

Сравнительная реакция лиственницысибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) Радиальный прирост измения климата влестепи и высокогорья Южной Сибири

В.И. Харука, б, *, И.А. Петрова, М.Л. Двинская, СТ.Им, б, в, и А.С. Шущпанова

^аИнститут леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, 660036 Россия

^бСибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

^сСибирский государственный университет науки и технологий имени М.Ф. Решетнёва, Красноярск, 660037, Россия

*электронная почта: kharuk@ksc.krasn.ru

Получено 16 января 2018 г.; окончательном виде 30 января 2018 г.

Аннотация. Рассматривается влияние измения климата на радиальный прирост лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.) в условиях ограниченного (лестепи) и достаточного (высокогорный Кузнецкий Алатау, пойменные насаждения) увлажнения. Проанализирована связь индекса роста лиственницы ($N = 257$) с эколого-климатическими переменными. Влестепи наступление мотепления наблюдается уменьшение засухливости климата, увеличение продолжительности вегетационного периода (1980-е годы) и увеличение индекса роста лиственницы за которым последовало его депрессия в 1990-х годах. Радиально-инкрементальная депрессия вызвана увеличением дефицита давления и засухливости климата из-за повышения температуры воздуха. В 2000-х годах радиально-инкрементные колебания со средними значениями, не превышающими значения до начала текущего мотепления климата период наступил. В высокогорье с 1970-х годов наблюдается общее увеличение радиального прироста лиственницы, тесно связанное с основным имитирующим фактором роста — температурой воздуха. В то же время засухливый летотмечается также угнетение радиального прироста лиственниц в горных и пойменных лиственничниках. При реализации «жестких» климатических сценариев (RCP 6.0 и RCP 8.5) вероятно, что индекс роста лиственницы влестепи будет наблюдаться дальнейшее снижение, а в районах достаточного увлажнения — его увеличение.

Ключевые слова: *Larix sibirica*, измения климата, лестепи, высокогорные леса, индекс роста, дефицит воды, засуха, индекс, водный стресс и радиальный прирост

DOI: 10.1134/S1995425518040042

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее существенное влияние измения климата на древственные насаждения наблюдается в переходных зонах (экотонах) между различными типами растительного покрова, где рост древственных растений ограничен температурой и влажностью (Ллойд и Банн, 2007; МГЭИК, 2014). В последние десятилетия ограничение влажности поставка (из-за увеличения засухливости климата, частоты и интенсивности засухи) наблюдалась во всех частях boreальной зоны, что в сочетании с активизацией биотических воздействий привело к сокращению площади насаждений, преимуществом которых являются хвойные деревья, в лесах Северная Америка (Аллен и др., 2009; Миллар и Стивенсон, 2015), Западная и Восточная Европа, а также Россия (Феттиг и др., 2013; Харук и др., 2016; Колб и др., 2016). В европейской части России и Беларуси наблюдается усыхание ели (*Picea abies* (L.) H. Karst.) (Чупров, 2008; Сарнатский, 2012), а в Сибирь условия произрастания пихты кедр (*Abies sibirica* Ledeb., *Pinus sibirica* du Tour) ухудшаются из-за синегризма водного стресса и биотических влияний (Павлови др., 2008; Харук и др., 2015,

2016). В настоящее время наблюдается сокращение площади насаждений, образующих *Pinus silvestris* L., вид относится к засухостойчивый, влестепной зоне Украины и в отмечена юго-западная часть Беларуси (Луфев и Ковалишин, 2017). Ограничение по влажности может также наблюдаться в высоких широтах (Харук и др., 2015).

Лиственница (*Larix sibirica*, *L. dahurica* Turcz.) благодаря своей высокой эффективности использования воды, что позволяет этому виду расти при низком (до 250 мм/год) количестве осадков уровня, относится к наиболее засухостойчивым древственным видам в Сибири (Клеппель и др., 1998). Засухливый климат прогнозируется в ряде регионов измения влестепи, лиственница может рассматриваться потенциальная замена для видов деревьев в стойчивых к засухе (например, *P. sibirica*, *P. sibirica* и *P. abies*), которые теряют часть своих территорий (Сарнатский, 2012; Миллар и Стивенсон, 2015 г.; Харук и др., 2016).

Целью данной работы был сравнительный анализ влияния измения климата на радиальный рост лиственницы сибирская, обитающая в экотонах лестепи и в условиях достаточного увлажнения (высокогорные и пойменные насаждения).

