
**ЭВОЛЮЦИЯ
ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

УДК 630*422.11/.12:582.475:630*561.24(234.851)

**ФОРМИРОВАНИЕ МОРОЗОБОЙНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ
У ХВОЙНЫХ ДЕРЕВЬЕВ В РАЗЛИЧНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПЕРИОДЫ
НА ПОЛЯРНОМ УРАЛЕ**

© 2018 г. М. А. Гурская

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

e-mail: mgurskaya@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.08.2017 г.

Принята в печать 27.07.2018 г.

В горах Полярного Урала изучены частота повторяемости, интенсивность и пространственно-временное распределение морозобойных повреждений у ели и лиственницы, произрастающих в пределах одного склона юго-западной экспозиции на верхней границе распространения деревьев и на дне горной долины, с целью выявить пространственно-временную динамику их формирования в различные климатические периоды за последние 100 лет. На верхней границе леса повреждения формируются чаще у лиственницы по сравнению с елью, а на дне горной долины у лиственницы, напротив, повреждения формируются в два-три раза реже, чем у ели в одни и те же климатические периоды. Высокая частота формирования повреждений в ранней древесине хвойных приурочена к теплым климатическим периодам с ранним началом вегетации и небольшой высотой снега в мае. Выявлены наиболее экстремальные годы, когда повреждается большое количество деревьев, показано отличие от местообитаний, расположенных в Западной Сибири. Существует повышенный риск повреждений хвойных деревьев поздними весенними заморозками в связи с недавними изменениями климата на Полярном Урале.

Ключевые слова: морозобойные повреждения, Полярный Урал, лиственница, ель, заморозки, древесно-кольцевые хронологии

DOI: 10.1134/S2587556618060055

Экстремальные погодные и климатические явления оказывают существенное влияние как на функционирование экосистем, так и на народно-хозяйственную деятельность человека. Несмотря на то, что они происходят редко, природные экстремумы могут иметь непропорциональное экологическое и эволюционное значение для растений [12, 24]. Знание частоты повторяемости, интенсивности и пространственного распространения экстремальных явлений необходимо для понимания механизмов устойчивого функционирования экосистем. Согласно последним оценкам ожидается увеличение частоты и интенсивности климатических экстремумов [26]. Высокие широты являются наиболее перспективным районом изучения природных экстремумов, так как здесь экосистемы наиболее уязвимы к погодным и климатическим необычным явлениям [25]. Горные системы, характеризующиеся неоднородностью и изрезанностью рельефа, также отличаются большим количеством экстремальных и необычных погодных и климатических явлений [1]. В связи с этим наибольший научный интерес представляют горные полярные районы, где экстре-

мальные погодные условия гор сочетаются с экстремальными условиями высоких широт.

С другой стороны, горные долины и котловины часто характеризуются своеобразным мезо- и микроклиматом, который отличается от условий произрастания деревьев на верхней границе леса. Климатические различия обусловлены количеством приходящей солнечной радиации на вершины гор, склоны и в горные котловины. Кроме этого, в горных котловинах наблюдаются перераспределение осадков в зимнее время и увеличение высоты снежного покрова зимой за счет метелевого переноса, медленный сход снега весной и запаздывание начала вегетации, специфическая циркуляция воздушных масс, температурные инверсии, уменьшение и перераспределение ветровой нагрузки за счет создания препятствий [1, 10].

Деревья, произрастающие на северном пределе распространения, регистрируют изменения окружающей среды в годичных кольцах [2]. Экстремальные природные явления отмечаются в годичных кольцах в виде аномалий строения годичных колец, соотношения количества разных кле-

точных элементов, нарушений регулярной структуры ксилемы, формирования паренхимных клеток и патологических смоляных ходов [9, 14, 21, 27, 28]. Одним из таких анатомических образований являются морозобойные повреждения, которые состоят из слоя погибших клеток, деформированных трахеид, разросшихся сердцевинных лучей и (иногда) патологических смоляных ходов [17, 19]. Морозобойные повреждения формируются под воздействием температур ниже $+4^{\circ}\text{C}$ в течение вегетации [18]. Наличие морозобойных повреждений указывает на то, что изменение погодных условий в течение вегетации привело к нарушению течения процессов роста и дифференцировки клеток ксилемы.

Таким наиболее вероятным изменением условий окружающей среды принято считать заморозки. Заморозками называют понижение температуры воздуха до отрицательных значений вечером и ночью при положительной температуре днем [3]. Заморозки бывают адвективными, формирующимися в результате вторжения крупных холодных воздушных масс, и радиационными, наступающими из-за выхолаживания поверхностей в период ясных безветренных холодных ночей [11].

Исследования и реконструкции климатических факторов (температуры и осадков) выполнены с использованием ширины и плотности годовых колец деревьев, произрастающих на верхней границе распространения растительности [15]. Большинство исследований климатического отклика годовых колец проводится в экотоне верхней границы леса, а работ, посвященных сравнительному анализу структуры и строению годовых колец деревьев, произрастающих на верхней границе леса и в горных долинах и котловинах, немного. В настоящее время нет данных о распределении морозобойных повреждений в годовых кольцах хвойных деревьев на верхней границе леса и в горной долине и связи между частотой формирования повреждений и климатическими периодами.

Цель работы: выявить частоту и интенсивность формирования морозобойных повреждений в различные климатические периоды в связи с изменениями климата на Полярном Урале в древесине лиственницы и ели на верхней границе леса и на дне горной долины.

Поставлены следующие **задачи**:

- выявить динамику годового прироста на верхнем пределе распространения деревьев и на дне горной долины;

- определить предельный возраст формирования морозобойных повреждений и построить хронологии по морозобойным повреждениям в ранней и поздней древесине;

- сравнить периоды частого/редкого формирования повреждений с климатическими факторами.

Район и методы исследования. Характеристика района исследований. Район исследования находится на Полярном Урале, к востоку от массива Рай-Из. Подстилающие породы горной долины и прилегающих вершин принадлежат лангот-юганской свите, состоящей из толщи переслаивания черных, серых, зеленовато-серых и ярко-зеленых сланцев с прослоями и линзами кварцитов и известняков, с выходящими местами гранитами, вершина горы сложена из диоритов и габбро [7].

Для климатической характеристики района исследования использовались данные двух ближайших метеостанций. Одна из них – станция Рай-Из – высокогорная, расположенная на высоте 895 м над ур.м. (66.90 с.ш. 65.67 в.д., период наблюдений 1940–1997 гг.), находящаяся в 5 км от точек сбора образцов, но больше подходящая для характеристики климата на вершинах гор. Вторая – станция Салехард (66.50 с.ш. 66.68 в.д. 15 м над ур.м., период наблюдений 1882–2016 гг.), расположенная в пойме р. Обь, находится в 50 км от района исследования и характеризует климатические условия Западной Сибири [30]. В анализе использовали данные по среднемесячным температурам воздуха, сумме осадков и высоте снежного покрова с 11-летним сглаживанием.

