

ВЛИЯНИЕ ПОЗДНИХ ВЕСЕННИХ ЗАМОРОЗКОВ НА ПЛОДОНОШЕНИЕ КЕДРА СИБИРСКОГО (*PINUS SIBIRICA* DU TOUR) В ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ КЛИМАТЕ

С.Н. Велисевич, А.В. Попов[✉], М.А. Мельник, С.Н. Горошкевич

ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН), Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, д. 10/3

tomskceltic@gmail.com

Рассмотрена динамика плодоношения кедра сибирского за период с 1990 по 2023 гг. для установления влияния погодных условий весной в год опыления на последующий урожай. Установлено, что за последние два десятилетия среднееголетний уровень количества созревших шишек снизился почти на четверть от уровня, характерного для стабильного климата и характерное для прежнего климата чередование высоких и низких урожаев сменилось чередованием средних и низких. Высказано предположение, что одной из причин появления негативного тренда в динамике плодоношения являются поздние весенние заморозки, которые, несмотря на потепление климата, остались в прежних временных рамках. Количество зрелых шишек в кроне во многом зависело от весенней погоды в год опыления и отрицательно коррелировало с суммой активных температур выше +5 °С, накопленной до наступления поздних весенних заморозков. Величина этого показателя, в свою очередь, определялась температурой апреля. В годы, когда поздние весенние заморозки случались при небольшой сумме активных температур (менее 100 градусов), урожай шишек был большим. Напротив, когда перед заморозками накапливалось 300 градусов и более, урожай шишек был минимальным. Также отмечены изменения в сроках наступления последних весенне-летних заморозков, в среднем наблюдается тенденция сдвига сроков последних заморозков к более поздним датам. Предполагается, что при дальнейшем потеплении климата начало весеннего развития репродуктивных структур будет происходить в более ранние сроки, поэтому репродуктивные структуры будут сильнее повреждаться поздними весенними заморозками, поскольку последние остаются в прежних временных рамках. Обильные урожаи у кедра сибирского смогут формироваться лишь в отдельные годы с поздней весной и/или при отсутствии поздних весенних заморозков.

Ключевые слова: кедр сибирский, *Pinus sibirica* Du Tour, плодоношение, климат, весенние заморозки

Ссылка для цитирования: Велисевич С.Н., Попов А.В., Мельник М.А., Горошкевич С.Н. Влияние поздних весенних заморозков на плодоношение кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в изменяющемся климате // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 5. С. 138–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-138-152

Погодные факторы считаются важнейшими регуляторами плодоношения лесных древесных видов [1]. В настоящее время повсеместно отмечается изменение характера плодоношения вследствие потепления климата [2, 3]. В связи с этим осуществляются попытки прогноза будущих урожаев на основе анализа средних значений температуры воздуха и количества осадков за год, сезон или месяц [4]. При этом следует учитывать, что различные факторы действуют на разных пространственных и временных уровнях, поэтому доля их влияния существенно зависит от климатических условий и конкретного вида. В отдельных случаях реальную прогностическую ценность имеет анализ краткосрочных погодных явлений, действующих на протяжении определенных критических периодов развития репродуктивных структур [5, 6]. В частности, наиболее чувствительным этапом генеративного морфогенеза, как показано на примере различ-

ных видов хвойных, является весенний сезон, предшествующий цветению, когда происходят дифференциация репродуктивных структур и мейоз [7–12]. В этот период даже низкие положительные температуры воздуха могут вызвать нарушения морфогенеза генеративных органов [7].

Весенние заморозки, как и прочие случайные погодные аномалии, трудно поддаются прогнозу, и по этой причине их сложно учитывать при построении климатических моделей [13]. Тем не менее современные заморозки чаще обсуждают в мировой литературе, поскольку влекут за собой значительный экологический и экономический ущерб. Например, «ложная весна» («false spring») в марте и последовавшие за ней весенние заморозки в апреле 2007 г. вызвали гибель урожая плодовых культур на востоке США [14]. К тому же теплая погода в апреле 2017 г. [15] и апреле 2021 г. [16] обусловила раннее наступление весны, которая сменилась заморозками, повлекшими за собой гибель будущего урожая в садах и виноградниках многих стран Европы.



Рис. 1. Макростробилы кедр сибирского во время опыления, поврежденные возвратными заморозками: *а* — за два дня до заморозков; *б* — спустя два дня после заморозков; *в* — спустя шесть дней после заморозков; *г* — спустя десять дней после заморозков

Fig. 1. Macrostrombiles of Siberian stone during pollination damaged by return frosts: *a* — two days before frost; *б* — two days after frost; *в* — six days after frost; *г* — ten days after frost

Такие случаи вряд ли можно напрямую объяснить глобальными климатическими изменениями. Однако появляются доказательства, что они сопровождаются расширением диапазона колебаний температуры воздуха, способствующим увеличению частоты погодных аномалий [17], в том числе поздним весенним заморозкам [16, 18]. Мягкая зима и теплая ранняя весна, ожидаемые на фоне потепления климата, будут способствовать преждевременному весеннему развитию растений и увеличат риск их повреждения заморозками [14], что подтверждают многочисленные исследования. Кроме того, несмотря на увеличение длительности безморозного периода, риск заморозков в период вегетации растений по-прежнему сохраняется [13, 19–22].

Изучаемый нами кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour) является хозяйственно важным орехоплодным видом. От урожая, его плодов, их количества и качества зависит не только успех его

собственного возобновления, но и возможность коммерческой заготовки семян. У кедр сибирского ярко выраженный неравномерный (без правильной периодичности) характер плодоношения, поскольку его репродуктивная система основана на взаимодействии с животными-консументами [23].

Суть этого взаимодействия заключается в том, что в неурожайные годы снижается численность животных — потребителей семян, в то время как в урожайные годы семян достаточно не только для животных, но и для возобновления самого кедр. В предшествующий климатический период (до начала потепления) высокие урожаи формировались два-три раза за десятилетие, в остальные годы они были средними или низкими [9, 24–26]. В настоящее время исчезли пиковые урожаи, что предположительно связано с изменениями климата [27]. Мы предполагаем, что основной причиной появления негативных тенденций могут быть поздние весенние заморозки,

нарушающие естественный ход генеративного морфогенеза.

Известно, что в климатических условиях Западной Сибири наиболее чувствительный период в развитии репродуктивных структур кедра сибирского приходится на конец мая — начало июня в год опыления (рис. 1), когда происходят дифференциация женского и мужского гаметофита и мейоз [9, 24, 28].

Именно в это время циркуляция атмосферного воздуха на юге региона характеризуется повышенной неустойчивостью [29] и высокой вероятностью возникновения погодных экстремумов, в частности поздних весенних заморозков [21, 22, 30, 31].

Цель работы

Цель работы — сопряженный анализ многолетней динамики плодоношения кедра сибирского в связи с погодными условиями весной в год опыления.

Материалы и методы

Исследования проводились на юге Западной Сибири, в междуречье р. Обь и р. Томь, в 22 км к северо-востоку от г. Томска. Этот район относится к южной окраине равнинной части ареала кедра сибирского. Климат здесь умеренно континентальный со средней годовой температурой воздуха $+1,16$ °C и среднегодовым количеством осадков 577 мм, согласно данным метеостанции г. Томска за последние 30 лет. В 1990 г. на первой надпойменной террасе р. Порос (левый приток р. Томь) заложена постоянная пробная площадь в припоселковом кедровнике мелкотравном (9К1Е+П), III класс бонитета, полнота 0,7. На момент исследования средний возраст деревьев кедра составил 180...220 лет, высота 24 м, диаметр ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли 64 см. Ежегодно с 1990 по 2023 г. учитывали урожай шишек в среднем с 37 деревьев (в разные годы 20...45). Количество шишек определяли в конце августа, сразу же после их созревания. Для этого с кроны на землю вручную отряхивались все шишки, затем проводился их подсчет. Для анализа связи между плодоношением и погодными условиями использовали показатель числа зрелых шишек на дерево.

Данные о погоде были получены с метеостанции в г. Томске, принадлежащей Федеральной службе по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) и расположенной в 20 км к востоку от исследуемой пробной площади. Проанализированы следующие метеорологические параметры:

– средняя температура воздуха вегетационного периода (с апреля по сентябрь);

– средняя температура воздуха в апреле;
– средняя температура воздуха в мае;
– дата последнего весеннего заморозка;
– температура последнего весеннего заморозка;

– сумма активных температур (САТ), представленная суммой средних суточных температур воздуха, превышающих порог $+5$ °C перед последним весенним заморозком от $-0,1$ °C;

– среднее за весь исследуемый период число дней с весенне-летними заморозками;

– среднедекадное число дней с весенне-летними заморозками;

– вероятность возникновения заморозка по декадам вегетационного периода, рассчитанная как отношение числа лет, в которые заморозок наблюдался в заданную декаду, к общему числу лет наблюдений.

Заморозком принято считать кратковременное понижение температуры воздуха или поверхности почвы до 0 °C и ниже, наблюдаемое в вегетационный период на фоне положительных средних суточных температур воздуха [32]. В данной работе заморозком считалось понижение температуры воздуха до отрицательных значений после того, как среднесуточная температура хотя бы один раз превысила $+5$ °C, т. е., когда потенциально возможен рост растений и когда заморозки могут негативно повлиять на этот процесс.

