

ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОЧВЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮЖНОЙ ЧАСТИ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ РУССКОЙ РАВНИНЫ

Ю.А. Подрезова

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж, Россия, e-mail: umbassadorka@mail.ru

Аннотация. Проведен климато-статистический анализ средних годовых, сезонных и месячных норм температуры воздуха и почвы, а также характеристик трендов. Получено, что за последние 40 лет на исследуемой территории наблюдалось устойчивое закономерное потепление климата во все месяцы года, что привело к повышению температур почвы на всех глубинах.

Ключевые слова. Потепление климата, лесостепная зона, температура почвы, температура воздуха, Воронеж, Каменная степь.

INFLUENCE OF MODERN CLIMATE CHANGE ON SOIL TEMPERATURE IN THE CENTRAL AND SOUTHERN PART OF THE FOREST-STEPPE ZONE OF THE RUSSIAN PLAIN

Yu.A. Podrezova

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia, e-mail: umbassadorka@mail.ru

Abstract. A climate-statistical analysis of average annual, seasonal and monthly air and soil temperature norms, as well as trend characteristics, was conducted. It was found that over the past 40 years, a steady, regular climate warming was observed in the study area in all months of the year, which led to an increase in soil temperatures at all depths.

Keywords: Climate warming, forest-steppe zone, soil temperature, air temperature, Voronezh, Kamennaya Steppe.

Введение

Большинство сценариев изменения климата основано на анализе температур воздуха. Однако для теоретических и прикладных задач, связанных с оценкой отклика земной

поверхности на изменения климата, первостепенное значение имеет температура почв — важнейшая характеристика климатических, почвообразовательных, мерзлотных и инженерно-геологических условий. Она определяет функционирование наземных биогеоценозов, позволяя судить о чувствительности ландшафтов к антропогенному воздействию, изменению природной среды и климатическим флуктуациям. Поверхность почвы является важным звеном при передаче тепла из атмосферы в почвогрунты на глубины. В дневное время суток основная часть тепла накапливается в поверхностном слое почвы за счет энергии приходящей солнечной радиации. Ночью происходит теплообмен между почвой и атмосферой за счет конвекции. Влияние температуры воздуха является основным фактором изменения термического состояния почвогрунтов, однако, проникновение волн тепла и холода из воздуха в почву зависит от многих факторов (снежный покров, растительный покров, влажность почвы и т.д.) [2, 4].

Цель, объекты и методика исследований, исходные данные

Цель — статистическая оценка происходящих климатических изменений и их влияние на температуру почвы в центральной и южной части лесостепной зоны Русской равнины на территории Воронежской области.

Объектами настоящего исследования являются происходящие климатические изменения в поле температур воздуха и почвы на различных глубинах в центральной и южной части лесостепной зоны Русской равнины на территории Воронежской области по данным репрезентативных метеорологических станций Воронеж (высота 107 м) и Каменная степь (высота 200 м, расположена примерно в 150 км к юго-востоку от Воронежа). Все использованные метеорологические данные находятся в свободном доступе на сайте ВНИИГМИ-МЦД [1], а также на сайте Погода и климат [5]. Были рассчитаны многолетние климатические нормы средних месячных, сезонных и годовых температур воздуха и почвы на поверхности и глубинах 20, 40, 80, 120 см, их средние квадратические отклонения, характеристики линейных трендов, а также изменения самих значений температуры воздуха и почвы по найденным линейным трендам. Это позволило получить численные оценки современных изменений климата, как в виде общих интегральных характеристик (нормы и их СКО), так и характеристик основной тенденции или динамики климатических изменений (тренды) [3].

Результаты и их обсуждение

Климатические нормы средних месячных, сезонных, годовых температур почвы на различных глубинах и воздуха, а также их межгодовая изменчивость в период 1984-2023 гг.

В таблице 1 приведены значения климатических норм средних месячных, сезонных и годовых температур почвы на глубинах 0, 20, 40, 80 и 120 см по станциям Воронеж и Каменная степь, а также средние месячные, сезонные и годовые многолетние температуры воздуха, рассчитанные за общий использованный 40-летний период 1984–2023 гг.