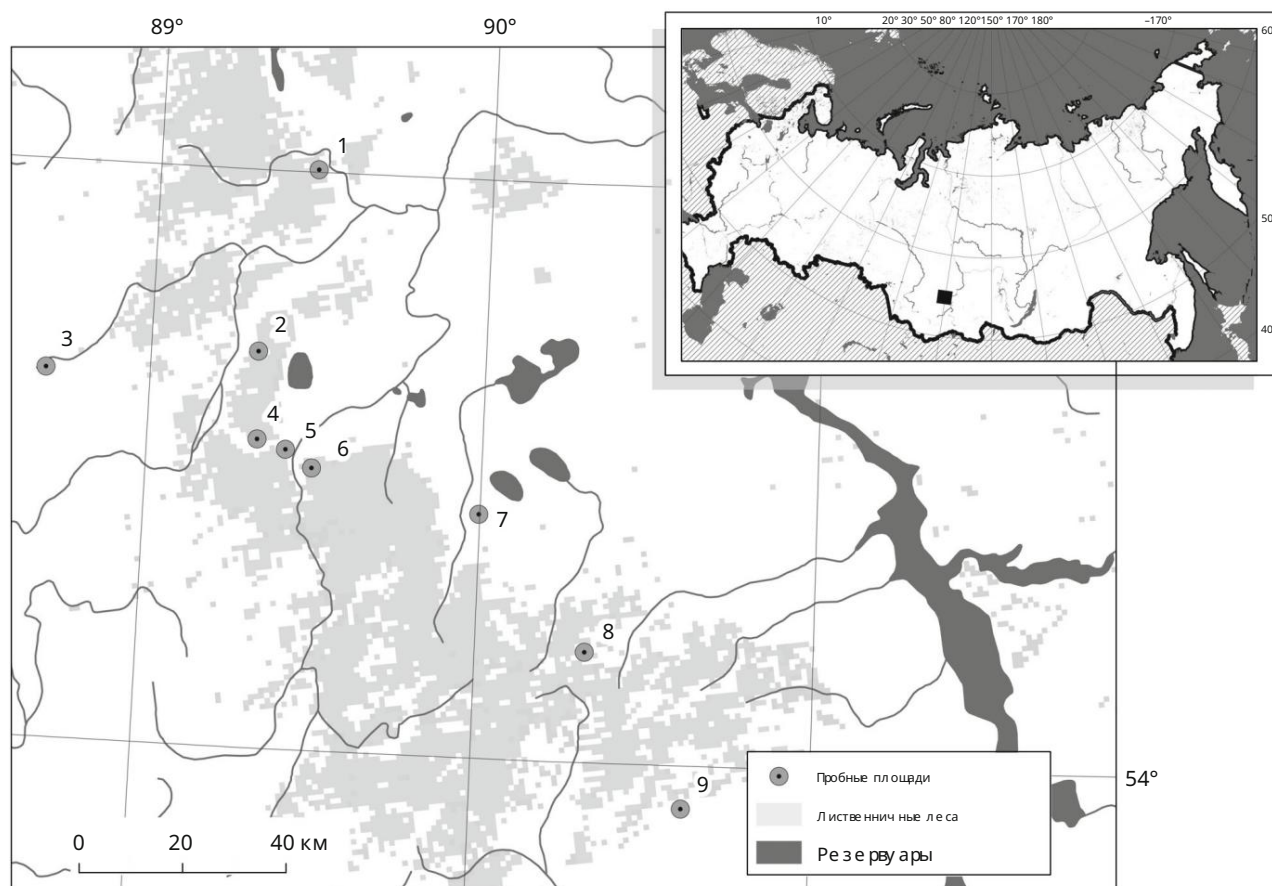


Рис. 1. Карта-схема размещения пробной площади (на карте отмечена квадратом). (1, 2, 4, 6–9) Лесостепь, (3) Высокогорье, и (5) пойма.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на лиственницах сибирских (*Larix sibirica* Ledeb.), деветья лесостепного экотона (Средняя Сибирь и Минусинская котловина) и высокогорья Кузнецкого Алатау (рис. 1). Образцы древесины (керы) отбирались приростным буром на пробных площадях (ПП, $n = 9$), расположенных в лесостепи ($n = 7$), в пойме реки ($n = 1$) и в высокогорьях ($n = 1$). ТА представлял собой либо трансекты на склонах гор (№ 1–4, 8, 9; рис. 1), либо разрез на Равнине 0,25 га (№ 5–7). Характеристики ТА и деветья в биометрические данные приведены в Таблице 1. Трансекты были проложены по склонам южной экспозиции — от границы сомкнутого насаждения до границы распространения древесных пород растительности степной зоны (трансекты № 1, 2, 4, 8, и 9) или граница горной лесотундры (№ 3). Отбор проб производился с интервалом 10 м в высоту над уровнем моря. На ТА за пределами трансекта, образцы отбирались в случайном порядке. В каждом ТА были записаны координаты отбора проб. Было проведено геоботаническое описание и определен тип почвенно-зоогенные воздеистия (пожары и рубка леса) Определены Почвы представлены бурыми степными типами лесостепи и бурыми степными типами высокогорья. В лесостепи, подлесок

(древесные растения в возрасте до 30 лет) были представлены единичными экземплярами; в высокогорье среднее количество молдняка составил ~300 шт./га. На большинстве ТА, следы воздеистия луговых пожаров (отложения) были наблюдались. Ни у одного из ТА не было разваливающихся деветья.

Деветхронологический анализ был проведен на основе выборки лиственничных деветьев (лесостепь $N = 160$, возвышенности $N = 57$, и поймы $N = 40$). Измерения древесных кернов проводились на

Платформа LINTAB 3 с точностью 0,01 мм (Ринн, 1996). В результате были получены абсолютные индивидуальные хронологии для каждого дерева (мм). Для проверки качества знакомств, программы TSAP и COFENA (Holmes, 1983) были использованы чтобы исключить возрастную тенденцию была применена процедура стандартизации, которая может преобразовать временной ряд ширины годичных колец в временной ряд без размерных индексов со средним 1,0 и относительно постоянной дисперсией (Спир, 2010).