Результаты и обсуждение

Температура воздуха за вегетационный период (апрель — сентябрь) увеличилась в среднем на $0,4$ °C — с $+12,1$ °C в 1990–2005 гг. до $+12,5$ °C в 2006–2023 гг. В весенние месяцы более существенный прирост тепла наблюдался в апреле (рис. 2). Если в первой половине периода наблюдений температура воздуха в апреле в среднем составила $+1,5$ °C, то во второй — увеличилась до $+3,6$ °C. Для температуры воздуха в мае средние значения этих показателей составили $+11,5$ и $+10,0$ °C соответственно. Наблюдаемые положительные тенденции изменения температуры воздуха в мае во второй половине периода наблюдений обусловлены аномально теплой погодой в 2020 и 2022 гг. Если исключить из рассмотрения эти два года, многолетние тенденции температуры воздуха в мае будут практически нулевыми. Обращает на себя внимание и разная амплитуда изменчивости температуры воздуха в эти два месяца. В мае размах колебаний между минимальным и максимальным значением составил 7,9 градусов в первой половине периода наблюдений и 8,7 — во второй. В апреле эти значения были выше — 9,4 и 11,6 градуса соответственно. Таким образом, особые погодные

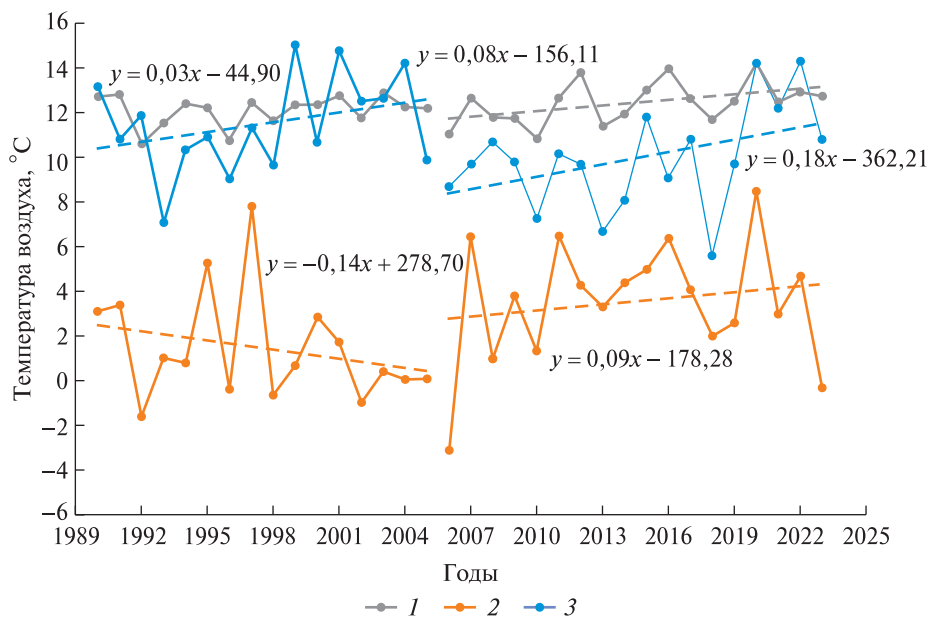


Рис. 2. Изменение средней температуры воздуха вегетационного периода, средней температуры воздуха в апреле и мае за периоды 1990–2005 гг. и 2006–2023 гг. (штриховой линией показана линия тренда признака): 1 — средняя температура воздуха вегетационного периода; 2 — средняя температура воздуха в апреле; 3 — средняя температура воздуха в мае

Fig. 2. Change in mean growing season air temperature, mean monthly April and May air temperature for the periods 1990–2005 and 2006–2023 (the dashed line shows the trend line of the feature): 1 — average air temperature during the growing season; 2 — average air temperature in April; 3 — average air temperature in May)

изменения в мае, которые могли бы повлиять на характер плодоношения кедра сибирского, не наблюдаются. Напротив, в апреле характер тенденций изменения температуры воздуха с отрицательного перешел на положительный и существенно возросла ее амплитуда.

Анализ сроков наступления весенних заморозков и их продолжительности показал, что в среднем за 34 года наблюдений основная угроза заморозков приходится на две первые декады мая (рис. 3). К концу мая риск их возникновения постепенно снижается. Заморозки в начале мая продолжительнее — в среднем от 1...3 сут. Заморозки в конце мая и начале июня весьма кратковременны и длятся всего несколько часов. Анализ частоты возникновения заморозков для двух временных периодов с 1990 по 2005 гг. и с 2006 по 2023 гг. показал их различное распределение по декадам мая и июня. Несмотря на то что среднее число дней с заморозками в первый период наблюдений составило 6,6 сут., а во второй — сократилось до 5,0 сут., вероятность их возникновения в третьей декаде мая возросла с 17,7 до 27,8 %, а в первой декаде июня — с 6 до 11 %. Это свидетельствует об опасности возникновения поздних весенне-летних заморозков на исследуемой территории.

Анализ динамики сроков наступления последних весенне-летних заморозков за 34 года показал их существенную изменчивость по годам. Кроме

того, в среднем отмечается тенденция сдвига сроков последних заморозков к более поздним датам (рис. 4). Если за первый период наблюдений не было ни одного случая заморозков после 30 мая, то во второй половине периода наблюдений таких случаев было четыре (2007, 2014, 2019 и 2022 гг.). В первой половине анализируемого периода заморозки случались примерно 13 мая, во второй — они сдвинулись на 19 мая, хотя в отдельные годы сроки могут различаться до 1,5 мес. Например, в 2020 г. последние заморозки были 15 апреля, после чего установилась теплая погода с положительными значениями температуры воздуха. В 2022 г. весна была довольно теплой, но 6 июня случились заморозки, и несмотря на то что температура снизилась всего до -1°C на несколько часов, будущий урожай шишек практически полностью погиб. Что касается температуры воздуха при заморозках, то можно констатировать, что за период наблюдений она существенно не изменилась: в первой половине анализируемого периода она составила $-1,9$, во второй $-1,6^{\circ}\text{C}$, т. е. диапазон ее изменчивости во второй половине анализируемого периода несколько сузился.

Для выявления связи между урожаем шишек и поздними весенне-летними заморозками были рассмотрены показатели, используемые при определении величины возможного риска, наносимого заморозками различным культурам, такие

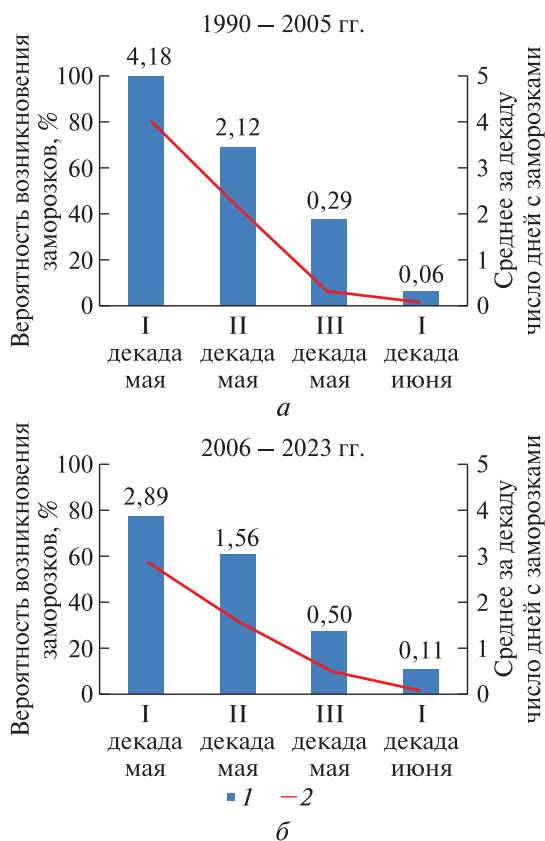


Рис. 3. Распределение вероятности возникновения весенне-летних заморозков по декадам месяца для двух временных периодов (а) 1990–2005 гг. и (б) 2006–2023 гг.: 1 — вероятность возникновения заморозков; 2 — среднее за декаду число суток с заморозками

Fig. 3. Distribution of the probability of occurrence of spring-summer frosts by decade of the month for two time periods (a) 1990–2005 and (b) 2006–2023: 1 — probability of frost occurrence; 2 — average number of days with frosts per decade

как сумма активных температур $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, сумма эффективных температур $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура воздуха при заморозках, дата заморозков, и пр. Наилучшая корреляционная зависимость наблюдалась между динамикой САТ $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, накопленной на дату позднего заморозка и урожаем шишек в следующем году ($r = -0,65$, достоверно при $p \leq 0,05$). На рис. 5 представлена обратная зависимость между этими признаками. В годы, когда последние заморозки случались при небольшом значении САТ, урожай шишек был высоким. Например, заморозки при $-4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 16 мая 1998 г. никак не повлияли на последующий высокий (666 шт./с одного дерева) урожай шишек в 1999 г., поскольку накопленная САТ была небольшой (98 градусов). Заморозки при $-3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 мая 2002 г. (при САТ 34 градуса), также не оказали влияния на высокий урожай (634 шт./с одного дерева) в 2003 г. Заморозки при $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 7 мая 2006 г. (при САТ 11 градуса) не повлияли на урожай (637 шт./с одного дерева) в 2007 г.

Рекордный за период наблюдений урожай 1993 г. — 740 шишек с одного дерева сформировался также благодаря отсутствию в 1992 г. заморозков начиная с 5 мая, хотя апрель был холодный и к дате последних заморозков САТ составила 0 градусов.