Таблица 1 – Нормы годовых, месячных и сезонных средних температур почвы на различных глубинах и воздуха (°C) по станциям Воронеж и Каменная степь за 1984-2023 гг.

Год, сезон, месяц	Станция Воронеж						Станция Каменная степь					
	$T_{\text{возд.}}$	T_0	T_{20}	T_{40}	T_{80}	T_{120}	$T_{\text{возд.}}$	T_0	T_{20}	T_{40}	T_{80}	T_{120}
Год	7,3	8,6	9,0	8,8	8,7	8,7	7,1	8,7	8,7	8,7	8,7	8,8
Зима:	-5,5	-6,5	-0,6	0,5	2,5	4,2	-6,2	-6,6	-0,3	1,4	3,4	4,9
декабрь	-4,5	-5,2	0,0	1,3	3,7	5,6	-5,1	-5,4	0,4	2,3	4,6	6,4
январь	-6,1	-7,0	-0,8	0,3	2,2	3,9	-6,8	-7,2	-0,6	1,1	3,1	4,6
февраль	-6,0	-7,2	-1,0	-0,2	1,6	3,0	-6,7	-7,4	-0,7	0,7	2,3	3,7
Весна:	7,8	9,0	7,4	6,3	5,3	4,9	7,6	8,8	6,5	5,7	5,2	5,1
март	-0,5	-1,7	0,5	0,6	1,5	2,6	-1,1	-1,9	0,5	1,1	2,2	3,3
апрель	8,6	9,6	6,9	5,6	4,3	4,0	8,6	9,3	5,9	4,9	4,3	4,3
май	15,3	19,3	14,7	12,7	10,0	8,3	15,4	19,0	13,0	11,1	9,0	7,8
Лето:	19,9	24,7	20,2	18,6	16,0	14,1	20,2	25,0	18,9	17,0	14,8	13,3
июнь	19,0	24,2	18,9	17,0	13,9	11,9	19,2	24,5	17,4	15,2	12,8	11,1
июль	20,9	26,1	21,1	19,4	16,6	14,5	21,0	26,4	19,7	17,7	15,4	13,7
август	19,9	24,0	20,6	19,4	17,4	15,8	20,3	24,3	19,6	18,1	16,4	15,0
Осень:	7,0	6,9	9,1	9,9	11,0	11,7	7,0	7,5	9,7	10,6	11,5	11,9
сентябрь	13,7	14,7	15,2	15,3	15,1	14,7	14,1	15,8	15,3	15,2	14,9	14,4
октябрь	7,2	6,6	8,9	9,8	11,2	11,9	7,1	7,2	9,7	10,8	11,8	12,2
ноябрь	0,2	-0,5	3,1	4,5	6,8	8,5	-0,2	-0,4	4,0	5,8	7,9	9,2

За 40-летний период наблюдений 1984–2023 гг. климатические нормы средних годовых температур воздуха по станциям Воронеж и Каменная степь были соответственно равными 7,3 и 7,1 °C. Статистически по t-критерию это означает их равенство не уровне значимости $q=0,05$ (односторонняя альтернатива). Средние квадратические отклонения (СКО) для годовых температур воздуха были одинаковыми по обеим станциям и составили 1,2 °C. Статистически по F-критерию это означает равенство дисперсий температур на уровне значимости $q=0,05$ [3]. Значения СКО для средних месячных температур, как и следовало ожидать, были значительно больше: по Воронежу для центральных месяцев сезонов - января, апреля, июля и октября - они соответственно равнялись 3,4, 2,0, 1,9 и 1,6 °C, а для Каменной степи 3,3, 2,2, 2,0 и 1,8 °C. Таким образом, обращает на себя внимание очень важный факт: практическое равенство в период 1984–2023 гг. как норм температуры по обеим станциям, так и ее межгодовой изменчивости, являющихся одними из основных показателей климата. Для обеих станций минимальные месячные нормы температуры воздуха отмечаются в январе (-6,1 °C для Воронежа и -6,8 °C для Каменной степи), а максимальные – в июле (20,9 °C для Воронежа и 21,0 °C для Каменной степи).