Для получения индексированных обобщенных хронологий годичных колец конкретного пробного участка (ПП) необходимо определить индекс роста. Отдельные деветья были усреднены. Для каждого ТА, стандартизированного и «остаточного» (выделенного из стандартизированного по минимизации автокорреляционной составляющей) был построен хронологии в программе ARSTAN; линейная регрессия, и отрицательная экспоненциальная кривая, была

Таблица 1. Таксационная характеристика деревьев в ТА

№ т.	ТА, высота над уровнем моря (макс-мин), м	Длина транскты, м	Возраст дерева, лет	Высота дерева, м	Диаметр дерева, см
1	629–549	255	53 ± 10	11,9 ± 0,4	22,7 ± 1,7
2	630–590	150	46 ± 3	9,8 ± 0,6	18,4 ± 1,4
	1350–1290	200	138 ± 12	4,2 ± 0,3	15,0 ± 2,1
3 4	685–655	115	55 ± 3	10,3 ± 0,7	17,3 ± 1,4
5	479	–	65 ± 4	19,8 ± 1,0	37,5 ± 1,4
6	673	–	60 ± 1	17,0 ± 1,0	35,0 ± 3,5
7	541	–	99 ± 6	6,0 ± 1,0	18,0 ± 2,5
8	777–730	174	61 ± 13	14,1 ± 0,5	21,7 ± 2,1
9	725–715	70	77 ± 20	10,5 ± 1,1	23,6 ± 3,6

Таблица 2. Статистика отдельных хронологий

№ т. ТА	Число образцов	Средний радиальный прирост	Максимальный радиальный приращение	Межриальный корреляция	Стандарт отклонение, Σ	Коэффициент чувствительности
1, 2, 4, 6, 7, 8, 9 3	160	1,39	11,68	0,59	1,05	0,46
(высокогорье) 5	57	0,57	4,70	0,62	0,38	0,44
(повышенное русло)	40	2,13	9,86	0,42	1,27	0,31

(Куку и Кайракхтис, 1990). Дендроклиматический анализ, который включал «остаточный» хронологии, представленные безразмерным ростом индекса, был выполнен. Выбор «остаточных» хронологий был обусловлен отсутствием в них автокорреляционной составляющей, что значительно повысило климатический сигнал. Статистика индивидуальных хронологий показана в таблице 2.

Индекс роста рассматривался в связи со следующими экологическими и климатическими переменными: температура воздуха, осадки, водяной пар дефицит давления (VPD), индекс засушливости SPEI, влажность корнеобитаемого слоя (HRL), суммы активных температур (t 5°C) и продолжительности вегетации период (дни с t 5°C). Как показали Росси и др. (2008) ксилогенез хвойных наблюдается при температуре воздуха повышается до 4–5,8°C. Климатические переменные получены по данным местного Светлообово (лесостепь, расстояние до ТА ~90 км) и Неустая (горная местность, расстояние до ТА ~10 км) метеостанций.

Влажность корнеобитаемого слоя (принимается равной 0–100 см) получено из баз данных MERRA2 (разрешение на местности 0,5° × 0,625°; <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanaанализ/MERRA-2>).

Засушливость климата оценивалась по индексу SPEI. Индекс сухости, представляющий собой разницу (Di) между значениями осадков (Pi) и потенциального испарения (PETi):

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

где i — месяц (пространственное разрешение 0,5° × 0,5°; <http://sac.csic.es/spei>).

Статистический анализ проводился в StatSoft Программа Inc. (2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика экологических и климатических переменных

В лесостепной зоне средняя годовая температура, средняя летняя температура и средние зимние температуры составляют 0,2, 16,3 и –17,2°C, соответственно. Средняя температура января составляет –19°C, а июля – 18,1°C. Средняя годовая температура Общие количество осадков составляет 331 мм, а летом — 183 мм. В высокогорьях средняя годовая температура, средняя летняя температура и средняя Зимние температуры составляют –2,2, 12 и –15°C соответственно. Температуры января и июля составляют –15 и 13°C соответственно. Среднегодовое количество осадков составляет 1600 мм, летом — 380 мм.

Положительные тенденции температуры воздуха были наблюдались с 1970-х годов (за гидрологический год) и с 1980-х годов (за период май–сентябрь) до начала 2000-х годов без существенных тенденций в будущем (рис. 2а). Сумма активных температур увеличилась в период с 1980 года до начала 2000-е годы продолжительность вегетационного периода увеличилась на протяжении всего периода наблюдения (рис. 2б). Количество осадков в «теплый период» увеличилось с 1970-х годов, с последующим тенденция к снижению в 1990-х годах (рис. 2с). Дефицит Давление водяного пара увеличилось в 1980–2000 годах без существенных тенденций в будущем (рис. 2д). Засушливость климата (оцененная SPEI) уменьшилась в 1975–1990 гг. В дальнейшем наблюдалась тенденция минимальных значений SPEI: интенсивность засух увеличилась (рис. 2д). Влажность корнеобитаемого слоя снижался до начала 2000-х годов без существенного тенденции в будущем (рис. 2е).