Климатические условия на восточном макросклоне Полярного Урала в целом носят континентальный характер. На формирование температурного режима большое влияние оказывают воздушные массы континентального типа. Средняя многолетняя температура здесь составляет -6.8 – -7.8°C . Самым холодным месяцем является январь. По данным метеостанции Рай-Из средняя месячная температура -19.1°C , а по данным метеостанции Салехард -26°C . Самый теплый месяц – июль: $+8.5^{\circ}\text{C}$ (Рай-Из), $+14.3^{\circ}\text{C}$ (Салехард). Переход средней температуры воздуха через 5°C осуществляется к концу июня. Летом случается жаркая погода с температурой выше $+20^{\circ}\text{C}$, периоды эти обычно длятся не более недели. Показателем суровости климата является короткий вегетационный сезон, прерываемый заморозками. В среднем, поздние весенние заморозки наблюдаются 3 июля, самая поздняя дата наступления последнего заморозка – 20 июля. Она же является одной из самых ранних дат наступления первых осенних заморозков. Разреженность воздуха влечет за собой повышенную интенсивность теплоотдачи и резкие суточные колебания температур. В летние месяцы преобладают ветры северного и северо-восточного направления из-за более высокого давления воздуха над Карским морем. Зимой преобладают южные и юго-западные ветры. Годовое количество осад-

ков — 400 мм, высота снежного покрова в среднем достигает 1.2 м, продолжительность снежного периода — около 200 дней. Протаивание вечной мерзлоты в летний период составляет до 0.5–1 м [5, 8].

Экологический профиль находится на склоне юго-западной экспозиции и спускается к пойме р. Собь (рис. 1). На верхнем высотном уровне (66.90 с.ш. 65.76 в.д.) на пологой террасе крутизной 4–5° на высоте 250 м над ур.м. заложена пробная площадь, где лиственница произрастает совместно с елью. Микрорельеф хорошо выражен. Имеется много заросших каменно-земляных пятен (до 30% территории) в виде плоских возвышений и впадин. Характерны дерновые почвы и подбуры. Режим увлажнения почвы переходный между свежим и сухим. Деревья относительно молодые. Средняя высота лиственницы составила 5–6 м, средний диаметр 5–6 см, у ели высота 4–5 м, а диаметр около 10 см. Отдельные деревья лиственницы формируют верхнюю границу распространения деревьев, а ель произрастает несколько ниже лиственницы по сырым местам. Кустарниковый ярус состоит из березы карликовой, багульника болотного и различных ив. По 100 шт. образцов (керны или спилы) с деревьев лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) собрано на высоте 0.3–0.5 м.

Второй уровень находится в горной долине, в 500 м от русла р. Собь, (66.90 с.ш.; 65.74 в.д., 80 м над ур.м.). Перепад высот над уровнем моря между верхней границей леса и дном горной долины составляет всего 150 м, следовательно, расчетная разность температур между этими двумя местообитаниями составляет 0.9°C (0.6°C на каждые 100 м высоты). Выбранное местообитание представляет собой длинную (2 км) полосу ерничово-зеленомошного лиственнично-елового редколесья. Микрорельеф хорошо выражен, образован кочками, на которых произрастают деревья. По характеру увлажнения этот склон представляет собой свежее местообитание. Почва представлена каменистыми маломощными подбурами. Старые деревья лиственницы и ели сибирской были вырублены во время строительства железной дороги в период с 1947 по 1950 г. Наряду с молодыми деревьями единично встречаются старые возрастом около 200 лет. Средняя высота лиственниц 5–6 м, средний диаметр — 10 см. Средняя высота елей 6–8 м, диаметр около 15 см. В понижениях произрастают береза карликовая и багульник болотный. Покров травяно-кустарничкового яруса достигает 50%. Здесь также собрано по 100 шт. образцов с деревьев лиственницы и ели на высоте пня (0.3–0.5 м).

Годичные кольца образцов древесины были измерены с использованием программы TSAP 3.0

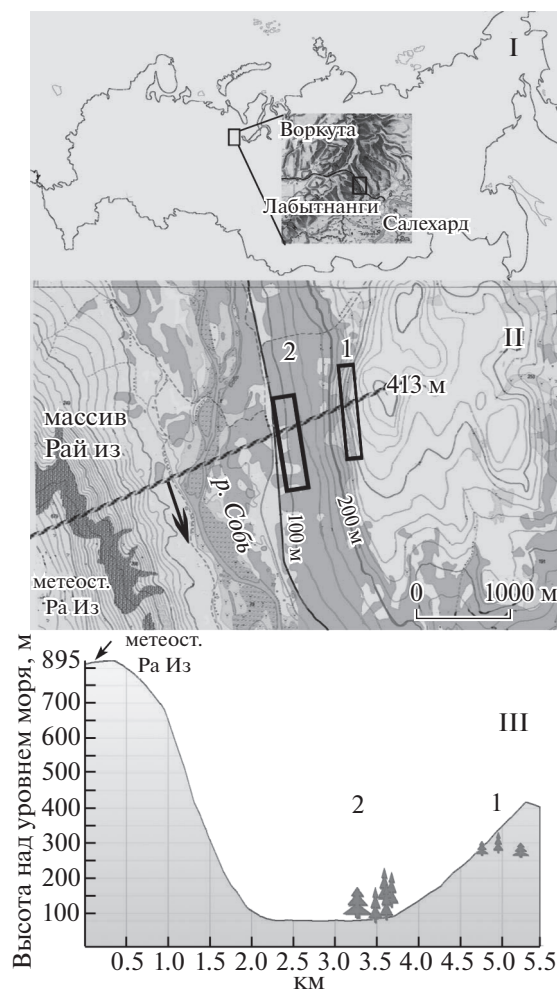


Рис. 1. План-схема района исследования и расположения пробных площадей. I — район исследования. II — топографическая карта местности. Заливка темным серым — распространение деревьев. Штрихованная линия показывает линию разреза профиля рельефа. III — профиль рельефа. 1 — верхняя граница леса, 2 — дно горной долины.

[29], а полученные индивидуальные серии перекрестно датированы с использованием программы COFESNA [23].

