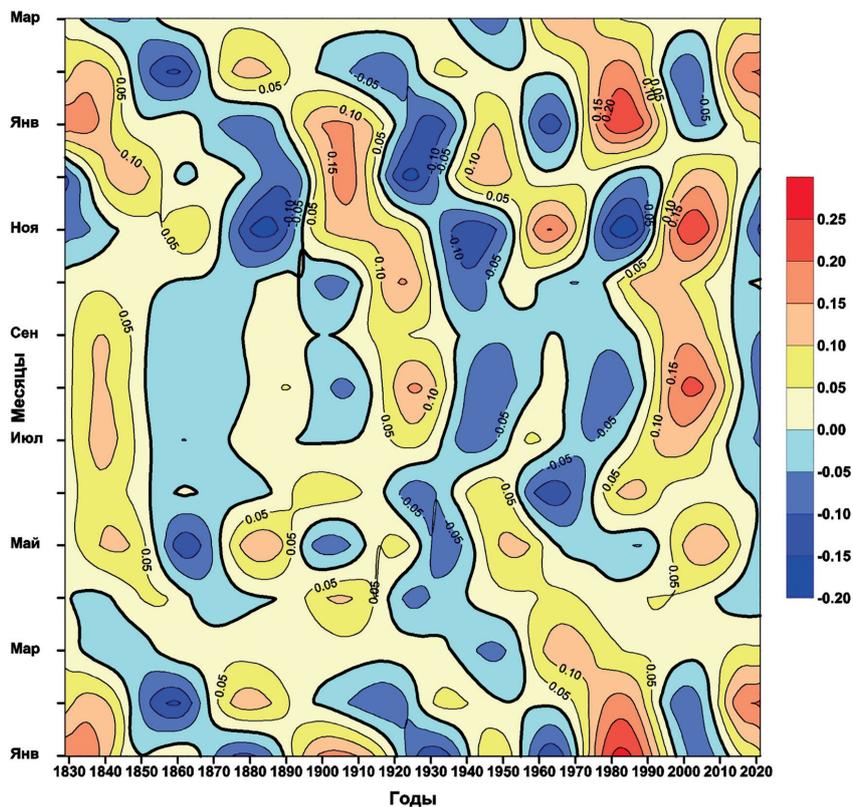


Рис. 7. Разности НЧК температуры воздуха с периодом более 30 лет для станции Казань, университет [Fig. 7. Differences in the low temperature of the air with a period of more than 30 years for the station Kazan, University]