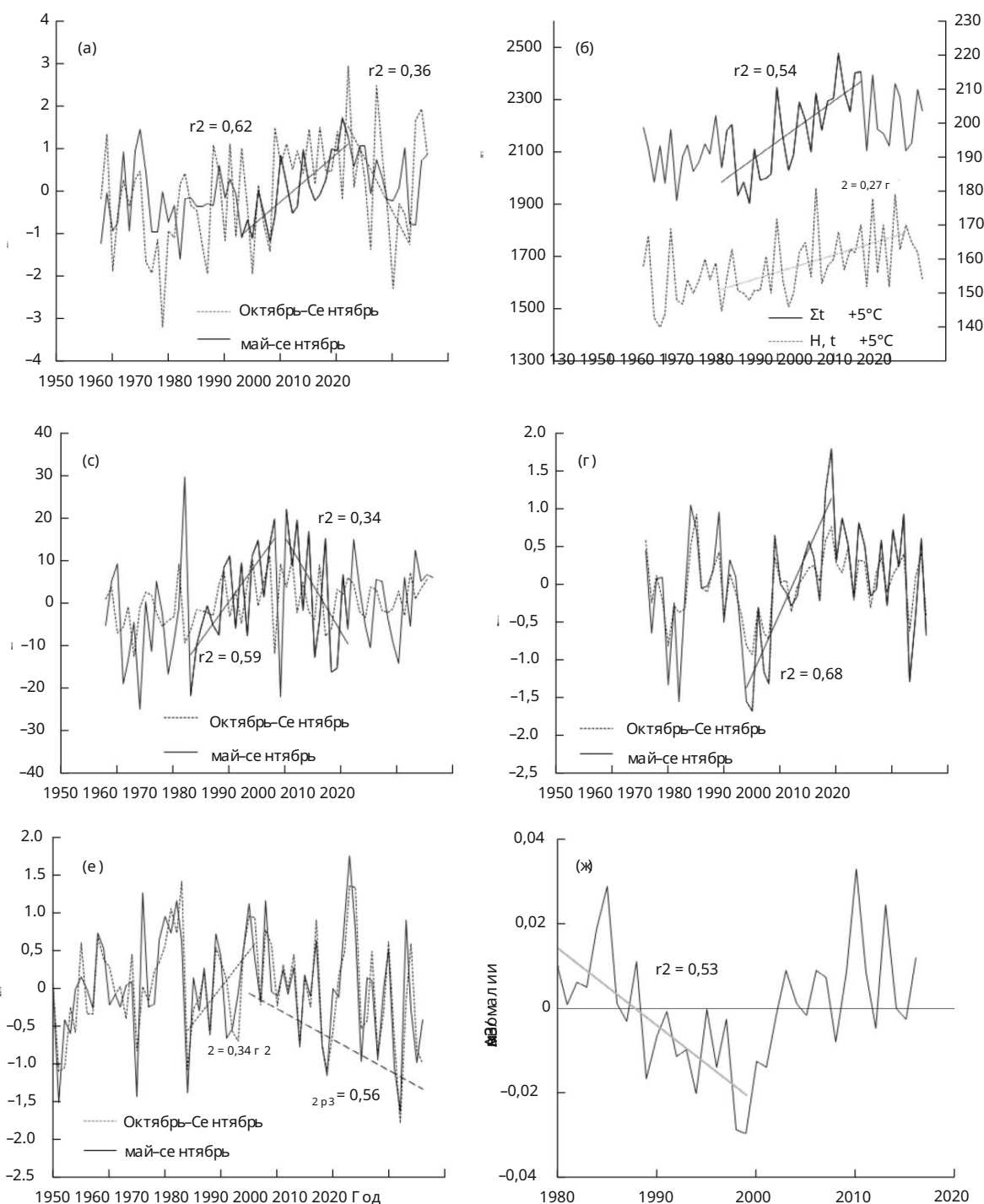


Рис. 2. Динамика эколого-климатических переменных в лесостепной зоне. а) Аномалии температуры воздуха, б) Динамика суммы активных температур продолжительности вегетационного периода (число дней, $N, \Sigma t + 5^\circ\text{C}$), в) Аномалии осадков, г) Аномалии дефицита испаряемости водяного пара (ДУП), д) Аномалии SPEI, е) Аномалии влажности корнеобитаемого слоя (ВКС). Данные представлены для «теплого периода» (май-сентябрь) и гидрологического года (октябрь-сентябрь). Тенденции значимы при $p < 0,05$. Примечание: уменьшение SPEI указывает на увеличение засушливости.

Радиальный прирост лиственницы экологические и климатические переменные

Радиальный прирост лиственницы в лесостепной зоне увеличился, начиная с 1980-х годов, при этом

последующая депрессия в 1990-х годах. В 21 веке наблюдались колебания в стоимости радиальных

Прирост без существенных тенденций (рис. 3а). Рост деревьев в при достаточном увлажнении почвы

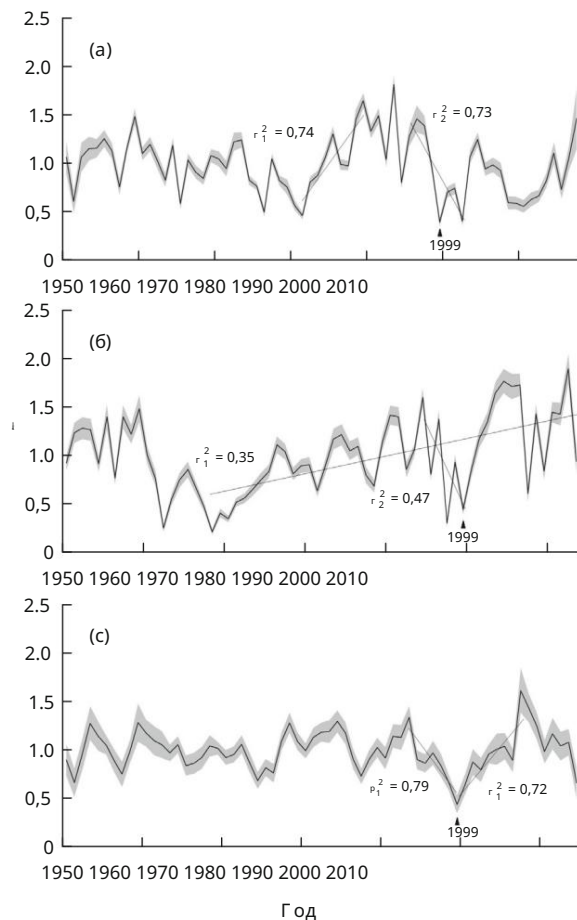


Рис. 3. Динамика индекса прироста лиственничев (а) л е с у степь (N = 160), (б) высокогорье (N = 57) и (с) пойма (N = 40). Годы засухи отмечены стрелками.