Напротив, в годы, когда к дате последних заморозков накапливалась высокая САТ, урожай шишек был минимальным. Например, даже небольшие заморозки ($-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), случившиеся 28 мая 2003 г., погубили почти весь урожай шишек в 2004 г. (урожай составил 28 шт./с одного дерева), поскольку накопленная САТ составила 372 градуса.

Заморозки при $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 31 мая 2007 г. (при САТ 435 градусов), также привели к потерям урожая в 2008 г. (урожай составил 30 шт./с одного дерева). Поздние и совсем незначительные ($-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) заморозки 3 июня 2014 г. полностью погубили урожай 2015 г., заморозки при $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 6 июня 2022 г. (при рекордной САТ в 595 градусов) также привели к неурожаю в 2023 г.

Тенденции динамики урожая шишек и САТ зеркально противоположны (рис. 6), причем отрицательная связь между этими признаками усилилась в течение периода наблюдений: с $r = -0,551$ в первой половине до $r = -0,771$ во второй (оба коэффициента достоверны при $p \leq 0,05$). В первой половине анализируемого периода среднемноголетний уровень количества шишек на одно дерево составил 353 шт. (см. рис. 6, а). Во второй половине он существенно снизился и составил 259 шт. Явно изменился и сам характер цикличности урожаев. Если до 2005 г. довольно высокие урожаи (более 500 шишек с одного дерева) отмечались 6 раз, то начиная с 2006 г. их было всего три, причем последний был пять лет тому назад — в 2019 г. Число нулевых или почти нулевых урожаев при этом осталось примерно на том же уровне. В первой половине анализируемого периода средние урожаи были редко, в основном чередовались высокие и низкие. Во второй половине наблюдалось чередование средних и низких урожаев.

Противоположная тенденция наблюдается в динамике накопления САТ накануне последних весенних заморозков (см. рис 6, б). В первой половине анализируемого периода заморозки в среднем случались при достижении среднемноголетнего уровня 150 градусов, во второй — при 244 градусах, причем диапазон колебаний расширился. Различия почти на 100 градусов говорят о том, что в последние два десятилетия погодные условия существенно изменились, обуславливая развитие репродуктивных структур накануне цветения и опыления.

Как следует из рис. 5, все хорошие урожаи сформировались в условиях, когда САТ, накопленных

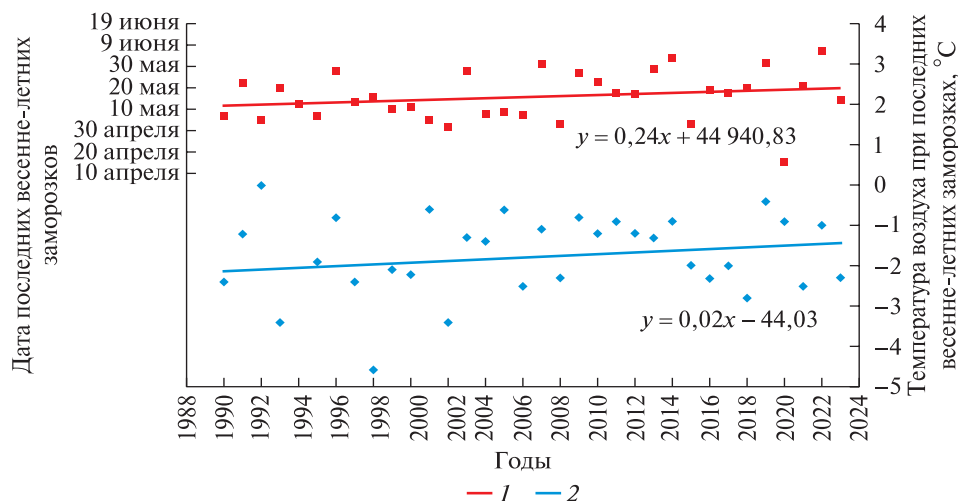


Рис. 4. Даты наступления последних весенне-летних заморозков и значения температуры воздуха за период наблюдения (1990–2023 гг.): 1 — линия тренда даты последних весенне-летних заморозков; 2 — линия тренда температуры воздуха последних весенне-летних заморозков

Fig. 4. Dates of the last spring-summer frosts and air temperature values during the observation period (1990–2023): 1 — trend line for the date of the last spring-summer frosts; 2 — trend line of air temperature of the last spring-summer frosts

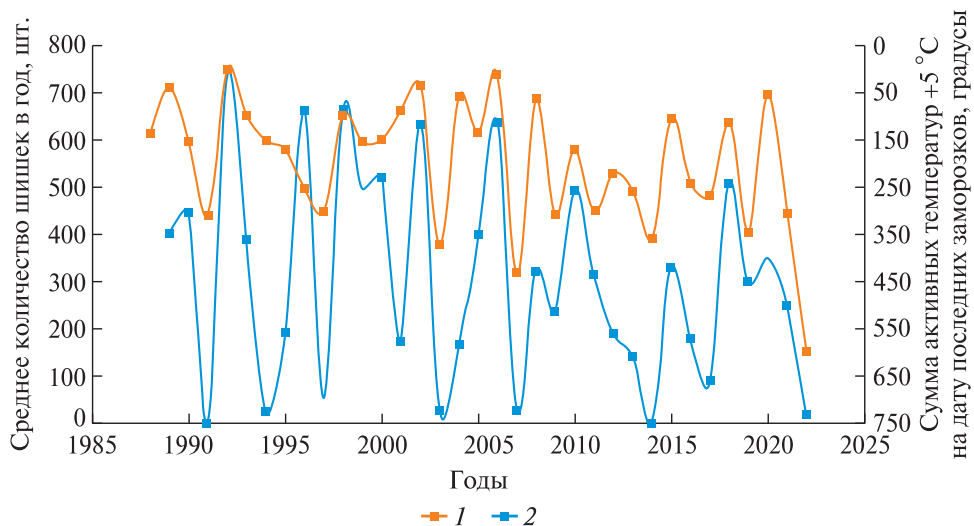


Рис. 5. Обратная зависимость урожая шишек и динамики суммы активных температур выше +5 °С, накопленной на дату последних весенне-летних заморозков в год опыления с 1989 по 2023 гг.: 1 — урожай шишек; 2 — сумма активных температур выше +5 °С на дату последних заморозков

Fig. 5. Inverse relationship between the yield of cones and the dynamics of the sum of active temperatures above +5 °C, accumulated on the date of the last spring-summer frosts in the year of pollination from 1989 to 2023: 1 — yield of cones; 2 — the sum of active temperatures above +5 °C on the date of the last frost

перед заморозками, составляла 100...130 градусов, поэтому прирост этого показателя на 100 градусов за последние два десятилетия значительно увеличивает риск развития репродуктивных структур. Изменился и характер динамики накопления САТ: возросла амплитуда колебаний этого показателя. Так, в первой половине периода наблюдений аномально ранняя весна, когда САТ перед заморозками достигала 300 градусов и более, была редкостью, и случалась примерно раз

в 5–6 лет. Во второй половине анализируемого периода, напротив, редкостью стала поздняя весна, когда САТ накануне последних заморозков не превышала 100 градусов.

Температура воздуха в мае существенно не влияла на величину САТ выше +5 °С ($r = -0,205$), при которой были последние весенние заморозки. Температура воздуха в апреле, напротив, оказалась довольно тесно связанной с этим показателем ($r = +0,505$, достоверно при $p \leq 0,05$).

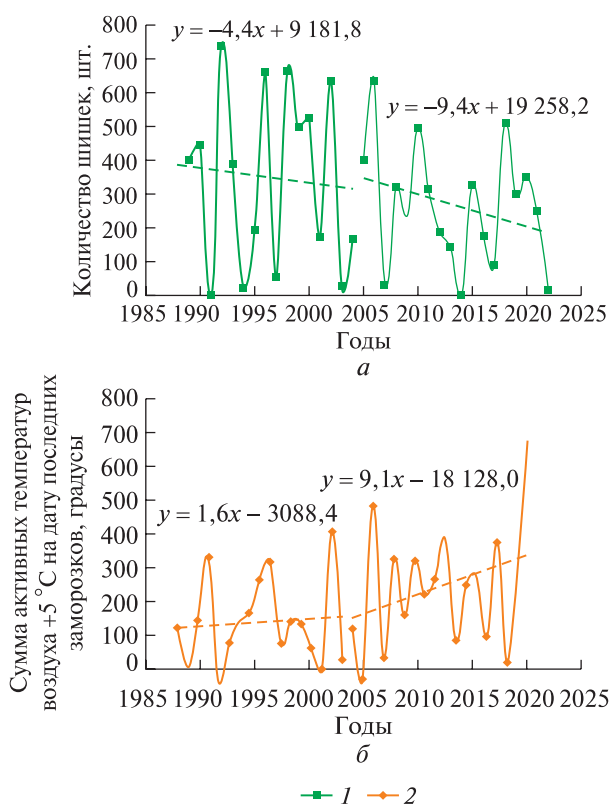


Рис. 6. Динамика урожая шишек (а) и изменение суммы активных температур +5 °C (б), накопленной на дату последних весенне-летних заморозков, за периоды 1990–2005 гг. и 2006–2023 гг. (штриховой линией показаны линии тренда изменения признаков): 1 — урожай шишек; 2 — сумма активных температур воздуха выше +5 °C на дату последних весенне-летних заморозков

Fig. 6. Dynamics of cone yield (a) and changes in the sum of active temperatures +5 °C (b) accumulated on the date of the last spring-summer frosts for the periods 1990–2005 and 2006–2023 (the dashed line shows the trend lines of changes in characteristics): 1 — cone yield; 2 — the sum of active temperatures above +5 °C on the date of the last spring-summer frosts

Из этого следует, что в условиях наблюдаемых климатических изменений более значимым фактором весеннего развития репродуктивных структур является температура воздуха в апреле.