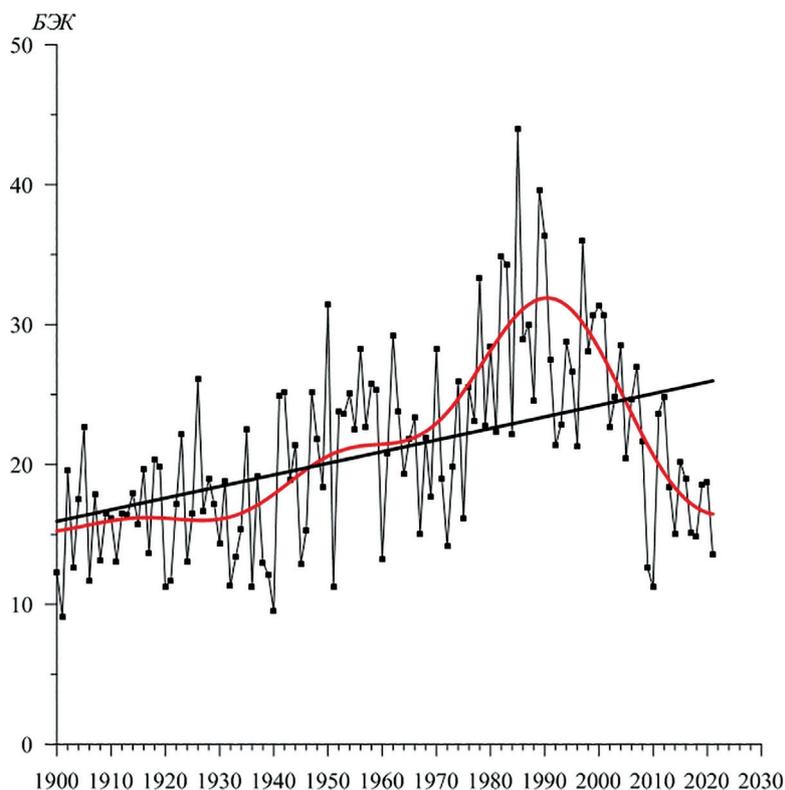


Рис.8. Многолетний ход индекса биологической эффективности климата на станции Казань, университет [Fig.8. Long-term variation of the biological efficiency climate index at station Kazan, University]

периода 1966-2021 годов, оказалось равной 21,15 °С, а для Вязовых – 18,64 °С (значения КНЛТ соответственно равны -0,22 °С/10 лет и 0,06 °С/10 лет).

БЭК синтезирует важнейшие климатические показатели: температуру воздуха, атмосферные осадки и относительную влажность воздуха в их годовом ходе, а также годовую теплообеспеченность и хорошо выражает общий экологический фон. Зоне экологического оптимума БЭК соответствует величина 22. В данном случае рассчитанные показатели незначительно отличаются от оптимума. На рисунке 8 представлен межгодовой ход индекса биологической эффективности климата с 1900 по 2021 годы для Казани. Как видно из рисунка 8, для индекса БЭК отмечается положительный линейный тренд, однако низкочастотная компонента позволила выделить периоды с различной интенсивностью и направленностью рассматриваемого параметра.

Безусловно, теоретический и практический интерес вызывают оценки будущих изменений основных климатических показателей на рассматриваемой территории. С этой целью использовались

результаты ансамблевых расчетов по 40 климатическим моделям выполненных для 4-х основных сценариев проекта СМIP6: ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Расчеты выполнены как в целом для периода 2021-2100 годов, так и последовательно по 20-летним периодам: 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 годы.

Как видно из таблицы 4, в зимний период потепление будет происходить более высокими темпами, чем в летний. По наиболее вероятному сценарию ssp245 (радиационный форсинг составит 4,5 Вт/м²) в заключительный период XXI века (2081-2100 годы) по сравнению с 2021-2040 годами повышение температуры воздуха по сезонам и за год составит соответственно: 2,88 °С (зимой), 2,37 °С (весной), 2,12 °С (осенью) и 2,4 °С (за год). Более высокие темпы потепления, согласно данным таблицы 4, ожидаются в случае осуществления наиболее жесткого сценария (ssp585), при котором радиационный форсинг составит 8,5 Вт/м². Однако его реализация маловероятна. В этом случае в конце столетия годовая температура в Казани возрастает на 5,5 °С, а в зимний период – на 6,6 °С.

Таблица 4

Средние значения температуры (°С) в отдельные временные периоды и сезоны для различных сценариев [Table 4. Average temperature values (°C) in separate time periods and seasons for different scenarios]

Сценарий / Scenario	Период (годы) / Period (years)	Зима / Winter	Весна / Spring	Лето / Summer	Осень / Autumn	Год / Year
ssp126	2021-2100	-8,42	6,22	20,40	6,68	6,2
	2021-2040	-9,05	5,63	19,90	6,14	5,7
	2041-2060	-8,29	6,33	20,51	6,77	6,3
	2061-2080	-8,14	6,54	20,67	6,96	6,5
	2081-2100	-8,18	6,43	20,55	6,86	6,4
ssp245	2021-2100	-7,43	6,68	20,91	7,35	6,9
	2021-2040	-8,95	5,40	19,75	6,19	5,6
	2041-2060	-7,83	6,43	20,67	7,10	6,6
	2061-2080	-6,79	7,17	21,39	7,80	7,4
	2081-2100	-6,07	7,77	21,87	8,37	8,0
ssp370	2021-2100	-6,45	7,35	21,77	7,99	7,7
	2021-2040	-8,94	5,36	19,87	6,10	5,6
	2041-2060	-7,36	6,74	21,08	7,35	7,0
	2061-2080	-5,61	8,04	22,40	8,60	8,4
	2081-2100	-3,77	9,38	23,83	10,03	9,9
ssp585	2021-2100	-5,92	8,18	23,16	9,00	8,6
	2021-2040	-9,07	5,68	20,73	6,64	6,0
	2041-2060	-7,16	7,24	22,16	8,07	7,6
	2061-2080	-4,82	9,04	23,93	9,74	9,5
	2081-2100	-2,50	10,88	25,93	11,65	11,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Среднегодовые значения суммарной солнечной радиации в Приказанском регионе меняется в пределах 3343-4505 МДж/м², в годовом