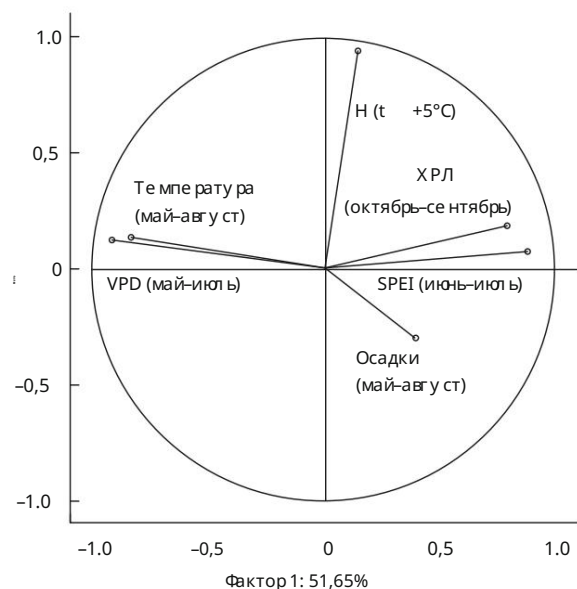


Рис. 4. Диаграмма главных компонентов климатического фактора (л е с у степь). ДПД — дефицит давления водяного пара; HRL — влажность корнеобитаемого слоя; N (t + 5°C) — продолжительность вегетационного периода (количество дней с t + 5°C).

(пойма и высокогорья) также уменьшались в засушливые годы (конец 1990-х; рис. 3б, 3в). Однако в высокогорье, в отличие от лесостепи, наблюдалось общее положительное направление радиального прироста в течение всего периода наблюдений (рис. 3б).

Положительная тенденция радиального прироста лиственничев лесостепи обязана своим происхождением, как следует из уравнения (2), за счет уменьшения засухливости и увеличения продолжительности вегетационного периода:

$$G = 0,21 \text{ СТГ} + 0,02 \text{ Н} + 0,1 \text{ ВПД} + 1,27; \quad (2) \\ (P^2 = 0,86),$$

где G — индекс радиального прироста, N — количество дней с t + 5°C, а VPD — водяной пар дефицит давления.

Последующее снижение радиального прироста (1987–2003) в основном обусловлено негативным влиянием температуры воздуха и дефицита давления водяного пара:

$$G = (0,3 \text{ } 0,06 \text{ ВПД} + 6,02); \quad (3) \\ (P^2 = 0,57)$$

Анализ основных компонентов переменных, влияющих на радиальный прирост, показал, что

Первая составляющая определяется в основном температурой и влагообеспеченностью (VPD, SPEI, HRL и осадками); вторая составляющая — это продолжительность вегетационного периода (рис. 4).

Частные корреляции (рис. 5) показывают, что в лесостепной зоне радиальный прирост отрицательно реагирует к температуре и дефициту давления водяного пара ($r = -0,63$, $r = -0,57$ соответственно; рис. 5а, 5г).

Была обнаружена положительная корреляция с засухой индекс ($r = 0,63$), влажность корнеобитаемого слоя ($r = 0,62$) и продолжительности вегетационного периода ($r = 0,55$; Рис. 5б, 5в, 5д). В отличие от лесостепи, прирост в высокогорье был положительно коррелирован с основным фактором роста, т.е. температурой ($r = 0,74$; рис. 5а); корреляции с остальными переменными были незначимы. Однако в засушливые периоды (конец 1990-х годов), радиальный прирост депрессии также наблюдалось в районах достаточного увлажнения — высокогорья и пойменные насаждения (рис. 3б, 3в).

В этот период радиальный прирост пойменных лиственничевых лесов коррелировал с индексом засухливости ($r = 0,55$), дефицита давления водяного пара ($r = -0,56$), а влажность корнеобитаемого слоя ($r = 0,63$).

В то же время достаточная влажность воздуха Корневой слой не может компенсировать последствия атмосферной засухи (описываемой VPD и SPEI), что это также отметили Новик и др. (2016).

ОБСУЖДЕНИЕ

Начиная с 1970-х годов наблюдался рост индекс роста лиственничев лесостепи, который сменялся в 1990-х годах депрессией. Увеличение радиального прироста было облегчено

