

КЛИМАТ ЮЖНОГО ПОДМОСКОВЬЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ И ОЦЕНКА АНОМАЛЬНОСТИ

И.Н. Курганова^{1)*}, *В.О. Лопес де Гереню*¹⁾, *В.А. Аблеева*²⁾, *С.С. Быховец*¹⁾

¹⁾ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Россия, 142290, Московская обл., г. Пушкино, Институтская ул., д. 2; **ikurg@mail.ru*

²⁾ Станция фонового мониторинга, Россия, 142200, Московская область, Серпуховский район, Данки, Заповедник

Резюме. Изменения климата, наблюдаемые в настоящее время на значительной части территории России, проявляются как в повышении температуры воздуха, так и в увеличении числа погодных аномалий, усиливающих общую аномальность климата. На основе долговременных рядов метеорологических наблюдений, проводимых на Станции фонового мониторинга в Приокско-Террасном Государственном биосферном заповеднике с 1973 года, охарактеризованы современные тренды основных метеорологических параметров. Выполнена оценка аномальности климата в районе южного Подмосковья. Показано, что наиболее заметными тенденциями современного климата в южном Подмосковье наряду с однонаправленным увеличением среднегодовой и среднесезонных температур воздуха являются усиление засушливости летнего периода и потепление зимнего сезона. Последнее проявляется в уменьшении продолжительности и максимальной высоты снежного покрова. Расчеты показали, что после 1994 г. происходит смена знака суммы аномалий с отрицательного на положительный как для среднегодовых и среднесезонных температур, так и для суммарного количества осадков. За 44-летний период метеонаблюдений нам не удалось выявить однозначной тенденции увеличения повторяемости аномальных погодных явлений по всем анализируемым показателям. Однако в 2006-2016 гг. проявился отчетливый рост числа аномальных лет как по величине летнего гидротермического коэффициента Селянинова, так и по сумме осадков во все календарные сезоны года, кроме зимнего.

Ключевые слова. Изменение регионального климата, гидротермический коэффициент Селянинова, аридизация, аномалии, засухи, южное Подмосковье.

CLIMATE OF MOSCOW REGION SOUTH: CURRENT TRENDS AND ASSESSMENT OF THE ANOMALITY

I.N. Kurganova^{1)*}, *V.O. Lopes de Gerenyu*¹⁾, *V.A. Ableeva*²⁾, *S.S. Bykhovets*¹⁾

¹⁾ Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science RAS, 2, Institutsкая ul., 142290, Moscow oblast, Pushchino, Russia; **ikurg@mail.ru*

²⁾ Background Monitoring Station, Prioksko-Terrasny Nature Reserve, 142200, Moscow oblast, Serpukhovsky region, Danki, Zapovednik. Russia,

Summary. Current climatic changes observed over substantial part of Russian territory are manifested both as air temperature growth and the increase in the

number of weather anomalies enhancing the anomaly of climate. In the paper, current trends of main meteorological parameters are characterized for the southern part of Moscow region on the basis of long-term series of meteorological observations carried out at the Background Monitoring Station of Prioksko-Terrasny Nature Reserve since 1973. The anomaly of climate in the South of Moscow region is also assessed. It is shown that along with unidirectional increase in mean annual and mean seasonal air temperature the most pronounced trends in the South of Moscow region are intensification of droughts in summer and warming in winter. The latter results in decrease in snow cover duration and maximal snow depth. The calculations show that the sign of anomalies sum changed from minus to plus in 1994 for mean annual and mean seasonal temperature as well as for total precipitation amount. For 44-year period of observations, we didn't detect a definite increase in the frequency of anomalous weather events for all the analyzed parameters. However, pronounced increase in the number of anomalous years is found using summer Selyaninov hydrothermal coefficient as well as total precipitation for all seasons except winter.

Keywords. Regional climate change, Selyaninov hydrothermal coefficient, aridization, anomalies, droughts, South of Moscow region.

Введение

Изменения климата, наблюдаемые в настоящее время на значительной территории России, проявляются как в общем повышении температуры воздуха, так и в увеличении числа погодных аномалий, усиливающих общую экстремальность климата (IPCC, 2008, 2013, 2015; Второй оценочный доклад..., 2014). И если глобальная температура воздуха ($T_{\text{возд}}$) за последнее столетие (1907-2006 гг.) возросла на 0.74°C , то среднегодовая $T_{\text{возд}}$ в России за тот же период увеличилась на 1.29°C (Оценочный доклад..., 2008). Суммарное потепление в последние 3 десятилетия (1976-2007 гг.) на территории Российской Федерации было еще более заметным и составило 1.33°C . Таким образом, скорость потепления после 1975 г. была существенно больше, чем за столетие в целом: $0.43^{\circ}\text{C}/10$ лет против $0.10\text{-}0.13^{\circ}\text{C}/10$ лет, соответственно. Столь значительные темпы роста среднегодовой $T_{\text{возд}}$ в России после 1975 г. объясняются как общей тенденцией усиления потепления в этот период, так и имевшим место в середине XX века относительным похолоданием на всей территории России (Оценочный доклад..., 2008). И хотя рост среднегодовой $T_{\text{возд}}$ наблюдается во всех регионах страны (Розгачева, 2012), из-за большой протяженности территории России изменение среднегодовой $T_{\text{возд}}$ происходит с неодинаковой скоростью как в различных природно-географических регионах, так и в различные сезоны года (Оценочный доклад..., 2008; Второй оценочный доклад..., 2014). В связи с этим, анализ региональных и локальных трендов изменения климата и их сравнение с общими тенденциями представляется весьма актуальным.

Неотъемлемой характеристикой современного климата являются также более частые погодные аномалии, которые проявляются в различных регио-

нах нашей планеты в виде жесточайших засух, ливневых или ледяных дождей, наводнений, ураганов. Увеличение частоты и площади засух наблюдается сегодня не только в регионах с прогнозируемым снижением количества осадков, но и в областях, где вследствие изменений климата сумма осадков имеет тенденцию увеличиваться (Золотокрылин и др., 2007). Вероятность этого тренда в конце XX века составила более 66% и сохраняется в текущем столетии (Гулев и др., 2008). Расчеты, выполненные на основе наблюдений за ежедневной максимальной температурой воздуха и суточными суммами осадков на 110-ти метеостанциях сети Росгидромета, показали, что на территории европейской части России (ЕЧР), южнее 57° с.ш., в течение 1995-2014 гг. наблюдалось существенное увеличение повторяемости периодов аномально высоких температур длительностью больше месяца по сравнению с периодом 1963-1994 гг. (Черенкова, 2017). Автор считает, что при сохранении темпов современного потепления, в ряде регионов на ЕЧР рост частоты непрерывных периодов с аномально высокими майскими температурами приведет к увеличению риска опасных атмосферных засух уже в мае, что будет весьма неблагоприятно для сельскохозяйственной отрасли. На примере Причерноморского региона было показано, что за период современного потепления (после 1976 г.) экстремальность $T_{\text{возд}}$, которая выражалась через значения 5-го и 95-го перцентилей внутрисезонных аномалий температуры, увеличивалась для всех сезонов кроме зимнего, когда отмечались тренды обоих знаков (Коваленко и др., 2017). Таким образом, проявление экстремальности климата зависит от сезона года и имеет свои региональные особенности, оценка которых очень важна для оценки рисков в земледельческой отрасли.