ходе ее значения меняются от 55 (декабрь) до 665 (июнь) МДж/м². Средний годовой радиационный баланс составляет 1344 МДж/м² (максимум в июне 330 МДж/м²). Величина ФАР в годовом ходе ме-

няется от 23,7 (декабрь) до 327,4 (июнь) МДж/м². Продолжительность солнечного сияния в течение года возрастает от 26 (декабрь) до 308 (июль) часов.

2. В период с 1947 по 2021 годы СГТВ в Казани увеличилась на 2,53 °С со скоростью 0,34 °С/10 лет. Сумма атмосферных осадков в летний период с 1986 по 2021 годы уменьшилась на 87,18 мм со скоростью 24,91 мм/10 лет.

3. Переход ССТ через 10 °С в среднем многолетнем (начало активном фазы вегетационного периода) происходит в Казани весной 3 мая, а осенью 27 сентября. Продолжительность этого периода составляет 148 дней, сумма положительных температур 2476 °С. Индекс БЭК близок к оптимальному значению.

4. Выявлен с использованием индексов слабый рост засушливости климата в Приказанском регионе в летний период в 1966-2020 годах, сопровождающийся ростом испаряемости.

5. Анализ индексов экстремальности климата выявил уменьшение числа морозных и увеличение числа жарких дней, слабое уменьшение годовой суммы сильных осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладильщикова А. А., Дмитриева Т. М., Семенов С. М. Специальный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата «Глобальное потепление на 1,5 °С» // *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2018, т. 4, с. 5-18.

2. Грингоф И. Г., Пасечнюк А. Д. *Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения*. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2005. 552 с.

3. Заварзин Г. А., Котляков В. М. Стратегия изучения Земли в свете глобальных изменений // *Вестник РАН*, 1998, т. 68, № 1, с. 23-29.

4. *Климат Казани и его изменения в современный период* / под ред. Переведенцева Ю. П., Наумова Э. П. Казань: Издательство Казанского государственного университета, 2006. 216 с.

5. *Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем* / под ред. Семенова С. М. Москва: Росгидромет, 2012. 508 с.

6. Особенности проявления современного глобального потепления в тропосфере Атлантико-Европейского региона / Ю. П. Переведенцев, М. А. Верещагин, Э. П. Наумов, К. М. Шанталинский // *Метеорология и гидрология*, 2004, № 2, с. 38-47.

7. Педь Д. А. Определение дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения // *Метеорология и гидрология*, 1951, № 10, с. 38-39.

8. Семенов С. М., Кузовкин В. В. Современное содержание диоксида углерода в приповерхностном слое атмосферы Земли: многолетние тренды и внутригодовая изменчивость // *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2019, т. 4, с. 101-119.

9. Современные изменения климата Республики Татарстан / Ю. П. Переведенцев, Н. В. Исмагилов, Б. Г. Шерстюков и др. // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2008, № 2, с. 13-23.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 20.01.2023

Принята к публикации 05.06.2023

UDC 551.588

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/2/72-85>

Climatic Conditions of Functioning of the Carbon Landfill in the Kazan Region

Yu. P. Perevedentsev , K. M. Shantalinsky, N. A. Mirsaeva, T. R. Aukhadeev, A. A. Nikolaev, V. V. Guryanov, G. I. Shishkin

Kazan (Volga Region) Federal University,
Institute of Ecology and Nature Management, Russian Federation
(5, Tovarishcheskaya Str., Kazan, 420097)

Abstract. The purpose is to assess the current and future climatic condition of the Pacific region in the interests of the functioning of the Carbon landfill.