На верхней границе леса длина древесно-кольцевой хронологии получилась 280 лет по лиственнице и 160 лет по ели, а количество проанализированных колец 9680 шт. у лиственницы и 5950 шт. у ели. Длина хронологий у деревьев, произрастающих на дне горной долины, составила 160 лет у лиственницы и 150 лет у ели, всего проанализировано около 7370 шт. и 6480 шт. колец соответственно. Последнее массовое поколение хвойных деревьев появилось здесь в середине XX в., в период строительства железной дороги. В анализе был использован период 1900–2016 гг., этот период обеспечен наибольшим количеством колец на каждый год.

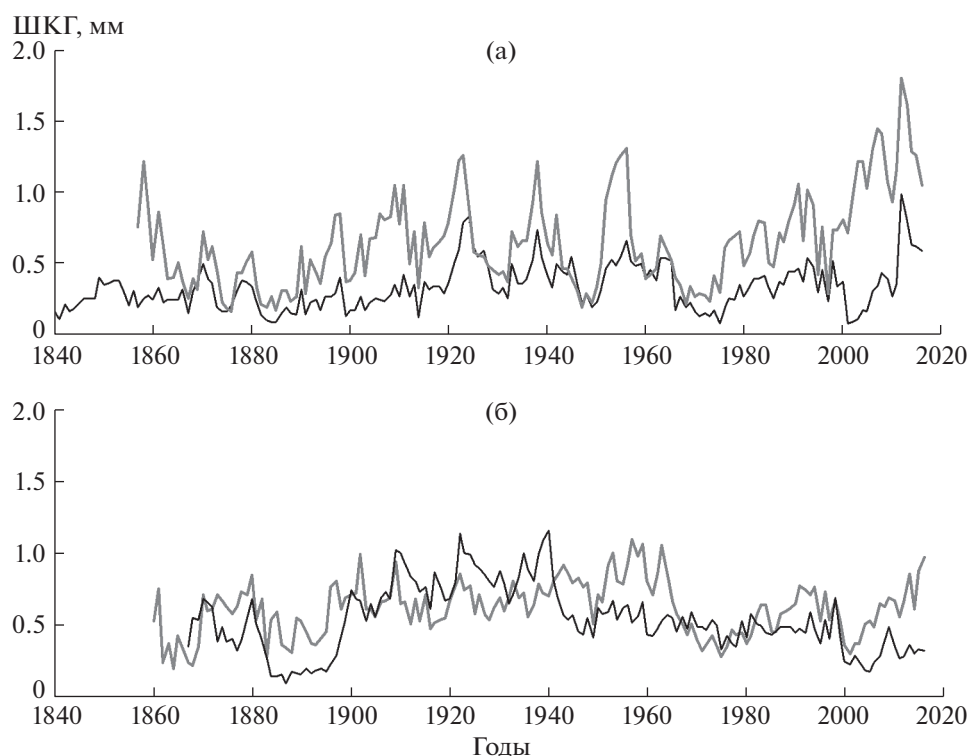


Рис. 2. Древесно-кольцевые хронологии по ширине годичного кольца. а — Лиственница, б — Ель. Черный — верхняя граница леса, серый — дно горной долины.

Морозобойные кольца визуально выявляли под микроскопом на хорошо зачищенной поверхности кернов. Положение повреждения фиксировалось в ранней (РД) или в поздней древесине (ПД). Период чувствительности годичных колец деревьев к заморозку определяли как камбиальный возраст, когда формирование повреждений сокращалось на 90%. Этот возраст соответствует возрасту линейной связи между формированием повреждений и возрастом [20]. Затем были построены хронологии морозобойных повреждений с учетом положения в РД и ПД на основе процента поврежденных колец от общего количества чувствительных к заморозку колец [18].

Результаты. Древесно-кольцевые хронологии. У деревьев с верхней границы леса средняя ширина колец составила 0.33, а максимальная — 3 мм у обоих видов. У деревьев, произрастающих на дне горной долины, ширина годичных колец составила 1 мм у лиственницы и 0.8 мм у ели, с максимальными значениями у некоторых индивидуальных серий до 5 мм у обоих видов (рис. 2).

На верхней границе леса коэффициенты корреляции у лиственницы и ели между сериями составили 0.63 и 0.69 соответственно, а коэффициенты чувствительности 0.42 и 0.46. Корреляция между лиственничной и еловой хронологиями составила 0.27.

Для хронологий на днище горной долины характерны высокие межсерийные коэффициенты корреляции (0.69 у ели и 0.62 у лиственницы), а чувствительность составила 0.37 и 0.33 соответственно. Межвидовая корреляция древесно-кольцевых хронологий составила 0.26.

Гораздо более высокие коэффициенты корреляции получены между хронологиями одного вида, произрастающего в верхней и нижней части склона. У лиственницы он составляет 0.56 и у ели 0.3.

Морозобойные повреждения. В древесине ели и лиственницы, произрастающих на Полярном Урале, выявлены морозобойные кольца. Повреждения, локализованные в начале ранней древесины, не имеют темного слоя погибших клеток, а повреждения, расположенные в других частях кольца, имеют этот слой. Слой деформированных восстанавливающихся трахеид в основном состоит из 2–3 слоев клеток (рис. 3).

На верхней границе леса лиственница чувствительна к заморозкам первые 35 лет, а ель — 30 лет. На дне горной долины у лиственницы возраст чувствительности, когда повреждаемость колец к заморозкам снижается на 90%, составляет всего 15 лет, а у ели — 20 лет. Все последующие расчеты для построения хронологий были проведены на основе этих данных. Максимальный воз-

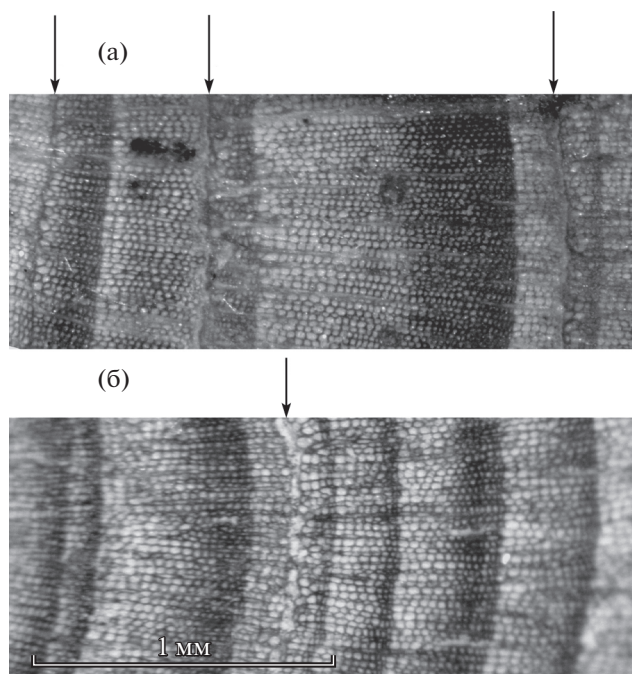


Рис. 3. Морозобойные кольца у ели (а) и лиственницы (б), произрастающих в горной долине. Стрелка указывает на морозобойное повреждение. Увеличение $\times 80$.