Наряду с общим потеплением, климатические аномалии и экстремальные погодные явления оказывают значительное влияние на функционирование природной среды в целом. Изменения климата влияют в частности на все составляющие баланса углерода, смещая суммарный вектор потоков CO_2 в пространстве и времени и изменяя стоковую функцию экосистем (Peters et al, 2011; Курганова и др., 2011б, 2016). Поэтому наряду с оценкой общих тенденций в изменении климата на региональном или локальном уровне весьма важным представляется также анализ частоты погодных экстремумов и значительных климатических аномалий, который поможет прояснить особенности динамики растительных сообществ, формирования потоков и баланса углерода на уровне отдельных экосистем, а также изменение ареалов распространения возбудителей болезней лесных и сельскохозяйственных культур.

Цель настоящего исследования состояла в выявлении современных трендов основных метеорологических характеристик и оценке аномальности климата в районе южного Подмосковья. В основу работы был положен детальный анализ метеорологических данных, полученных на станции фонового мониторинга (СФМ), расположенной на территории Приокско-Террасного государственного биосферного заповедника (ПТГБЗ), где метеонаблюдения ведутся непрерывно, начиная с 1973 г. Сама станция находится на лесной поляне и здесь к минимуму сведено влияние антропогенных нару-

шений. И хотя такое расположение СФМ не отвечает полностью требованиям, предъявляемым к репрезентативности стандартных метеостанций сети Росгидромета, временные ряды метеонаблюдений, полученных на СФМ, отличаются однородностью и могут служить характеристикой именно «лесного» климата в регионе южного Подмосковья. Так, анализ микроклиматических наблюдений, проводимых именно на территории заповедника, объясняет особенности динамики остепненных луговых сообществ в ПТГБЗ (Зеленская, 2016, 2017). Было найдено, что лугово-степная экосистема «Долы», расположенная на северо-западном пределе ареала существования, за годы глобального потепления приблизилась по важнейшим структурным и количественным характеристикам к луговой степи в Курской области, а ее продуктивность возросла за период 1998-2011 гг. более чем на 30% по сравнению с периодом 1975-1985 гг. (Зеленская и др., 2015). В смешанном лесу ПТГБЗ, расположенном в непосредственной близости от СФМ, за 17-летний цикл наблюдений (1998-2014 гг.) была выявлена отчетливая тенденция снижения годовых потоков CO_2 из дерново-подзолистой супесчаной почвы со скоростью $12.8 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ($R^2 = 0.28$; $P = 0.03$), которая обусловлена недостаточным увлажнением почв легкого гранулометрического состава и снижением уровня грунтовых вод на площадках исследований, вызванных усилением засушливости климата в регионе (Курганова и др., 2011б, 2016).

Задачи настоящего исследования включали также (1) оценку линейных трендов среднегодовых значений $T_{\text{возд}}$ в 1907-2006 гг. (100 лет) и в 1976-2007 гг. (32 года) для Центрального Федерального округа (ЦФО) и Московской области; (2) сравнительную характеристику среднемесячных, среднесезонных и среднегодовых $T_{\text{возд}}$ и сумм осадков ($\sum \text{ос}$) за 30-летний период (1981-2010 гг.) на СФМ и других метеостанциях южного Подмосковья, и (3) анализ временных трендов годовых и сезонных $T_{\text{возд}}$ и $\sum \text{ос}$ на СФМ и метеорологической станции Коломна.

Методология исследований

Используя свободный доступ к климатическим данным ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета (<http://meteo.ru/data>), было проведено пространственное осреднение климатических данных (среднегодовая $T_{\text{возд}}$ и $\sum \text{ос}$) для ЦФО (30 станций) и Московской области (4 станции) и построены линейные тренды для двух временных интервалов, характеристика которых для разных регионов России приведена в отчете Росгидромета (Оценочный доклад..., 2008), а именно: за 1907-2006 гг. и за 1976-2007 гг. (Табл. 1).

На основе имеющихся в нашем распоряжении данных среднемесячных, среднегодовых и среднесезонных значений $T_{\text{возд}}$ и $\sum \text{ос}$ за 30-летний период (1981-2010 гг.) для других метеостанций, расположенных в южном Подмосковье (Серпухов, $54^{\circ}55'$ с.ш., $37^{\circ}24'$ в.д.; Кашира, $54^{\circ}49'$ с.ш., $38^{\circ}09'$ в.д.; Коломна, $55^{\circ}05'$ с.ш., $38^{\circ}46'$ в.д.), было проведено сравнение этих показателей с аналогичными данными для СФМ ($54^{\circ}54'$ с.ш., $37^{\circ}33'$ в.д.).

Работа с многолетними рядами метеорологических данных СФМ и станции Коломна включала построение линейных временных трендов за 44-летний цикл наблюдений (1973-2016 гг.) и за современный 19-летний период (1998-2016 гг.), сопряженный с многолетними непрерывными наблюдений за эмиссией CO_2 из почв лесного и лугового ценозов в ПТГБЗ (Курганова и др., 2007; 2011а, б; 2016). Построение линейных трендов на годовом и сезонном уровнях осреднения по данным СФМ было проведено для следующих показателей: $T_{\text{возд}}$, $\sum \text{ос}$, продолжительность снежного периода (ПСП) и максимальная высота снежного покрова ($MV_{\text{снега}}$). По данным рядов наблюдений в Коломне временные тренды также строились на годовом и сезонном уровнях осреднения, но только для $T_{\text{возд}}$ и $\sum \text{ос}$. Интенсивность и знак наблюдаемых трендов характеризовали с помощью коэффициента линейной регрессии (a), который соответствует средней (с шагом в 1 год) скорости изменения переменной. Статистическая достоверность полученных трендов оценивалась методом наименьших квадратов по коэффициенту детерминации R^2 и критической значимости тренда P .