Без ответа остался один вопрос: изменяется ли соотношение наблюдаемой глобальной температуры воздуха и весенних заморозков? Если да, то каким образом?

Большинство исследователей склоняется к мнению о том, что потепление климата в мировом масштабе будет продолжаться и далее [33]. В связи с этим предполагаются различные сценарии развития событий — от относительно мягких, например RCP4.5, согласно которым температура к концу XXI в. вырастет не более чем на 1,8 градуса, до более драматических, например RCP8.5, в соответствии с которыми температура воздуха на планете вырастет более чем на 3,7 градуса [34].

Большинство прогнозов для территории юга Сибири также указывает на рост температуры на 0,4...0,8 градуса за десятилетие [35, 36].

Есть, однако, мнение, что в глобальном потеплении возникла пауза и что в ближайшие два десятилетия в Северном полушарии ожидается замедление темпов прироста температуры приземного воздуха [37]. На данный момент существуют разные точки зрения относительно будущего климата и в этом направлении продолжают исследования. Тем не менее согласно официальной сводке по Сибирскому федеральному округу [36], климат региона теплеет и сохранение этой тенденции прогнозируется на ближайшие десятилетия.

Рост температуры сопровождается увеличением частоты, длительности и интенсивности погодных аномалий [35]. Это во многом обусловлено участвовавшей сменой противоположных по характеру процессов — блокирующих и циркуляционных [38–43], это означает быструю смену погодных условий в регионах, расположенных на пути вторжения холодных арктических масс и, как следствие, повторяемости метеорологических экстремумов и связанных с ними заморозков [42]. В Западной Сибири дополнительным фактором, способствующим быстрому и беспрепятственному передвижению воздушных масс, является равнинный рельеф. Проникновение теплого воздуха из Казахстана провоцирует раннюю весну, а вторжение арктических воздушных масс на юг региона в начале вегетации приводит к заморозкам, которые являются самым опасным метеоявлением [44, 45].

Прогнозы относительно того, как изменятся сроки весенних заморозков при дальнейшем потеплении климата, противоречивы и, очевидно, наука находится на этапе сбора информации по этому вопросу [46, 47]. Большинство исследователей отмечает, что потепление уже привело к увеличению общей длительности безморозного периода за счет ранней весны и более позднего наступления осени и эта тенденция сохранится в будущем [13, 48, 49]. Повышение весенних значений температуры воздуха значительно ускорило начало вегетации растений и сдвинуло сроки цветения на более ранние даты, при этом весенние заморозки остались в прежних временных рамках [50–52]. Часть исследователей прогнозирует продолжение этой тенденции в течение всего XXI в. [18, 52, 53]. Поэтому ожидается, что повреждаемость растений заморозками остается на прежнем уровне [14, 51, 54, 55].

Есть противоположное мнение о том, что в будущем возможен сдвиг поздних весенних заморозков на более ранние сроки [13, 56]. Например, из исторических источников известно, что сроки

и длительность заморозков синхронизованы с «внутривековыми» циклами летних температур воздуха. Так, согласно летописям сельскохозяйственного освоения Сибири XVII–XIX вв., в периоды, когда были зафиксированы волны похолодания (1630–1840 гг.), поздние заморозки на юге Сибири происходили даже в начале июля [57], т. е. на месяц позднее, чем в XX в. Исходя из этого, можно предположить, что при «мягких» сценариях изменения климата, которые предполагают незначительное потепление или даже паузу в нем, теоретически возможна синхронизация заморозков с общим температурным режимом в весенние месяцы.

Для юга Западной Сибири — региона данных наблюдений, прогнозируется дальнейшее увеличение длительности безморозного периода благодаря росту температуры весной и позднему наступлению осени [21, 22, 30, 41]. Что касается изменения частоты весенних заморозков в связи с потеплением климата, то мнения исследователей не всегда совпадают, что, по-видимому, обусловлено разными методами учета заморозков, условиями районов исследования и хронологией метеоданных. Например, локальные очаги радиационных заморозков часто значительно удалены от ближайшей метеостанции и не фиксируются, при этом радиационные заморозки случаются чаще, чем адвективные и наблюдаются гораздо позже весной [58].

Судя по полученным нами результатам (см. рис. 5), в некоторые годы неурожай шишек мог быть обусловлен влиянием именно радиационных заморозков. Например, в 2001 г. на момент последних заморозков, зафиксированных местной метеостанцией, САТ составила всего 87 градусов, однако средний урожай шишек оказался небольшим — 166 шт./с одного дерева. В 2004 г. наблюдалась аналогичная ситуация: САТ на момент заморозков составила 58 градусов, а средний урожай — 173 шишки с одного дерева. Тем не менее бесспорным остается факт наступления самых поздних заморозков по-прежнему в первой половине июня [21, 22, 30, 31, 41, 59]. Вероятность их появления сохраняется на уровне 2...10 % [21, 31, 59].

На первый взгляд складывается парадоксальная ситуация: климат теплеет, начало весеннего развития живой природы сдвигается на более ранние сроки, а заморозки как элемент климатической системы а priori должны также сдвинуться на более ранние сроки. Тогда бы их негативное влияние на растения осталось прежним. Однако наблюдения показывают неожиданный результат: даты заморозков не только не сдвигаются на более ранние сроки, но становятся даже более поздними (см. рис. 3, 4),

а значит, более разрушительными для растений. С одной стороны, результаты получены нами с помощью анализа достаточно коротких (с климатической точки зрения) рядов метеоданных и дальнейшие наблюдения могут выявить изменение наблюдаемых тенденций. С другой — возможно, что в настоящее время происходит локальная и кратковременная «рассинхронизация» глобальной температуры воздуха и заморозков. Предположительно, в будущем даты поздних весенних заморозков сдвинутся на более ранние сроки, поскольку при любых климатических изменениях должна доминировать синхронизация [39].

Повышение температуры воздуха весной ускоряет начало вегетации — эти процессы не всегда параллельны [47, 52] — поэтому изменения взаимосвязи между сроками весенней фенологии и температурой используются как индикатор экологических последствий от заморозков, обусловленных потеплением климата [60].

Прогнозы реакции растений на заморозки могут различаться и географически: заморозки могут наступать чаще в одних районах и реже — в других [54]. Важно также учитывать видовую специфику фенологических реакций на потепление. Например, виды с температурной стимуляцией начала весеннего развития [61], по сравнению с фотопериодической [62], сильнее подвергаются негативному действию асинхронности заморозков и весенней температуры. Некоторые древесные виды, произрастающие в условиях умеренного климата, минимизируют риск попадания под заморозки благодаря задержке начала весеннего развития [52] вследствие снижения температурной чувствительности. Теплые зимы способствуют меньшему зимнему охлаждению, вызывая ослабление реакции деревьев на раннее наступление весеннего тепла. Мягкие зимы обеспечивают «правильную» реакцию растений на весеннее тепло, поэтому выход почек из состояния покоя задерживается и все фенофазы происходят позднее, когда минует угроза заморозков. Именно уменьшение экстремально низких температур зимой дает основание рассматривать изменяющийся климат не как все более жаркий, а как менее холодный [49]. В сложившейся ситуации предполагается два сценария. С одной стороны, дальнейшее потепление может передвинуть начало цветения растений на более поздние сроки, не вызывая изменения или даже незначительно снижая риск весенних заморозков [52, 63, 64]. С другой — по причине потепления начало цветения растений может сместиться на более ранние сроки, что увеличит риск их повреждения весенними заморозками [63, 65].

Для кедра сибирского, по нашему мнению, реалистичен второй сценарий. Согласно полученным нами данным, изменение характера цикличности плодоношения обусловлено сопряженным действием двух основных метеопараметров:

1) стремительным ростом температуры воздуха в апреле в год опыления, вызывающим быстрое накопление САТ;

2) относительным «запаздыванием» поздних весенних заморозков. На фоне активного роста температуры воздуха заморозки остаются в прежних временных границах. Эта асинхронность привела к тому, что заморозки стали застигать развивающиеся шишки на более поздних, а потому более уязвимых, этапах развития. Учитывая, что необходимым условием для созревания высокого урожая кедра сибирского является либо отсутствие поздних весенних заморозков, либо они должны произойти при небольшом значении САТ, наблюдаемая климатическая тенденция вряд ли будет способствовать формированию высоких урожаев. По-видимому, ситуация может измениться к лучшему лишь при стабилизации климата, которая может «синхронизировать» заморозки с общим температурным режимом в весенние месяцы.