раст, когда формирование повреждений полностью прекращается, это 50 лет у лиственницы и 59 лет у ели на верхней границе, а на дне горной долины — 16 и 36 лет соответственно (рис. 4).

У лиственницы на верхней границе леса повреждения образуются с частотой 0.12 в РД и 0.03 в ПД, в среднем повреждается 10–15% колец от общего числа колец в отдельный год. Частота формирования повреждений на верхней границе леса у ели гораздо меньше — в три раза в РД по сравнению с лиственницей, произрастающей здесь же, и примерно столько же в ПД. Процент поврежденных колец в зависимости от общего числа в отдельный год достигает 10. На дне горной долины у лиственницы повреждения формируются чаще, по сравнению с верхней границей, особенно в ПД, количество поврежденных колец в среднем составляет 25% в РД и 16% в ПД. У ели частота формирования повреждений на дне горной долины самая высокая из всех изученных местообитаний, количество лет, когда формируются повреждения в РД или ПД, примерно одинаково, а количество поврежденных колец составляет в среднем от 30% в РД до 24% в ПД (табл. 1).

Распределение морозобойных повреждений во времени приурочено к определенным временным периодам. У лиственницы на верхней границе леса эти периоды составляют 1930–1940 и 1980–2000 гг., в эти периоды частота формирования повреждений составляет в РД 0.15/0.2 и в ПД

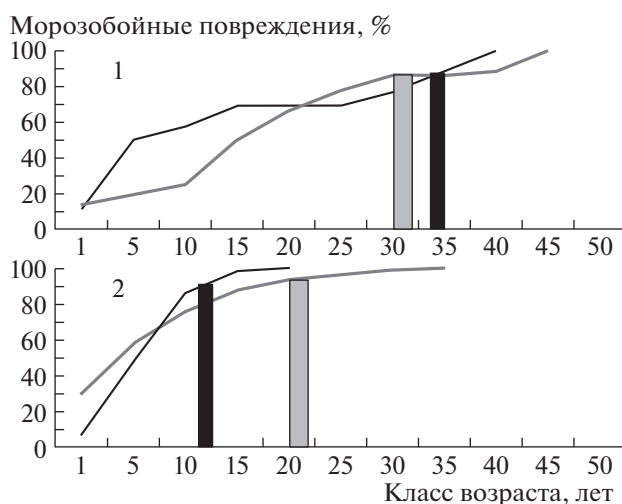


Рис. 4. Интегральные кривые уменьшения возраста чувствительности годовичных колец к заморозкам. 1 — верхняя граница леса, 2 — дно горной долины. Черный цвет — лиственница, серый — ель. Вертикальные столбцы — возраст, когда образование повреждений уменьшается на 90%.

0.05/0.03 соответственно, а процент поврежденных колец составляет в среднем в РД 10/25% и в ПД 10/15%. У ели, произрастающей здесь же, выделить какие-либо периоды затруднительно.

На дне горной долины у лиственницы выделяются также два периода: 1930–1950 и 1980–2000 гг. В эти периоды частота формирования повреждений составляет в РД 0.25/0.25 и в ПД 0.25/0.35, а процент поврежденных колец в среднем в РД 19/37% и в ПД 17/10%. У ели, напротив, формирование морозобойных повреждений становится массовым по сравнению с деревьями на верхнем пределе распространения и по сравнению с лиственницей. В хронологии морозобойных повреждений ели можно выделить периоды 1910–1920, 1940–1960 и 1990–2010 гг. В эти периоды частота формирования морозобойных повреждений составляет в РД 0.23/0.43/0.23, а в ПД 0.26/0.33/0.23. Количество поврежденных колец составляет в среднем по выделенным периодам в РД 22/40/40%

Таблица 1. Частота формирования морозобойных повреждений и процент поврежденных колец от общего числа колец в отдельно взятый год за период 1900–2016 гг.

ПП	Вид	Лиственница		Ель	
	Зона кольца	РД	ПД	РД	ПД
ВГЛ	частота	0.12	0.03	0.04	0.04
	% колец	15	10	10	10
Дно	частота	0.10	0.15	0.24	0.22
	% колец	25	16	30	24