© Perevedentsev Yu. P., Shantalinsky K. M., Mirsaeva N. A., Aukhadeev T. R., Nikolaev A. A., Guryanov V. V., Shishkin G. I., 2023
✉ Yuri P. Perevedentsev, e-mail: ypereved@kpfu.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Materials and methods. The information base was the daily meteorological and actinometric data of station Kazan, University and station Vyazovye for 1966–2021. To identify long-period climatic changes, the average monthly temperature values at Kazan station, University in the period 1828–2021 were used. The extremity indices were evaluated according to the data of the ERA5 reanalysis. The main attention is paid to the analysis of a number of radiation, climatic, agrometeorological and extreme characteristics of the temperature and humidity regime, which made it possible to obtain a comprehensive description of the climatic state of the region.

Results and discussion. The dynamics of variability of radiation characteristics, the long-term course of temperature and precipitation are obtained, the degree of moisture and aridity of the territory, indicators of the growing season are estimated. The analysis of the indices recommended by the World Meteorological Organization revealed the most extreme climatic situations in the period 1980–2020.

Conclusions. The greatest rate of warming in Kazan was observed in 1981–2016, which led to an increase in the sum of positive temperatures during the growing season by 362.1 °C. A decrease in the amount of precipitation in 1986–2021 by 87.18 mm at a rate of 24.9 mm/10 years was revealed. The duration of the growing season has increased due to its earlier onset in spring and later completion in autumn. There is an increase in aridity in the area in the summer.

Key words: carbon landfill, greenhouse gases, climate warming, air temperature, precipitation, trends of change.

Funding: The work was carried out with the financial support of the RNF and the Cabinet of Ministers of Tatarstan within the framework of scientific project No. 22-27-20080.

For citation: Perevedentsev Yu. P., Shantalinsky K. M., Mirsaeva N. A., Aukhadeev T. R., Nikolaev A. A., Guryanov V. V., Shishkin G. I. Climatic Conditions of Functioning of a Carbon Landfill in the Kazan Region. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografya. Geoekologiya*, 2023, no. 2, pp. 72–85. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/2/72-85>

REFERENCES

1. Gladil'shchikova A. A., Dmitrieva T. M., Semenov S. M. Spetsial'nyy doklad Mezhpripravitel'stvennoy gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata «Global'noe potepleniya 1,5 °S» [Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change "Global warming by 1.5°C"]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2018, vol. 4, pp. 5–18. (In Russ.)
2. Gringof I. G., Pasechnyuk A. D. *Agrometeorologiya i agrometeorologicheskie nablyudeniya* [Agrometeorology and agrometeorological observations]. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 2005. 552 p. (In Russ.)
3. Zavarzin G. A., Kotlyakov V. M. Strategiya izucheniya Zemli v svete global'nykh izmeneniy [The strategy of studying the Earth in the light of global changes]. *Vestnik RAN*, 1998, vol. 68, no. 1, pp. 23–29. (In Russ.)
4. *Klimat Kazanii ego izmeneniya v sovremennyy period* [The climate of Kazan and its changes in the modern period] / pod red. Perevedentsev Yu. P., Naumov E. P. Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2006. 216 p. (In Russ.)
5. *Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems] / pod red. Semenov S. M. Moscow: Rosgidromet, 2012. 508 p.
6. Osobennosti proyavleniya sovremennogo global'nogo potepleniya v troposphere Atlantiko-Evropeyskogoregiona [Features of the manifestation of modern global warming in the troposphere of the Atlantic-European region] / Yu. P. Perevedentsev, M. A. Vereshchagin, E. P. Naumov, K. M. Shantalinsky. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2004, no. 2, pp. 38–47. (In Russ.)
7. Ped' D. A. Opredelenie dat ustoychivogo perekhoda temperatury vozdukha cherez opredelennye znacheniya [Determination of dates of stable transition of air temperature through certain values]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 1951, no. 10, pp. 38–39. (In Russ.)
8. Semenov S. M., Kuzovkin V. V. Sovremennoe sodержanie dioksida ugleroda v pripoverkhnostnom sloe atmosfery Zemli: mnogoletnie trendy i vnutrigodovaya izmenchivost' [Modern carbon dioxide content in the near-surface layer of the Earth's atmosphere: long-term trends and intra-annual variability]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2019, vol. 4, pp. 101–119. (In Russ.)
9. Sovremennye izmeneniya klimata Respubliki Tatarstan [Modern climate changes of the Republic of Tatarstan] / Yu. P. Perevedentsev, N. V. Ismagilov, B. G. Sherstyukovi dr. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografya. Geoekologiya*, 2008, no. 2, pp. 13–23. (In Russ.)