Выводы

За период 2000–2020 гг. среднемноголетнее созревание шишек снизилось почти на 25 % относительно уровня, который был при стабильных климатических условиях. Изменился объем урожаев шишек: характерное для прежнего климата чередование высоких и низких урожаев сменилось чередованием средних и низких. Итоговый урожай шишек стал зависеть преимущественно от весенней погоды в год опыления и отрицательно коррелирует с САТ выше +5 °С, накопленной до наступления поздних весенних заморозков. В годы, когда поздние весенние заморозки случались при небольшом значении САТ (менее 100 градусов), урожай шишек был высоким. Напротив, когда перед заморозками накапливалась большая САТ, урожай шишек был минимальным. Несмотря на рост теплообеспеченности в весенний период вследствие активного «прироста» температуры воздуха в апреле, ожидаемого сдвига заморозков на более ранние сроки на юге Западной Сибири не наблюдается. Для кедра сибирского такая ситуация чревата усилением негативных тенденций в динамике плодоношения. Предполагается, что при дальнейшем потеплении климата начало весеннего развития репродуктивных структур будет происходить в более ранние сроки, поэтому репродуктивные структуры будут сильнее повреждаться поздними весенними заморозками, поскольку последние остаются в прежних временных рамках. Обильные урожаи

шишек кедра сибирского смогут формироваться лишь в отдельные годы с поздним наступлением весны и/или при отсутствии поздних весенних заморозков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 23-26-00080.

Список литературы

- [1] Pearse I.S., Koenig W.D., Kelly D. Mechanisms of mast seeding: resources, weather, cues, and selection // *New Phytologist*, 2016, v. 212, iss. 3, pp. 546–562. DOI: 10.1111/nph.14114
- [2] Pearse I.S., LaMontagne J.M., Koenig W.D. Inter-annual variation in seed production has increased over time (1900–2014) // *Proceedings of the Royal Society B*, 2017, v. 284, at. 20171666. DOI: 10.1098/rspb.2017.1666
- [3] Bogdziewicz M., Kelly D., Thomas P.A., Lagueard J.G.A., Hackett-Pain A. Climate warming disrupts mast seeding and its fitness benefits in European beech // *Nature Plants*, 2020, v. 6, pp. 88–94. DOI: 10.1038/s41477-020-0592-8
- [4] Crone E.E., Miller E., Sala A. How do plants know when other plants are flowering? Resource depletion, pollen limitation and mast-seeding in a perennial wildflower // *Ecology letters*, 2009, v. 12, pp. 1119–1126. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01365.x
- [5] Bisi F., von Hardenberg J., Bertolino S., Wauters L.A., Imperio S., Preatoni D.G., Provenzale A., Mazzamuto M.V., Martinoli A. Current and future conifer seed production in the Alps: testing weather factors as cues behind masting // *European J. of Forest Research*, 2016, v. 135, pp. 743–754. DOI: 10.1007/s10342-016-0969-4
- [6] Zamorano J.G., Hokkanen T., Lehtikoinen A. Climate-driven synchrony in seed production of masting deciduous and conifer tree species // *J. of Plant Ecology*, 2016, v. 11, no. 2, pp. 180–188. DOI: 10.1093/jpe/rtw117
- [7] Owens J.N. Flowering and seed set // *Physiology of trees*. New York: John Wiley, 1991, pp. 247–273.
- [8] Некрасова Т.П. Пыльца и пыльцевой режим хвойных Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 169 с.
- [9] Третьякова И.Н. Эмбриология хвойных: физиологические аспекты. Новосибирск: Наука, 1990. 157 с.
- [10] Bazhina E.V., Kvitko O.V., Muratova E.N. Specific features of meiosis in the Siberian fir (*Abies sibirica*) in the forest Arboretum of the V.N. Sukachev Institute, Russia // *Biodiversity and Conservation*, 2011, v. 20, no. 2, pp. 415–428. DOI: 10.1007/s10531-010-9958-y
- [11] Goryachkina O.V., Muratova E.N. Meiosis at microsporangogenesis in Gmelin larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) at the V.N. Sukachev Institute of Forest Arboretum // *The International J. of Plant Reproductive Biology*, 2016, v. 8, no. 2, pp. 139–144.
- [12] Носкова Н.Е., Третьякова И.Н., Муратова Е.Н. Микроспорогенез и формирование пыльцы у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях современного климата Сибири // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*, 2009. № 3. С. 379–384.
- [13] Omazić B., Anić M., Prtenjak M.T., Kvakić M., Blašković L. Analysis of different existing measurement-based methods and a new approach for frost probability detection // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, v. 347, at. 109898. DOI: 10.1016/j.agrformet.2024.109898
- [14] Gu L., Hanson P., Mac Post W., Kaiser D., Yang B., Nemani R., Pallardy S., Meyers T. The 2007 eastern US spring freezes: Increased cold damage in a warming world? // *Bioscience*, 2008, v. 58, pp. 253–262. DOI: 10.1641/B580311

- [15] Vitasse Y., Rebetez M. Unprecedented risk of spring frost damage in Switzerland and Germany in 2017 // *Climatic Change*, 2018, v. 149, pp. 233–246. DOI: 10.1007/S10584-018-2234-Y
- [16] Lamichhane J.R. Rising risks of late-spring frosts in a changing climate // *Nature Climate Change*, 2021, v. 11, pp. 554–555. DOI: 10.1038/s41558-021-01090-x
- [17] Rigby J.R., Porporato A. Spring frost risk in a changing climate // *Geophysical Research Letters*, 2008, v. 35, iss. 12, at. 12703. DOI: 10.1029/2008GL033955
- [18] Augspurger C.K. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: spring damage risk is increasing // *Ecology*, 2013, v. 94, iss. 1, pp. 41–50. DOI: 10.1890/12-0200.1
- [19] Erlat E., Türkek M. Analysis of observed variability and trends in numbers of frost days in Turkey for the period 1950–2010 // *International J. of Climatology*, 2012, v. 32, iss. 12, pp. 1889–1898. DOI: 10.1002/JOC.2403
- [20] Graczyk D., Szwed M. Changes in the occurrence of late spring frost in Poland // *Agronomy*, 2020, v. 10, iss. 11, at. 1835. DOI: 10.3390/AGRONOMY10111835
- [21] Волкова Е.С., Мельник М.А. Заморозки в южной тайге Западной Сибири как фактор риска для сферы растениеводства // *География и природные ресурсы*, 2023. № 1. С. 67–75. DOI: 10.15372/GIPR20230108
- [22] Чердько Н.Н., Кужевская И.В., Волкова М.А., Горбатенко В.П., Нечепуренко О.Е., Носырева О.В., Чурсин В.В. Оценка изменения характеристик заморозков для агрозоны юга Сибири в период потепления // XV Сибирское совещ. и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием, Томск, 17–20 октября 2023 г. Томск: б. и., 2023. С. 113–115.
- [23] Танцурев Н.В., Санников С.Н. Анализ консортивных связей между кедром сибирским и кедровкой на Северном Урале // *Экология*, 2011. № 1. С. 20–24.
- [24] Некрасова Т.П. Биологические основы семеношения кедра сибирского. Новосибирск: Наука, 1972. 276 с.
- [25] Ирошников А.И. Полиморфизм популяций кедра сибирского // *Изменчивость древесных растений Сибири*. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева, 1974. С. 77–103.
- [26] Воробьев В.Н., Воробьева Н.А., Горошкевич С.Н. Рост и пол кедра сибирского. Новосибирск: Наука, 1989. 167 с.
- [27] Goroshkevich S., Velisevich S., Popov A., Khutornoy O., Vasilyeva G. 30-year cone production dynamics in Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) in the southern boreal zone: a causal interpretation // *Plant Ecology and Evolution*, 2021, v. 154, no. 3, pp. 321–331. DOI: 10.5091/plecevo.eu/issue/3728
- [28] Горошкевич С.Н. Пространственно-временная и структурно-функциональная организация кроны кедра сибирского: дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.01. Томск, 2011. 611 с.
- [29] Харюткина Е.В., Логинов С.В., Ипполитов И.И. Роль радиационных и циркуляционных факторов в изменении климата Западной Сибири в конце XX и начале XXI веков // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, 2016. Т. 52. № 6. С. 651–659.
- [30] Воронина Л.В., Зарубина А.В. Исследование заморозков как экологически опасных явлений // *Вестник СГУИТ*, 2010. № 13–2. С. 107–112.
- [31] Носырева О.В., Кошикова Т.С. Повторяемость заморозков в Западной Сибири // XII Сибирское совещ. и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: Материалы Всерос. науч. конф., Томск, 17–20 октября 2017 г. Томск: Офсет-центр, 2017. С. 72–73.
- [32] Грингоф И.Г., Пасечнюк А.Д. Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. 552 с.
- [33] AR6 Synthesis Report Climate Change 2023. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (дата обращения 14.03.2024).
- [34] AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/> (дата обращения 14.03.2024)
- [35] Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017 год. Москва: Росгидромет, 2018. 70 с. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/o-klimat-rf-2018.pdf (дата обращения 14.02.23)
- [36] Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург: Росгидромет, 2022. 676 с. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2022/od3.pdf> (дата обращения 18.03.2024)
- [37] Шерстюков Б.Г. Физико-статистическое моделирование колебаний климата и опыт прогноза на два десятилетия колебаний температуры воздуха Северного полушария // *Труды ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»*, 2018. № 18. С. 29–49.
- [38] Мохов И.И., Акперов М.Г., Прокофьева М.А., Тимажев А.В., Лупо А.Р., Ле Трет Э. Блокинг в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // *Доклады Академии наук*, 2013. Т. 449. № 5. С. 1–5. DOI: 10.7868/S0869565213110224
- [39] Переведенцев Ю.П. Мохов И.И., Елисеев А.В., Шанталинский К.М., Важнова Н.А. Теория общей циркуляции атмосферы. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2013. 224 с.
- [40] Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Martynova Y.V. Variability of atmospheric circulation under climate change in West Siberia in the late 20th – early 21st centuries // *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, v. 41, no. 6, pp. 435–438. DOI: 10.3103/S106837391606008X
- [41] Барашкова Н.К., Кужевская И.В., Носырева О.В. Климатические характеристики режимов устойчивого перехода температуры воздуха через определенные пределы на юге Западной Сибири // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 2015. № 1. С. 87–97. DOI: 10.15356/0373-2444-2015-1-87-97
- [42] Кононова Н.К., Черенкова Е.А. Повторяемость элементарных циркуляционных механизмов в атмосфере Северного полушария // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 2018. № 6. С. 17–25. DOI: 10.1134/S2587556618060080
- [43] Харюткина Е.В., Логинов С.В., Морару Е.И., Пустовалов К.Н., Мартынова Ю.В. Динамика характеристик экстремальности климата и тенденции опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*, 2022. Т. 35. № 2. С. 136–142. DOI: 10.15372/AOO20220208
- [44] Евсеева Н.С., Ромашова Т.В. Опасные метеорологические явления как составная часть природного риска (на примере юга Томской области) // *Вестник Томского государственного университета*, 2011. № 353. С. 199–204.
- [45] Волкова М.А., Чердько Н.Н., Ивашкова О.А. Особенности формирования и социально-экономические последствия температурных рисков в Томской области // *Вестник Томского государственного университета*, 2013. № 374. С. 180–187.
- [46] Vitasse Y., Lenz A., Körner C. The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees // *Frontiers in Plant Science*, 2014, v. 5, at. 541. DOI: 10.3389/fpls.2014.00541