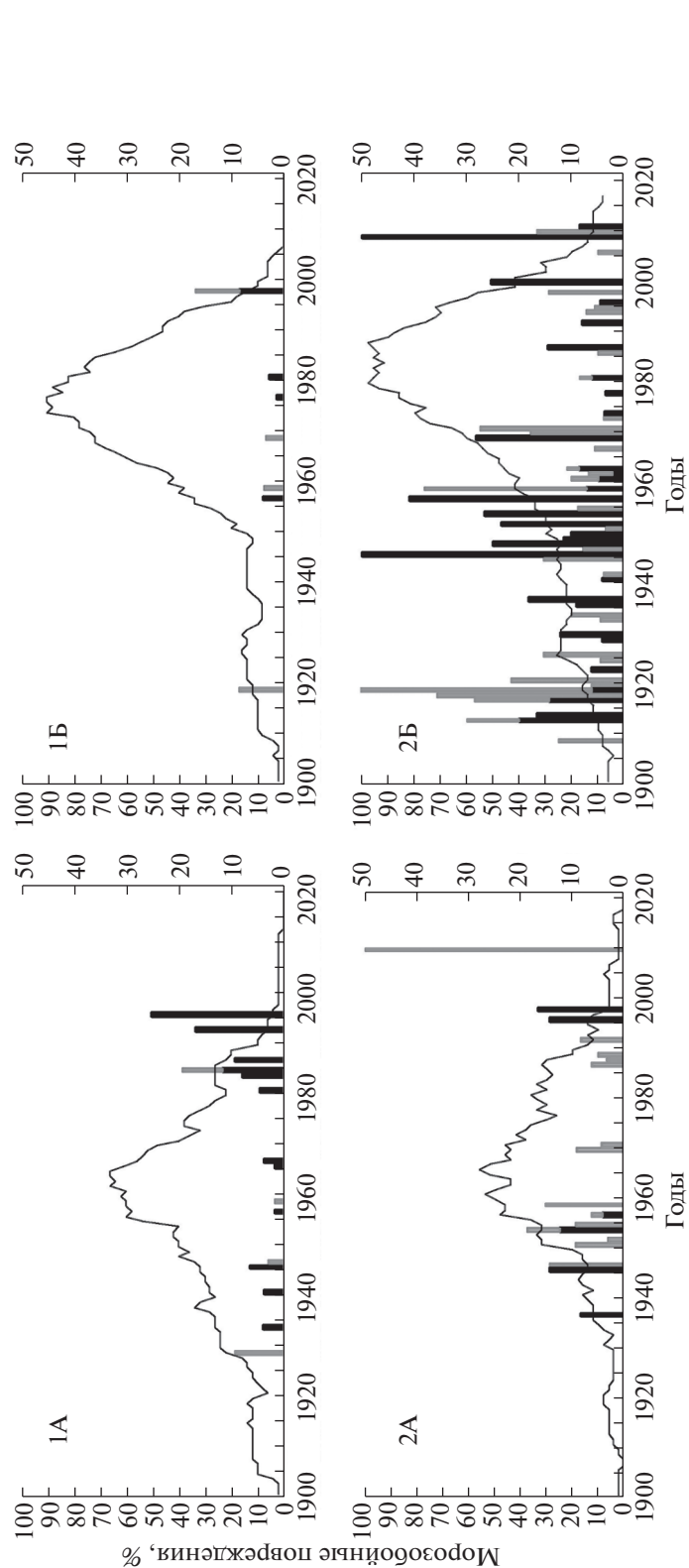


Рис. 5. Хронологии морозобойных повреждений. 1 — верхняя граница леса, 2 — дно горной долины. а — лиственница, б — ель. Столбцы черные — РД, серые — ПД, линия — количество деревьев.

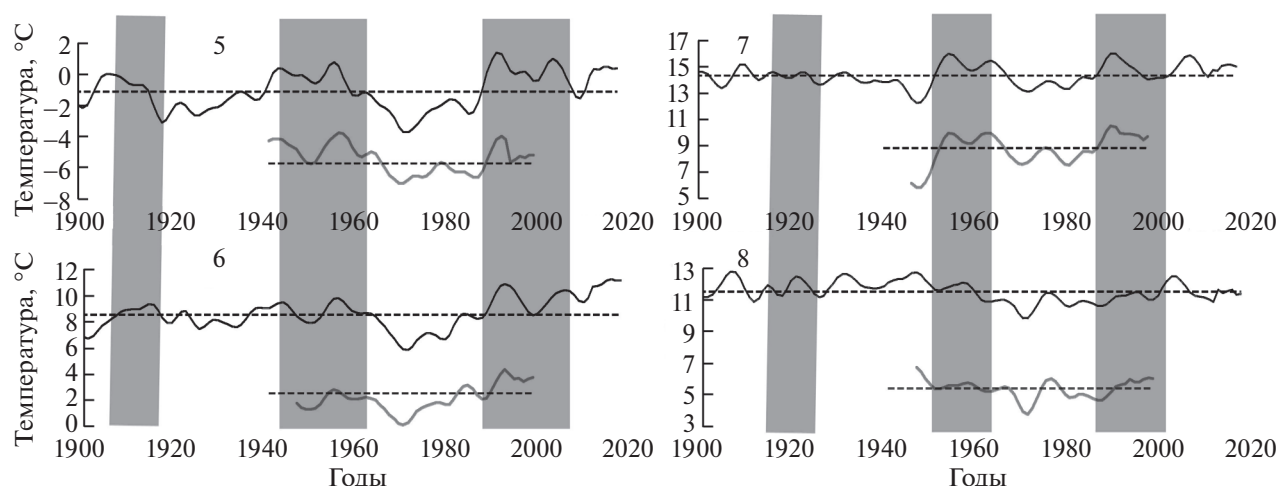


Рис. 6. Сглаженные средние месячные температуры метеорологических станций Салехард (черная линия) и Ра-Из (серая линия), среднее многолетнее значение — пунктирная линия. 5, 6, 7, 8 — месяцы года.

и в ПД 39/21/15%. В период 1960–1980 гг. наблюдается массовое появление на высоте 0.3–0.5 м молодых стволиков, а частота и интенсивность формирования морозобойных повреждений существенно уменьшаются (рис. 5).

Таким образом, два периода 1930–1960 и 1980–2010 гг. выражены у обоих видов, произрастающих в горной долине, а у ели выделяется еще дополнительный период с 1910–1920 гг. Сравнение с климатическими данными показывает, что периоды частого формирования морозобойных повреждений в РД характеризуются теплыми летними месяцами (май и июнь). В ПД эта закономерность не так выражена, морозобойные повреждения формируются в конце теплых периодов в июле и августе (рис. 6).

Период массового достижения стволиками высоты 0.3–0.5 м и с отсутствием морозобойных повреждений (1960–1990 гг.) отличается холодными климатическими условиями (см. рис. 6). Кроме этого, по данным станции Салехард, в период 1966–1986 гг. высота снежного покрова в мае больше средних многолетних значений (рис. 7). С осадками мая–августа каких-либо закономерностей в частоте и интенсивности формирования морозобойных повреждений не выявлено.

Выявлены годы с массовым формированием повреждений у хвойных деревьев (больше средних значений для каждого местообитания). На верхней границе леса в древесине лиственницы это 1945, 1983, 1984, 1986, 1992, 1995 г. в РД и 1928, 1984 г. в ПД. У ели повреждения образуются в другие годы: в 1956, 1980, 1997 г. в РД и в 1918, 1958, 1968, 1997 г. в ПД. На дне горной долины в древесине лиственницы повреждения образуются массово в 1936, 1945, 1995, 1997 г. в РД и в 1946, 1950, 1954, 1958, 1969, 2009 г. в ПД. У ели в 1912,

1913, 1936, 1945, 1947, 1951, 1953, 1956, 1968, 1997, 1999, 2008 г. в РД и в 1916, 1917, 1918, 1920, 1925, 1944, 1958, 1969, 1970, 1997, 2009 г. в ПД.

Общими годами можно назвать 1945, 1958, 1997 г., когда морозобойные повреждения выявлены минимум на трех местообитаниях. В 1945 г. морозобойное повреждение локализуется в РД, в этом году май и июнь были очень теплыми, заморозки были в июне. В 1958 и 1997 г. повреждения найдены в ПД, эти годы находятся в конце теплых периодов, а эти два года характеризовались низкой температурой июля в рассматриваемый период.