Для оценки меры засушливости климата был выбран гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК), рассчитанный для летнего периода и равный отношению суммы осадков за лето ($\sum \text{ос-лето}$, мм) к сумме среднесуточных температур воздуха, превышающих 10°C ($T_{>10^\circ\text{C}}$) за это же время, уменьшенной в 10 раз: $\text{ГТК} = \sum \text{ос-лето} / 0.1 \cdot T_{>10^\circ\text{C}}$ (Золотокрылин и др. 2007; Черенкова, Золотокрылин, 2016). Чтобы отнести засуху к слабой, умеренной или сильной, использовали сравнение отрицательных аномалий ГТК по отношению к его среднему значению за исследуемый период и среднего квадратичного отклонения, STD (Золотокрылин, Черенкова, 2006). Превышение отрицательными аномалиями ГТК значений, соответствующих 1, 1.5 и 2 STD позволяло отнести засухи к слабой, умеренной или сильной (экстремальной), соответственно.

Оценка экстремальности локального климата, предпринятая в настоящем исследовании, базировалась на оценке аномалий основных метеорологических параметров (среднегодовых и среднесезонных $T_{\text{возд}}$, $\sum \text{ос}$, летнем ГТК, ПСП, $MV_{\text{снега}}$). Аномалии, под которыми понимается любое отклонение от среднего значения, были просуммированы для 4-х последовательных 11-летних интервалов за период 1973-2016 гг. Оценка аномалий климатических переменных проводилась по отношению к среднему арифметическому за весь 44-летний цикл метеонаблюдений.

Результаты и обсуждение

Проведенные расчеты показали, что в Центральном Федеральном округе были выявлены значимые ($P < 0.01$) положительные тренды среднегодовой $T_{\text{возд}}$ как в течение последнего столетия ($0.14^\circ\text{C}/10$ лет), так и за период 1976-2007 гг. ($0.57^\circ\text{C}/10$ лет). Рост среднегодовых $T_{\text{возд}}$ в Московском регионе происходил с аналогичной интенсивностью и составлял $0.17^\circ\text{C}/10$ лет для столетнего периода и $0.58^\circ\text{C}/10$ лет за последнее тридцатилетие (табл. 1).

Таблица 1. Оценки линейных трендов регионально осредненных среднегодовых значений $T_{\text{возд}}$ в 1907-2006 гг. и в 1976-2007 гг.

Регион	1907-2006 (100 лет)		1976-2007 (32 года)	
	a , °C/10 лет	Δ , °C	a , °C/10 лет	Δ , °C
Россия*	0.13	1.29	0.43	1.33
Европейская часть России*	0.12	1.19	0.49	1.51
Центральный Федеральный округ	0.14	1.36	0.57	1.70
Московская область	0.17	1.66	0.58	1.73

* *Оценочный доклад..., 2008 (с.14)*

Примечание. a - коэффициент линейного тренда, °C/10 лет; Δ — суммарное изменение температуры за указанный период, соответствующее линейному тренду, °C

Обнаруженное повышение среднегодовой $T_{\text{возд}}$ в течение XX столетия в ЦФО Российской Федерации и в Московском регионе было более значительным, чем на территории России в целом и ее Европейской части, а полученные временные тренды температуры отражают общие тенденции в изменении климата на планете, которые, заключаются в более высоких темпах потепления после 1975 г. по сравнению с периодом 1907-2006 гг.

Сравнительная характеристика $T_{\text{возд}}$ и $\sum \text{ос}$ на метеорологических станциях южного Подмосковья в 1981-2010 гг.

Расположенные на юге Подмосковья метеостанции показывают очень сходные данные по многолетним (1981-2010 гг.) среднемесячным, среднесезонным и среднегодовым значениям $T_{\text{возд}}$ и $\sum \text{ос}$ (рис. 1). Коэффициент вариации (CV) для среднемесячных значений $T_{\text{возд}}$ был самым высоким в марте (18.5%) и ноябре (22.5%). Во все остальные месяцы и сезоны года CV изменялся от 1.1 до 4.6%. Отклонение всех температурных показателей на СФМ от их средних значений для южного Подмосковья изменялось от 0.1 до 0.5°C и не превышало величину STD (рис. 1 А, В).

Варьирование среднесезонных $\sum \text{ос}$ среди станций южного Подмосковья во все временные интервалы (месяц, сезон, год) было более выражено, чем варьирование температуры (CV = 3.2-11.4%). Практически во все сезоны и месяцы года разность между $\sum \text{ос}$ на СФМ и ее средней величиной по всем станциям южного Подмосковья была положительной и превышала величину STD, рассчитанную по данным 4-х станций. Наибольшие различия по количеству осадков наблюдались между СФМ и станцией Коломна. И хотя расстояние между этими станциями всего 80 км, разность годовых $\sum \text{ос}$ составила 80 мм, варьируя в отдельные сезоны года от 16 до 30 мм. Разность $\sum \text{ос}$ за годовой период между СФМ и ближайшей к ней станцией Серпухов, расположенной в 11 км к западу, была также существенной (55 мм) и в зависимости от сезона года изменялась от 9 до 19 мм. Отмеченные различия между СФМ и

другими метеостанциями региона в количестве осадков в зимний сезон могут объясняться особенностями расположения СФМ на лесной поляне, что в некоторой степени уменьшает сдувание снега с поверхности почвы в зимнее время, по сравнению с другими метеостанциями, расположенными на открытых участках. В другие сезоны года основной причиной отличий, по-видимому, является пространственная неравномерность распределения осадков по территории.

