

УДК 630х11:582.47(571.51/.52)

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ ХВОЙНЫХ ПОРОД В СРЕДНЕЙ СИБИРИ С 1960 г.<sup>1</sup>

© 2021 г. И. В. Тихонова<sup>а, \*</sup>, М. А. Корец<sup>б, с</sup>

<sup>а</sup>Западно-Сибирское отделение Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – филиал ФГБНУ  
“Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”,  
ул. Жуковского, 100/1, Новосибирск, 630082 Россия

<sup>б</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (ФГБНУ “Красноярский научный центр Сибирского отделения  
Российской академии наук”), Академгородок, 50, стр. 28, Красноярск, 660036 Россия

<sup>с</sup>Сибирский Федеральный Университет, ул. Киренского, 79, Красноярск, 660041 Россия

\*E-mail: selection@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019 г.

После доработки 19.05.2020 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

Представлены результаты анализа пространственной и временной (по годам) изменчивости условий произрастания основных лесообразующих хвойных видов (ели сибирской *Picea obovata* Ledeb., лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ledeb., лиственницы Гмелина *L. gmelinii* (Rupr.) Rupr., сосны сибирской кедровой *Pinus sibirica* Du Tour., сосны обыкновенной *P. sylvestris* L., пихты сибирской *Abies sibirica* Ledeb.) в Средней Сибири и в горах Южной Сибири, включая районы Красноярского края, Иркутской области, республик Хакассия, Тыва, Бурятия, Якутия. Установлены пределы изменчивости некоторых климатических переменных в местообитаниях популяций хвойных видов по амплитудам среднегодовых температур, суммам осадков и гидротермическим коэффициентам за 1960–2016 гг. Показаны различия между видами по корреляциям между занимаемой ими относительно площади с величинами временной изменчивости метеорологических показателей. Сравниваются уровни изменчивости метеорологических условий произрастания хвойных лесов в таежной зоне с условиями произрастания популяций, расположенных на южной и северной границах ареала хвойных лесов, а также корреляции с ними у отдельных видов. Показаны особенности временной и пространственной изменчивости климатических показателей в местах произрастания хвойных видов в разных природно-климатических зонах Сибири. Выявлены достоверные различия по уровням межгодовой изменчивости тепло- и влагообеспеченности местообитаний хвойных видов, групп популяций и отдельных популяций, что подтверждает необходимость учитывать их в прогнозировании реакции видов на изменения климата. Отмечено, что динамика изменений температуры последних десятилетий специфична для разных природно-климатических зон и локальных местообитаний популяций. Для долгосрочного прогноза предлагается использовать частотные характеристики изменений климата в масштабах столетних и тысячелетних хронологий.

**Ключевые слова:** популяции лесообразующих хвойных видов, изменчивость климата, Средняя Сибирь.

DOI: 10.31857/S002411482102008X

Как известно, бореальные леса имеют важное хозяйственное и экологическое (климато-, средо- и почвообразующее) значение (Протопопов, 1975; Молчанов, 1978; Рахманов, 1984; Davin, Noublet-Ducoudre, 2010). В свою очередь, распространение лесов, видовой состав и продуктивность лесных фитоценозов в большой степени зависят от климата (Берг, 1925; Бузыкин, 1970; Сочава, 1980; Поликарпов и др., 1986; Кузьмичев, 2013; Усольцев, 2016). Примеры современного усыхания хвойных лесов, смещения их границ в Евразии

(Шиятов и др., 2007; Allen et al., 2010; Замолодчиков, 2011; Харук и др., 2016) и изменения продуктивности (Алексеев, Марков, 2003; Игошин, Кузьмичев, 2008; Martinez-Vilalta et al., 2008; Демаков, Смыков, 2009) свидетельствуют о достаточно высокой чувствительности лесных экосистем к изменениям климата и составу воздуха. Поэтому повышение точности прогнозирования как изменений климата, так и реакции лесных экосистем имеет большое значение при долгосрочном планировании способов и интенсивности эксплуатации лесных ресурсов и мер содействия их восстановлению, с расчетом на будущее состояние лесов и окружающей среды.

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ФГБНУ ЗСО ИЛ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН (00356-2019-0024).

Необходимо отметить, что основные площади наиболее ценных хвойных лесов Евразии сосредоточены в России, а внутри России – в Сибири и на Дальнем Востоке. При этом в Сибири, особенно на севере и в горных районах, отмечены наиболее быстрые изменения климата и, соответственно, реакция природных экосистем (Замолодчиков, 2011; Изменение климата ..., 2013). Для уточнения экологических характеристик видов, в развитие и дополнение исследования закономерностей распределения лесов Сибири в экологических градиентах (Шумилова, 1962; Пузаченко, Скулкин, 1981; Назимова и др., 2004; Цельникер и др., 2010; Tchebakova et al., 2016; Усольцев, 2016; и др.), необходимо учитывать разную способность популяций к акклиматизации, показанную на примере многих видов животных и растений (Мамаев и др., 1988; Алтухов, 2004). И такие попытки предпринимаются на основе наблюдений за ростом географических культур (Rehfeldt et al., 2002; Berlin et al., 2016). Хотя необходимо отметить, что географические культуры произрастают в условиях загущенных рядовых посадок, а не естественно размещены на площади, поэтому только этих данных для выяснения устойчивости популяций, на наш взгляд, недостаточно. Разрабатываются также морфологические подходы к установлению границ популяций видов (Семериков, 1986; Видякин, 2014; Тихонова и др., 2014; Зацепина и др., 2016), но это очень трудоемкая и длительная работа, особенно для крупных лесных стран. Мы предположили, что решить эту проблему можно с помощью анализа изменчивости условий произрастания популяций, считая их (условия) неотъемлемой характеристикой самих популяций.

Целью проводимых исследований являлось получение информации о пределах пространственно-временной изменчивости метеорологических показателей в местах произрастания популяций хвойных видов и примерной оценке на ее основе потенциальной устойчивости популяций в меняющемся климате с использованием метеорологической и лесоустроительной баз данных.

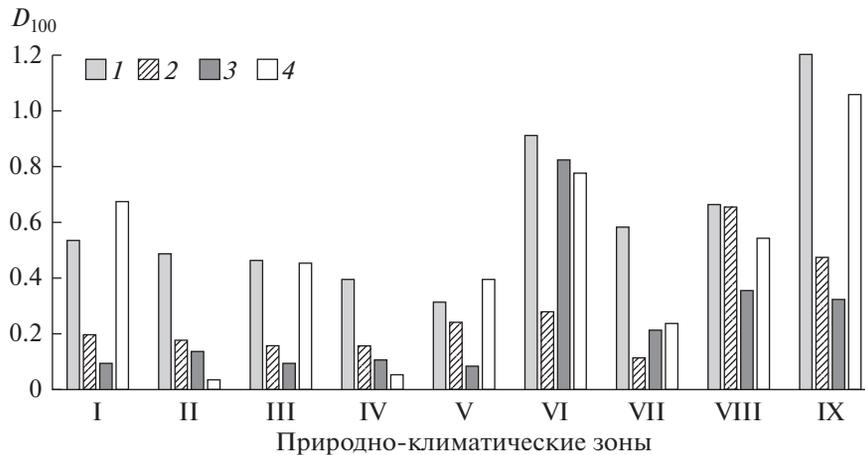
## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В работе были использованы карта “Леса СССР” масштаба 1 : 2500000 (1990), материалы лесоустройства и карта растительного покрова России масштаба 1 : 2500000 (Барталев и др., 2011). Для климатического анализа изучаемой территории и построения климатической карты использовали среднемесячные значения приземной температуры воздуха и суммы осадков по 116 метеостанциям Средней Сибири, включая районы Красноярского края, Иркутской области, республик Хакасия, Тыва и Бурятия, районы Якутии западнее р. Лена за 1960–2016 гг. (база данных Всероссийского научно-исследовательского ин-