У деревьев, произрастающих на верхней границе леса, найдены морозобойные повреждения, сформировавшиеся в наиболее удаленных от центра ствола кольцах (у старых деревьев обоих видов). В кольцах 1995 и 1997 г. повреждения лока-

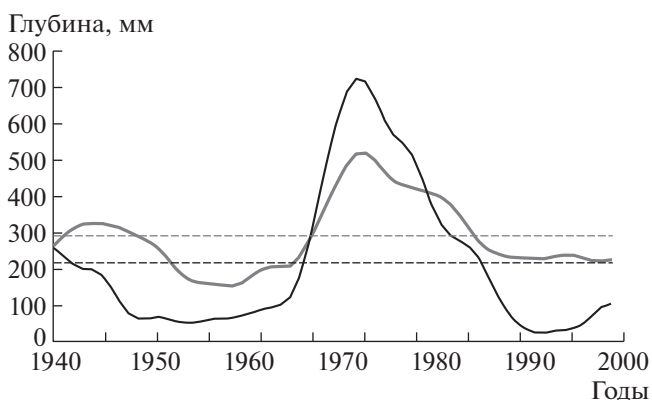


Рис. 7. Сглаженные значения высоты снежного покрова в мае (черная линия) и годовой высоты (серая линия) по данным метеостанции Салехард. Пунктирная линия — средние многолетние значения.

лизуются во второй половине РД, в 1958 г. повреждения выявлены в ПД. На дне горной долины наиболее старые деревья лиственницы и ели имеют повреждения во второй половине РД в 1997 г., и в ПД в 1970 г.

Обсуждение. На Полярном Урале на верхней границе леса деревья имеют более узкие годовичные кольца, что указывает на более суровые условия произрастания деревьев по сравнению с дном горной долины. Узкие кольца формируются в результате низкой скорости годовичного прироста из-за более короткого вегетационного сезона и более низкой температуры в течение вегетации. Таким образом, расчетные различия температуры на 0.9°C между двумя местообитаниями ведут к двух-трехкратному различию в годовичном приросте.

Более высокие коэффициенты корреляции и чувствительности древесно-кольцевых хронологий подтверждают, что климатические условия произрастания на верхнем пределе распространения лиственницы и ели более суровые по сравнению с дном горной долины. Хорошая корреляция и синхронность между индивидуальными сериями и еловой, и лиственничной хронологиями указывают на воздействие общего лимитирующего фактора в районе исследования на верхней границе и на дне горной долины.

Чувствительность хвойных деревьев к заморозкам, произрастающих на верхней границе леса, сохраняется дольше по сравнению с горной долиной. Это обусловлено теплоемкостью ствола, которая является одним из физических факторов, способствующих поддержанию внутренней температуры ствола и защищающей от заморозков [4]. Увеличение толщины ствола происходит в два-три раза медленнее по сравнению с деревьями из горной долины, следовательно, деревья на верхней границе распространения более уязвимы к действию повреждающих температур. Данные по максимальному возрасту и возрасту линейной чувствительности растущих клеток ксилемы подтверждают это предположение.

Выявленные различия в частоте морозобойных повреждений между видами на верхней границе леса связаны с экологическими условиями их произрастания. Ель, как требовательный к влаге и температуре воздуха вид, растет в более снежных местообитаниях и начинает вегетационный период несколько позже, когда средняя температура воздуха становится выше $+4.8^{\circ}\text{C}$, а лиственница — при температуре $+3.8^{\circ}\text{C}$ [6]. Различия в дате начала активного роста подтверждают полученные различия в частоте и интенсивности повреждений в РД. Частота формирования повреждений в ПД не связана с датой начала вегетации и поэтому примерно одинакова у обоих видов.

На верхней границе леса частота формирования повреждений в РД выше, чем в ПД в оба теплых периода мая—июня. Обычно в горах и на Полярном Урале, в частности, существует явление инверсии, когда холодный воздух стекает вниз по склону и застаивается в межгорных долинах и котловинах, а на верхней границе леса заморозки в результате стока холодного воздуха должны наблюдаться реже. Следовательно, заморозки высоко в горах должны быть достаточно сильными и продолжительными (адвективными), чтобы повредить растущие клетки ксилемы. Более длительный возраст чувствительности деревьев к заморозкам на верхней границе леса по сравнению с дном горной долины может быть также обусловлен не только толщиной ствола, но и сильными заморозками адвективной природы [3, 11].

На дне горной долины происходит скопление холодного воздуха, который повреждает деревья, но вследствие более благоприятных условий произрастания, таких как более высокая температура воздуха и более длительный вегетационный период, толщина ствола по диаметру увеличивается в два-три раза быстрее по сравнению с деревьями с верхней границы леса. Более толстые стволы имеют более высокую теплоемкость, и устойчивость к повреждающим температурам будет наступать быстрее.

В долгосрочной перспективе увеличение частоты заморозков в течение вегетации в последнее время наблюдается повсеместно, например, в период 1980—2012 гг. частота заморозков составила 0.21, а в предшествующий период 1889—1979 гг. — 0.03 [13]. Данное исследование показывает, что не только в последний теплый период, но и в любой другой климатически теплый период мая и июня частота условий, приводящих к формированию морозобойных повреждений в РД у хвойных деревьев на Полярном Урале, увеличивается с 0.03 до 0.2—0.25 (каждый четвертый-пятый год).

Известно, что происходит уменьшение морозостойкости растений в зимний период при потеплении климата [16, 22]. В течение вегетационного сезона приуроченность высокой частоты формирования морозобойных повреждений РД к теплым климатическим периодам связана с ранним началом и, таким образом, увеличением продолжительности вегетации. Теплый май будет способствовать раннему снеготаянию и, в дальнейшем, более быстрому и раннему прогреву почвы и раннему началу камбиальной активности. Сравнение данных по снегу показывает, что более важным является именно высота снежного покрова в мае, а не общая годовая величина высоты снега.

В начале июня наблюдается возврат повреждающих температур, как результат глобальной атмосферной циркуляции, что ведет к регистрации

поздних весенних заморозков в виде морозобойных повреждений в РД. Влияние теплых температур до начала периода вегетации на повреждаемость поздними весенними заморозками листьев, бутонов и формирование морозобойных повреждений в зависимости от фенологической фазы было отмечено и раньше [12, 13]. В более холодные климатические периоды (холодный май—июнь) вероятность быть поврежденными снижается из-за задержки начала вегетации.

Во второй половине вегетации формирование повреждений в ПД происходит в периоды нисходящей ветви теплого климатического цикла. Это связано, скорее всего, с локальной циркуляцией воздуха и с увеличением частоты радиационных заморозков в конце июля и в августе. Изменения частоты заморозков во второй половине вегетации в большей степени зависят от суточной изменчивости температуры, чем от общих температурных трендов.

Годы с наиболее сильными заморозками в изучаемой горной долине были в 1945, 1958, 1970 и 1997 г. Эти годы отмечены и для прилегающего района Западной Сибири [18], но не как самые экстремальные. Таким образом, несмотря на близкое положение района исследования к Западной Сибири (40–50 км), распределение экстремальных погодных и климатических явлений, зарегистрированных в виде морозобойных повреждений, происходит по-разному.