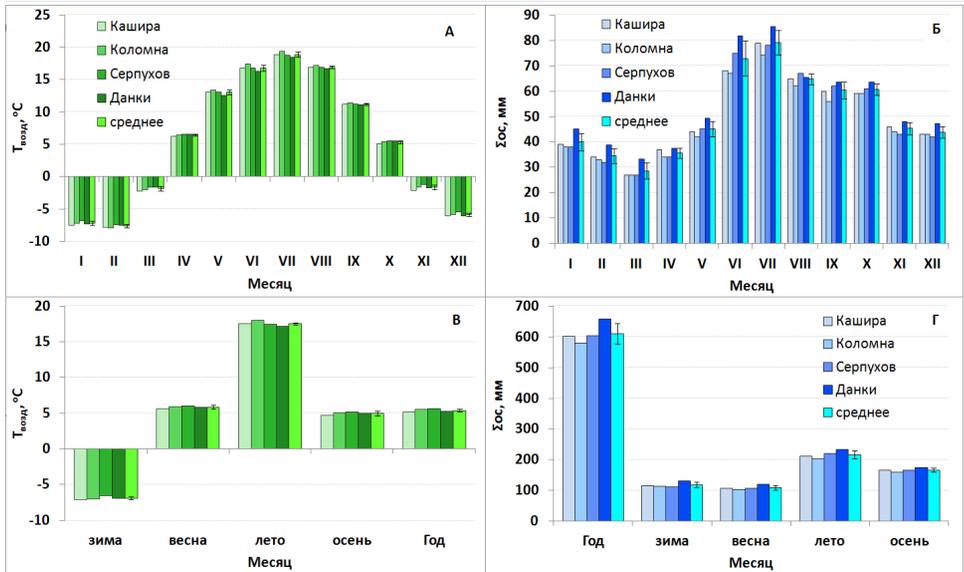


Рисунок 1. Среднемесячные и среднесезонные значения $T_{\text{возд}}$ (А, В) и $\Sigma_{\text{ос}}$ (Б, Г) в 1981-2010 гг. на метеорологических станциях южного Подмосковья
Вертикальные линии соответствуют ± 1 STD, рассчитанному по данным 4-х станций

В табл. 2 представлены коэффициенты детерминации и параметры регрессионных уравнений, описывающих взаимосвязь между основными метеорологическими параметрами на СФМ и метеостанции Коломна за различные временные интервалы в 1973-2016 гг. Взаимообусловленность $T_{\text{возд}}$ на этих станциях была самой слабой в апреле и сентябре, а также в летний и осенний сезоны ($R^2 < 0.90$). Расхождения в количестве осадков были более существенными, особенно в июне, июле и в целом за летний период ($R^2 = 0.30-0.38$). Взаимообусловленность по количеству осадков за год и за зимний период на СФМ и станции Коломна также была невысокой и составляла 54-55%.

Таким образом, при практически одинаковой теплообеспеченности, в регионе южного Подмосковья отмечается существенная разница в количестве осадков, что, безусловно, способствует формированию некоторых различий в локальном климате на ближайших метеостанциях. Мы можем также констатировать, что мезо- и микроклиматические характеристики естественных территорий в пределах одного региона могут быть отличными от таковых, полученных на основе данных метеостанций сети Росгидромета.

Таблица 2. Параметры регрессионных уравнений ($y = ax + b$), описывающих взаимосвязь между метеорологическими параметрами на СФМ и метеостанции Коломна за различные временные интервалы в 1973-2016 гг.

Период	$T_{\text{возд}}$			$\Sigma_{\text{ос}}$		
	a	b	R^{2*}	a	b	R^{2*}
Январь	0.97	-0.25	0.98	0.98	6.5	0.77
Февраль	0.95	-0.02	0.96	0.98	7.1	0.71
Март	0.94	0.31	0.95	1.13	3.2	0.74
Апрель	0.93	0.52	0.86	0.85	10	0.62
Май	0.92	0.26	0.92	0.93	12	0.72
Июнь	0.89	0.86	0.93	0.53	40	0.30
Июль	0.93	0.45	0.97	0.55	44	0.38
Август	0.94	0.37	0.90	0.89	12	0.62
Сентябрь	0.92	0.56	0.88	1.09	2.8	0.85
Октябрь	0.95	0.33	0.93	0.87	13	0.81
Ноябрь	0.97	-0.18	0.91	0.97	6.7	0.81
Декабрь	1.04	0.07	0.98	1.05	4.6	0.61
Зима	0.89	-0.52	0.90	0.87	34	0.55
Весна	0.86	1.93	0.93	1.01	18	0.68
Лето	0.92	0.86	0.86	0.67	91	0.36
Осень	0.99	-1.24	0.86	0.98	21	0.85
Год	0.93	0.06	0.95	0.86	163	0.54

* R^2 значимыми при $P < 0.0001$, ($n = 44$).

Анализ годовых и сезонных трендов $T_{\text{возд}}$, $\Sigma_{\text{ос}}$ и ГТК в регионе южного Подмосковья

Согласно нашим оценкам, в районе СФМ отмечался достоверный рост среднегодовой $T_{\text{возд}}$ со скоростью 0.046 и 0.068°C/год в течение 1973-2016 и 1998-2016 гг., соответственно (рис. 2). Общее повышение температуры за 44 года здесь было существенно выше, чем на территории России в целом и составило 2.02°C. Такой рост среднегодовой температуры воздуха на 64% (или 1.29°C) был обусловлен положительным трендом изменения среднегодовой $T_{\text{возд}}$ за последние 19 лет.

Статистически значимое ($P < 0.05$) увеличение $T_{\text{возд}}$ в районе СФМ за рассматриваемый 44-летний период наблюдалось во все календарные сезоны кроме зимы (рис. 2), но наиболее значительное ее повышение было зарегистрировано летом ($a = +0.06^\circ\text{C}/\text{год}$; $R^2 = 0.33$; $P < 0.0001$). В осенний и весенний периоды рост температуры происходил примерно с одинаковой скоростью: ($a = +0.04^\circ\text{C}/\text{год}$; $R^2 = 0.11-0.13$; $P = 0.02-0.03$). За последние 19 лет выраженность осеннего и весеннего трендов увеличилась более чем в 2 раза, а летний тренд сохранил свою интенсивность на том же уровне (рис. 3). И хотя из-за

высокой вариабельности погодных условий в последние 2 десятилетия, отмеченные тренды были статистически незначимы, современная тенденция более отчетливого потепления климата весной и осенью представляется очевидной. Отсутствие выраженных тенденций изменения температуры в зимний сезон обусловлено сильной изменчивостью погодных условий в это время года за исследуемый временной период (рис. 3).