ститута гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД)). Ввиду недостатка и неравномерности распределения метеостанций на исследуемой территории для составления климатических карт была использована база данных UEA CEDA, CRU (Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia) (Mitchell, Jones, 2005; Harris et al., 2014) в виде матриц экстраполированных значений среднемесячной температуры воздуха с ячейками  $0.5^\circ$  с.ш.  $\times$   $0.5^\circ$  в.д. Для каждой метеостанции и каждой ячейки матрицы были рассчитаны среднеголетние значения, экстремумы и среднеквадратичные отклонения метеорологических показателей. Матрицы данных были преобразованы в формат растровых изображений в ГИС средствами пакета ESRI ArcGIS. Пространственную привязку осуществляли с помощью цифровой векторной топоосновы масштаба 1 : 1000000 и цифровой модели рельефа (SRTM 90 DEM). При составлении климатических карт учитывался рельеф местности. Были использованы следующие метеорологические показатели: среднегодовая температура воздуха ( $T_{cp}$ ), годовая сумма осадков ( $CO_r$ ), амплитуда среднемесячных температур воздуха ( $A$ ), индекс континентальности Конрада ( $ИК = 1.7A/\sin(\varphi + 10) - 14$ , где  $A$  – средняя годовая амплитуда температур местности,  $\varphi$  – широта местности), гидротермические коэффициенты за год и за ноябрь, которые рассчитывались по формулам: гидротермический коэффициент по Де Мартону (Хромов, Мамонтов, 1974) с поправкой на более низкие температуры  $ГТК_r = CO_r(T_{cp} + 20)^{-1}$  и гидротермический коэффициент  $ГТК_n = T_{cp\ n}CO_n^{-1}$  ( $T_{cp\ n}$  и  $CO_n$  – средняя температура и сумма осадков за ноябрь) для примерной оценки степени промерзания почвы в ноябре при невысоком снежном покрове. Изменчивость условий произрастания в пространстве оценивали по среднеквадратичному отклонению ( $\sigma$ ), амплитуде среднеголетних значений ( $A_p$ ) и разнице среднеголетних значений метеорологических показателей, деленной на 100 км расстояния между точками ( $D_{100}$ ). Дополнительно проводился анализ временной (по годам) изменчивости перечисленных показателей для всех метеостанций (по  $\sigma$  и по амплитудам среднегодовых значений ( $A_r = T_{cp\ max} - T_{cp\ min}$ )).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вычисления изменчивости метеорологических показателей в местах произрастания хвойных лесов проводили в границах природно-климатических зон. Расчеты были выполнены в целом для хвойных лесов и отдельно для каждого из пяти лесобразующих хвойных видов (виды лиственницы сибирскую и Гмелина не разделяли). Было установлено, что наиболее изменчивы в



**Рис. 1.** Разница среднееголетних значений метеорологических показателей, деленная на 100 км расстояния между точками ( $D_{100}$ ) (пространственная изменчивость)  $T_{cp}$  (1),  $CO_{г} \times 10^{-2}$  (2),  $ГТК_{г}$  (3) и  $ТГК_{н} \times 10$  (4) внутри природно-климатических зон. I – лесотундра и предтундровые леса, II, III, IV – соответственно, подзоны северной, средней и южной тайги, V – зона лесостепи, VI – горные территории с субарктическим типом поясности, VII – горные территории с бореальным типом поясности, VIII – горные территории с суббореальным типом поясности, IX – горные территории с субаридным типом поясности.

пространстве условия произрастания хвойных лесов в горных районах с субарктическим, субаридным и суббореальным типами высотной поясности (рис. 1). Для этих природно-климатических зон получены наибольшие пространственные дисперсии ( $\sigma$ ), средние значения  $D_{100}$  и пределы экстремальных значений всех используемых климатических показателей, кроме  $ТГК_{н}$ . Вместе с тем, в двух из перечисленных природно-климатических зонах климат характеризуется меньшей межгодовой изменчивостью метеорологических переменных: в горах с субаридным типом поясности – по  $T_{cp}$ , в горах с суббореальным типом поясности – по  $T_{cp}$  и гидротермическим коэффициентам  $ГТК_{г}$  и  $ТГК_{н}$ . В других природно-климатических зонах (их обозначения приведены в табл. 1) условия менее изменчивы в пространстве. Из них относительно более высоким диапазоном значений  $ТГК_{н}$  в пространстве отличаются горы с бореальным типом поясности, а  $T_{cp}$  и ИК – лесотундра (табл. 1). Наименее изменчивы по годам условия произрастания хвойных лесов в южной тайге, а из горных территорий – в горах с суббореальным типом поясности, что существенно отличает их от других природно-климатических зон.

На исследуемой территории хвойные леса произрастают в интервале среднееголетних значений  $T_{cp}$ , равном  $24.0^{\circ}C$ , а с учетом экстремумов (предельных отклонений) –  $28.7^{\circ}C$ ;  $CO_{г}$ , соответственно 918 и 1600 мм;  $ГТК_{г}$  – 31.3 и 38.2;  $ТГК_{н}$  – 7.7 и 37.6. Амплитуды значений метеорологических переменных внутри ареалов каждого из хвойных видов приведены в табл. 2. Наиболь-

ший по региону интервал среднееголетних температур воздуха ( $A_p, T_{cp}$ ) характерен для лиственницы, он сопоставим с общим интервалом для хвойных видов –  $23.0^{\circ}C$  (с учетом наибольших отклонений температуры воздуха в отдельные годы –  $27.5^{\circ}C$ ), за ней идут ель сибирская (соответственно 16.3 и  $21.0^{\circ}C$ ) и сосна обыкновенная (14.3 и  $19.0^{\circ}C$ ). Сосна сибирская кедровая (11.4 и  $15.5^{\circ}C$ ) и пихта сибирская (9.3 и  $15.2^{\circ}C$ ) распространены в более узких границах условий теплообеспеченности территории. По гидротермическим коэффициентам эти пределы составили: по среднееголетним данным  $ГТК_{г}$  – 3.9–4.3 (пихта сибирская, сосна обыкновенная и сосна сибирская, с учетом экстремальных значений – 6.6–8.0), 5.9 (ель сибирская, с экстремумами 14.5) и 7.8 (виды лиственницы, только в горах субарктики и лесотундре  $ГТК_{г}$  достигают значений 29.0–37.8);  $ТГК_{н}$  – 2.0 и 3.4 у пихты сибирской и ели сибирской (с крайне редкими для них экстремальными отклонениями до 20.6 и 21.2), 3.1 у сосны сибирской кедровой (соответственно 28.6), 2.7 и 7.6 соответственно, у светлохвойных видов сосны обыкновенной и лиственницы (с учетом отдельных экстремумов – 33.5 и 36.8). По индексу континентальности различия между видами были несущественными, за исключением пихты сибирской, ограниченной условиями с меньшей амплитудой температур внутри сезона.

В обобщенном анализе для всех природно-климатических зон, где растут хвойные леса, установлена статистически значимая корреляция их относительной площади (в % к площади участков  $0.5^{\circ}$  с.ш.  $\times$   $0.5^{\circ}$  в.д.) со среднееголетними значениями  $T_{cp}$ ,  $ГТК_{г}$  и  $ТГК_{н}$  ( $r = 0.49, -0.40, 0.52$

**Таблица 1.** Пространственная изменчивость метеорологических показателей в местах произрастания хвойных лесов в границах природно-климатических зон (ПКЗ) Средней Сибири

Природно-климатическая зона		Метеорологические показатели				
		$T_{cp}$ , °C	$CO_r$ , мм	ГТК <sub>r</sub>	ТГК <sub>н</sub>	ИК
Лесотундра и предтундровые леса	СМ	-9.6	420	4.1	-1.16	67.6
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-17.9...-6.3	227-552	3.2...28.4	-3.1...-0.5	58.7-90.6
	$Extr_{min/max}$	-20.1...-4.5	124-720	2.1...31.7	-13.4...-0.12	42.5-101.7
Горные территории с субарктическим типом поясности	СМ	-12.6	415	6.0	-1.19	70.7
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-21.5...-8.2	193-530	3.8...33.6	-5.6...-0.2	60.2-91.6
	$Extr_{min/max}$	-23.8...-4.2	167-740	1.9...38.9	-25.7...-0.15	45.2-104.8
Горные территории с бореальным типом поясности	СМ	-7.1	462	3.7	-1.27	70.9
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-15.0...-2.4	320-564	2.3...5.2	-9.4...-0.3	59.3-79.9
	$Extr_{min/max}$	-17.2...-0.3	217-850	1.7...15.3	-37.6...-0.2	45.9-94.5
Подзона северной тайги	СМ	-10.1	383	3.9	-1.23	73.7
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-14.8...-4.0	259-580	2.7...5.6	-4.3...-0.4	61.3-93.4
	$Extr_{min/max}$	-18.5...-0.4	166-765	1.75...25.1	-10.9...-0.1	43.8-107.1
Подзона средней тайги	СМ	-7.8	350	3.0	-0.84	74.2
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-16.1...-1.0	247-578	2.1...6.3	-3.6...-0.3	47.3-95.1
	$Extr_{min/max}$	-18.1...1.3	185-706	1.5...11.6	-8.0...-0.03	45.7-109.4
Подзона южной тайги	СМ	-1.7	426	2.4	-0.45	64.3
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-4.6...0.0	285-630	1.7...4.0	-1.1...-0.3	59.0-70.8
	$Extr_{min/max}$	-7.5...2.9	224-683	1.3...4.3	-6.5...-0.05	42.7-92.0
Зона лесостепи	СМ	-0.4	430	2.2	-0.83	63.6
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-3.7...1.2	287-510	1.1...2.7	-3.5...-0.3	56.1-75.7
	$Extr_{min/max}$	-6.1...4.0	173-657	0.7...4.2	-12.6...-0.04	38.3-91.4
Горные территории с суббореальным типом поясности	СМ	-4.7	615	3.6	-0.81	66.2
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-9.0...-0.3	363-1248	2.4...5.9	-2.9...-0.3	57.3-77.8
	$Extr_{min/max}$	-10.9...2.9	254-1740	1.0...8.9	-10.0...-0.06	44.0-92.8
Горные территории с субаридным типом поясности	СМ	-4.4	457	2.8	-1.09	69.9
	$СМ_{min}/СМ_{max}$	-7.9...-1.2	332-542	1.6...3.8	-8.7...-0.3	57.2-79.0
	$Extr_{min/max}$	-10.3...2.6	179-653	1.04...6.6	-14.8...-0.1	47.6-92.8

Примечание. В таблицах 1 и 2:  $T_{cp}$  – среднегодовая температура воздуха,  $CO_r$  – среднегодовая сумма осадков, ГТК<sub>r</sub>, ТГК<sub>н</sub> – гидротермические коэффициенты за год и ноябрь, ИК – индекс континентальности. СМ – среднегодовое значения,  $СМ_{min}/СМ_{max}$  и  $Extr_{min/max}$  соответственно – среднегодовое и абсолютные значения минимума и максимума внутри природно-климатической зоны.