- [47] Ma Q., Huang J.G., Hänninen H., Berninger F. Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming // *Global Change Biology*, 2019, v. 25, iss. 1, pp. 351–360. DOI: 10.1111/GCB.14479
- [48] Menzel A. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996 // *International J. of Biometeorology*, 2000, v. 44, pp. 76–81. DOI: 10.1007/s004840000054
- [49] Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation // *J. of Geophysical Research*, 2006, v. 111, at. 5109. DOI: 10.1029/2005JD006290
- [50] Vitasse Y., Francois C., Delpierre N., Dufrêne E., Kremer A., Chuine I., Delzon S. Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, v. 151, pp. 969–980. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.03.003
- [51] Hoffmann H., Rath T. Future Bloom and Blossom Frost Risk for *Malus domestica* Considering Climate Model and Impact Model Uncertainties // *PLOS ONE*, 2013, v. 8, iss. 10, at. 75033. DOI: 10.1371/journal.pone.0075033
- [52] Fu Y.H., Zhao H., Piao S., Peaucelle M., Peng S., Zhou, G., Ciais P., Huang M., Menzel A., Peñuelas J., Song Y., Vitasse Y., Zeng Z., Janssens I.A. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding // *Nature*, 2015, v. 526, pp. 104–107. DOI: 10.1038/nature15402
- [53] Unterberger C., Brunner L., Nabernegg S., Steininger K.W., Steiner A.K., Stabentheiner E., Monschein S., Truhetz H. Spring frost risk for regional apple production under a warmer climate // *PLOS ONE*, 2018, v. 13, iss. 7, at. 0200201. DOI: 10.1371/journal.pone.0200201
- [54] Inouye D.W. The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change // *Ecology Letters*, 2000, v. 3, pp. 457–463. DOI: 10.1046/j.1461-0248.2000.00165.x
- [55] Chuine I., Bonhomme M., Legave J.-M., Garcia de Cortazar-Atauri I., Charrier G., Lacoïnte A., Ameglio T. Can phenological models predict tree phenology accurately in the future? The unrevealed hurdle of endodormancy break // *Global Change Biology*, 2016, v. 22, pp. 3444–3460. DOI: 10.1111/gcb.13383
- [56] Zohner C.M., Mo L., Renner S.S., Svenning J.-C., Vitasse Y., Benito B.M., Ordonez A., Baumgarten F., Bastin J.-F., Sebald V., Reich P.B., Liang J., Nabuurs G.-J., Brändli U.-B., Cienciala E., Crowther T.W., Kepfer-Rojas S., Saikia P., Gianelle D., Fernández C.A., Korjus H. Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, v. 117, pp. 12192–12200. DOI: 10.1073/pnas.1920816117
- [57] Мыглан В.С. Климат и социум Сибири в малый ледниковый период. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального университета, 2010. 230 с.
- [58] Волкова Е.С., Мельник М.А. Специфика критериев опасных и неблагоприятных природно-климатических явлений для сферы аграрного природопользования южной тайги Западной Сибири // *Проблемы региональной экологии*, 2016. № 5. С. 70–75.
- [59] Кижнер Л.И. Экономические аспекты обеспечения метеорологической информацией о заморозках в Томской области // *Вестник Томского государственного университета*, 2014. № 381. С. 232–237.
- [60] Keenan T.F. Phenology: Spring greening in a warming world // *Nature*, 2015, v. 526, pp. 48–49. DOI: 10.1038/nature15633
- [61] Hufkens K., Friedl M.A., Keenan T.F., Sonnentag O., Bailey A., O'keefe J., Richardson A.D. Ecological impacts of a widespread frost event following early spring leaf-out // *Global Change Biology*, 2012, v. 18, pp. 2365–2377. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02712.x
- [62] Zohner C.M., Renner S.S. Perception of photoperiod in individual buds of mature trees regulates leaf-out // *New Phytologist*, 2015, v. 208, pp. 1023–1030. DOI: 10.1111/nph.13510
- [63] Eccel E., Rea R., Caffarra A., Crisci A. Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: the role of phenological acclimation // *International J. of Biometeorology*, 2009, v. 53, pp. 273–286. DOI: 10.1007/s00484-009-0213-8
- [64] Vitasse Y., Schneider L., Rixen C., Christen D., Rebetez M. Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, v. 248, pp. 60–69. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.09.005
- [65] Sgubin G., Swingedouw D., Dayon G., Garcia de Cortazar-Atauri I., Ollat N., Page C., van Leeuwen C. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, v. 250–251, pp. 226–242. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.12.253

Сведения об авторах

Велисевич Светлана Николаевна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН), s_n_velisevich@mail.ru

Попов Александр Владимирович — инженер 1 категории, ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН), tomskceltic@gmail.com

Мельник Мария Алексеевна — канд. геогр. наук, науч. сотр., ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН), melnik-m-a@yandex.ru

Горошкевич Сергей Николаевич — д-р биол. наук, гл. науч. сотр., ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН), pearldiver@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.05.2024.

Одобрено после рецензирования 15.07.2024.

Принята к публикации 22.08.2024.

INFLUENCE OF LATE SPRING LIGHT FROSTS ON SIBERIAN STONE PINE (*PINUS SIBIRICA* DU TOUR) SEED PRODUCTION IN CHANGING CLIMATE

S.N. Velisevich, A.V. Popov✉, M.A. Mel'nik, S.N. Goroshkevich

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3, Academicheskyy av., 634055, Tomsk, Russia

tomskceltic@gmail.com

The dynamics of Siberian stone pine cone bearing for the period from 1990 to 2023 has been considered to establish the influence of weather conditions in the spring period during the pollination year on the subsequent cone crop. It has been found that over the past two decades, the average annual level of the mature cones number has decreased by almost a quarter of the level that was at stable climate. The amplitude of fluctuations in cone crops has also changed, as the alternation of high and low yields characteristic of the previous climate was replaced by an alternation of medium and low ones. It has been suggested that one of the reasons for a negative trend in the seeding dynamics is late spring frosts, which remained within the same time frame despite climate warming. The number of mature cones in the crown largely depended on the spring weather in the pollination year and negatively correlated with the sum of active temperatures above +5°C accumulated before the onset of late spring frost. The value of this indicator was determined by the April temperature. In years when late spring frost occurred at low active temperatures (less than 100 °C), the cone crop was large. In contrast, when 300 °C or more accumulated before freezing, cone crop was minimal. Changes in the timing of the last spring-summer frosts were also noted; on average, there is a tendency for the timing of the last frosts to shift to later dates. It is assumed that with further climate warming, the onset of spring development of reproductive structures will occur at an earlier date, therefore reproductive structures will be more damaged by late spring frosts, since the latter remain within the same time frame. Abundant crops of Siberian stone pine can be formed only in some years with late spring and/or in the absence of late spring frosts.