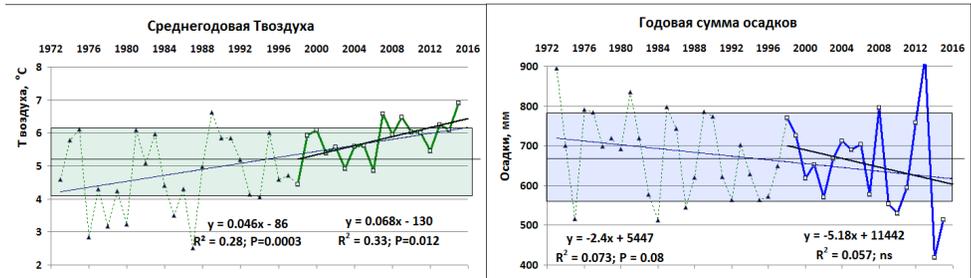


Рисунок 2. Временные тренды среднегодовой $T_{\text{возд}}$ и годовой суммы осадков в 1973-2016 гг. (тонкая линия) и в 1998-2016 гг. (яркая линия)

Выделение цветом ограничивает область, соответствующую ± 1 STD

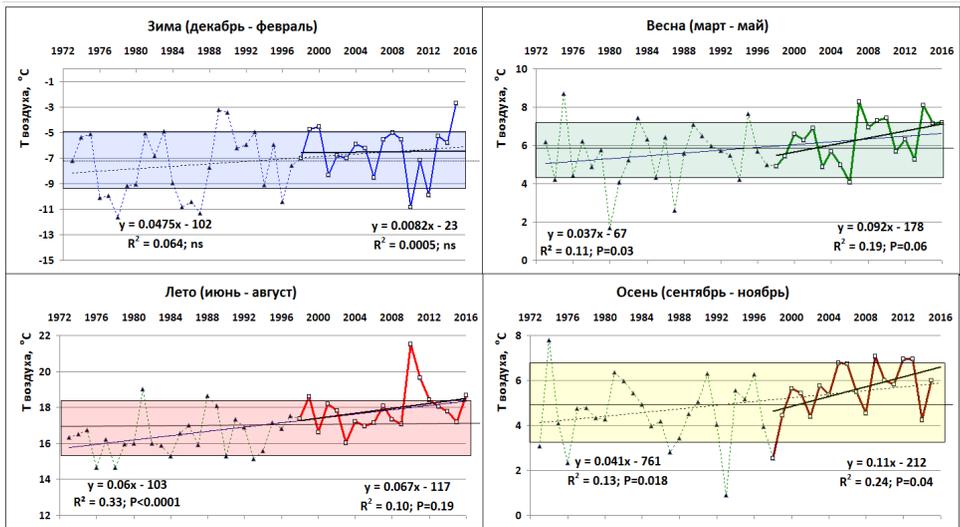


Рисунок 3. Временные тренды среднесезонных $T_{\text{возд}}$ в 1973-2016 гг. (тонкая линия) и в 1998-2016 гг. (яркая линия)

Выделение цветом ограничивает область, соответствующую отклонению от среднего (пунктирная линия), равному ± 1 STD

Аналогичные тенденции изменения годовых и сезонных $T_{\text{возд}}$ были получены на основе данных станции Коломна, а именно: (1) значимый ($P < 0.05$) рост температуры воздуха в течение последних 44 лет во все сезоны, кроме зимнего, со скоростями $0.04\text{-}0.06^\circ\text{C}/\text{год}$; (2) наиболее заметное усиление потепления со скоростью $0.07\text{-}0.12^\circ\text{C}/\text{год}$ в последние 19 лет в весенний и осенний периоды (табл. 3).

Таблица 3. Оценки линейных трендов среднегодовых и среднесезонных значений $T_{\text{возд}}$ в 1973-2016 гг. и в 1998-2016 гг. на метеостанции г. Коломна

Период	1973-2016			1998-2016		
	a	R^2	P	a	R^2	P
$T_{\text{возд}}$						
год	0.05	0.31	<0.0001	0.05	0.11	0.10
зима	0.05	0.07	0.08	-0.02	0.00	ns
весна	0.04	0.11	0.03	0.07	0.11	ns
лето	0.06	0.31	<0.0001	0.04	0.04	ns
осень	0.05	0.18	0.005	0.12	0.23	0.03

Примечание. a - коэффициент линейного тренда $T_{\text{возд}}$, °C/год

На фоне наблюдаемого потепления временные тренды изменения количества осадков на обеих метеостанциях были незначимы при $P < 0.05$ как за годовой период в целом, так и во все календарные сезоны в течение двух рассматриваемых периодов (табл. 4). Направленность этих трендов могла быть как положительной, так и отрицательной, свидетельствуя о высокой межгодовой и внутрисезонной неоднородности выпадения осадков.

Таблица 4. Оценки линейных трендов годовых и сезонных значений $\Sigma_{\text{ос}}$ в 1973-2016 гг. и в 1998-2016 гг. на СФМ и метеостанции г. Коломна

Период	1973-2016			1998-2016		
	a	R^2	P	a	R^2	P
СФМ						
год	-2.40	0.07	0.08	-5.17	0.06	ns
зима	0.57	0.05	ns	-1.10	0.03	ns
весна	0.16	0.00	ns	1.83	0.04	ns
лето	-0.10	0.04	ns	-2.87	0.05	ns
осень	-0.06	0.02	ns	-0.80	0.05	ns
Метеостанция г. Коломна						
год	0.30	0.00	ns	0.16	0.00	ns
зима	0.66	0.08	0.06	-0.39	0.00	ns
весна	0.62	0.05	ns	2.15	0.12	ns
лето	-0.44	0.01	ns	0.85	0.00	ns
осень	0.09	0.00	ns	-0.43	0.00	ns

Примечание. a - коэффициент линейного тренда, характеризующий среднюю скорость изменения $\Sigma_{\text{ос}}$ за год, мм/год

Тем не менее, совместное влияние трендов изменения температуры и количества осадков выразилось в наблюдаемом и значимом ($P = 0.027$) усилении засушливости климата в районе СФМ (рис. 4А), которая отмечалась нами и прежде (Курганова и др., 2011б; 2016). Особенно заметной аридизация кли-

мата была в последние 19 лет, в течение которых мы наблюдали 8 засух различной интенсивности – от слабых и средних (2001, 2009 и 2014 гг.) до сильных и экстремальных в 2002, 2007, 2010, 2011 и 2015 гг. с ГТК <1.0 (рис. 5). Другими словами, каждый 2-3 год в регионе исследований был в той или иной степени засушливыми.

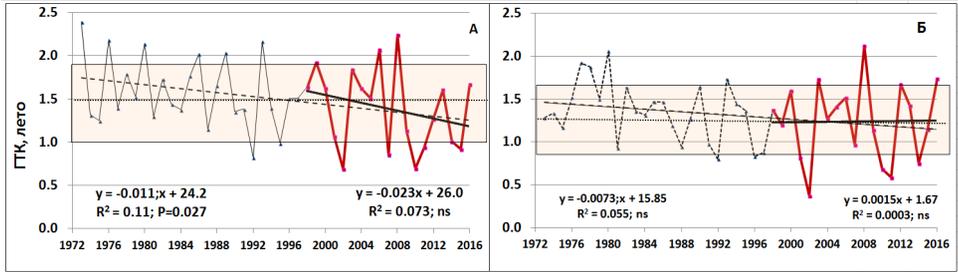


Рисунок 4. Временные тренды летнего ГТК в 1973-2016 гг. (тонкая линия) и в 1998-2016 гг. (яркая линия) на СФМ (А) и на метеостанции г. Коломна (Б)

Выделение цветом ограничивает область, соответствующую отклонению от среднего (пунктирная линия), равного ± 1 STD

Несмотря на близкое расположение метеостанций, в районе г. Коломны тренд усиления засушливости был незначим в 1973-2016 гг. и полностью отсутствовал в последние 19 лет (рис. 4 Б). За этот период здесь зафиксировано всего 4 засухи против 8 в районе СФМ в ПТБЗ. Таким образом, проявление засух отличается высокой степенью локальности, главным образом из-за неравномерности выпадения летних осадков, о которой упоминалось выше.