соответственно), а также со среднеквадратичными отклонениями ( $\sigma$ ) и амплитудами экстремальных значений ( $A_r$ ) гидротермических коэффициентов ГТК<sub>r</sub> и ТГК<sub>н</sub> ( $r = -0.45...-0.57$ ). Как видим, наиболее тесные связи получены с ТГК<sub>н</sub>. При этом не выявлено достоверной корреляции между площадью хвойных лесов и показателями временной изменчивости  $T_{cp}$  и  $OS_r$ , вероятно, из-за сопряженных эффектов между ними и различий между видами. Более тесные связи со среднегодовыми значениями  $T_{cp}$  обнаруживаются ближе к границам ареалов: положительные – на севе-

ре (в лесотундре, горах субарктики и северной тайге), и от положительных до отрицательных – на юге (в лесостепи и горах с субаридным типом поясности) (рис. 2). Поскольку на границах природно-климатических поясов происходит смена лимитирующих факторов (Сочава, 1980; Одум, 1986), был проведен анализ временной изменчивости климатических показателей в области сплошного распространения хвойных лесов и за ее пределами: сравнивали условия произрастания популяций хвойных видов в южной и средней тайге, отличающихся наибольшей продуктивно-

**Таблица 2.** Средние значения и пределы климатических показателей за 1960–2016 гг. в популяциях исследуемой части ареалов видов хвойных

Вид	Показатели	$T_{cp}$ , °C	$CO_r$ , мм	ГТК <sub>г</sub>	ГТК <sub>н</sub>
Лиственницы сибирская и Гмелина	СМ	-9.1	378	4.22	-1.38
	СМ <sub>min</sub> /СМ <sub>max</sub>	-22.5/0.5	227/900	1.72/32.60	-7.9/-0.3
	Extr <sub>min/max</sub>	-24.7/2.8	152/1244	0.86/38.9	-37.6/-0.04
	$\sigma_{min/max}$	0.8/1.66	35.7/127.7	0.31/9.79	0.14/7.64
	$\Delta_{extr}$	3.4/7.0	156/568	1.32/37.3	0.66/36.8
Сосна обыкновенная	СМ	-5.4	403	2.82	-0.90
	СМ <sub>min</sub> /СМ <sub>max</sub>	-12.9/1.4	234/698	1.1/4.96	-3.0/-0.28
	Extr <sub>min/max</sub>	-15.0/4.0	141/917	0.70/7.7	-34.2/-0.04
	$\sigma_{min/max}$	0.78 /1.4	39.8 /118.5	0.31/1.03	0.15/4.34
	$\Delta_{extr}$	3.5/6.08	170/534	1.3/4.79	0.62/33.5
Ель сибирская	СМ	-5.7	453	3.31	-0.73
	СМ <sub>min</sub> /СМ <sub>max</sub>	-16.1/0.2	248 /911	1.88/7.82	-3.65/-0.25
	Extr <sub>min/max</sub>	-18.1/2.9	172/1153	1.23/14.7	-21.7/-0.03
	$\sigma_{min/max}$	0.84/1.37	40.8/127.7	0.30/3.62	0.15/2.79
	$\Delta_{extr}$	3.60/6.10	159 /646	1.39 /11.3	0.62/21.2
Сосна сибирская кедровая	СМ	-4.3	492	3.17	-0.67
	СМ <sub>min</sub> /СМ <sub>max</sub>	-9.9/1.3	330/1248	1.75/5.97	-3.36/-0.25
	Extr <sub>min/max</sub>	-12.1/3.4	166 /1740	0.87/8.9	-29.1/-0.03
	$\sigma_{min/max}$	0.78/1.36	40.8/127.7	0.31/1.17	0.15/3.99
	$\Delta_{extr}$	3.55/6.09	186/568	1.31/5.12	0.64/28.6
Пихта сибирская	СМ	-3.3	514	3.12	-0.43
	СМ <sub>min</sub> /СМ <sub>max</sub>	-8.9/1.4	341/1248	1.80/5.85	-2.24/-0.25
	Extr <sub>min/max</sub>	-11.2 /4.0	166 /1740	0.87/7.50	-21.7/-0.03
	$\sigma_{min/max}$	0.79/1.36	46.9/115.0	0.31/1.07	0.14/2.75
	$\Delta_{extr}$	3.59/6.1	202/547	1.32/4.86	0.62/20.6

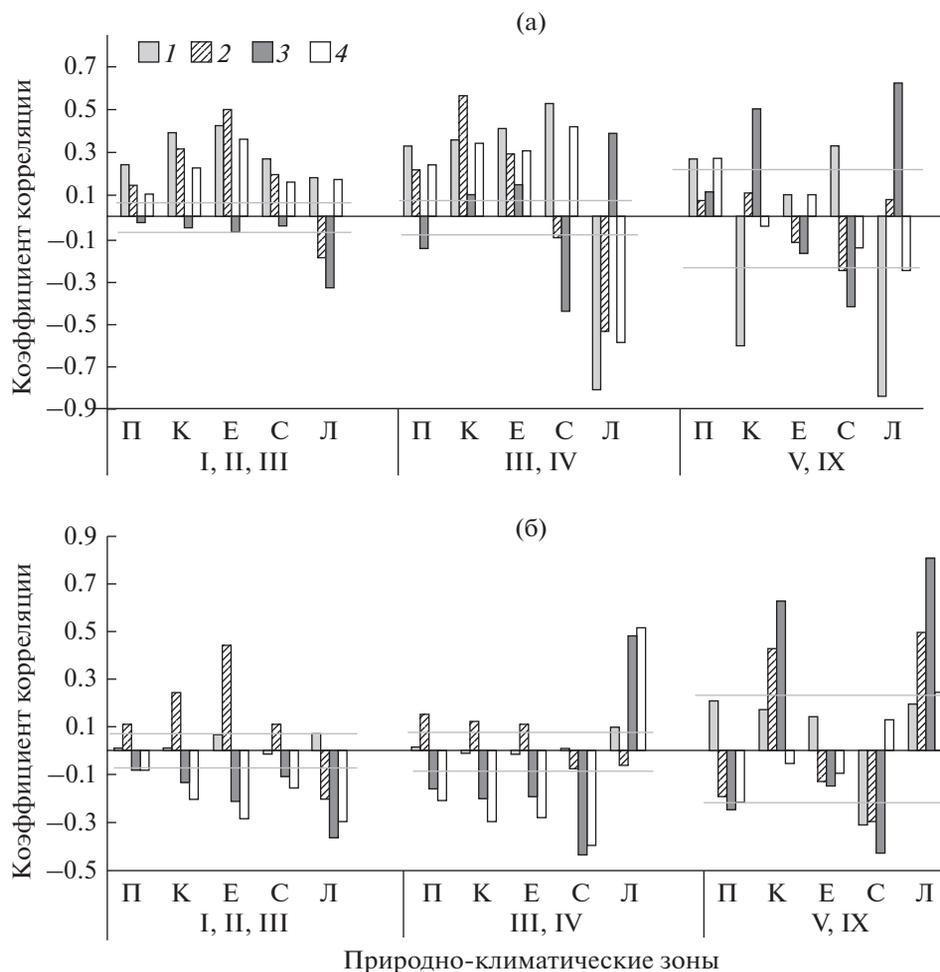
Примечание: СМ – среднееголетнее; СМ<sub>min</sub>/СМ<sub>max</sub> и Extr<sub>min/max</sub> – среднееголетние и среднегодовые максимальное и минимальное значения показателя. *Изменчивость во времени внутри популяций*:  $\sigma_{min/max}$  – популяционные пределы временной изменчивости (среднеквадратичных отклонений);  $\Delta_{extr}$  – интервалы (разница) между минимальным и максимальным значением показателя за отдельные годы внутри популяций.

стью, – одним из основных критериев оптимальности (Заугольнова, 1985; Плюта, 1994; и др.), с местообитаниями северных и южных популяций (перечислены перед ссылкой на рис. 2).