Нормы средних годовых температур почвы на глубинах 0, 20, 40, 80 и 120 см для метеостанции Воронеж соответственно равны 8,6, 9,0, 8,8, 8,7 и 8,7 °C, а для метеостанции Каменная степь на поверхности и глубинах 20, 40, 80 см – 8,7 °C, на глубине 120 см – 8,8 °C.

Для обеих станций минимальные месячные нормы температуры почвы на поверхности и глубинах 20 и 40 см отмечаются в феврале (-7,2, -1,0, -0,2 °C соответственно для Воронежа и -7,4, -0,7, 0,7 °C для Каменной степи), а на глубинах 80 и 120 см – в марте (1,5, 2,6 °C для Воронежа и 2,2, 2,3 °C для Каменной степи). Максимальные месячные нормы температуры почвы на станциях отмечаются в июле для поверхности и глубины 20 см (26,1, 21,1 °C для Воронежа и 26,4, 19,7 °C для Каменной степи), а на глубинах 40, 80 и 120 см – в августе (19,4, 17,4, 15,8 °C для Воронежа и 18,1, 16,4, 15,0 °C для Каменной степи). Весенние нормы температуры поверхности почвы больше осенних, также, как и весенние нормы температуры

воздуха. На глубинах 20 см и более наоборот, осенние нормы превосходят весенние в 1,2-2,4 раза. Средние квадратические отклонения для годовых температур почвы на обеих станциях были почти одинаковыми на соответствующих глубинах и составляли 0,6-1,4 °С.

Динамика изменения средних месячных, сезонных и годовых температур воздуха и почвы на различных глубинах в период 1984–2023 гг.

Для изучения временных изменений средних месячных, сезонных и годовых температур воздуха и почвы на различных глубинах в период 1984–2023 гг. использовался анализ трендов.

На рисунке 1(в) и 1(г) показан временной ход средних годовых температур воздуха за 1984–2023 гг. по обеим станциям и аппроксимация его линейными трендами. На рисунке 1(а) и 1(б) аналогично приведен временной ход средних годовых температур почвы на всех глубинах.

Из графиков видно закономерное повышение всех температур от начала к концу периода, хорошо аппроксимируемое прямыми линейных трендов.

По линейным трендам для обеих станций были рассчитаны непосредственно значения ее изменений $\Delta T_{\text{возд.}}$, ΔT_0 , ΔT_{20} , ΔT_{40} , ΔT_{80} , ΔT_{120} в °С, показанные в таблице 2.

Таблица 2 – Значения изменений средних месячных, сезонных и годовых температур воздуха $\Delta T_{\text{возд.}}$ и почвы на различных глубинах ΔT_0 , ΔT_{20} , ΔT_{40} , ΔT_{80} , ΔT_{120} (°С) по станциям Воронеж и Каменная степь за 1984-2023 гг.