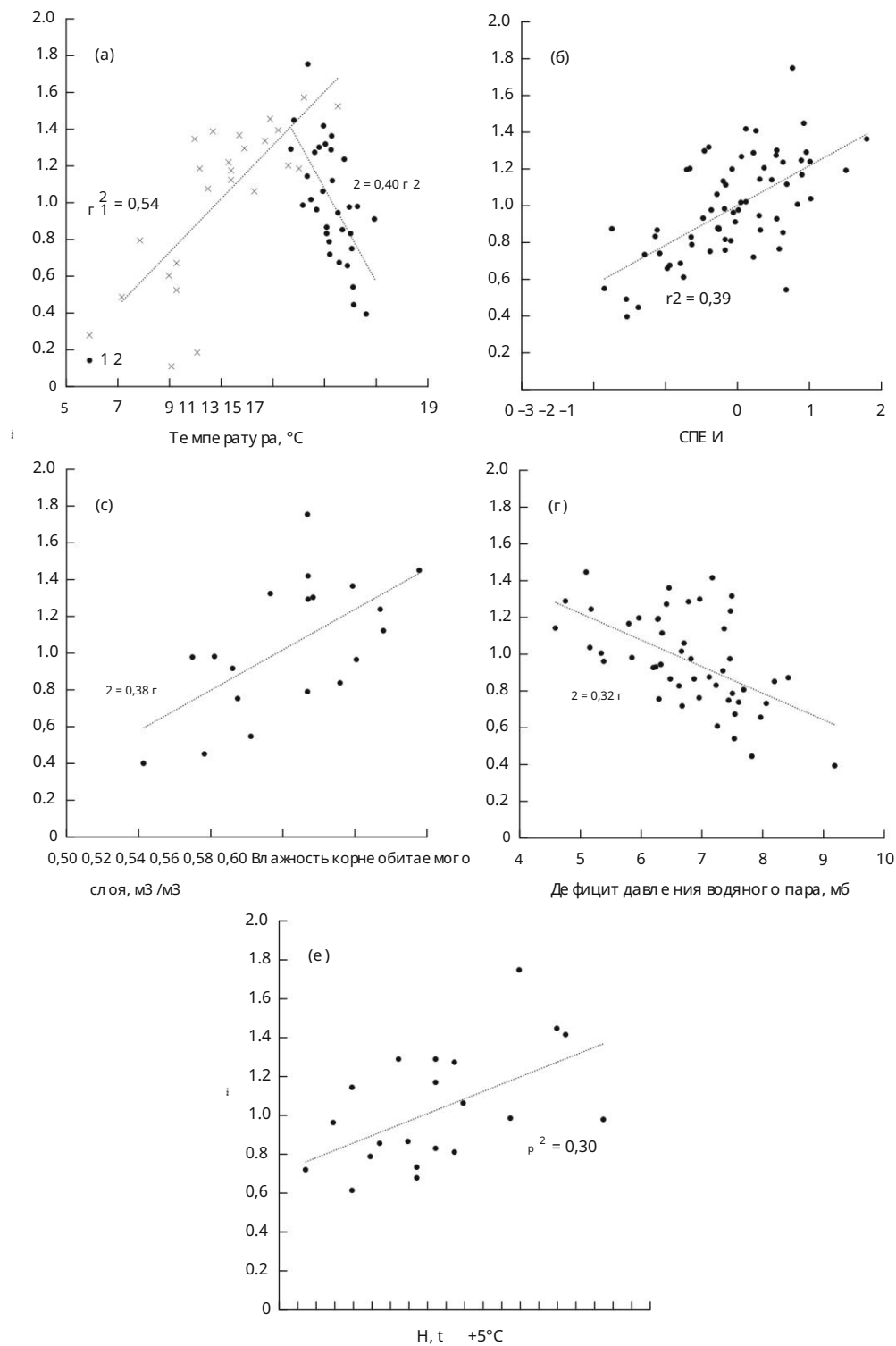


Рис. 5. Зависимость индекса роста от (а) температуры воздуха: (1) высокогорья и (2) лесостепи; (б) SPEI (индекс аридности); (в) влажности корнеобитаемого слоя; (г) дефицита упругости водяного пара; (д) продолжительности вегетационного периода. Временной интервал соответствует максимальному. Примечание: уменьшение SPEI указывает на увеличение засушливости.

уменьшение засушливости климата и увеличение вегетационного периода, когда его продолжительность увеличивается на 8–10 дней. Депрессия радиального прироста обусловлена ростом температуры и водяного пара

Дефицит давления (у р. (2), (3)). Вместе с этим снизилась влажность корнеобитаемого слоя (рис. 2е). При этом не наблюдается значимой связи между радиальным приростом и осадками. Э тот парадокс

объясняются растущей потребностью растений во влаге из-за увеличения уровня эвапотранспирации (уравнение (1)). Бабушкина и др. (2017) также указали на слабую связь между радиальным приростом и осадками.

Подобная динамика роста (увеличение в 1980-х годах с последующим снижением из-за возросшего водного стресса) отмечена также для *P. sibirica* и *A. sibirica* в Прибайкалье и Восточном Саяне (Харук и др., 2017а, б). Отмечено, что отсутствие положительной связи между радиальным приростом и температурой воздуха («феномен дивергенции») ранее было описано и для других членистых бореальных зон (например, Andreu-Hayles et al., 2011), что, вероятно, также было связано с возросшим водным стрессом. Последнее подтверждается данными Restaino et al. (2016). Авторы показали, что рост температуры привел к снижению радиального прироста пихты Дугласа (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.))

Франко) на западе США из-за нарастающего дефицита давления водяного пара. На основании данных рис. 2г и 3а удалены критические значения дефицита давления водяного пара, превышение которого приводило к уменьшению радиального прироста (7–9 мб). Однако увеличение засухливости климата не привело к усугублению климатических последствий, тогда как в подзоне южной тайги в это время наблюдалось усиление насаждений, образованных влаголюбивыми древесными породами и пихтой (Харук и др., 2016). В 2000-е годы наблюдалось колебание радиального прироста со средними значениями, не превышающими таковые до наступления потепления.

В высокогорьях, где рост лиственных пород имитируется в первую очередь температурой, наблюдалась общая тенденция увеличения радиального прироста. Ранее (Петров и др., 2015) было показано существенное (>50%) увеличение прироста лиственных пород в современных условиях по сравнению с началом XX века. В то же время в периоды сильных засух, когда нарушается сезонное распределение осадков, в условиях избыточного среднегодового (>1500 мм) увлажнения высокогорий, а также в пойменных лиственных лесах происходит уменьшение радиального прироста.