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 20.01.2023

Accepted: 05.06.2023

Переведенцев Юрий Петрович
доктор географических наук, профессор кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-3181-6227, e-mail: ypereved@kpfu.ru

Yuriy P. Perevedentsev
Dr. (Geogr.) Sci., Professor of the Department of meteorology, climatology and atmosphere ecology, Institute of Environmental Sciences, Kazan (Volga) Federal University, Kazan, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-3181-6227, e-mail: ypereved@kpfu.ru

Шанталинский Константин Михайлович

кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-1044-5789, e-mail: kshantal@kpfu.ru

Мирсаева Надежда Александровна

кандидат географических наук, заведующий кафедрой метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, Российская Федерация, ORCID:0000-0001-7123-9121, e-mail: NAMirsaeva@kpfu.ru

Аухадеев Тимур Ринатович

кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-6818-7794, e-mail: TRAUhadееv@kpfu.ru

Николаев Александр Анатольевич

кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-8555-8745, e-mail: Aleksandr.Nikolaev@kpfu.ru

Гурьянов Владимир Владимирович

кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-9353-7488, e-mail: Vladimir.Guryanov@kpfu.ru

Шишкин Георгий Игоревич

ассистент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, Российская Федерация, ORCID:0000-0002-6818-7794, e-mail: GeoIshishkin@kpfu.ru

Konstantin M. Shantalinsky

Cand. (Geogr.) Sci., Associate Professor of the Department of meteorology, climatology and atmosphere ecology, Institute of Environmental Sciences, Kazan (Volga) Federal University, Kazan, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-1044-5789, e-mail: kshantal@kpfu.ru

Nadezhda A. Mirsaeva

Cand. (Geogr.) Sci., Head of the Department of meteorology, climatology and atmosphere ecology, Institute of Environmental Sciences, Kazan (Volga) Federal University, Kazan, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-7123-9121, e-mail: NAMirsaeva@kpfu.ru

Timur R. Aukhadееv

Cand. (Geogr.) Sci., Associate Professor of the Department of meteorology, climatology and atmosphere ecology, Institute of Environmental Sciences, Kazan (Volga) Federal University, Kazan, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-6818-7794, e-mail: TRAUhadееv@kpfu.ru

Alexander A. Nikolaev

Cand. (Geogr.) Sci., Associate Professor of the Department of meteorology, climatology and atmosphere ecology, Institute of Environmental Sciences, Kazan (Volga) Federal University, Kazan, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-8555-8745, e-mail: Aleksandr.Nikolaev@kpfu.ru

Vladimir V. Guryanov

Cand. (Geogr.) Sci., Associate Professor of the Department of meteorology, climatology and atmosphere ecology, Institute of Environmental Sciences, Kazan (Volga) Federal University, Kazan, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-9353-7488, e-mail: Vladimir.Guryanov@kpfu.ru

Georgy I. Shishkin

Assistant of the Department of meteorology, climatology and atmosphere ecology, Institute of Environmental Sciences, Kazan (Volga) Federal University, Kazan, Russian Federation, ORCID:0000-0002-6818-7794, e-mail: GeoIshishkin@kpfu.ru