Год, сезон, месяц	Станция Воронеж						Станция Каменная степь					
	$\Delta T_{\text{возд.}}$	ΔT_0	ΔT_{20}	ΔT_{40}	ΔT_{80}	ΔT_{120}	$\Delta T_{\text{возд.}}$	ΔT_0	ΔT_{20}	ΔT_{40}	ΔT_{80}	ΔT_{120}
Год	3,1	3,1	2,1	2,0	1,6	1,5	2,9	3,6	2,4	1,9	1,6	1,8
Зима:	3,6	3,5	2,1	1,6	1,4	1,6	3,4	3,8	0,3	0,7	1,0	1,3
декабрь	5,2	5,3	2,4	1,8	1,6	1,7	4,9	5,2	1,0	1,2	1,5	1,7
январь	1,1	1,1	1,8	1,5	1,3	1,6	1,0	1,3	0,0	0,6	1,0	1,3
февраль	4,5	4,1	2,1	1,6	1,4	1,4	4,5	4,7	0,1	0,3	0,6	0,9
Весна:	2,2	2,0	1,9	1,9	1,5	1,5	2,2	2,8	2,7	2,1	1,7	1,7
март	3,6	2,9	2,1	1,9	1,6	1,5	3,7	4,5	1,4	1,2	1,0	1,0
апрель	1,8	1,8	2,4	2,6	1,9	1,9	1,9	2,5	3,4	2,6	2,0	1,8
май	1,1	1,3	1,2	1,3	1,1	1,2	0,9	1,5	3,2	2,4	2,2	2,2
Лето:	3,1	3,6	2,1	2,0	1,3	1,2	2,7	3,8	3,8	2,4	1,7	2,0
июнь	1,9	3,0	1,1	1,3	0,9	1,0	1,2	2,7	3,2	2,1	1,7	2,0
июль	2,9	2,9	1,9	1,8	1,0	1,1	2,7	3,4	3,5	2,2	1,5	1,8
август	4,4	4,9	3,2	2,9	1,9	1,6	4,2	5,2	4,6	3,0	1,9	2,0
Осень:	3,4	3,4	2,5	2,3	2,1	1,9	3,3	3,8	2,7	2,5	2,1	2,2
сентябрь	3,0	3,2	2,7	2,5	2,1	1,9	2,9	4,1	3,6	2,7	2,0	2,1
октябрь	2,4	2,3	1,9	1,8	1,9	1,7	2,4	2,9	2,3	2,3	2,0	2,1
ноябрь	4,7	4,6	2,9	2,5	2,2	2,0	4,5	4,5	2,2	2,5	2,3	2,3