Keywords: Siberian stone pine, *Pinus sibirica* Du Tour, seed production, climate, spring frosts

Suggested citation: Velisevich S.N., Popov A.V., Mel'nik M.A., Goroshkevich S.N. *Vliyaniye pozdnykh vesennikh zamorozkov na plodonosheniye kedra sibirskogo (Pinus sibirica Du Tour) v izmenyayushchemsya klimate* [Influence of late spring light frosts on Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) seed production in changing climate]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 138–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-5-138-152

References

- [1] Pearse I.S., Koenig W.D., Kelly D. Mechanisms of mast seeding: resources, weather, cues, and selection. *New Phytologist*, 2016, v. 212, iss. 3, pp. 546–562. DOI: 10.1111/nph.14114
- [2] Pearse I.S., LaMontagne J.M., Koenig W.D. Inter-annual variation in seed production has increased over time (1900–2014). *Proceedings of the Royal Society B*, 2017, v. 284, at. 20171666. DOI: 10.1098/rspb.2017.1666
- [3] Bogdziewicz M., Kelly D., Thomas P.A., Lageard J.G.A., Hackett-Pain A. Climate warming disrupts mast seeding and its fitness benefits in European beech. *Nature Plants*, 2020, v. 6, pp. 88–94. DOI: 10.1038/s41477-020-0592-8
- [4] Crone E.E., Miller E., Sala A. How do plants know when other plants are flowering? Resource depletion, pollen limitation and mast-seeding in a perennial wildflower. *Ecology letters*, 2009, v. 12, pp. 1119–1126. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01365.x
- [5] Bisi F., von Hardenberg J., Bertolino S., Wauters L.A., Imperio S., Preatoni D.G., Provenzale A., Mazzamuto M.V., Martinoli A. Current and future conifer seed production in the Alps: testing weather factors as cues behind masting. *European J. of Forest Research*, 2016, v. 135, pp. 743–754. DOI: 10.1007/s10342-016-0969-4
- [6] Zamorano J.G., Hokkanen T., Lehtikoinen A. Climate-driven synchrony in seed production of masting deciduous and conifer tree species. *J. of Plant Ecology*, 2016, v. 11, no. 2, pp. 180–188. DOI: 10.1093/jpe/rtw117
- [7] Owens J.N. Flowering and seed set. *Physiology of trees*. New York: John Wiley, 1991, pp. 247–273.
- [8] Nekrasova T.P. *Pyl'tsa i pyl'tsevoy rezhim khvoynykh Sibiri* [Pollen and pollen regime of Siberian conifers]. Novosibirsk: Nauka, 1983, 169 p.
- [9] Tret'yakova I.N. *Embriologiya khvoynykh: fiziologicheskie aspekty* [Embryology of conifers: physiological aspects]. Novosibirsk: Nauka, 1990, 157 p.
- [10] Bazhina E.V., Kvitko O.V., Muratova E.N. Specific features of meiosis in the Siberian fir (*Abies sibirica*) in the forest Arboretum of the V.N. Sukachev Institute, Russia. *Biodiversity and Conservation*, 2011, v. 20, no. 2, pp. 415–428. DOI: 10.1007/s10531-010-9958-y
- [11] Goryachkina O.V., Muratova E.N. Meiosis at microsporogenesis in Gmelin larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) at the V.N. Sukachev Institute of Forest Arboretum. *The International J. of Plant Reproductive Biology*, 2016, v. 8, n. 2, pp. 139–144.
- [12] Noskova N.E., Tret'yakova I.N., Muratova E.N. *Mikrosporogenez i formirovaniye pyl'tsy u sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) v usloviyakh sovremennoy klimata Sibiri* [Microsporogenesis and pollen formation in Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) under modern climatic conditions of Siberia]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya biologicheskaya* [Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2009, no. 3, pp. 379–384.
- [13] Omazić B., Anić M., Prtenjak M.T., Kvakić M., Blašković L. Analysis of different existing measurement-based methods and a new approach for frost probability detection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, v. 347, at. 109898. DOI: 10.1016/j.agrformet.2024.109898

- [14] Gu L., Hanson P., Mac Post W., Kaiser D., Yang B., Nemani R., Pallardy S., Meyers T. The 2007 eastern US spring freezes: Increased cold damage in a warming world? *Bioscience*, 2008, v. 58, pp. 253–262. DOI: 10.1641/B580311
- [15] Vitasse Y., Rebetez M. Unprecedented risk of spring frost damage in Switzerland and Germany in 2017. *Climatic Change*, 2018, v. 149, pp. 233–246. DOI: 10.1007/S10584-018-2234-Y
- [16] Lamichhane J.R. Rising risks of late-spring frosts in a changing climate. *Nature Climate Change*, 2021, v. 11, pp. 554–555. DOI: 10.1038/s41558-021-01090-x
- [17] Rigby J.R., Porporato A. Spring frost risk in a changing climate. *Geophysical Research Letters*, 2008, v. 35, iss. 12, at. 12703. DOI: 10.1029/2008GL033955
- [18] Augspurger C.K. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: spring damage risk is increasing. *Ecology*, 2013, v. 94, iss. 1, pp. 41–50. DOI: 10.1890/12-0200.1
- [19] Erlat E., Türkes M. Analysis of observed variability and trends in numbers of frost days in Turkey for the period 1950–2010. *International J. of Climatology*, 2012, v. 32, iss. 12, pp. 1889–1898. DOI: 10.1002/JOC.2403
- [20] Graczyk D., Szwed M. Changes in the occurrence of late spring frost in Poland. *Agronomy*, 2020, v. 10, iss. 11, at. 1835. DOI: 10.3390/AGRONOMY10111835
- [21] Volkova E.S., Mel'nik M.A. *Zamorozki v yuzhnoy tayge Zapadnoy Sibiri kak faktor riska dlya sfery rasteniyevodstva* [Frosts in southern taiga of Western Siberia as a risk factor for plant production]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 2023, no. 1, pp. 67–75. DOI: 10.15372/GIPR20230108
- [22] Chered'ko N.N., Kuzhevskaya I.V., Volkova M.A., Gorbatenko V.P., Nechepurenko O.E., Nosyreva O.V., Chursin V.V. *Otsenka izmeneniya kharakteristik zamorozkov dlya agrozony yuga Sibiri v period potepleniya* [Assessment of changes in the characteristics of frosts for the agrozone of southern Siberia during the warming period]. XII Sibirskoe soveshchanie i shkola molodykh uchenykh po klimato-ekologicheskomu monitoringu: materialy Vseros. (s mezhdunar. uchastiem) nauch. konf. [XIIth Siberian Meeting and Young Scientists School on Climate and Environmental Monitoring: materials of Vseros. (with international participation) scientific. conf.]. Tomsk, October 17–20, 2023. Tomsk, 2023, pp. 72–73.
- [23] Tantsyrev N.V., Sannikov S.N. *Analiz konsortivnykh svyazey mezhdru kedrom sibirskim i kedrovkoy na Severnom Urale* [Analysis of consortive relationships between the Siberian stone pine and the nutcracker in the Northern Urals]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2011, no. 1, pp. 20–24.
- [24] Nekrasova T.P. *Biologicheskoe osnovy semenosheniya kedra sibirskogo* [Biological basis of the Siberian cedar seed production]. Novosibirsk: Nauka, 1972, 276 p.
- [25] Iroshnikov A.I. *Polimorfizm populyatsiy kedra sibirskogo* [Polymorphism of Siberian Cedar Populations]. *Izmenchivost' drevesnykh rasteniy Sibiri* [Variability of Woody Plants of Siberia]. Krasnoyarsk: ILID SB AS USSR, 1974, pp. 77–103.
- [26] Vorob'ev V.N., Vorob'eva N.A., Goroshkevich S.N. *Rost i pol kedra sibirskogo* [Growth and gender of Siberian cedar]. Novosibirsk: Nauka, 1989, 167 p.
- [27] Goroshkevich S., Velisevich S., Popov A., Khutornoy O., Vasilyeva G. 30-year cone production dynamics in Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) in the southern boreal zone: a causal interpretation. *Plant Ecology and Evolution*, 2021, v. 154, no. 3, pp. 321–331. DOI: 10.5091/plecevo.eu/issue/3728
- [28] Goroshkevich S.N. *Prostranstvenno-vremennaya i strukturno-funktsional'naya organizatsiya krony kedra sibirskogo* [Spatio-temporal and structural-functional organization of the Siberian cedar crown]. Diss. Dr. Sci. (Biol.). 03.02.01. Tomsk, 2011, 611 p.
- [29] Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Ippolitov I.I. *Rol' radiatsionnykh i tsirkulyatsionnykh faktorov v izmenenii klimata Zapadnoy Sibiri v kontse XX i nachale XXI vekov* [Influence of radiation and circulation factors on climate change in Western Siberia at the end of the 20th century and beginning of the 21st century]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics], 2016, t. 52, no. 6, pp. 651–659.
- [30] Voronina L.V., Zarubina A.V. *Issledovanie zamorozkov kak ekologicheski opasnykh yavleniy* [Study of frosts as environmentally hazardous phenomena]. *Vestnik SGUGIT* [Vestnik SSUGT], 2010, no. 13–2, pp. 107–112.
- [31] Nosyreva O.V., Koshikova T.S. *Povtoryaemost' zamorozkov v Zapadnoy Sibiri* [Frost frequency in Western Siberia]. XII Sibirskoe soveshchanie i shkola molodykh uchenykh po klimato-ekologicheskomu monitoringu: Materialy Vseros. nauch. konf. [XIIth Siberian Meeting and Young Scientists School on Climate and Environmental Monitoring: materials of Vseros. scientific. conf.]. Tomsk, October 17–20, 2017. Tomsk: Ofset-tsentr, 2017, pp. 72–73.
- [32] Gringof I.G., Pasechnyuk A.D. *Agrometeorologiya i agrometeorologicheskie nablyudeniya* [Agrometeorology and agrometeorological observations]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2005, 552 p.
- [33] AR6 Synthesis Report Climate Change 2023. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (accessed 14.03.2024).
- [34] AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/> (accessed 14.03.2024)
- [35] *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2017 god* [Report on climate features in the Russian Federation in 2017]. Moscow: Rosgidromet, 2018, 70 p. Available at: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/o-klimata-rf-2018.pdf (accessed 14.02.23)
- [36] *Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. St. Petersburg: Rosgidromet, 2022, 676 p. Available at: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2022/od3.pdf> (accessed 18.03.2024)
- [37] Sherstyukov B.G. *Fiziko-statisticheskoe modelirovanie kolebaniy klimata i opyt prognoza na dva desyatiletiya kolebaniy temperatury vozdukh Severnogo polushariya* [Physical-statistical modeling of climate variations and the experience in forecasting of air temperature variations in the Northern hemisphere for two decades]. *Trudy FGBU «VNIIGMI-MTsD»* [Proceedings of RIHMI-WDC], 2018, no. 18, pp. 29–49.
- [38] Mokhov I.I., Akperov M.G., Prokof'eva M.A., Timazhev A.V., Lupo A.R., Le Tret E. *Blokingi v Severnom polusharii i Evro-Atlanticheskoy regione: otsenki izmeneniy po dannym reanaliza i model'nym raschetam* [Blockings in the northern hemisphere and euro-atlantic region: estimates of changes from reanalysis data and model simulations]. *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the Academy of Sciences], 2013, t. 449, no. 5, pp. 1–5. DOI: 10.7868/S0869565213110224
- [39] Perevedentsev Yu.P., Mokhov I.I., Eliseev A.V., Shantalinsky K.M., Vazhnova N.A. *Teoriya obshchey tsirkulyatsii atmosfery [Theory of general atmospheric circulation]*. Ed. E.P. Naumov. Kazan: Kazan Federal University, 2013, 224 p.