Другим зафиксированным эффектом потепления в высокогорьях является продвижение высотных границ распространения древесной растительности, редколесий и сомкнутого древостоя (Харук и др., 2017в). В то же время в высокогорьях юга Алтае-Саянского региона (АСР) прирост имитируется не только температурой, но и условиями влагообеспеченности, что может привести к регрессии верхней границы распространения древесной растительности. По прогнозам (МГЭИК, 2014), на юге Сибири, особенно при «жестких» климатических сценариях (RCP 6.0, RCP 8.5), засухливость климата будет усиливаться, что приведет к снижению интегративности засух в исследуемом регионе (рис. 2д).

В связи с этим следует ожидать снижения радиального прироста лиственных пород, вероятно, в южной части АСР, тогда как в условиях достаточного увлажнения

(Кузнецкий Алатау, Западный Саян) будет наблюдаться дальнейшее увеличение прироста лиственных пород.

В заключение отметим, что высокая (по сравнению с другими лесовосстановительными сибирскими породами) засухоустойчивость лиственных пород позволяет рекомендовать этот вид для лесовосстановления в зонах климатических изменений. Обусловленного усиления темповой (Харук и др., 2016). Лиственные породы сибирского южного также рассматривать в качестве вероятной замены (P. abies) у высаживаемых насаждений в европейской части России и Европы, а также, возможно, и в сосновых насаждениях (P. sylvestris), у которых отмечаются в южной части лесов Украины и Беларуси (Сарнацкий, 2012; Харук и др., 2015; Луфферов, Ковалишин, 2017).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

(1) Потепление, начавшееся в 1980-х годах, уменьшение засухливости климата и увеличение продолжительности вегетационного периода сопровождалось ростом индекса радиального прироста лиственных пород в лесостепи. В начале 1990-х годов прирост прироста снижился из-за увеличения дефицита испаряемости водяного пара и засухливости климата, в результате повышения температуры воздуха. В 2000-х годах наблюдалось колебание прироста, средние значения которых не превышали таковых до начала периода современного потепления климата.

(2) В высокогорьях с 1970-х годов наблюдается общая тенденция увеличения радиального прироста лиственных пород из-за сочетания повышения основного фактора роста: температуры воздуха. При этом в засухливые периоды снижения прироста отмечалась и во влажных местах (высокогорные и пойменные лиственные леса).

(3) При реализации «жестких» (RCP 6.0 и RCP 8.5) климатических сценариев вероятно дальнейшее снижение индекса прироста лиственных пород в лесостепи и его увеличение в районах с достаточным увлажнением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-05-00432. Работа И.А. Петрова поддержана Российским научным фондом, проект № 17-74-10113.

ССЫЛКИ

Аллен, К. Д., Макадаи, А. К., Ченчуни, Х., Бачелет, Д., Макдауэлл, Н., Веннетт, М., Кичберг, Т., Риглинг, А., Брешир, Д. Д., Хогг, Э. Х., Гонсалес, П., Феншам, Р., Чжан, З., Кастро, Дж., Демидова, Н. и др. Глобальный обзор гибели деревьев в важной засухой и жарой, выявляет возникающие риски изменения климата для лесов.
Экологическое моделирование, 2009, т. 259, стр. 660–684.
Андреу-Хейлс, Л., Дарриго, Р., Анчукайтис, К. Дж., Бек, П.С., Франк, Д. и Гетц, С., Различная реакция бореальных лесов на изменение окружающей среды Арктики в