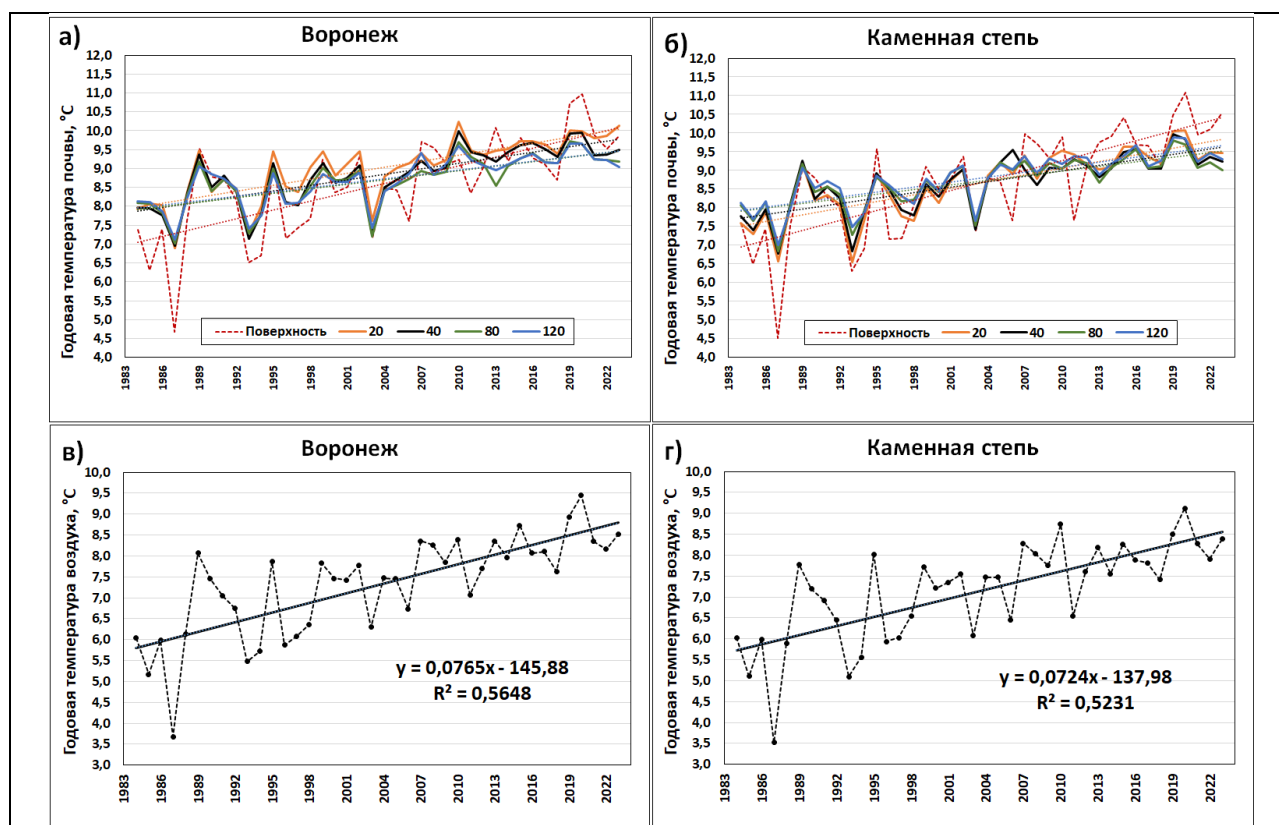


Рис. 1. Ход годовых температур почвы на различных глубинах по метеостанции Воронеж (а) и Каменная степь (б), а также годовых температур воздуха (в, г) с линиями и уравнениями (для температуры воздуха) линейных трендов за 1984–2023 гг.

Несмотря на то, что увеличение месячных и годовых температур воздуха в Воронеже было немного интенсивнее, температуры почвы больше увеличились преимущественно по всем глубинам в Каменной степи. Годовые температуры почвы за рассмотренный период на поверхности и на глубинах 20, 40, 80 и 120 см увеличились соответственно на 3,1, 2,1, 2,0, 1,6 и 1,5 °C для метеостанции Воронеж и на 3,6, 2,4, 1,9, 1,6 и 1,8 °C для метеостанции Каменная степь. Если рассматривать трендовые изменения температур почвы по сезонам года, то можно заметить, что наибольшее увеличение температур на поверхности почвы для Воронежа было летом и зимой (на 3,6 и 3,5 °C соответственно), а для Каменной степи интенсивное потепление поверхности почвы наблюдалось зимой, летом и осенью (на 3,8 °C). Менее всего увеличились температуры весны (на 2,0 °C для Воронежа и на 2,8 °C для Каменной степи). На глубинах 20, 40, 80 и 120 см более всего увеличились осенние температуры почвы (на 2,5, 2,3, 2,1 и 1,9 °C соответственно) для метеостанции Воронеж. На метеостанции Каменная степь максимальное за 40 лет увеличение температур почвы на глубине 20 см наблюдалось летом (на 3,8 °C), а на остальных глубинах осенью (на 2,1-2,5 °C).

Наибольшее потепление средних месячных температур поверхности почвы для обеих станций было в декабре и августе – на 4,9-5,3 °C, а наименьшее в январе и мае – на 1,1-1,5 °C. На глубинах почвы 20 и 40 см для обеих станций интенсивнее всего увеличились температуры августа (на 2,9-4,6 °C), а на уровнях 80 и 120 см – сентября и апреля для Воронежа (на 1,9-2,1 °C) и сентября и мая для Каменной степи (на 2,0-2,2 °C). Наименьшее увеличение месячных температур воздуха для последних глубин было в июне-июле для Воронежа (на 0,9-1,1 °C) и в феврале для Каменной степи (на 0,6-0,9 °C).

Заключение

В центральной и южной части лесостепной зоны Русской равнины на территории Воронежской области по многолетним данным наблюдений репрезентативных метеостанций Воронеж и Каменная степь за 1984–2023 гг. наблюдалось устойчивое закономерное потепление климата во все месяцы года, а также увеличение температур почвы на всех глубинах.

Годовые нормы температур воздуха оказались равными: станция Воронеж 7,3 °С, Каменная степь 7,1 °С. Годовые значения СКО по температуре воздуха по обеим станциям оказались равными и составили 1,2 °С, следовательно, можно считать, что, с точки зрения, как самих норм температуры, так и ее межгодовой изменчивости, климатические условия на обеих станциях были идентичными. Годовые **нормы температур почвы** на глубинах 0, 20, 40, 80 и 120 см: Воронеж 8,6, 9,0, 8,8, 8,7 и 8,7 °С, Каменная степь – 8,7, 8,7, 8,7, 8,7 и 8,8 °С.