Хорошее возобновление лиственницы и ели на дне горной долины в период 1960–1990 гг. можно объяснить интенсивными рубками вдоль всего железнодорожного полотна в период стройки железной дороги (1940–1950 гг.). В это время могли появиться новые территории для появления всходов. Сложнее интерпретировать процессы интенсивного возобновления, происходящие на верхней границе леса. Здесь наблюдается продвижение верхней границы леса вверх. В предшествующий теплый период май—июнь 1940–1960 гг. было накоплено достаточное количество семенного материала, всходов и сеянцев, которые достигли высоты 0.3–0.5 м в период 1960–1990 гг. и были учтены в текущем анализе. Однако такого же интенсивного возобновления или продвижения верхней границы леса вверх и появления молодого поколения не наблюдается в районе исследования после теплого периода 1985–2000 гг. Возможно, на интенсивное возобновление леса на верхней границе в период 1940–1960 гг. повлияла еще и небольшая высота снежного покрова в мае, косвенным образом способствующая более быстрому прогреву почвы и более раннему началу вегетации.

Таким образом, потепление климата ведет, с одной стороны, к увеличению прироста и возобновления деревьев, а с другой стороны, увеличивает частоту экстремальных климатических и погодных явлений и, следовательно, повреждае-

мость деревьев, что может негативно сказываться на процессах роста и возобновления.

Заключение. В горах Полярного Урала формируются морозобойные повреждения у хвойных деревьев, произрастающих как на верхней границе леса, так и на дне горной долины. Частота и интенсивность образования повреждений выше на дне горной долины по сравнению с верхней границей распространения леса. У лиственницы на верхней границе леса повреждения формируются чаще по сравнению с елью, а на дне горной долины, наоборот, в древесине ели частота и интенсивность повреждений выше по сравнению с лиственницей. Существует повышенный риск повреждений хвойных деревьев заморозками в связи с потеплением климата на Полярном Урале.

Благодарности. Автор благодарит В.С. Мазепу за ценные советы при написании рукописи. Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 14-04-91356 и 15-04-04933 и программы УрО РАН № 15-2-4-22.

Acknowledgments. The author is grateful to V.S. Mazepa for valuable advices. This work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects no. 14-04-91356 and 15-04-04933 and the program of the UrB RAS no. 15-2-4-22.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барри Р.Г. Погода и климат в горах. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 312 с.
2. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике // Новосибирск: СО РАН, 1996. 246 с.
3. Гольцберг И.А. Агроклиматическая характеристика заморозков в СССР и методы борьбы с ними. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 217 с.
4. Гурская М.А., Шиятов С.Г. Распределение морозобойных колец в древесине хвойных деревьев // Экология. 2006. № 1. С. 1–8.
5. Климат России / ред. Н.В. Кобышева. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 655 с.
6. Медведева М.А., Барталёв С.А., Лупян Е.А. и др. Возможности оценки момента наступления вегетационного сезона на основе спутниковых и метеорологических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2008. № 5. С. 313–321.
7. Раaben М.Е. Стратиграфия древних свит Полярного Урала // Стратиграфия и тектоническое строение северной оконечности Приполярного Урала. М.: ГИН АН СССР, 1959. 131 с.
8. Урал и Приуралье: Природные условия и естественные ресурсы СССР // М.: Наука, 1968. 460 с.
9. Хантемиров Р.М., Горланова Л.А., Шиятов С.Г. Патологические структуры в годичных кольцах можжевельника сибирского (*Juniperus sibirica* Burgsd.) и их использование для реконструкции экстремальных климатических событий // Экология. 2000. № 3. С. 185–192.

10. Хромов С.П. Метеорология и климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 456 с.
11. Чудновский А.Ф. Заморозки. Л.: Гидрометеиздат, 1949. 124 с.
12. Augspurger C.K. Frost damage and cascading negative effects on *Aesculus glabra* // Plant Ecology. 2011. № 212. P. 1193–1203.
13. Augspurger C.K. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: spring damage risk is increasing // Ecology. 2013. № 94(1). P. 41–50.
14. Briffa K., Jones P., Schweingruber F., Osborn T. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the last 600 years // Nature. 1998. № 393. P. 450–455.
15. Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Jones Ph.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 2. Spatio-temporal variability and associated climate patterns // The Holocene. 2002. № 12(6). P. 759–789.
16. Cannell M.G.R. Analysis of risks of frost damage to forest trees in Britain. In Crop Physiology of Forest Trees / Tigerstedt P.M.A., Tigerstedt M.A., Puttonen P., and Koski V. (Ed). Helsinki: Helsinki Univ. Press, 1985. P. 153–166.
17. Glerum C., Farrar J.L. Frost ring formation in the stem of some coniferous species // Canad. J. Bot. 1966. № 44(7). P. 879–886.
18. Gurskaya M.A. Temperature Conditions of the Formation of Frost Damages in Conifer Trees in the High Latitudes of Western Siberia // Biology Bulletin. 2014. № 41(2). P. 187–196.
19. Gurskaya M.A., Shiyatov S.G. Formation of Two Xylem Frost injuries in One Annual Ring in Siberian spruce under Conditions of Western Siberian forest-tundra // Russian J. of Ecology. 2002. № 33(2). P. 73–79.
20. Gurskaya M., Moiseev P., Wilmsking M. Does slope exposure affect frost ring formation in *Picea obovata* growing at treeline in the Southern Urals? // Silva fennica. 2016. № 3. 1560 p.
21. Fillion L., Payette S., Gauthier L., Boutin Y. Light rings in sub-arctic conifers as a dendrochronological tool // Quat. Res. 1986. № 26. P. 272–279.
22. Hänninen H. Climate warming and the risk of frost damage to boreal forest trees: identification of critical ecophysiological traits // Tree Physiology. 2006. № 26. P. 889–898.
23. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bulletin. 1983. № 43. P. 69–78.
24. Inouye D.W. The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change // Ecology Letters. 2000. № 3. P. 457–463.
25. 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 / Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Yu., Bex V., and Midgley B.M. (Ed). Cambridge, New York: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
26. IPCC-2012 SREX Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.-K., Allen S.K., Tignor M., and Midgley M. (Ed). Cambridge, New York: Cambridge Univ. Press. 2012. P. 1–19.
27. LaMarch V.C., Hirschboeck K.K. Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions // Nature. 1984 307. P. 121–126.
28. Marchand N., Fillion L. False rings in the white pine (*Pinus strobus*) of the Outaouais Hills, Québec (Canada), as indicators of water stress // Can. J. For. Res. 2012. № 42. P. 12–22.
29. Rinn F. TSAP Time Series Analysis and Presentation. Ver. 3.0. Reference Manual. Heidelberg, 1996. 262 p.
30. URL. www.meteo.ru.