Современные тенденции изменения продолжительности и высоты снежного покрова на СФМ

Достоверный рост $T_{\text{возд}}$ в осенний период (рис. 3) и наметившаяся тенденция уменьшения $\sum_{\text{ос}}$ в 1998-2016 гг. (табл. 4) привели к значимому сокращению периода стабильного снежного покрова (рис. 5 А) и уменьшению его максимальной высоты (рис. 5 Б) в районе СФМ.

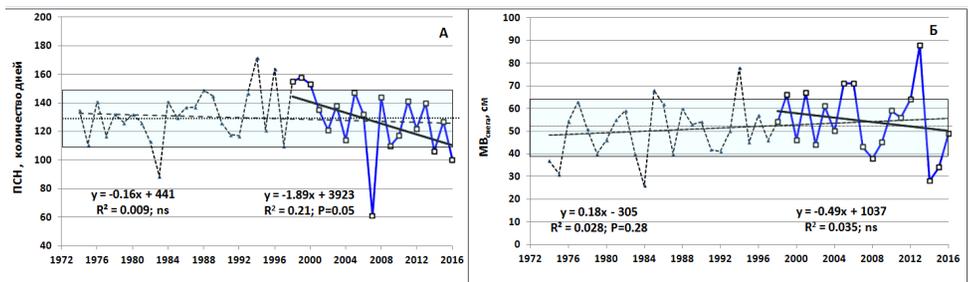


Рисунок 5. Временные тренды продолжительности (ПСП; А) и максимальной высоты снежного покрова ($MB_{\text{снега}}$; Б) в 1973-2016 гг. (тонкая линия) и в 1998-2016 гг. (яркая линия)

Выделение цветом ограничивает область, соответствующую отклонению от среднего (пунктирная линия), равного ± 1 STD

Наши расчеты показали, что за последние 19 лет продолжительность снежного периода сократилась более чем на месяц (36 дней), что хорошо согласуется с данными дистанционного зондирования вегетационного индекса (NDVI, MODIS), которые свидетельствуют о существенном увеличении продолжительности вегетационного периода за счет более позднего установления снежного покрова осенью и более раннего схода весной (Курганова и др., 2016). Так, согласно нашим оценкам, длительность периода вегетации, оцененная с помощью NDVI в многолетней динамике (2000-2015 гг.), показывает отчетливую тенденцию увеличения продолжительности вегетационного сезона со средней скоростью 26 дней за 10 лет ($P=0.02-0.04$) в лесных ценозах и 27-33 дня за 10 лет ($P=0.001-0.004$) - в луговых.

Максимальная высота снега в соответствии с проведенными расчетами за последние 19 лет уменьшилась на 17 см. Наблюдаемое сегодня потепление зим выражается в частых нарушениях сезонного снежного покрова из-за увеличения доли дождевых осадков, образовании ледяных корок на поверхности почв и более глубоком промерзании почв (Kurganova et al., 2017). Эти явления могут оказывать существенное влияние на корневые системы растений и эмиссию углекислого газа из почв. Как показали наши исследования, зимнее потепление ведет также к существенному охлаждению почв и увеличению числа циклов промерзания-оттаивания (Kurganova et al., 2017). Потепление зим, проявляющееся в последние десятилетия в более позднем установлении снежного покрова, сокращении его высоты и регулярном нарушении его целостности наблюдается также и в северных регионах Европы, в США и Канаде (Henry, 2008; Jylha et al., 2008; Kreyling, Henry, 2011; Groffman et al., 2012). Уменьшение высоты снежного покрова в бореальной и суббореальной зонах вызывает снижение изолирующего действия снежного покрова, ведет к значительному охлаждению почв и их более глубокому и длительному промерзанию (Hardy et al., 2001; Bokhorst et al., 2012). Таким образом, современные тенденции изменения зимнего климата могут оказывать существенное влияние на функционирование как почвенного, так и растительного покрова.

Оценка повторяемости климатических аномалий в регионе исследований

Результаты наших расчетов показали, что после 1994 г. происходит смена знака суммы аномалий с отрицательного на положительный как для среднегодовых, так и для среднесезонных $T_{\text{возд}}$ (рис. 6 А). Как правило, сумма аномалий была самой высокой в последний 11-летний период (2006-2016 гг.) по сравнению с другими анализируемыми интервалами. Сумма аномалий, рассчитанных для $\sum_{\text{ос}}$, показывает отчетливое и однонаправленное изменение знака с положительного на отрицательный для годового, летнего и осеннего периодов (рис. 6 Б). Для весеннего и зимнего сезонов такая однонаправленная тенденция изменения суммы аномалий не выдерживается.

Возрастание вероятности аномальных и экстремальных погодных явлений считается одним из негативных проявлений современных климатических изменений (Второй оценочный доклад..., 2014). Численной оценкой аномаль-

ности климата может служить количество лет, когда значения анализируемых метеорологических параметров отклоняются от средних значений в отрицательную или положительную область более чем на 1 величину среднеквадратического отклонения (STD). Это наглядно продемонстрировано на рис. 2-5, где выделение цветом ограничивает область, соответствующую отклонению от среднего (пунктирная линия), равного ± 1 STD. И хотя для анализа температурных экстремумов часто используют 5-й и 95-й процентиль (Коваленко и др., 2017), для выявления засух применяют и другой подход, сравнивая отрицательные аномалии ГТК с величиной STD (Черенкова, Золотокрылин, 2006).

Используя величину STD для выявления аномальных периодов для всех анализируемых метеорологических параметров, мы просуммировали количество аномально влажных и сухих, теплых и холодных лет и календарных сезонов, а также холодных периодов с аномально малой продолжительностью и низкой высотой снежного покрова. Расчеты проводились последовательно для четырех 11-летних циклов, которые затем объединялись в два 22-летних цикла (рис. 6-8).