Средняя скорость повышения годовых температур воздуха за 40-летний период по станции Воронеж составила 0,765 °С/10 лет, что привело к их росту на 3,1 °С. Аналогичная скорость повышения годовых температур по станции Каменная степь была 0,724 °С/10 лет, что привело к почти такому же их росту на 2,9 °С.

Сильнее всего потеплел зимний сезон года (на 3,4-3,6 °С) и осенний (на 3,3-3,4 °С). Температуры летнего сезона увеличились на 2,7-3,1 °С, а весеннего на 2,2 °С. Максимальные скорости повышения температур на обеих станциях наблюдались в декабре, что дало потепление на 4,9-5,2 °С, а минимальные – в январе и мае, увеличение температур составило 0,9-1,1 °С.

Годовые температуры почвы на поверхности и на глубинах 20, 40, 80 и 120 см увеличились соответственно на 3,1, 2,1, 2,0, 1,6 и 1,5 °С для Воронежа и на 3,6, 2,4, 1,9, 1,6 и 1,8 °С для Каменной степи.

Для обеих станций на поверхности почвы максимально увеличились зимние, летние и осенние температуры (на 3,1-3,6 °С для Воронежа и на 3,6-3,8 °С для Каменной степи). По данным метеостанции Воронеж наибольшее увеличение сезонных температур почвы на глубинах от 20 до 120 см было осенью (на 1,9-2,5 °С), также значительно увеличились летние и зимние температуры на глубине 20 см (на 2,1 °С), летние и весенние на глубине 40 см (на 1,9-2,0 °С), зимние и весенние на уровне 80 и 120 см (на 1,4-1,6 °С). По данным метеостанции Каменная степь на глубине 20 см более всего увеличились летние температуры (на 3,8 °С), а на остальных глубинах – в первую очередь осенние (на 2,1-2,5 °С), а также летние и весенние температуры (на 1,7-2,4 °С).

Наибольшее потепление средних месячных температур поверхности почвы для обеих станций было в декабре и августе – на 4,9-5,3 °С, а наименьшее в январе и мае – на 1,1-1,5 °С. На глубинах почвы 20 и 40 см для обеих станций интенсивнее всего увеличились температуры августа (на 2,9-4,6 °С), а на уровнях 80 и 120 см – сентября и апреля для Воронежа (на 1,9-2,1 °С) и сентября и мая для Каменной степи (на 2,0-2,2 °С). Наименьшее увеличение месячных температур воздуха для последних глубин было в июне-июле для Воронежа (на 0,9-1,1 °С) и в феврале для Каменной степи (на 0,6-0,9 °С).

Список литературы

1. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. – URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения 13.01.2025).
2. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. Сведения о влиянии текущих изменений приземного климата на термическое состояние почвогрунтов РФ. – URL: <http://meteo.ru/activity/climate/soil-temperature-info> (дата обращения 17.02.2025).
3. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд.-во МГУ, 1988. 245 с.
4. Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.
5. Погода и климат. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения 20.01.2025).

References

1. Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. – URL: <http://meteo.ru/data> (Accessed 13.01.2025).
2. Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center, Information on the impact of current changes in the surface climate on the thermal state of soils in the Russian Federation. – URL: <http://meteo.ru/activity/climate/soil-temperature-info> (Accessed 17.02.2025).
3. Isaev, A.A. (1988), *Statistika v meteorologii i klimatologii*, [Statistics in meteorology and climatology], Moscow, Russian.
4. Naumov, A.V. (2009). *Dyhanie pochvy: sostavljajushhie, jeologicheskie funkicii, geograficheskie zakonomernosti*, [Soil respiration: components, ecological functions, geographical patterns], Novosibirsk, Russian.
5. Weather and climate. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (Accessed 20.01.2024).