Было установлено, что в подзонах средней и южной тайги среднеквадратичные отклонения и амплитуды экстремальных значений ГТК<sub>г</sub> и ГТК<sub>н</sub> достоверно отличаются в 2–3 раза более низкими величинами по сравнению с другими природно-климатическими зонами, в том числе по сравнению с рядом расположенными горами бореальной зоны. Меньшей временной изменчивостью, как мы отмечали ранее, характеризуется также в целом прохладный гумидный климат гор Южной Сибири с суббореальным типом высотной поя-

ности. Условия в средней и южной тайге, горах с суббореальным типом поясности отличаются также более высокими амплитудами и среднеквадратичными отклонениями  $CO_r$  и более низкой изменчивостью  $T_{cp}$ . При этом меньшая изменчивость ГТК<sub>г</sub> в этих природно-климатических зонах свидетельствует о большей частоте лет с однонаправленными изменениями температуры и осадков и поэтому меньшей вероятности возникновения засух.

Они также характеризуются относительно невысокой степенью промерзания почвы в ноябре: за пределами этих природно-климатических зон в отдельные годы почва в конце осени – начале зи-



**Рис. 2.** Коэффициенты корреляции ( $r$ ) относительной площади, занимаемой хвойными видами, со среднемноголетними значениями (а) и среднеквадратичными отклонениями (б)  $T_{cp}$ ,  $OS_r$ ,  $ГТК_r$ ,  $ТГК_n$  в Средней Сибири (горизонтальные линии – порог достоверности  $r$  при  $p < 0.01$ , для лесостепи и гор с субаридным типом поясности он выше из-за меньшей площади природно-климатических зон и, соответственно, выборки участков); I–IX – природно-климатические зоны (см. рис. 1); П – пихта сибирская, К – сосна сибирская, Е – ель сибирская, С – сосна обыкновенная, Л – виды лиственницы.

мы может более резко охлаждаться, а  $ТГК_n$  – опускаться до  $-12.6...-14.8$  в лесостепной зоне и в горах с субаридным типом поясности, до  $-10.9...-37.6$  в лесотундре, горах субарктики, горах бореальной зоны и в северной тайге (табл. 1). А, как было отмечено выше, между площадью, занимаемой хвойными лесами, и этим показателем (и его изменчивостью) были получены самые высокие коэффициенты корреляции, чувствительность темнохвойных видов к позднему весенним и ранним осенним заморозкам перечисляется в их био-экологической характеристике во многих справочниках по дендрологии (Шиманюк, 1967; и др.). Таким образом, и на северной границе ареала, там, где рост деревьев ограничен недостатком тепла, и на юге в условиях семиаридного климата, где рост чаще ограничивается осадками, гидротермические коэффициенты отличаются более

высокой межсезонной изменчивостью, наиболее высокой в северных районах Средней Сибири.

Обращает также на себя внимание увеличение степени проявления экологических различий между видами с севера на юг (рис. 2). В таежной зоне лиственница занимает более прохладные и влажные места, а сосна обыкновенная – более сухие, при этом сосна предъявляет большие требования к стабильности гидротермических условий (отрицательные значения коэффициентов корреляции с  $\sigma ГТК_r$  получены во всех природно-климатических зонах). У южной границы хвойных лесов сосна сибирская кедровая и лиственница сибирская встречаются в более прохладных местообитаниях с более высокой изменчивостью климатических показателей по сравнению с другими видами. Пихта сибирская везде обнаруживает положительные корреляции со среднемного-

голетним значениями  $T_{cp}$ ,  $OS_r$ ,  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$  и отрицательные – с изменчивостью ( $\sigma$ ,  $A_t$ )  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$ , невысокие, по-видимому, из-за более ограниченного в целом ее распространения. Ель сибирская занимает промежуточное положение. Таким образом, именно на юге ареалов лучше изучать экологические особенности хвойных видов по реакции популяций на временную изменчивость климатических условий, особенно водного режима местности.

В результате дискриминантного анализа было установлено, что на исследуемых участках относительная площадь, занимаемая видами, на 53.8% объясняется зависимостью от среднегодовых климатических характеристик местообитаний (4 достоверных канонических корня,  $F = 192.08$ ,  $p < 0.00001$ ), и на 45.4% – их межсезонной изменчивостью ( $\sigma$  и  $A_t$ ) в популяциях (также 4 достоверных канонических корня,  $F = 79.66$ ,  $p < 0.00001$ ). В обоих вариантах анализа дистанции Махаланобиса между всеми видами были достоверны. Таким образом, временная изменчивость климатических показателей также является существенной экологической характеристикой хвойных видов, и ее изучение в отдельных популяциях представляет определенный интерес, в том числе для уточнения лесосеменного районирования.

Внутри видов отдельные популяции различались между собой в 1.4–2 раза по уровню временной изменчивости среднегодовой температуры, в 2.5–4 раза – по изменчивости суммы осадков за год (табл. 2). Амплитуды экстремальных значений среднегодовой температуры ( $A_t$ ) за 1960–2016 гг. в популяциях составили от 3.4 до 7.0°C, среднеквадратичные отклонения ( $\sigma$ )  $T_{cp}$  в местообитаниях популяций хвойных видов варьировали в пределах  $\pm 0.8$ – $1.7^\circ\text{C}$  (при включении 95% случаев ( $\pm 2\sigma$ ) – 3.6– $6.8^\circ\text{C}$ ). Наибольшие различия между популяциями внутри видов наблюдались по гидротермическим коэффициентам:  $ГТК_r$  – у видов лиственницы в 31 раз, (в абсолютных значениях – это величина  $\sigma_{min/max}$  приведена в табл. 2), у ели сибирской (в 12 раз) и в 3–4 раза у остальных видов;  $ТГК_n$  – в 54 раза у видов лиственницы, в 29 и 27 раз соответственно у сосны обыкновенной и сосны сибирской кедровой, в 19–20 раз у пихты сибирской и ели сибирской. Как видим, наибольшей временной изменчивостью части популяций и межпопуляционными различиями по сочетанию условий тепло- и влагообеспеченности местообитаний ( $ГТК_r$ ) характеризуются виды лиственницы и ель сибирская, а по  $ТГК_n$  (числу градусов ниже 0, приходящих за на 1 мм снежного покрова к началу зимы) – стлетьно-хвойные виды и сосна сибирская, что вполне соответствует их эколого-фитоценологическим характеристикам (Шиманюк, 1967). Отметим, что в анализе изменчивости условий произрастания

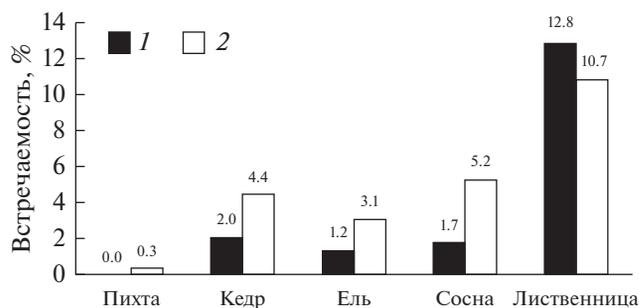
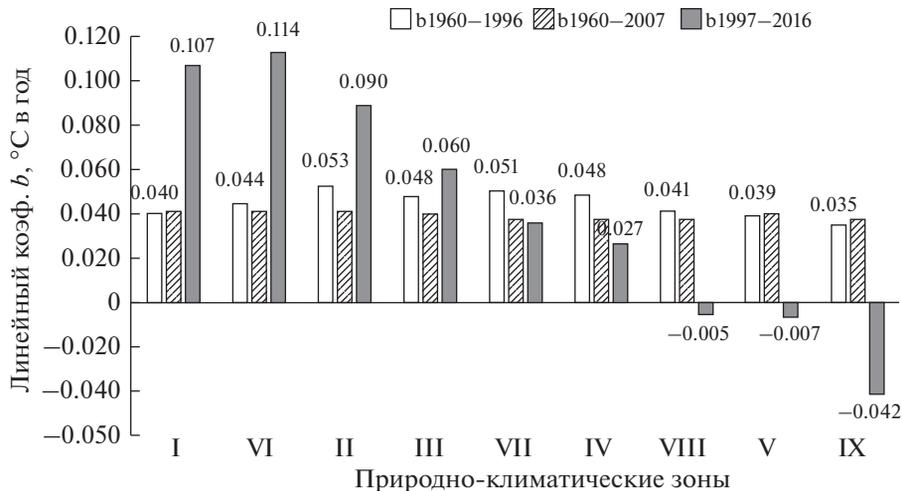


Рис. 3. Относительная встречаемость вида (% площадок к числу площадок с участием каждого вида) в условиях высокой временной изменчивости ( $\sigma \geq 1$ ) сразу двух показателей  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$  (1), только одного  $ТГК_n$  (2).

популяций сразу по двум коэффициентам  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$  размах значений существенно сужается для ели сибирской, и особенно, пихты сибирской по сравнению с другими видами, что может объяснять худшую приспособляемость этих видов к современным изменениям климата (Манько, Гладкова, 1995), особенно к разнонаправленным изменениям температуры и осадков в отдельные годы (Неволин и др., 2007). Из хвойных видов лиственница ssp. наиболее устойчива к условиям высокой временной изменчивости (по обоим коэффициентам).