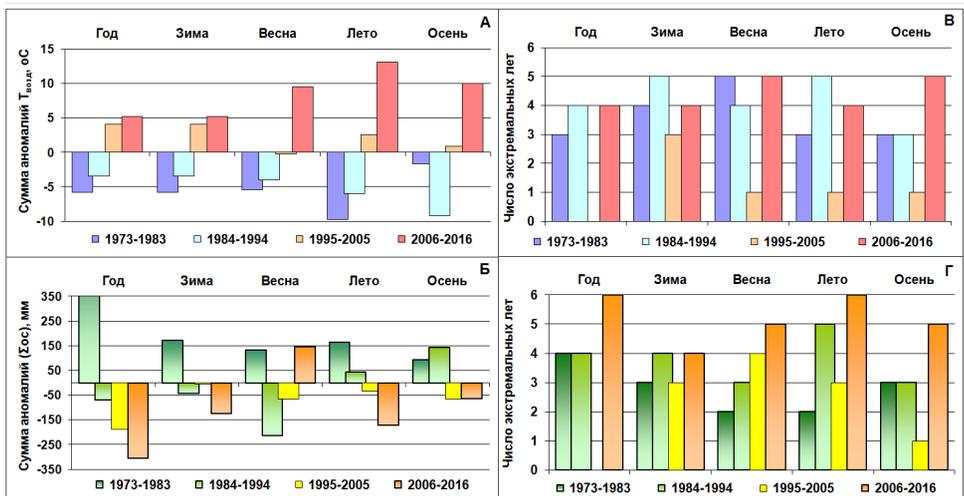


Рисунок 6. Сумма аномалий среднегодовых и средне-сезонных $T_{\text{возд}}$ (А), $\Sigma_{\text{ос}}$ (Б) и количество соответствующих этим параметрам аномальных лет (В, Г) за 4 последовательных 11-летних цикла в 1973-2016 гг.

Была найдено, что во все календарные сезоны и за год в целом число периодов с аномальными температурами варьировало во все 11-летние временные промежутки от 3 до 5 за исключением 1995-2005 гг., когда их количество изменялось от 0 до 3 (рис. 6 В). А вот повторяемость аномальных лет по годовой $\Sigma_{\text{ос}}$ была самой высокой в последний 11-летний цикл (2006-2016 гг.), варьируя в зависимости от сезона между 4 и 6, в то время как в остальные периоды число аномальных по $\Sigma_{\text{ос}}$ лет изменялось от 2 до 4. Объединяя попарно 11-летние циклы, мы нашли, что повторяемость периодов с аномальными температурами во все сезоны за исключением осеннего была выше в 1973-1994 гг., в то время как по $\Sigma_{\text{ос}}$ более аномальными выдались весенний и летний сезоны второй половины изучаемого периода – 1995-2016 гг. (рис. 7).

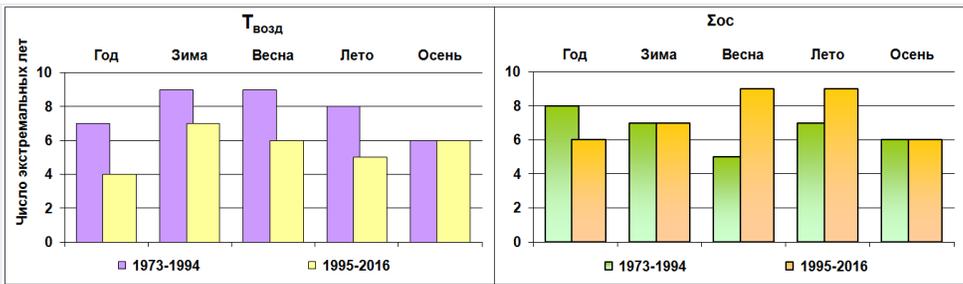


Рисунок 7. Количество экстремальных лет, соответствующих среднегодовой и среднесезонным $T_{\text{возд}}$ и $\Sigma_{\text{ос}}$ за два последовательных 22-летних цикла в 1973-2016 гг.

По величине летнего ГТК и $MV_{\text{снега}}$ максимальное количество аномальных лет приходилось на последнюю 11-летку (2006-2016 гг.) и составило 7 и 6 лет, соответственно (рис. 8). Однако, расчеты, проведенные для 22-летних циклов, показали, что по ПСП и летнему ГТК более аномальным являлся период между 1995 и 2016 гг. (7 и 9 событий, соответственно), в то время как $MV_{\text{снега}}$ чаще отклонялась от нормы в первые 22 года наблюдений (рис. 8).

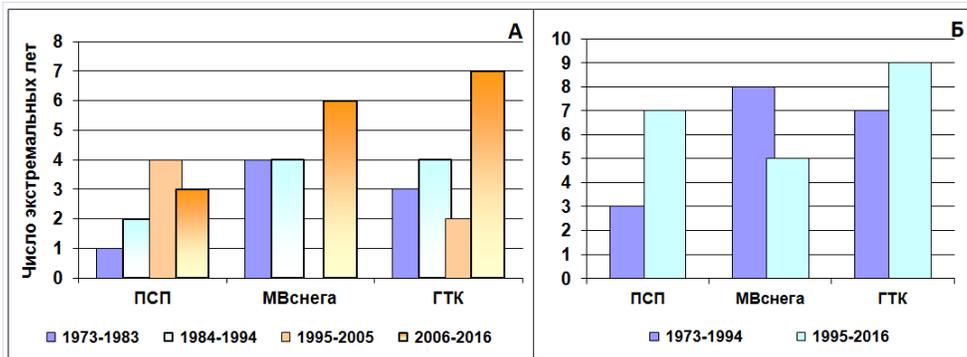


Рисунок 8. Количество аномальных лет, соответствующих величине ГТК, продолжительности (ПСН) и максимальной высоте ($MV_{\text{снега}}$) снежного покрова, за четыре 11-летних (А) и два 22-летних последовательных цикла в 1973-2016 гг. (Б)

И хотя за 44-летний период наблюдений нам не удалось выявить отчетливой тенденции увеличения аномальности климата по всем анализируемым показателям, мы заключаем, что в последний 11-летний период проявлялось отчетливое увеличение повторяемости числа аномальных лет по величине летнего ГТК, главным образом за счет более засушливых лет (рис. 4), и по $\Sigma_{\text{ос}}$ во все сезоны года кроме зимнего, как за счет более влажных, так и за счет более сухих лет.