- Ферт-Ривер, Аляска, Environ. Res. Lett., 2011, т. 6, doi 10.1088/1748-9326/6/4/049502
- Бабушкина Е.А., Белокопылова Л.В., Грачев А.М., Мелько, Д.М. и Ваганов Е.А. Вариация гидрологического режима сточного бассейна Белые-Шира в Южной Сибири и ее отражение в радиальном приросте из *Larix sibirica*, Reg. Environ. Change, 2017, т. 17, стр. 1725–1737. doi 10.1007/s10113-017-1137-1
- Чупров Н.П. Усыхание еловых лесов европейской части России. Север России, Лесн. хоз., 2008, вып. 1, стр. 24–26.
- МГЭИК 2014, Изменение климата 2014: Воздействие, Адаптация, и уязвимость. Вклад рабочих групп II к Пятому оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата, Филд, К.Б., Баррос, В.Р., Дркен, Д.Д., Мах, К.Дж., Мастрандреа, доктор медицинских наук, Билер, Т.Э., Чаттерджи, М., Эби, К.Л., Эстрада, ЮО., Диего, Р.С., и др., редакторы. Женева: Всемирная метеорологическая организация, 2014. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>. Доступно 19 мая 2017 г.
- Кук, Э.Р. и Кайрокстис, Л.А., Методы дендрохронологии: приложения в науке об окружающей среде, Dor-drecht: Kluwer, 1990.
- Феттиг, К.Дж., Рид, М.Л., Бенц, Б.Дж., Севанто, С., Спиттхаус, Д.Л. и Ванг, Т., Изменение климата, изменение лесов западной североамериканской перспектива, J. For., 2013, т. 111, № 3, стр. 214–228.
- Холмс, Р.Л., Компьютерный контроль качества при датировании и измерении колец деревьев, Tree-Ring Bull., 1983, т. 44, стр. 69–75.
- Харук В.И., Им, С.Т., Двинская М.Л., Голуков А.С. и Рэнсон, К.Дж., Климатический индустриальный индекс в ели иственники в Беларуси, Письма по охране окружающей среды 2015, т. 10, п. 125006. doi 10.1088/1748-9326/10/12/125006
- Харук, В.И., Им, С.Т., Петров, И.А., и Ягунов, М.Н., Усыхание темных лесных насаждений в Прибайкалье, Созерцание Пробл. Экол., 2016, вып. 9, нет. 5, стр. 617–625.
- Харук В.И., Им С.Т., Петров И.А., Двинская М.Л., Федотова, Е.В. и Рэнсон, К.Дж., Снижение ели и смертность в горах Южной Сибири, обл. Окружающая среда. Изменение, 2017а, т. 17, № 3, стр. 803–812. doi 10.1007/s10113-016-1073-5
- Харук В.И., Им С.Т., Петров И.А., Голуков А.С., Рэнсон К.Дж., Ягунов М.Н. Климатический обеспокоенный индекс сосны пихты сибирской в бассейне озера Байкал, Сибирь // Экологическое управление. 2017б. Т. 384. стр. 191–199.
- Харук В.И., Им, С.Т., Двинская М.Л., Рэнсон К.Дж., и Петров, И.А., Миграция древесной волны через градиент высот в горах Алтая, Сибирь, Журнал горных наук, 2017с, т. 14, № 3, стр. 442–452. doi 10.1007/s11629-016-4286-7
- Клеппель, Б.Д., Гауэр, С.Т., Тречел, И.В. и Харук, В., Дискриминация изотопов углерода в листьях видов *Larix* и симпатрические вечнозеленые хвойные: глобальное сравнение, Экология, 1998, вып. 14, стр. 153–159.
- Колб, Т.Э., Феттиг, Сиджей, Эйрес, член парламента, Бенц, Биджей, Хикс, Дж.А., Матиасен, Р., Старт, Дж.Э. и Вид, А.С., Наблюдаемые и ожидаемые последствия засух на лесах насекомых и болезнях в Соединенных Штатах Штаты For. Ecol. Manage., 2016, т. 380, стр. 321–324. <http://dx.doi.org/>. doi 10.1016/j.foreco.2016.04.051
- Ллойд, А.Х. и Банн, А.Г., Реакции циркулярного региона борельных лесов 20-го века из изменений климата, Environ. Res. Lett., 2007, т. 2, № 4, стр. 045013. <http://iop-science.iop.org/> 1748-9326/2/4/045013. Доступно 22 апреля, 2014.
- Луфьев А.О., Ковалишин В.Р. Проблема усыхания сосновых насаждений на территории Белорусского и Украинского лесничества // Материалы 5-ой международной конференции «Сохранение лесных генетических ресурсов», Гомель, Беларусь, 2–7 октября 2017 г. (Материалы 5-й Международной конференции «Сохранение лесных генетических ресурсов», Гомель, Беларусь, 2–7 октября 2017 г.), Минск: Колордрук, 2017, стр. 119–120.
- Миллар, С.И. и Стивенсон, Н.Л., Здоровье лесов умеренного пояса в эпоху возникновения мега-возмущений, Science, 2015, т. 349, № 6250, стр. 823–826. doi 10.1126/science.1259933
- Новик, К.А., Фиклин, Д.Л., Стой, Р.С., Уильямс, С.А., Бох, Г., Ойши, А.С., Папуга, С.А. и др., Растущая важность атмосферного спроса для экосистемных потоков воды в углерода, Nat. Clim. Change, 2016. doi 10.1038/NCLIMATE3114
- Павлов И.Н., Рухомлаева О.В., Барабанова О.А., Агеев А.А. Роль корневых патогенов в ухудшении состояния лесного фонда Сибирского федерального округа // Хвойные борельной зоны 2008. № 3–4. стр. 262–268.
- Петров И.А., Харук В.И., Двинская М.Л., Им С.Т. Реакция хвойных деревьев в Кузнецкого Алатау экотонах пихтовой лесостепи из изменения климата, Современные проблемы экологии, 2015, т. 8, № 4, стр. 423–430. doi 10.1134/S1995425515040137
- Рейстайно, С.М., Петерсон, Д.Л. и Литтелл, Дж., Увеличение дефицита воды снижает рост пихты Дугласа по всему миру в западных лесах США, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2016, том. 113, нет. 34. doi 10.1073/pnas.1602384113
- Ринн, Ф., TSAP V 3.6. Справочное руководство: компьютерная программа для анализа и представления годовых колец деревьев, Гейдельберг, Фрэнк Ринн, 1996.
- Росси, С., Делорье, А., Грисар, Ж., Сео, Ж.-В., Ратгебер, Ц.Б.К., Анфодилло, Т., Морен, Х., Леванич, Т., Овен, П. и Ялканен, Р., Критические температуры для ксилемы не у хвойных деревьев в холодном климате, Global Ecol. Биогеограф., 2008, т. 17, стр. 696–707. doi 10.1111/j.1466-8238.2008.00417.x
- Сарнацкий В.В. Зональная типологическая закономерность периодических массовых повреждений еловых лесов в Беларуси, Труды Белгос. Технол. ун-та, Лесн. хоз., 2012. С. 274–276.
- Спир, Дж.Х., Основы исследования годовых колец деревьев в Тусон: Исследовательство Аризонского университета, 2010.
- StatSoft, Электронный учебник по статистике, 2013. <http://www.statsoft.com/textbook>. Доступно 22 апреля 2014 г.

Перевод Т. Борисовой