Результаты расчетов встречаемости популяций видов, произрастающих в условиях высокой временной изменчивости одновременно двух гидротермических коэффициентов  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$ , приведены на рис. 3. Такие местообитания находятся большей частью в лесотундре, горах субарктики, северной тайге, редко обнаруживаются в средней тайге и горах бореальной зоны, единично в горах Южной Сибири с суббореальным типом поясности. Отметим, что для всех исследуемых видов получены достоверные различия между группами популяций, приуроченных к крупным геоморфологическим единицам рельефа, по изменчивости климатических условий во времени ( $F = 2.89$ – $497.9$ ,  $p < 0.038$ ).

Нельзя не отметить, что проведенное нами исследование включает период наибольших зафиксированных в последнее столетие изменений климата – уменьшения континентальности и увеличения теплообеспеченности территории Евразии (Семенов и др., 2014), в результате которых сдвинулись *потенциальные* климатические границы природно-климатических зон и некоторых хвойных видов (Назимова и др., 2005; Изменение климата ..., 2013). В меньшей степени при этом изменились ареалы самих видов, поскольку для этого требуется значительно больший период времени (Назимова, Поликарпов, 2001). В литературе приводятся многочисленные свидетельства продви-



**Рис. 4.** Изменение среднегодовой температуры воздуха на территории Средней Сибири за 3 разных по длительности периода: 1960–1996 гг., 1960–2007 гг. и в 1960–2016 гг.; I–IX – природно-климатические зоны (см. рис. 1).

жения хвойных видов на десятки и сотни метров к северу в глубь лесотундры и выше границы леса в горах (Харук и др., 2005; Шиятов и др., 2007; Замолотчиков, 2011), распространение подроста мы наблюдали также вокруг лесостепных боров в Южной Сибири. Однако используемые нами источники информации (карты мелкого масштаба, особенно по климату) не позволяют зафиксировать данные изменения ареалов видов, поэтому такая задача нами не ставилась. При этом перечисленные изменения климата никоим образом не отразились на достоверности результатов приведенного выше анализа (территории сравнивались за аналогичные периоды времени по каждой природно-климатической зоне). И все же для получения дополнительной информации о временной изменчивости показателей в этот период были рассчитаны коэффициенты линейной регрессии изменений температуры (тренды) за периоды 1960–1996, 1960–2007 и 1960–2016 гг. (рис. 4) – в переломных точках на кривых и соответственно оценена изменчивость  $ГТК_r$  и  $ТГК_n$ . Было установлено, что динамика изменений температуры носит не только региональный характер, но и специфична для разных природно-климатических зон, что неоднократно было отмечено многими исследователями (Назимова, Поликарпов, 2001; Изменение климата ..., 2013). Как видно из рис. 4, дальнейшее заметное потепление продолжается не во всех районах Сибири – в лесотундре, северной тайге и горах субарктики. В южных районах с 2007 г. положительный тренд сменился на отрицательный (в лесостепи, горах с субарктическим и суббореальными типами поясности). Вместе с ростом  $T_{cp}$  наблюдалось снижение изменчивости гидротермических коэффициентов в районах севера; отсутствие заметных однонаправленных изменений в горах бореальной зоны, средней и юж-

ной тайге; для пунктов, расположенных в лесостепи и горах с субарктическим типом поясности, обнаружилось большое разнообразие локальных изменений – от постепенного снижения изменчивости  $ГТК_r$ ,  $ТГК_n$  с 1996 г. до отсутствия определенных изменений  $\sigma$  и  $A_p$  или роста изменчивости  $ГТК_r$  с 2007 г.

В заключение проведенного предварительного исследования отметим, что для практического использования полученных результатов потребуются расширение набора климатических показателей по их внутрисезонной изменчивости для установления частоты и продолжительности засушливых периодов, а также анализ почвенных условий (Тихонова и др., 2018), что и планируется сделать в дальнейшем. При этом необходимо иметь в виду, что географические пределы распространения видов определяются не только климатом, но и историей и стадией развития лесного фитоценоза, пожарами, вырубками (Щербаков, 1975; Сафронова, 1993). В пограничных условиях роста они с трудом конкурируют с теми видами, для которых данный климат более благоприятен, и поэтому часто не достигают потенциально возможных границ своих климатических ареалов (Воейков, 1884). Например, отмечается высокая холодостойкость не только лиственницы, но и сосны с елью на севере Якутии, где среди лиственничных редколесий часто встречается ель сибирская (Щербаков, 1975; Сочава, 1980). По берегам р. Хатанги этот вид доходит до  $70^\circ$  с.ш. (Берг, 1947, с. 154), часто проникает в лесотундру и лесостепь (Крылов, 1961; Кулагин, 1980), а сосна обыкновенная в Якутии доходит до северной границы лесов и нередко преобладает в подросте лиственничников (Щербаков, 1975), хотя считается, что она не выносит мерзлотности почвы.

Сосна сибирская кедровая также отличается достаточно высокой холодостойкостью и в северо-восточной части ареала может образовывать древостой большей продуктивности по сравнению с другими видами (!), занимая при этом самые высокие и холодные местообитания (Щербаков, 1975), т.е. эта граница резкая, без признаков постепенного ослабления вида. Поэтому можно предположить, что ее распространению на севере (как и на юге (Назимова и др., 2005)) также препятствуют пожары (темнохвойные виды наименее устойчивы к ним), вырубки, поедание животными. Лишь у пихты сибирской ареал не выходит за границы лесной зоны. Поэтому результаты исследования и оценки потенциальной устойчивости популяций, групп популяций и видов верны только для современного состояния лесов, влияние других неучтенных факторов вносит определенную, по-видимому, немалую ошибку при изучении климатических закономерностей географии распространения хвойных видов.

Представляется, что для получения более надежных прогнозов устойчивости хвойных лесов необходимо комплексное прогнозирование изменений таких факторов, как пожары и вредители, опосредованные климатическими и антропогенными (вырубки и пожары) факторами, а с учетом цикличности изменений климата (Шнитников, 1957; Максимов, 1995; Кашкаров, Поморцев, 2007; Семенов и др., 2014) надежнее для долгосрочных прогнозов использовать частотные характеристики изменений климата (амплитуды и периодичность колебаний) в масштабах столетних и тысячелетних хронологий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования было установлено, что во всех природно-климатических зонах в большей степени обнаруживается сопряженность площади хвойных видов с гидротермическими коэффициентами: в большинстве случаев положительная со среднемноголетними значениями  $TГК_n$  и отрицательная с  $TГК_r$ , а также отрицательные корреляции с межгодовой изменчивостью обоих коэффициентов для всех видов на севере (в лесотундре, северной тайге и горах субарктики), и разные для видов в других природно-климатических зонах. Следовательно, на юге ареалов лучше выражены экологические особенности хвойных видов по реакции популяций на временную изменчивость климата. В условиях высокой изменчивости двух гидротермических коэффициентов произрастает значительная часть популяций лиственницы ssp. и лишь немногие популяции остальных видов. Совсем не обнаружено таковых для пихты сибирской. Поэтому *временная изменчивость климатических показателей* (по  $\sigma$  и  $A_t$ ) *является существенной до-*

*полнительной экологической характеристикой хвойных видов.*

Были выявлены особенности пространственной и временной изменчивости метеорологических условий роста основных лесобразующих видов хвойных на территории Средней Сибири с 1960 по 2016 г. Полученные данные в целом подтверждают известные экологические характеристики видов и позволяют уточнить эти характеристики и пределы изменчивости метеорологических показателей не только для видов в целом, но и для отдельных популяций. Установлено, что интервалы климатических ареалов видов в Средней Сибири в 2.5–6.8 раз шире амплитуд межгодовых колебаний условий произрастания отдельных популяций внутри видов по  $T_{cp}$ ,  $CO_r$  и  $TГК_r$ . Поэтому существует небольшая вероятность того, что найдутся популяции, способные адаптироваться к любым резким изменениям климата и, следовательно, *для устойчивого рационального лесопользования необходимо сохранение популяционной структуры видов.* Это согласуется с результатами исследований и выводами ряда авторов (Мамаев и др., 1988; Путенихин, 2000; Видякин, 2014), использовавших морфологические признаки деревьев. Внутри хвойных видов популяции существенно различаются по уровням временной изменчивости метеорологических условий произрастания. Достоверность влияния этого фактора на их распространение подтверждает необходимость учитывать его в прогнозировании реакции видов на изменения климата. Например, равнинные и горные территории сильно различаются по структуре (соотношению величин временной – для каждой популяции, и пространственной – между популяциями) изменчивости климата (на равнинах преобладает временная изменчивость климата, в горах – пространственная). Это необходимо учитывать в лесосеменном районировании, не надеясь на то, что можно вырубать равнинные леса и потом их восстанавливать семенами горных популяций.

На основании полученных данных о межгодовой изменчивости климатических показателей можно предположить, что популяции хвойных видов способны адаптироваться к постепенному повышению или понижению температуры воздуха на 3.5–7.0°C. Это относится, прежде всего, ко взрослым деревьям. Подрост, а тем более всходы, появляющиеся уже в новых условиях, имеют большие возможности адаптироваться не только к понижению, но и к росту температуры, если оно будет компенсировано, согласно правилу Иверсена–Гричука (Кашкаров, Поморцев, 2007), пропорциональным увеличением количества осадков. Как показало проведенное исследование, большая часть популяций хвойных видов Средней Сибири существует в условиях невысокой

временной изменчивости ГТК<sub>r</sub> и поэтому может быть весьма чувствительна к росту его изменчивости и аридизации климата на южной границе ареала, особенно если эти отклонения в отдельные годы будут переходить минимальный для темнохвойных видов предел 1.0, для светлохвойных — 0.7, а длительностью в несколько лет — 1.2 и 0.85, соответственно. Из-за недостаточного количества осадков в конце осени — начале зимы может также снижаться показатель ТГК<sub>н</sub>, возростать его изменчивость, что имеет большое значение для темнохвойных видов, в первую очередь, пихты сибирской. Особого внимания в этой связи заслуживают популяции, произрастающие в условиях семиаридного климата, а также популяции из природно-климатических зон, отличающихся относительной стабильностью условий произрастания (южной тайги и гор с суббореальным типом поясности). Следует также отметить, что немаловажное значение имеет способность не только древесного яруса, но и всего лесного фитоценоза приспособиться к новым условиям (Крылов, 1961; Назимова и др., 2004; Tchebakova et al., 2016), так как одним из существенных факторов продуктивности и устойчивости хвойных видов являются симбиотические отношения внутри биоценозов, а микробиоценоз и травяной покров более чувствительны к изменениям условий увлажнения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А., Марков М.В.* Статистические данные о лесном фонде и изменение продуктивности лесов России во второй половине XX в. СПб.: Санкт-Петербургский лесной экологический центр, 2003. 272 с.
- Алтухов Ю.П.* Динамика генофондов при антропогенных воздействиях // Вестник ВОГиС. 2004. Т. 8. № 2. С. 40–59.
- База данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД). 2017. <http://meteo.ru>
- Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- Берг Л.С.* Климатические пояса Земли // Известия географического института. 1925. Т. 5. С. 21–47.
- Берг Л.С.* Географические зоны Советского Союза. М.: Огиз — Географгиз, 1947. 397 с.
- Бузыкин А.И.* О географических и эдафо-ценологических факторах продуктивности лесов // Вопросы лесоведения. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР, 1970. С. 80–91.
- Видякин А.И.* Применение результатов феногеографических исследований в практике лесного хозяйства России // Сибирский лесной журн. 2014. № 4. С. 29–34.
- Воейков А.И.* Климаты Земного шара, в особенности России. СПб.: Изд-во Картографического заведения А. Ильина, 1884. 640 с.
- Демаков Ю.П., Смыков А.Е.* Динамика сосновых лесов республики Марий Эл за последние полвека // Хвойные бореальной зоны. 2009. Т. XXVI. № 2. С. 203–210.
- Замолодчиков Д. Г.* Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учетов лесного фонда // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 382–392.
- Заугольнова Л.Б.* Понятие оптимумов у растений // Журн. общей биологии. 1985. Т. 16. № 4. С. 444–452.
- Зацепина К.Г., Тараканов В.В., Кальченко Л.И., Эжарт А.К., Ларионова А.Я.* Дифференциация популяций сосны обыкновенной в ленточных борах Алтайского края, выявленная с применением маркеров различной природы // Сибирский лесной журн. 2016. № 5. С. 21–32.
- Игошин В.Н., Кузьмичев В.В.* Анализ динамики средних высот порослевых березняков лесостепи за период с 1897 по 2006 гг. // Лесная таксация и лесоустройство. 2008. Вып. 2. № 40. С. 37–41.
- Изменение климата и биоразнообразие российской части Алтае-Саянского экорегиона / Под ред. Михайлова Н.Н. Красноярск: Типография “Город”, 2013. 328 с.
- Леса СССР. Масштаб 1 : 2500000. М.: Федеральная служба лесного хозяйства, 1990. 16 л.
- Кашкаров Е.П., Поморцев О.А.* Глобальное потепление климата: ритмическая основа прогноза и ее практическое значение в охране лесов северного полушария // Хвойные бореальной зоны. 2007. № 2–3. С. 207–216.
- Крылов Г.В.* Леса Западной Сибири. История изучения, типы лесов, районирование, пути использования и улучшения. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 255 с.
- Кузьмичев В.В.* Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука, 2013. 192 с.
- Кулагин Ю.З.* Лесообразующие виды, техногенез и прогнозирование. М.: Наука, 1980. 113 с.
- Максимов Е.В.* Ритмы на Земле и в Космосе. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. университета, 1995. 324 с.
- Мамаев С.А., Семериков Л.Ф., Махнёв А.К.* О популяционном подходе в лесоводстве // Лесоведение. 1988. № 1. С. 3–9.
- Манько Ю.И., Гладкова Г.А.* О факторах усыхания пихтово-еловых лесов на Дальнем Востоке // Лесоведение. 1995. № 2. С. 3–12.
- Молчанов А.А.* Влияние леса на окружающую среду. М.: Наука, 1978. 358 с.
- Назимова Д.И., Поликарпов Н.П.* Возможен ли прогноз лесного покрова Сибири на XXI век? // Природа. 2001. № 4. С. 55–61.
- Назимова Д.И., Ермаков Н.Б., Андреева Н.М., Степанов Н.В.* Концептуальная модель структурного биоразнообразия зональных классов лесных экосистем Северной Евразии // Сибирский экологический журн. 2004. № 5. С. 745–755.

- Назимова Д.И., Пономарев Е.И., Степанов Н.В., Федотова Е.В. Черневые темнохвойные леса на юге Красноярского края и проблемы их обзорного картографирования // Лесоведение. 2005. № 1. С. 12–18.
- Неволин О.А., Третьяков С.В., Торхов С.В. К истории об усыхании хвойных лесов // Лесной вестник. 2007. № 5. С. 65–74.
- Одум Ю. Экология. М.: Мир, 1986. Т. 2. 376 с.
- Плюта П.Г. Оптимумы растений и характер их распределения в пределах диапазона толерантности к условиям среды // Экология. 1994. № 4. С. 18–25.
- Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 224 с.
- Протопопов В.В. Средообразующая роль темнохвойного леса. Новосибирск: Наука, 1975. 327 с.
- Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Структура растительности лесной зоны СССР. М.: Наука, 1981. 276 с.
- Путенихин В.П. Популяционная структура и сохранение генофонда хвойных видов на Урале: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 06.03.01. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2000. 48 с.
- Рахманов В.В. Гидроклиматическая роль лесов. М.: Лесная пром-ть, 1984. 240 с.
- Сафронова Г.П. Место сосны обыкновенной в экосистеме сибирской тайги // Лесоведение. 1993. № 5. С. 48–54.
- Семенов В.А., Шелехова Е.А., Мохов И.И., Зуев В.В., Колтерманн К.П. Влияние Атлантического долгопериодного колебания на формирование аномальных климатических режимов в регионах северной Евразии по модельным расчетам // Доклады академии наук. 2014. Т. 459. № 6. С. 742–745.
- Семерилов Л.Ф. Популяционная структура древесных растений (на примере видов дуба европейской части СССР и Кавказа). М.: Наука, 1986. 140 с.
- Сочава В.Б. Географические аспекты сибирской тайги. Новосибирск: Наука, 1980. 256 с.
- Тихонова И.В., Мухортова Л.В., Данилова И.В., Михайлова И.А. Оценка лесорастительного потенциала почв республики Тыва для основных лесообразующих видов хвойных // Лесоведение. 2018. № 3. С. 194–209.
- Тихонова И.В., Тараканов В.В., Тихонова Н.А., Барченков А.П., Экарт А.К. Популяционная изменчивость шишек и семян сосны обыкновенной по фенам окраски и признакам-индексам на юге Сибири // Сибирский экологический журн. 2014. Т. 21. № 1. С. 79–86.
- Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесообразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов). Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2016. 384 с.
- Харук В.И., Им С.Т., Петров И.А., Ягунов М.Н. Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья // Сибирский экологический журн. 2016. Т. 23. № 5. С. 750–760.
- Харук В.И., Им С.Т., Рэнсон К.Дж., Сан Г. Космоснимки высокого разрешения в анализе временной динамики экотона лесотундры // Исследование Земли из космоса. 2005. № 6. С. 46–55.
- Хромов С.П., Мамонтов Л.И. Метеорологический словарь. М.: Гидрометеиздат, 1974. 569 с.
- Цельникер Ю.Л., Корзухин М.Д., Семенов С.М. Модельный анализ широтного распределения продуктивности лесных пород России // Лесоведение. 2010. № 2. С. 36–45.
- Шиманюк А.П. Дендрология. М.: Лесная пром-ть, 1967. 334 с.
- Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В., Циммерманн Н.Е. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале // Экология. 2007. № 4. С. 243–248.
- Шнитников А.В. Изменчивость общей увлажненности материков северного полушария. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1957. 337 с.
- Шумилова Л.С. Ботаническая география Сибири. Томск: Изд-во Томского гос. университета, 1962. 428 с.
- Щербаков И.П. Лесной покров Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1975. 343 с.
- Allen C., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger Th., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., J. Castro, Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests // Forest Ecology and Management. 2010. V. 259. P. 660–684.
- Berlin M.E., Persson T., Jansson G., Haapanen M., Ruotsalainen S., Barring L., Andersson Gull B. Scots pine transfer effect models for growth and survival in Sweden and Finland // Silva Fennica. 2016. V. 50. № 3. P. 1–21.
- Davin E., De Noblet-Ducoudre N. Climatic Impact of Global-Scale Deforestation: Radiative versus Nonradiative Processes // J. Climate. 2010. V. 23. P. 97–112.
- Harris I., Jones P.D., Osborna T.J., Listera D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // International J. Climatology. 2014. V. 34. P. 623–642.
- Martinez-Vilalta J., Lopez B.C., Adell N., Badiella L., Ninyerola M. Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions // Global Change Biology. 2008. V. 14. P. 2868–2881.
- Mitchell T.D., Jones P.D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // International J. Climatology. 2005. № 25. P. 693–712.
- Rehfeldt G.E., Wykoff W.R., Tchebakova N.M., Parfenova Y.I., Kuzmina N.A., Milyutin L.I. Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris* // Global Change Biology. 2002. V. 8. № 9. P. 912–929.
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Korets M.A., Conard S.G. Potential change in forest types and stand heights in central Siberia in a warming climate // Environmental Research Letters. 2016. V. 11 (035016). P. 1–15.

## A Variability of Meteorological Conditions for the Growth of Coniferous Species in Central Siberia Since 1960

I. V. Tikhonova<sup>1,\*</sup> and M. A. Korets<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>West-Siberian Division, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Zhukovskogo st., 100/1, Novosibirsk, 630082 Russia

<sup>2</sup>Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FI SB RAS), Akademgorodok, 50, bldg. 28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

<sup>3</sup>Siberian Federal University (SFU), Svobodny ave., 79, Krasnoyarsk, 660041 Russia

\*E-mail: selection@ksc.krasn.ru

The results of the analysis of the spatial and temporal (annual) variability of the main forest-forming coniferous species (Siberian spruce *Picea obovata* Ledeb., Siberian larch *Larix sibirica* Ledeb., Dahurian larch *L. gmelinii* (Rupr.) Rupr., Siberian pine *Pinus sibirica* Du Tour, Scots pine *P. sylvestris* L., Siberian fir *Abies sibirica* Ledeb.) growing conditions are presented for the Central Siberia and the mountains of Southern Siberia, including the Krasnoyarsk Territory, Irkutsk Region, the Republics of Khakassia, Tuva, Buryatia, Yakutia. The variability limit of some climatic values in habitats of coniferous species populations has been determined using the amplitudes of yearly mean temperatures, amounts of precipitation and hydrothermal coefficients for the period from 1960 to 2016. Differences have been found between the species in correlations between the relative area occupied by them and the values of the temporal variability of meteorological indicators. The levels of meteorological conditions variability for the coniferous forests growth in the taiga zone are compared with the growth conditions of populations, situated in the coniferous forests areas' southern and northern boundaries, as well as the individual species' correlations with them. Climatic indices temporal and spatial variability features have been determined in coniferous species growing areas in different natural and climatic zones of Siberia. Significant differences in the levels of interannual variability of heat and moisture conditions in habitats of coniferous species, groups of populations and individual populations were revealed, that proves the necessity to take them into consideration when predicting the species reactions on climate changes. It was noted that the temperature changes dynamics in recent decades is specific for various climatic zones and populations habitats. For a long-term prediction, the use of the climate changes frequency characteristics was suggested, in the centennial and millennial chronologies.

*Keywords:* forest-forming species populations, climate changes, Middle Siberia.

**Acknowledgements:** The work has been carried out within the framework of a budget programme of West-Siberian Division, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, as well as with a financial support of RFBR, Krasnoyarsk Krai administration and Krasnoyarsk Scientific Foundation (18-44-240002-p\_a).

### REFERENCES

- Alekseev V.A., Markov M.V., *Statisticheskie dannye o lesnom fonde i izmenenie produktivnosti lesov Rossii vo vtoroi polovine XX veka* (Forest resources statistical data and changes in forest productivity in Russia in the second half of the 20th century), St. Petersburg: Sankt-Peterburgskii lesnoi ekologicheskii tsentr, 2003, 272 p.
- Allen C., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N., A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests, *Forest Ecology and Management*, 2010, Vol. 259, pp. 660–684.
- Altukhov Y.P., Dinamika genofondov pri antropogennykh vozdeistviyakh (Dynamics of gene pools under anthropogenic impact), *Vestnik VOGiS*, 2004, Vol. 8, No. 2, pp. 40–59.
- Bartalev S.A., Egorov, V.A., Ershov, D.V., Isaev, A.S., Lupjan, E.A., Plotnikov, D.E., Uvarov, I.A., Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometrii MODIS, *Sovremennye problemy distan-*
- cionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
- Berg L.S., *Geograficheskie zony Sovetskogo Soyuz* (Geographical zone of the Soviet Union), M.: Ogiz – Geografiz, 1947, 397 p.
- Berg L.S., Klimaticheskie poyasa Zemli (Climatic zones of the Earth), *Izvestiya geograficheskogo instituta*, 1925, Vol. 5, pp. 21–47.
- Berlin M.E., Persson T., Jansson G., Haapanen M., Ruotsalainen S., Bärning L., Andersson G.B., Scots pine transfer effect models for growth and survival in Sweden and Finland, *Silva Fennica*, 2016, Vol. 50, No. 3, pp. 1–21.
- Buzykin A.I., O geograficheskikh i edafo-tsenoticheskikh faktorakh produktivnosti lesov (About geographical and edaphic-coenotic factors of forest productivity), In: *Voprosy lesovedeniya* (Issues of forest science), Krasnoyarsk: Izd-vo ILiD SO AN SSSR, 1970, Vol. 1, pp. 80–91.
- Davin E., De Noublet-Ducoudre N., Climatic Impact of Global-Scale Deforestation: Radiative versus Nonradiative Processes, *J. Climate*, 2010, Vol. 23, pp. 97–112.
- Demakov Y.P., Smykov A.E., Dinamika osnovnykh lesov respubliki Marii El za poslednie polveka (Dynamics of pine forests of the Mari Republic over the past half century),

- Khvoinye boreal'noi zony*, 2009, Vol. XXVI, No. 2, pp. 203–210.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H., Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset, *International J. Climatology*, 2014, Vol. 34, pp. 623–642.  
http://meteo.ru
- Igoshin V.N., Kuz'michev V.V., Analiz dinamiki srednikh vysot poroslevykh bereznyakov lesostepi za period s 1897 po 2006 gg. (Comparative estimation of the dependence of height on the diameter in the pine and birch standing timber of the wooded plain), *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo*, 2008, Vol. 2, No. 40, pp. 37–41.
- Izmenenie klimata i bioraznoobrazie rossiiskoi chasti Altae-Sayanskogo ekoregiona* (Climate change and biodiversity of the Russian part of the Altai-Sayan ecoregion), Krasnoyarsk: Tipografiya "Gorod", 2013, 328 p.
- Kashkarov E.P., Pomortsev O.A., Global'noe poteplenie klimata: ritmicheskaya osnova prognoza i ee prakticheskoe znachenie v okhrane lesov Severnogo polushariya (Global climate warming: practical application of cyclic basis of the forecast to protection of forests in the Northern hemisphere), *Khvoinye boreal'noi zony*, 2007, No. 2–3, pp. 207–216.
- Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Yagunov M.N., Decline of dark coniferous stands in Baikal region, *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, Vol. 9, No. 5, pp. 617–625.
- Kharuk V.I., Im S.T., Renson K.D., San G., Kosmosnimki vysokogo razresheniya v analize vremennoi dinamiki ekotona lesotundry (High resolution satellite images in the forest tundra ecotone dynamics analysis), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2005, No. 6, pp. 46–55.
- Khromov S.P., Mamontov L.I., *Meteorologicheskii slovar'* (Meteorological Dictionary), Moscow: Gidrometeoizdat, 1974, 569 p.
- Krylov G.V., *Lesa Zapadnoi Sibiri. Istoriya izucheniya, tipy lesov, raionirovanie, puti ispol'zovaniya i uluchsheniya* (Forests of Western Siberia. History of study, types of forests, zoning, ways of use and improvement), M.: Izd-vo AN SSSR, 1961, 255 p.
- Kulagin Y.Z., *Lesoobrazuyushchie vidy, tekhnogenez i prognozirovanie* (Forest-forming species, technogenesis and prognosis), M.: Nauka, 1980, 113 p.
- Kuz'michev V.V., *Zakonomernosti dinamiki drevostoev: printsipy i modeli* (Patterns in dynamics of forest stands: principles and models), Novosibirsk: Nauka, 2013, 207 p.
- Lesy SSSR. Masshtab 1 : 2500000*, (Forests of the USSR. Scale 1 : 2500000), M.: GUGK, 1990.
- Maksimov E.V., *Ritmy na Zemle i v Kosmose* (Rhythms on Earth and in Space), St. Petersburg: Izd-vo Sankt-Petersburgskogo gos. universiteta, 1995, 324 p.
- Mamaev S.A., Semerikov L.F., Makhnev A.K., O populyatsionnom podkhode v lesovodstve (Population approach in silviculture), *Lesovedenie*, 1988, No. 1, pp. 3–9.
- Man'ko Y.I., Gladkova G.A., O faktorakh usykhaniya pikh-tovo-elovykh lesov na Dal'nem Vostoke (On the factors of drying out of fir-spruce forests in the Far East), *Lesovedenie*, 1995, No. 2, pp. 3–12.
- Martinez-Vilalta J., Lopez B.C., Adell N., Badiella L., Ninyerola M., Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions, *Global Change Biology*, 2008, Vol. 14, pp. 2868–2881.
- Mitchell T.D., Jones P.D., An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids, *International J. Climatology*, 2005, Vol. 25, No. 6, pp. 693–712.
- Molchanov A.A., *Vozdeistvie antropogennykh faktorov na les* (Human factors affecting forests), Moscow: Nauka, 1978, 136 p.
- Nazimova D.I., Ermakov N.B., Andreeva N.M., Stepanov N.V., Kontseptual'naya model' strukturnogo bioraznoobraziya zonal'nykh klassov lesnykh ekosistem Severnoi Evrazii (Framework of structural biodiversity of zonal classes of forest ecosystems of Northern Eurasia), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2004, No. 5, pp. 745–755.
- Nazimova D.I., Polikarpov N.P., Vozmozhno li prognoz lesnogo pokrova Sibiri na XXI vek? (Is it possible to forecast the forest cover of Siberia for the XXI century?), *Priroda*, 2001, No. 4, pp. 55–61.
- Nazimova D.I., Ponomarev E.I., Stepanov N.V., Fedotova E.V., Chernevye temnokhvoinye lesa na yuge Krasnoyarskogo kraia i problemy ikh obzornogo kartografirovaniya (Chern dark coniferous forests in Southern Krasnoyarsk Region and problems of their general mapping), *Lesovedenie*, 2005, No. 1, pp. 12–18.
- Nevolin O.A., Tret'yakov S.V., Torkhov S.V., K istorii ob usykhanii khvoinykh lesov (To the story of the drying up of coniferous forests), *Lesnoi vestnik*, 2007, No. 5, pp. 65–74.
- Odum E.P., *Ecology*, M.: Mir, 1986, Vol. 2, 376 p.
- Plyuta P.G., Optimumy rastenii i kharakter ikh raspredeleniya v predelakh diapazona tolerantnosti k usloviyam sredy (Plant optima and the nature of their distribution within the range of tolerance to environmental conditions), *Ekologiya*, 1994, No. 4, pp. 18–25.
- Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I., *Klimat i gornye lesa Yuzhnoi Sibiri* (Climate and montane forests of South Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1986, 224 p.
- Protopopov V.V., *Sredoobrazuyushchaya rol' temnokhvoynogo lesa* (Habitat forming by dark coniferous forest), Novosibirsk: Nauka, 1975, 328 p.
- Putenikhin V.P., *Populyatsionnaya struktura i sokhranenie genofonda khvoinykh vidov na Urale. Avtoref. diss. d-ra biol. nauk* (Population structure and conservation of genebank of coniferous species in Urals. Extended abstract of Doctor biol. sci. thesis), Krasnoyarsk: IL SO RAN, 2000, 48 p.
- Puzachenko Y.G., Skulkin V.S., *Struktura rastitel'nosti lesnoi zony SSSR* (Structure of vegetation in the forest zone of USSR), M.: Nauka, 1981, 276 p.
- Rakhmanov V.V., *Gidroklimaticheskaya rol' lesov* (Hydroclimatic role of forests), Moscow: Lesnaya prom-t', 1984, 240 p.
- Rehfeldt G.E., Tchepakova N.M., Parfenova Y.I., Wykoff W.R., Kuzmina N.A., Milyutin L.I., Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris*, *Global Change Biology*, 2002, Vol. 8, pp. 912–929.
- Safronova G.P., Mesto sosny obyknovЕННОI v ekosisteme sibirskoi taigi (The place of Scots pine in the ecosystem of the Siberian taiga), *Lesovedenie*, 1993, No. 5, pp. 48–54.
- Semenov V.A., Shelekhova E.A., Mokhov I.I., Koltermann K.P., Zuev V.V., Influence of the atlantic multidecadal oscillation on settling anomalous climate regimes in Northern Eurasia based on model simulation, *Doklady Earth Sciences*, 2014, Vol. 459, No. 2, pp. 1619–1622.
- Semerikov L.F., *Populyatsionnaya struktura drevesnykh rastenii (na primere vidov duba Evropeiskoi chasti SSSR i Ka-*

- vkaza) (Population structure of wooden plants (case study of oak species in European part of USSR and Caucasus)), M.: Nauka, 1986, 140 p.
- Shcherbakov I.P., *Lesnoi pokrov severo-vostoka SSSR* (Forest cover of North-East of USSR), Novosibirsk: Nauka, 1975, 343 p.
- Shimanyuk A.P., *Dendrologiya* (Dendrology), M.: Lesnaya prom-t', 1967, 334 p.
- Shiyatov S.G., Terent'ev M.M., Fomin V.V., Zimmermann N.E., Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century, *Russian J. Ecology*, 2007, Vol. 38, No. 4, pp. 223–227.
- Shnitnikov A.V., *Izmenchivost' obshchei uvlazhnenosti materikov severnogo polushariya* (Variability of the general moisture content of the continents of the northern hemisphere), M., Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1957, 337 p.
- Shumilova L.S., *Botanicheskaya geografiya Sibiri* (Botanical geography of Siberia), Tomsk: Izd-vo Tomskogo un-ta, 1962, 428 p.
- Sochava V.B., *Geograficheskie aspekty sibirskoi taigi* (Geographic aspects of the Siberian taiga), Novosibirsk: Nauka, 1980, 256 p.
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Korets M.A., Conard S.G., Potential change in forest types and stand heights in central Siberia in a warming climate, *Environmental Research Letters*, 2016, Vol. 11 (035016), pp. 1–15.
- Tikhonova I.V., Mukhortova L.V., Danilova I.V., Mikhailova I.A., Otsenka lesorastitel'nogo potentsiala pochv respubliky Tyva dlya osnovnykh lesoobrazuyushchikh vidov khvoinykh (Assessment of soil suitability for growth of coniferous forests species in Tuva Republic), *Lesovedenie*, 2018, No. 3, pp. 194–209.
- Tikhonova I.V., Tarakanov V.V., Tikhonova N.A., Barchenkov A.P., Ekart A.K., Population variability of cones and seeds of Scots pine by phenes of color and traits-indices in the south of Siberia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 1, pp. 60–66.
- Tsel'niker Y.L., Korzukhin M.D., Semenov S.M., Model'nyi analiz shirotnogo raspredeleniya produktivnosti lesnykh porod Rossii (Model analysis of latitudinal distribution of forest species in Russia), *Lesovedenie*, 2010, No. 2, pp. 36–45.
- Usol'tsev V.A., *Biologicheskaya produktivnost' lesoobrazuyushchikh porod v klimaticheskikh gradientakh Evrazii (k menedzhmentu biosfernykh funktsii lesov)* (Biological productivity of forest-forming species in Eurasia's climatic gradients (as related to supporting decision-making processes in forest management)), Ekaterinburg: Izd-vo UMTs UPI, 2016, 384 p.
- Vidyakin A.I., Primenenie rezul'tatov fenogeograficheskikh issledovaniy v praktike lesnogo khozyaistva Rossii (Application of pheno-geographical research results in forestry of Russia), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 4, pp. 29–34.
- Voeikov A.I., *Klimaty Zemnogo shara, v osobennosti Rossii* (Climates of the Globe, especially Russia), St. Petersburg: Izd-vo Kartograficheskogo zavedeniya A. Il'ina, 1884, 640 p.
- Zamolodchikov D.G., An estimate of climate related changes in tree species diversity based on the results of forest fund inventory, *Biology bulletin reviews*, 2011, Vol. 2, No. 2, pp. 154–163.
- Zatsepina K.G., Tarakanov V.V., Kalchenko L.I., Ekart A.K., Larionova A.Y., Differentsiatsiya populyatsii sosny obyknovnoy v lentochnykh borakh Altaiskogo kraya, vyyavlenaya s primeneniem markerov razlichnoi prirody (Differentiation of Scots pine populations in the belt pine forests of Altai Krai discovered with markers of various nature), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2016, No. 5, pp. 21–32.
- Zaugol'nova L.B., Ponyatie optimumov u rastenii (The concept of optimums in plants), *Zhurnal obshchei biologii*, 1985, Vol. 46, No. 4, pp. 444–452.