Заключение

Выполненные в рамках настоящего исследования расчеты показали, что потепление в Московском регионе было более значительным, чем на территории России в целом и ее Европейской части, а его скорость после 1975 г. была существенно выше, чем в среднем за столетие. В регионе южного Подмоско-

вья при практически равномерной теплообеспеченности, отмечалась существенная разница в количестве осадков, поступающих на поверхность как в течение года, так и в различные календарные сезоны. Таким образом, именно пространственная неравномерность распределения осадков по территории способствует формированию различий в локальном климате на ближайших метеостанциях. Мы показали также, что в пределах одного региона многие климатические характеристики естественных территорий (СФМ) могут быть отличными от тех, что получены на основе данных метеостанций, относящихся к сети Росгидромета.

Наряду с однонаправленным увеличением среднегодовой и среднесезонных температур воздуха в регионе расположения СФМ в 1973-2016 гг. было зафиксировано значимое усиление засушливости летнего периода. В последние 19 лет наблюдений (1973-2016 гг.) наряду с более выраженным усилением засушливости летнего периода отмечается потепление зимнего сезона, проявляющееся в уменьшении продолжительности и максимальной высоты снежного покрова, которое в свою очередь может привести к охлаждению почв и увеличению числа циклов промерзания-оттаивания. Отчетливой тенденции увеличения аномальности климата по всем анализируемым показателям в регионе исследований выявлено не было.

Анализ локальных трендов изменения климата и их сравнение с общими тенденциями в регионе позволил продемонстрировать несомненные различия во влагообеспеченности и степени засушливости на территории Южного Подмосковья.

Благодарности

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (проект № 15-04-05157а) и Программы Президиума РАН № 15.

Список литературы

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Общее резюме. 2014. – Москва, Росгидромет, 60 с.

Гулёв С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н. 2008. Глобальное потепление климата продолжается. – Вестник Российской академии наук, т. 78, № 1, с. 20-27.

Зеленская Н.Н. 2016. Изменение функциональных параметров северного изолированного фрагмента степей при потеплении климата. – Научные ведомости Бел. ГУ, сер. Естественные науки, № 25 (246), вып. 376, с. 5-13.

Зеленская Н.Н. 2017. Отклик целостной экосистемы на потепление климата. – Теоретическая и прикладная экология, № 2, с. 44-49.

Зеленская Н.Н., Керженцев А.С., Аблеева В.А., Терешонок Н.А. 2015. Динамика продуктивности лугово-степных фитоценозов в урочище Долы. – В сб.: Труды Приокско-Террасного заповедника. – Тула, из-во Аквариус, вып. 6, с. 89-97.

Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. 2006. Изменение индикаторов соотношения тепла и влаги, продуктивности в зональных равнинных ландшафтах России во второй половине XX века. – Изв. РАН, сер геогр., № 3, с. 19-28.

Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Черенкова Е.А. 2007. Динамика засух в европейской России в ситуации глобального потепления. – Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – СПб., Гидрометеоиздат, т. XXI, с. 160-182.

Коваленко О.Ю., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н. 2017. Изменения характеристик экстремальности температуры воздуха в Причерноморском регионе и их изменчивость в связи с крупномасштабными климатическими процессами межгодового масштаба. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 2, с. 42-62.

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Розанова Л.Н., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Кудеяров В.Н. 2007. Многолетний мониторинг эмиссии CO₂ из дерново-подзолистой почвы: анализ влияния гидротермических условий и землепользования. – Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXI. – СПб., Гидрометеоиздат, с. 23-44.

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Кудеяров В.Н. 2011а. Эмиссия CO₂ из почв различных экосистем южно-таежной зоны: анализ данных непрерывных 12-летних круглогодичных наблюдений. – Доклады НАН, т. 436, № 6, с. 843-846.

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Петров А.С., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Аблеева В.А., Кудеяров В.Н. 2011б. Влияние наблюдаемых климатических изменений и экстремальных погодных явлений на эмиссионную составляющую углеродного цикла в различных экосистемах южно-таежной зоны. – Доклады РАН, т. 441, № 6, с. 845-849.

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Савин И.Ю., Шорохова Е.В. 2016. Баланс углерода в лесных экосистемах южного Подмосковья в условиях усиления засушливости климата. – Лесоведение, № 5, с. 332-345.

Оценочный доклад об изменениях климата (техническое резюме). 2008. – М., Росгидромет, 89 с.

Розгачева И.К. 2012. К проблеме прогноза изменений климата Земли. – Климат и природа, № 1, с. 3-9.

Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н. 2016. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 2, с. 79-94.

Черенкова Е.А. 2017. Опасная атмосферная засуха на европейской части России в условиях современного летнего потепления. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 2, с. 132-143

Bokhorst S., Phoenix G.K., Bjerke J.W., Callaghan T.V., Huyer-Brugman F., Berg M.P. 2012. Extreme winter warming events more negatively impact small rather than large soil fauna: shift in community composition explained by traits not taxa. – *Global Change Biol.*, vol. 18, pp. 1152-1162.

Groffman P.M., Rustad L., Templer P.H., Campbell J.L., Christenson L.M., et al. 2012. Long-term integrated studies show complex and surprising effects of climate change in the northern hardwood forest. – *BioScience*, vol. 62, pp. 1056-1066.

Hardy J.P., Groffman P.M., Fitzhugh R.D., Henry K.S., Welman T.A., Demers J.D., Fahey T.J., Driscoll C.T., Tierney G.L., Nolan S. 2001. Snow depth manipulation and its influence on soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest. – *Biogeochemistry*, vol. 56(2), pp. 151-174.

Henry H.A.L. 2008. Climate change and soil freezing dynamics: historical trends and projected changes. – *Climatic Change*, vol. 87, pp. 421-434.

IPCC 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.

IPCC 2015. *IPCC fifth assessment report: climate change 2014.* – Geneva, Switzerland, 151 p.

IPCC. 2007. *IPCC fourth assessment report: climate change 2007.* – Geneva, Switzerland. 104 p.

Jylha K., Fronzek S., Tuomenvirta H., Carter T.R., Ruosteenoja K. 2008. Changes in frost, snow and Baltic sea ice by the end of the twenty-first century based on climate model projections for Europe. – *Climatic Change*, 86, pp. 441-462.

Kreyling J., Henry H.A.L. 2011. Vanishing winters in Germany: soil frost dynamics and snow cover trends, and ecological implications. – *Clim Res.*, vol. 46, pp. 269-276.

Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Khoroshaev D., Blagodatskaya E. 2017. Effect of snowpack pattern on cold-season CO₂ efflux from soils under temperate continental climate. – *Geoderma*, vol. 304, pp. 28–39.

Peters G.P., Minx J.C., Weber C.L., Edenhofer O. 2011. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. – *Proceedings of the National Academy of Sciences*, No. 108 (21), pp. 8903-8908.