Formation of Frost Damages in Coniferous Trees in Different Climatic Periods on the Polar Ural Mountains

M. A. Gurskaya

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

e-mail: mgurskaya@yandex.ru

Received August 01, 2017

Accepted July 27, 2018

Frequency of recurrence, intensity and spatio-temporal distribution of frost damage in larch and spruce growing on the same southwest exposed slope at the upper tree-line and at the bottom of the mountain valley in the Polar Ural Mountains were studied with aim to reveal the dynamics of their formation in different climatic periods over the last 100 years. At the upper tree-line damages form more often in larch than in spruce, but at the bottom of the valley, on the contrary, damages form two-three times less frequently in larch than in spruce in the same climatic periods. The high frequency of damage formation in early wood is confined with warm climatic periods with early start of vegetation and low May snow depth. The most extreme years have been identified, when a large number of trees are damaged. The difference in frequency of frost damage formation with West Siberian has shown. Risk of a damage of coniferous trees by late spring frosts due to recent climate changes in the Polar Urals is increased.

Keywords: frost damage, Polar Urals, larch, spruce, frost, tree-ring chronologies.

REFERENCES

- Barri R.G. *Pogoda i klimat v gorakh* [Mountain Weather and Climate]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1984. 312 p.
- Vaganov Ye.A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S. *Dendroklimaticheskie issledovaniya v Uralo-Sibirskoi Subarktike* [Dendroclimatic Studies in the Ural-Siberian Subarctic]. Novosibirsk: SO RAN Publ., 1996. 246 p.
- Gol'tsberg I.A. *Agroklimaticheskaya kharakteristika zamorozkov v SSSR i metody bor'by s nimi* [Agroclimatic Characteristics of Frosts in the USSR and Methods of Their Control]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1961. 217 p.
- Gurskaya M.A., Shiyatov S.G. Distribution of frost rings in coniferous trees. *Russ. J. Ecol.*, 2006, no. 1, pp. 1–8. (In Russ.).
- Klimat Rossii* [Climate of Russia]. Kobysheva N.V., Ed. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 2001. 655 p.
- Medvedeva M.A., Bartalev S.A., Lupyan Ye.A. et. al. Opportunities forestations of vegetation period based on satellite and meteorological data. *Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2008, no. 5, pp. 313–321. (In Russ.).
- Raaben M.E. *Stratigrafiya drevnikh svit Polyarnogo Urala. Stratigrafiya i tektonicheskoe stroenie severnoi okonechnosti Pripolyarnogo Urala* [Stratigraphy of the Ancient Formations of the Polar Urals. Stratigraphy and Tectonic Structure of the Northern Extremity of the Subpolar Urals]. Moscow: GIN AN SSSR Publ., 1959. 131 p.
- Ural and Priural'e: Prirodnye usloviya i estestvennye resursy SSSR* [The Urals and the Pre-Urals: Natural Conditions and Natural Resources in the USSR]. Moscow: Nauka Publ., 1968. 460 p.
- Khantemirov R.M., Gorlanova L.A., Shiyatov S.G. Pathological structures of Juniper (*Juniperus sibirica* Burgsd.) and their using for climate extreme events reconstructions. *Russ. J. Ecol.*, 2000, no. 3, pp. 185–192. (In Russ.).
- Khromov S.P. *Meteorologiya i klimatologiya* [Meteorology and Climatology]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1968. 456 p.
- Chudnovskii A.F. *Zamorozki* [Frosts]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1949. 124 p.
- Augspurger C.K. Frost damage and cascading negative effects on *Aesculus glabra*. *Plant Ecol.*, 2011, no. 212, pp. 1193–1203.
- Augspurger C.K. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: spring damage risk is increasing. *Ecology*, 2013, no. 94 (1), pp. 41–50.
- Briffa K., Jones P., Schweingruber F., Osborn T. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the last 600 years. *Nature*, 1998, no. 393, pp. 450–455.
- Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Jones Ph.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 2, spatial-temporal variability and associated climate patterns. *The Holocene*, 2002, no. 12(6), pp. 759–789.
- Cannell M.G.R. Analysis of risks of frost damage to forest trees in Britain. In *Crop Physiology of Forest Trees*. Tigerstedt P.M.A., Puttonen P., and Koski V., Eds. Helsinki: Helsinki Univ. Press, 1985, pp. 153–166.
- Glerum C., Farrar J.L. Frost ring formation in the stem of some coniferous species. *Canad. J. Bot.*, 1966, no. 44 (7), pp. 879–886.
- Gurskaya M.A. Temperature conditions of the formation of frost damages in conifer trees in the high latitudes of Western Siberia. *Biol. Bull.*, 2014, no. 41(2), pp. 187–196.
- Gurskaya M.A., Shiyatov S.G. Formation of Two Xylem Frost injuries in One Annual Ring in Siberian spruce under Conditions of Western Siberian forest-tundra. *Russ. J. Ecol.*, 2002, no. 33(2), pp. 73–79.
- Gurskaya M., Moiseev P., Wilmking M. Does slope exposure affect frost ring formation in *Picea obovata* growing at treeline in the Southern Urals? *Silva Fennica*, 2016, vol. 50, no. 3, id 1560.
- Filion L., Payette S., Gauthier L., Boutin Y. Light rings in sub-arctic conifers as a dendrochronological tool. *Quat. Res.*, 1986, no. 26, pp. 272–279.
- Hänninen H. Climate warming and the risk of frost damage to boreal forest trees: identification of critical ecophysiological traits. *Tree Physiol.*, 2006, no. 26, pp. 889–898.
- Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.*, 1983, no. 43, pp. 69–78.
- Inouye D.W. 2000. The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change. *Ecol. Lett.*, 2000, no. 3, pp. 457–463.
- 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. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Yu., Bex V., and Midgley B.M., Eds. Cambridge, New York: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
- IPCC-2012 SREX Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.-K., Allen S.K., Tignor M., and Midgley M., Eds. Cambridge, New York: Cambridge Univ. Press, 2012, pp. 1–19.
- LaMarch V.C., Hirschboeck K.K. Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions. *Nature*, 1984, no. 307, pp. 121–126.
- Marchand N., Filion L. False rings in the white pine (*Pinus strobus*) of the Outaouais Hills, Québec (Canada), as indicators of water stress. *Canad. J. For. Res.*, 2012, no. 42, pp. 12–22.
- Rinn F. *TSAP Time Series Analysis and Presentation. Version 3.0. Reference Manual*. Heidelberg, 1996. 262 p.
- Available at: www.meteo.ru (accessed 13.09.2018).