- [40] Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Martynova Y.V. Variability of atmospheric circulation under climate change in West Siberia in the late 20th – early 21st centuries. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, v. 41, no. 6, pp. 435–438. DOI: 10.3103/S106837391606008X
- [41] Barashkova N.K., Kuzhevskaya I.V., Nosyreva O.V. *Klimaticheskie kharakteristiki rezhimov ustoychivogo perekhoda temperatury vozdukhа cherez opredelennye predely na yuge Zapadnoy Sibiri* [Climatic characteristics of modes of the stable transition of air temperature through key bounds in the south of Western Siberia]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography Series], 2015, no. 1, pp. 87–97. DOI: 10.15356/0373-2444-2015-1-87-97
- [42] Kononova N.K., Cherenkova E.A. *Povtoryaemost' elementarnykh tsirkulyatsionnykh mekhanizmov v atmosfere Severnogo polushariya* [Reiteration of the elementary circulation mechanisms in the atmosphere of the Northern hemisphere]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography Series], 2018, no. 6, pp. 17–25. DOI: 10.1134/S2587556618060080
- [43] Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Moraru E.I., Pustovalov K.N., Martynova Yu.V. *Dinamika kharakteristik ekstremal'nosti klimata i tendentsii opasnykh meteorologicheskikh yavleniy na territorii Zapadnoy Sibiri* [Dynamics of climate extremes and trends of dangerous meteorological phenomena in Western Siberia]. *Optika atmosfery i okeana* [Optika Atmosfery i Okeana], 2022, t. 35, no. 2, pp. 136–142. DOI: 10.15372/AOO20220208
- [44] Evseeva N.S., Romashova T.V. *Opasnye meteorologicheskie yavleniya kak sostavnaya chast' prirodnogo riska (na primere yuga Tomskoy oblasti)* [Dangerous meteorological phenomena as a constituent of natural risk (by example of the south of Tomsk region)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journals], 2011, no. 353, pp. 199–204.
- [45] Volkova M.A., Chered'ko N.N., Ivashkova O.A. *Osobennosti formirovaniya i sotsial'no-ekonomicheskie posledstviya temperaturnykh riskov v Tomskoy oblasti* [Peculiarities of formation and social-economic consequences of temperature risks in Tomsk region]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University J.], 2013, no. 374, pp. 180–187.
- [46] Vitasse Y., Lenz A., Körner C. The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees. *Frontiers in Plant Science*, 2014, v. 5, at. 541. DOI: 10.3389/fpls.2014.00541
- [47] Ma Q., Huang J.G., Hänninen H., Berninger F. Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming. *Global Change Biology*, 2019, v. 25, iss. 1, pp. 351–360. DOI: 10.1111/GCB.14479
- [48] Menzel A. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International J. of Biometeorology*, 2000, v. 44, pp. 76–81. DOI: 10.1007/s004840000054
- [49] Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. of Geophysical Research*, 2006, v. 111, at. 5109. DOI: 10.1029/2005JD006290
- [50] Vitasse Y., Francois C., Delpierre N., Dufrière E., Kremer A., Chuine I., Delzon S. Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, v. 151, pp. 969–980. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.03.003
- [51] Hoffmann H., Rath T. Future Bloom and Blossom Frost Risk for Malus domestica Considering Climate Model and Impact Model Uncertainties. *PLOS ONE*, 2013, v. 8, iss. 10, at. 75033. DOI: 10.1371/journal.pone.0075033
- [52] Fu Y.H., Zhao H., Piao S., Peaucelle M., Peng S., Zhou, G., Ciais P., Huang M., Menzel A., Peñuelas J., Song Y., Vitasse Y., Zeng Z., Janssens I.A. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 2015, v. 526, pp. 104–107. DOI: 10.1038/nature15402
- [53] Unterberger C., Brunner L., Nabernegg S., Steininger K.W., Steiner A.K., Stabentheiner E., Monschein S., Truhetz H. Spring frost risk for regional apple production under a warmer climate. *PLOS ONE*, 2018, v. 13, iss. 7, at. 0200201. DOI: 10.1371/journal.pone.0200201
- [54] Inouye D.W. The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change. *Ecology Letters*, 2000, v. 3, pp. 457–463. DOI: 10.1046/j.1461-0248.2000.00165.x
- [55] Chuine I., Bonhomme M., Legave J.-M., Garcia de Cortazar-Atauri I., Charrier G., Lacointe A., Ameglio T. Can phenological models predict tree phenology accurately in the future? The unrevealed hurdle of endodormancy break. *Global Change Biology*, 2016, v. 22, pp. 3444–3460. DOI: 10.1111/gcb.13383
- [56] Zohner C.M., Mo L., Renner S.S., Svenning J.-C., Vitasse Y., Benito B.M., Ordonez A., Baumgarten F., Bastin J.-F., Sebald V., Reich P.B., Liang J.; Nabuurs G.-J., Brändli U.-B., Cienciala E., Crowther T.W., Kepfer-Rojas S., Saikia P., Gianelle D., Fernández C.A., Korjus H. Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, v. 117, pp. 12192–12200. DOI: 10.1073/pnas.1920816117
- [57] Myglan V.S. *Klimat i sotsium Sibiri v malye lednikovyy period* [The climate and society of Siberia during the Little Ice Age]. Krasnoyarsk: Sibirskiy Federal'nyy Universitet, 2010, 230 p.
- [58] Volkova E.S., Mel'nik M.A. *Spetsifika kriteriev opasnykh i neblagopriyatnykh prirodno-klimaticheskikh yavleniy dlya sfery agrarnogo prirodopol'zovaniya yuzhnoy taygi Zapadnoy Sibiri* [The specificity of the criteria of dangerous and adverse natural-climatic phenomena for the agricultural environmental management sphere in the southern taiga of Western Siberia]. *Problemy regional'noy ekologii* [Regional Environmental Issues], 2016, no. 5, pp. 70–75.
- [59] Kizhner L.I. *Ekonomicheskie aspekty obespecheniya meteorologicheskoy informatsiyey o zamorozkakh v Tomskoy oblasti* [The value of prognostic information for reduction of losses from frosts in Tomsk oblast]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journals], 2014, no. 381, pp. 232–237.
- [60] Keenan T.F. Phenology: Spring greening in a warming world. *Nature*, 2015, v. 526, pp. 48–49. DOI: 10.1038/nature15633
- [61] Hufkens K., Friedl M.A., Keenan T.F., Sonnentag O., Bailey A., O'keefe J., Richardson A.D. Ecological impacts of a widespread frost event following early spring leaf-out. *Global Change Biology*, 2012, v. 18, pp. 2365–2377. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02712.x
- [62] Zohner C.M., Renner S.S. Perception of photoperiod in individual buds of mature trees regulates leaf-out. *New Phytologist*, 2015, v. 208, pp. 1023–1030. DOI: 10.1111/nph.13510

- [63] Eccel E., Rea R., Caffarra A., Crisci A. Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: the role of phenological acclimation. *International J. of Biometeorology*, 2009, v. 53, pp. 273–286. DOI: 10.1007/s00484-009-0213-8
- [64] Vitasse Y., Schneider L., Rixen C., Christen D., Rebetez M. Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, v. 248, pp. 60–69. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.09.005
- [65] Sgubin G., Swingedouw D., Dayon G., Garcia de Cortazar-Atauri I., Ollat N., Page C., van Leeuwen C. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, v. 250–251, pp. 226–242. DOI:10.1016/j.agrformet.2017.12.253

This work was financially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-26-00080

Authors' information

Velisevich Svetlana Nikolaevna — Cand. Sci. (Biology), Senior Staff Scientist, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, s_n_velisevich@mail.ru

Popov Aleksander Vladimirovich ✉ — Engineer of the 1st category, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, tomskcelttic@gmail.com

Mel'nik Maria Alekseevna — Cand. Sci. (Geography), Staff Scientist, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, melnik-m-a@yandex.ru

Goroshkevich Sergey Nikolaevich — Dr. Sci. (Biology), Chief Scientist, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, pearldiver@yandex.ru

Received 13.05.2024.

Approved after review 15.07.2024.

Accepted for publication 22.08.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest