

Сравнительная реакция прироста лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.) на изменения климата в лесостепи и высокогорьях Южной Сибири

В. И. ХАРУК^{1,2}, И. А. ПЕТРОВ¹, М. Л. ДВИНСКАЯ¹, С. Т. ИМ^{1,2,3}, А. С. ШУШПАНОВ¹

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: kharuk@ksc.krasn.ru

² Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

³ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева
660037, Красноярск, просп. Красноярский рабочий, 31

Статья поступила 16.01.2018

Принята к печати 30.01.2018

АННОТАЦИЯ

Рассмотрено воздействие изменений климата на прирост лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.) в условиях ограниченного (лесостепь) и достаточного (высокогорья Кузнецкого Алатау, пойменные древо-стои) увлажнения. Проанализирована связь индекса прироста деревьев лиственницы ($N = 257$) с эколого-климатическими переменными. В лесостепи с началом потепления, снижения засушливости климата и возрастания длительности периода вегетации (1980-е гг.) наблюдалось увеличение индекса прироста лиственницы с последующей его депрессией в 1990-х гг. Депрессия прироста обуславливалась возрастанием дефицита давления водяного пара и засушливости климата вследствие повышающейся температуры воздуха. В 2000-х гг. происходили флуктуации прироста со средними значениями, не превышающими таковые до начала современного периода потепления климата. В высокогорьях начиная с 1970-х гг. наблюдался общий тренд увеличения прироста лиственницы, тесно связанный с основным лимитирующим рост фактором – температурой воздуха. Вместе с тем в засушливые годы депрессия прироста отмечалась также в высокогорных и пойменных лиственничниках. При реализации “жестких” климатических сценариев (RCP 6.0, RCP 8.5) вероятно дальнейшее снижение индекса прироста лиственницы в лесостепи и его возрастание в зонах достаточного увлажнения.

Ключевые слова: лиственница, изменения климата, лесостепь, высокогорные леса, индекс прироста, дефицит влаги, индекс засушливости, водный стресс и прирост.

Наиболее значимое воздействие изменений климата на древесные растения наблюдается в переходных зонах (экотонах) между различными типами растительного покрова, где рост древесных растений лимити-

руется температурой или влагой [Lloyd, Bunn, 2007; IPCC, 2014]. В последние десятилетия лимитирование по влагообеспечению (вследствие возрастания засушливости климата, частоты и интенсивности засух) наблюдает-

ся во всех частях бореальной зоны, что, в сочетании с активизацией биотических воздействий, повлекло усыхание древостоев, преимущественно вечнозеленых хвойных, в лесах Северной Америки [Allen et al., 2009; Millar, Stephenson, 2015], Западной и Восточной Европы и России [Fettig et al., 2013; Харук и др., 2016; Kolb et al., 2016]. В европейской части России и Белоруссии происходит усыхание ели (*Picea abies* (L.) Н. Karst.) [Чупров, 2008; Сарнацкий, 2012], в Сибири ухудшается состояние пихты и кедра (*Abies sibirica* Ledeb., *Pinus sibirica* du Tour), обусловленное синергизмом водного стресса и биотических воздействий [Павлов и др., 2008; Kharuk et al., 2015; Харук и др., 2016]. В настоящее время отмечено усыхание древостоев, сформированных *Pinus sylvestris* L., видом сравнительно засухоустойчивым, в лесостепной зоне Украины и в юго-западной части Белоруссии [Луферов, Ковалишин, 2017]. Лимитирование по влаге может наблюдаться также и в высоких широтах [Kharuk et al., 2015].

Лиственница (*Larix sibirica*, *L. dahurica* Turcz.), благодаря высокой эффективности использования воды, позволяющей этому виду произрастать при низком (до 250 мм/год) уровне осадков, относится к наиболее засухоустойчивым древесным растениям Сибири [Клоерпел et al., 1998]. В условиях прогнозируемой в ряде регионов аридизации климата и изменения лесорастительных условий лиственница может рассматриваться как потенциальная замена неустойчивых к засухе древесных пород (например, *Abies sibirica*, *Pinus sibirica*, *Picea abies*), утрачивающих часть своих ареалов [Сарнацкий, 2012; Millar, Stephenson, 2015; Харук и др., 2016].

Цель данной работы – сравнительный анализ воздействия изменений климата на радиальный прирост лиственницы сибирской, произрастающей в экотоне лесостепи и в условиях достаточного увлажнения (высокогорья, пойменные древостои).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом служили сформированные лиственницей сибирской (*Larix sibirica*) древостои экотона лесостепи (Средняя Сибирь,

Минусинская котловина) и в высокогорьях Кузнецкого Алатау (рис. 1). Образцы древесины (керны) отбирали с помощью приростного бурава на пробных площадях (ПП; $n = 9$), расположенных в лесостепи ($n = 7$), пойме реки ($n = 1$) и высокогорьях ($n = 1$). ПП представляли собой либо трансекты на горных склонах (№ 1, 2, 3, 4, 8, 9; см. рис. 1), либо участки на равнине площадью 0,25 га (№ 5–7). Характеристики ПП и биометрия деревьев приведены в табл. 1. Трансекты закладывали на склонах южной экспозиции – от границы сомкнутых древостоев до границы распространения древесной растительности в остепенной зоне (трансекты № 1, 2, 4, 8, 9), или до границы горной лесотундры (№ 3). Отбор образцов проводили с интервалом 10 м по высоте над уровнем моря. На ПП вне трансект образцы отбирали в случайном порядке. На каждой ПП фиксировали координаты отбора образцов, выполняли геоботаническое описание, определяли тип почв, экзогенные воздействия (пожары, рубки). Почвы представлены бурыми степными в лесостепи и бурыми щебнистыми лесными в высокогорьях. В лесостепи подрост (древесные растения в возрасте до 30 лет) представлен единичными экземплярами; в высокогорьях средняя численность подроста составляла ~300 шт./га. На большинстве ПП отмечены следы воздействия низовых пожаров (нагар). Ни на одной из ПП не наблюдалось отпада деревьев.

Дендрохронологический анализ выполнен на основе выборки деревьев лиственницы (лесостепь – $N = 160$, высокогорья – $N = 57$, пойма реки – $N = 40$). Измерения кернов древесины проводили на платформе LINTAB 3 с точностью 0,01 мм [Rinn, 1996]. В результате получены абсолютные индивидуальные хронологии для каждого дерева (в миллиметрах). Для проверки качества датировки использовали программы TSAP и COFESHA [Holmes, 1983]. Для устранения возрастного тренда применяли процедуру стандартизации, которая преобразует временные ряды ширины годовых колец к временным рядам безразмерных индексов со средним 1,0 и относительно постоянной дисперсией [Speer, 2010].

Для получения индексированных обобщенных древесно-кольцевых хронологий конкрет-

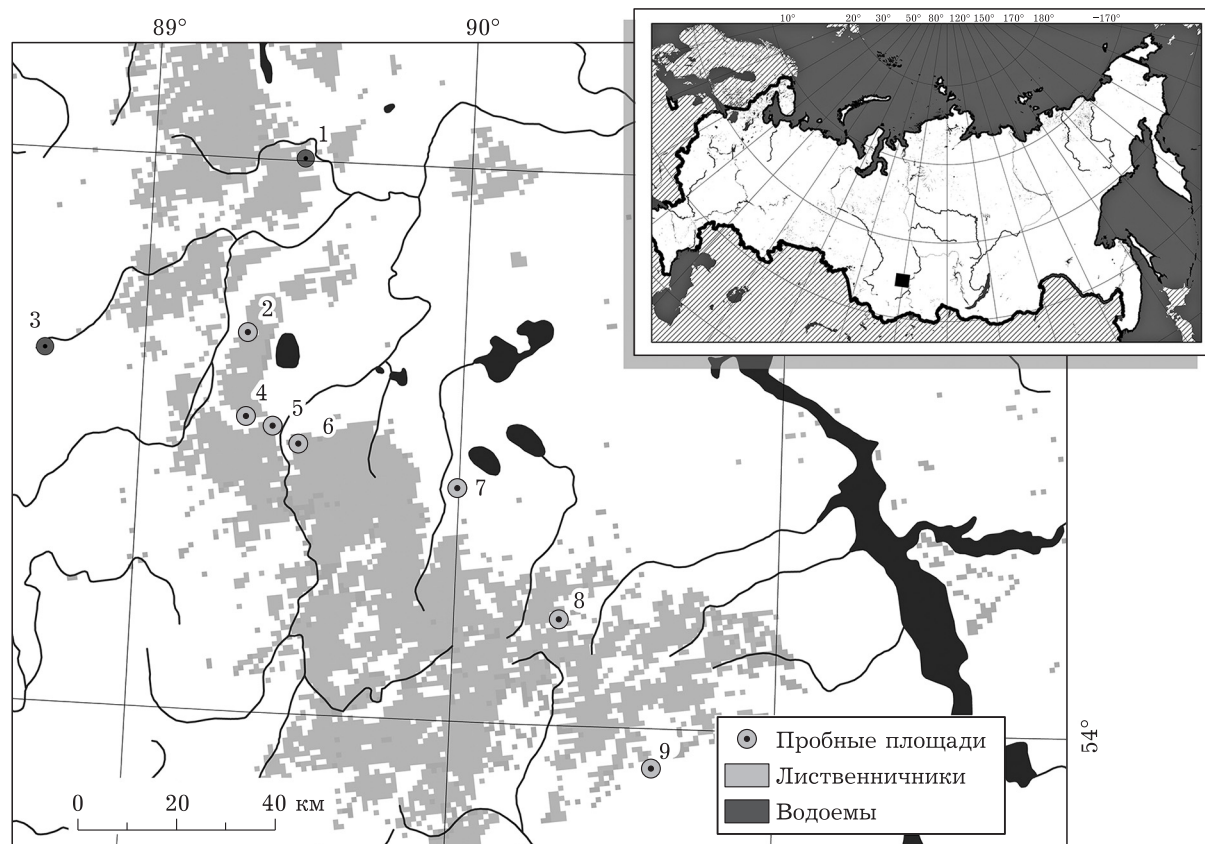


Рис. 1. Карта-схема размещения пробных площадей (на вставке отмечена квадратом). 1, 2, 4, 6–9 – лесостепь; 5 – пойма реки; 3 – высокогорья

ной пробной площади индексы прироста отдельных деревьев усредняли. Для каждой ПП построили стандартизированную и “остаточную” (полученную из стандартизированной посредством сведения к минимуму автокорреляционной составляющей) хронологии в

программе ARSTAN; детрендирование осуществляли линейной регрессией или отрицательной экспоненциальной кривой [Cook, Kairiukstis, 1990]. В дендроклиматическом анализе использовали “остаточные” хронологии, представленные безразмерным индексом

Т а б л и ц а 1

Таксационные характеристики деревьев на ПП

Номер	Высота ПП (max – min), м над ур. м.	Длина трансекты, м	Возраст деревьев, лет	Высота деревьев, м	Диаметр деревьев, 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
3	1350–1290	200	138 ± 12	4,2 ± 0,3	15 ± 2,1
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

Статистика индивидуальных хронологий

Номер ПП	Количество образцов	Средний прирост	Максимальный прирост	Межсерийная корреляция	Стандартное отклонение Σ	Коэффициент чувствительности
1, 2, 4, 6, 7, 8, 9	160	1,39	11,68	0,59	1,05	0,46
3 (высокогорья)	57	0,57	4,70	0,62	0,38	0,44
5 (пойма реки)	40	2,13	9,86	0,42	1,27	0,31

сом прироста. Выбор “остаточных” хронологий обусловлен отсутствием в последних автокорреляционной составляющей, что значительно усиливает климатический сигнал. Статистика индивидуальных хронологий приведена в табл. 2.

Индекс прироста рассматривался в связи со следующими эколого-климатическими переменными: температура воздуха, осадки, дефицит давления водяного пара (ДВП), индекс засухи SPEI, влажность корнеобитаемого слоя (ВКС), сумма активных температур ($t \geq +5$ °C), продолжительность периода вегетации (число дней с $t \geq +5$ °C). Как показано в работе S. Rossi et al. [2008], ксилогенез хвойных наблюдается при повышении температуры воздуха до $+4...+5,8$ °C. Климатические переменные получены по данным локальных метеостанций Светлолобово (лесостепь, расстояние до ПП ~ 90 км) и Ненастная (высокогорья, расстояние до ПП ~ 10 км).

Влажность корнеобитаемого слоя (принимаемого равным 0–100 см) получена из базы данных MERRA2 (наземное разрешение $0,5 \times 0,625^\circ$ <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2>).

Засушливость климата оценивалась по индексу сухости SPEI, представляющего разность (D_i) между величинами осадков (P_i) и потенциальной эвапотранспирации (PET_i):

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

где i – месяцы (пространственное разрешение – $0,5 \times 0,5^\circ$; <http://sac.csic.es/spei>).

Статистический анализ выполнен в программной среде StatSoft Inc. [2013].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика эколого-климатических переменных. В зоне лесостепи среднегодовая тем-

пература, среднелетняя (ИИА) и среднезимняя (ДЯФ) температуры составляют $+0,2$, $+16,3$, $-17,2$ °C соответственно. Температуры января и июля – -19 и $+18,1$ °C. Среднегодовые суммарные осадки составляют 331 мм, летние – 183 мм. В высокогорьях среднегодовая температура, среднелетняя и среднезимняя температуры составляют $-2,2$, $+12$ и -15 °C соответственно. Температуры января и июля – -15 и $+13$ °C. Среднегодовые суммарные осадки составляют 1600 мм, летние – 380 мм.

Положительные тренды температуры воздуха наблюдались с 1970-х гг. (для гидрологического года) и с 1980-х гг. (для периода май – сентябрь) по начало 2000-х гг. без значимых трендов в дальнейшем (рис. 2, а). Сумма активных температур возрастала в период 1980 – начало 2000-х гг.; длительность периода вегетации увеличивалась в течение всего периода наблюдений (см. рис. 2, б). Величина осадков в “теплый период” возрастала начиная с 1970-х гг. с последующим трендом снижения в 1990-х гг. (см. рис. 2, в). Дефицит давления водяного пара возрастал в период 1980–2000 гг. без значимых трендов в дальнейшем (см. рис. 2, г). Величина засушливости климата (оцениваемая по SPEI) уменьшалась в 1975–1990 гг.; в дальнейшем наблюдался тренд минимальных значений SPEI: происходило возрастание интенсивности засух (см. рис. 2, д). Влажность корнеобитаемого слоя снижалась до начала 2000-х гг. без значимых трендов в дальнейшем (см. рис. 2, е).

Прирост лиственницы и эколого-климатические переменные. Прирост лиственницы в лесостепи возрастал начиная с 1980-х гг. с последующей депрессией в 1990-х гг.; в XXI в. происходили флуктуации величины прироста без значимых трендов (рис. 3, а). У

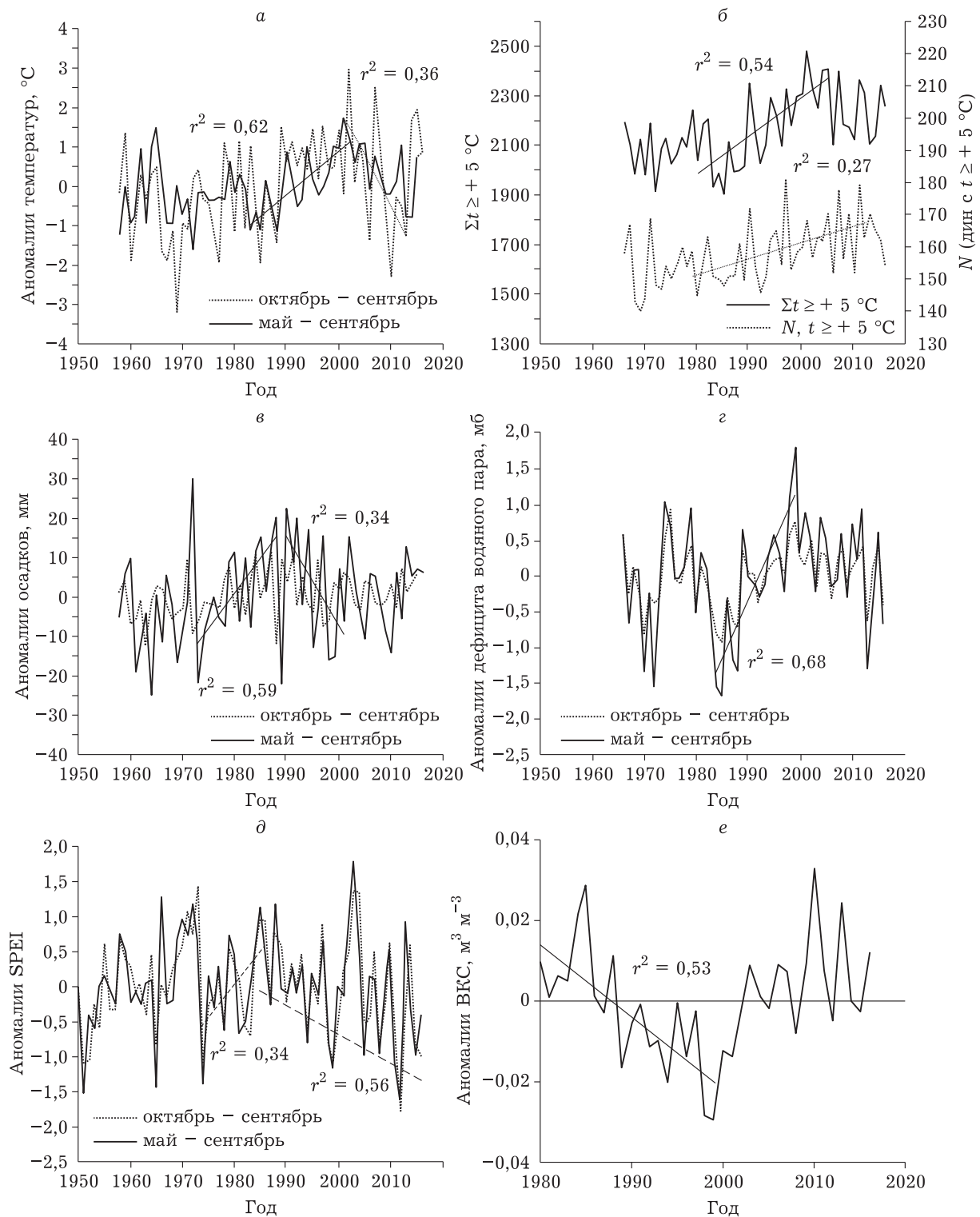


Рис. 2. Динамика эколого-климатических переменных в зоне лесостепи. Аномалии: а – температуры воздуха, в – осадков, г – дефицита давления водяного пара (ДВП), д – SPEI, е – влажности корнеобитаемого слоя (ВКС), б – динамика суммы активных температур и длительности периода вегетации (количество дней, N , с $t \geq +5$ °C). Данные представлены за “теплый период” (май – сентябрь) и гидрологический год (октябрь – сентябрь). Тренды значимы при $p < 0,05$. Уменьшение SPEI индицирует возрастание засухливости

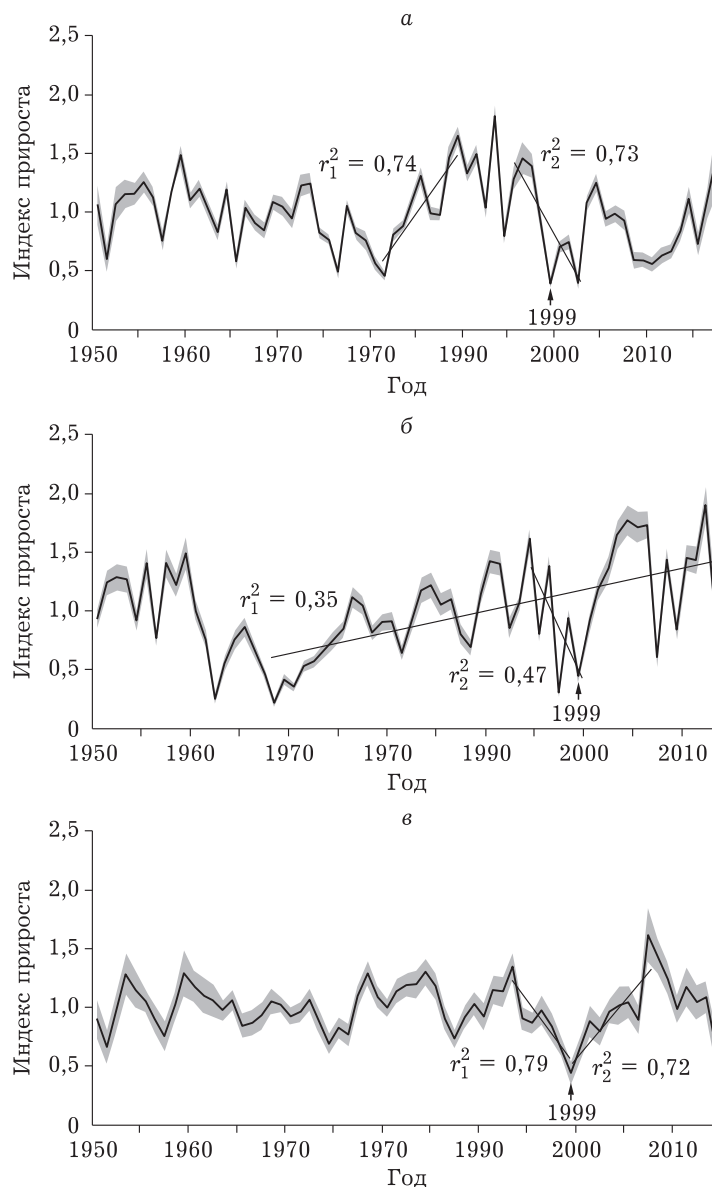


Рис. 3. Динамика индекса прироста лиственницы в лесостепи ($N = 160$) (а), в высокогорьях ($N = 57$) (б) и пойме реки ($N = 40$) (в). Стрелками отмечен год засухи

деревьев, произраставших в условиях достаточного почвенного увлажнения (пойма, высокогорья), прирост также снижался в засушливые годы (конец 1990-х гг.; см. рис. 3, б, в). Однако в высокогорьях, в отличие от лесостепи, наблюдался общий положительный тренд прироста в течение всего периода наблюдений (см. рис. 3, б).

Положительный тренд прироста лиственницы лесостепи обусловлен, как следует из уравнения (2), снижением засушливости и возрастанием длительности периода вегетации:

$$G = 0,21 \cdot (\text{SPEI}) + 0,02N - 0,1 \cdot (\text{ДВП}) - 1,27; \quad (R^2 = 0,86), \quad (2)$$

где G – индекс прироста, N – число дней с $t \geq +5$ °C, ДВП – дефицит давления водяного пара.

Последующая депрессия прироста (1987–2003 гг.) связана преимущественно с негативным влиянием температуры воздуха и дефицита давления водяного пара:

$$G = -0,3t - 0,06 \cdot (\text{ДВП}) + 6,02; \quad (R^2 = 0,57). \quad (3)$$

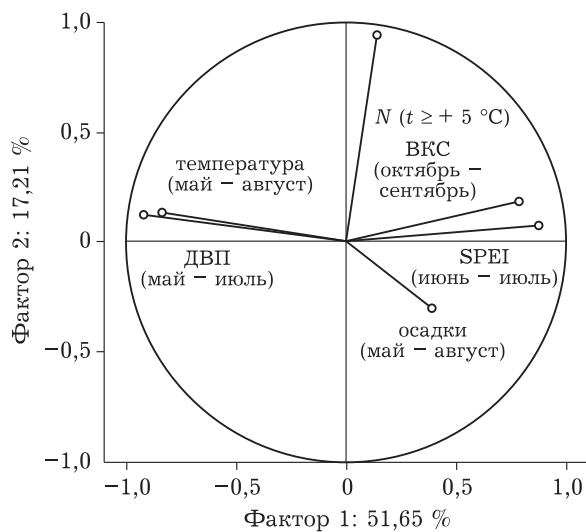


Рис. 4. Диаграмма главных компонент климатических факторов (лесостепь). ДВП – дефицит насыщения водяного пара, ВКС – влажность корнеобитаемого слоя, $N(t \geq +5 \text{ } ^\circ\text{C})$ продолжительность периода вегетации (число дней с $t \geq +5 \text{ } ^\circ\text{C}$)

Анализ главных компонент переменных, влияющих на прирост, показал, что первая компонента определяется преимущественно температурой и условиями влагообеспечения (ДВП, SPEI, ВКС, осадки), вторая – продолжительностью периода вегетации (рис. 4).

Частные корреляции (рис. 5) показывают, что в лесостепи прирост негативно реагирует на температуру, индекс засухи и дефицит давления водяного пара ($r = -0,63$; $r = 0,63$; $r = -0,57$ соответственно; см. рис. 5, а, б, г). Положительная корреляция выявлена с влажностью корнеобитаемого слоя ($r = 0,62$) и длительностью периода вегетации ($r = 0,55$; см. рис. 5, в, д). В отличие от лесостепи, в высокогорьях прирост положительно коррелирует с основным лимитирующим рост фактором – температурой ($r = 0,74$; см. рис. 5, а); корреляции с остальными переменными незначимы. Однако в засушливый период (конец 1990-х гг.) депрессия прироста наблюдалась и в зонах достаточного увлажнения – высокогорьях, и в пойменных древостоях (см. рис. 3, б, в). В указанный период прирост пойменных лиственничников коррелировал с индексом засухи ($r = 0,55$), дефицитом давления водяного пара ($r = -0,56$) и влажностью корнеобитаемого слоя ($r = 0,63$).

При этом достаточная влажность корнеобитаемого слоя может не компенсировать воздействие атмосферной засухи (описываемой ДВП, SPEI), что отмечено также и в работе К. А. Novick et al. [2016].

ОБСУЖДЕНИЕ

Начиная с 1970-х гг. в лесостепи наблюдалось возрастание индекса прироста деревьев лиственницы, сменившееся в 1990-х гг. его депрессией. Возрастанию прироста способствовали снижение засушливости климата и увеличение периода вегетации, длительность которого возросла на 8–10 дней. Депрессия прироста обуславливалась возрастанием температуры и дефицита давления водяного пара (2), (3). Наряду с этим, происходило снижение влажности корнеобитаемого слоя (см. рис. 2, е). Вместе с тем значимой связи прироста с осадками не установлено. Этот парадокс объясняется возрастанием потребности растений во влаге вследствие роста уровня эвапотранспирации (1). На слабую связь прироста с осадками указывают также данные [Babushkina et al., 2017].

Аналогичная динамика прироста (возрастание в 1980-е гг. с последующей депрессией вследствие увеличения водного стресса) отмечена также для *Pinus sibirica* и *Abies sibirica* в Прибайкалье и Восточном Саяне [Kharuk et al., 2017a, b]. Отметим, что отсутствие положительной связи прироста с температурой воздуха (“феномен дивергенции”) ранее описан и для других частей бореальной зоны [Andreu-Hayles et al., 2011], что, вероятно, также обусловлено возрастанием водного стресса. Последнее подтверждается данными С. М. Restaino et al. [2016], показавшими, что повышение температуры привело к снижению прироста пихты Дугласа (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) на западе США вследствие возрастания дефицита давления водяного пара. Исходя из данных рис. 2, г и 3, а, можно оценить критическую величину дефицита давления водяного пара, превышение которого влечет снижение прироста лиственницы (7–9 мбар). Однако возрастание засушливости климата не повлекло усыхания лиственничников ле-

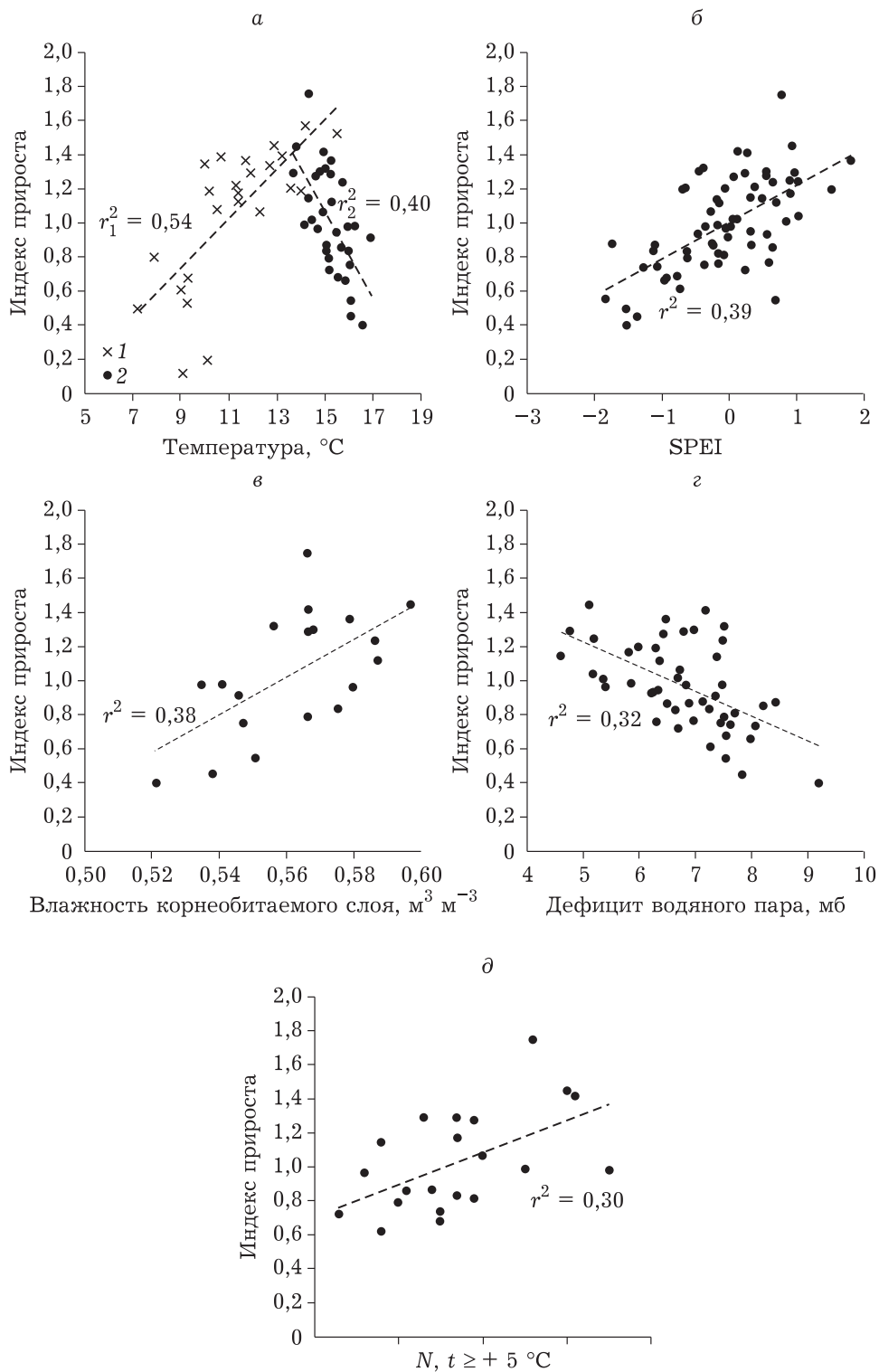


Рис. 5. Зависимость индекса прироста от температуры воздуха (1 – высокогорья; 2 – лесостепь) (а), индекса сухости SPEI (б), влажности корнеобитаемого слоя (в), дефицита насыщения водяного пара (г), продолжительности периода вегетации (е). Временной интервал соответствует максимуму r^2 . Уменьшение SPEI индицирует возрастание засушливости

состепи, в то время как в подзоне южной тайги наблюдалось усыхание древостоев, сформированных влаголюбивыми сосной кедровой сибирской и пихтой [Харук и др., 2016]. В 2000-х гг. происходили флуктуации прироста при средних величинах, не превышавших таковые до начала потепления.

В высокогорьях, где рост лимитируется преимущественно температурой, наблюдался общий тренд возрастания прироста. Ранее [Петров и др., 2015] показано значительное (> 50 %) увеличение прироста лиственницы в современных условиях по сравнению с таковым в начале XX в. В то же время в периоды сильных засух, когда нарушается сезонное распределение осадков, снижение прироста происходит в условиях избыточно среднегодового (> 1500 мм) увлажнения высокогорий, а также в пойменных лиственничниках. Другой документированный эффект потепления в высокогорьях – продвижение высотных границ древесной растительности, редколесий и сомкнутых древостоев [Kharuk et al., 2017c]. Вместе с тем в высокогорьях юга Алтае-Саянского региона (АСР) наблюдается лимитирование прироста не только температурой, но и условиями влагообеспечения, что может повлечь регрессию верхней границы древесной растительности. Согласно прогнозам [IPCC, 2014], в южной Сибири, особенно при “жестких” климатических сценариях (RCP 6.0, RCP 8.5), будет происходить возрастание засушливости климата, что подтверждается трендом возрастания интенсивности засух в исследуемом регионе (см. рис. 2, д). В этой связи следует ожидать снижения прироста лиственничников лесостепи и, вероятно, в горах южной части АСР, в то время как в условиях достаточного увлажнения (Кузнецкий Алатау, Западный Саян) будет наблюдаться дальнейшее возрастание прироста лиственницы.

В заключение отметим, что высокая (в сравнении с другими лесобразующими породами Сибири) засухоустойчивость лиственницы позволяет рекомендовать этот вид для лесовозобновления в зонах климатически индуцированного усыхания темнохвойных [Харук и др., 2016]. Лиственница сибирская может рассматриваться и как ве-

роятная замена ели (*Picea abies*) в усыхающих древостоях европейской части России, в Европе, а также, возможно, и сосны (*Pinus sylvestris*), усыхание которой отмечено в южной части лесов Украины и Белоруссии [Сарнацкий 2012; Луферов, Ковалишин, 2017].

ВЫВОДЫ

1. Начавшееся в 1980-е гг. потепление, снижение засушливости климата и возрастание длительности периода вегетации сопровождалось увеличением индекса прироста лиственницы в лесостепи. В начале 1990-х гг. возрастание прироста сменилось его депрессией вследствие увеличения дефицита давления водяного пара и засушливости климата, обусловленными возрастающей температурой воздуха. В 2000-х гг. происходили флуктуации прироста при средних величинах, не превышавших таковые до начала периода современного потепления климата.

2. В высокогорьях, начиная с 1970-х гг., наблюдается общий тренд возрастания прироста лиственницы, обусловленный возрастанием основного лимитирующего рост фактора – температуры воздуха. Вместе с тем в засушливые периоды депрессия прироста отмечалась также во влажных местопроизрастаниях (высокогорные и пойменные лиственничники).

3. При реализации “жестких” (RCP 6.0, RCP 8.5) климатических сценариев вероятно дальнейшее снижение индекса прироста лиственницы в лесостепи и его возрастание в зонах достаточного увлажнения.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-05-00432). Вклад И. А. Петрова поддержан Российским научным фондом (проект № 17-74-10113).

ЛИТЕРАТУРА

Луферов А. О., Ковалишин В. Р. Проблема усыхания сосновых насаждений на территории белорусского и украинского Полесья // Сохранение лесных генетических ресурсов: мат-лы 5-й Междунар. конф.-совещ. (2–7 октября 2017 г., Гомель, Беларусь). Ин-т

- леса НАН Беларуси, ООО “Колордрук”, 2017. С. 119–120.
- Павлов И. Н., Рухуллаева О. В., Барабанова О. А., Агеев А. А. Оценка роли корневых патогенов в ухудшении состояния лесного фонда Сибирского федерального округа // Хвойные бореальной зоны. 2008. № 3-4. С. 262–268.
- Петров И. А., Харук В. И., Двинская М. Л., Им С. Т. Реакция хвойных экотона альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау на изменение климата // Сиб. экол. журн. 2015. № 4. С. 518–527 [Petrov I. A., Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Im S. T. Reaction of coniferous trees in the Kuznetsk Alatau alpine forest tundra ecotone to climate change // Contemporary Problems of Ecology. 2015. Vol. 8, N 4. P. 423–430. DOI:10.1134/S1995425515040137].
- Сарнацкий В. В. Зонально-типологические закономерности периодического массового усыхания ельников Беларуси // Тр. БГТУ. Лесное хоз-во. 2012. С. 274–276.
- Харук В. И., Им С. Т., Петров И. А., Ягунов М. Н. Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья // Сиб. экол. журн. 2016. № 5. С. 750–760 [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, N 5. P. 617–625].
- Чупров Н. П. К проблеме усыхания ельников в лесах Европейского Севера России // Лесное хоз-во. 2008. № 1. С. 24–26.
- Allen C. D., 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., 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 // For. Ecol. Manage. 2009. Vol. 259. P. 660–684.
- Andreu-Hayles L., D’Arrigo R., Anchukaitis K. J., Beck P. S., Frank D., Goetz S., Varying boreal forest response to Arctic environmental change at the Firth River, Alaska // Environ. Res. Lett. 2011. 6. DOI:10.1088/1748-9326/6/4/049502.
- Babushkina E. A., Belokopytova L. V., Grachev A. M., Meko D. M., Vaganov E. A., Variation of the hydrological regime of Bele-Shira closed basin in Southern Siberia and its reflection in the radial growth of *Larix sibirica* // Regional Environ. Change. 2017. Vol. 17. P. 1725–1737. DOI:10.1007/s10113-017-1137-1.
- IPCC 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. A Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova et al. Switzerland: Geneva, World Meteorological Organization, 2014. 190 p. Available online: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> (accessed on 19 May 2017).
- Cook E. R., Kairiukstis L. A. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Science. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.
- Fettig C. J., Reid M. L., Bentz B. J., Sevanto S., Spittlehouse D. L., Wang T. Changing climates, changing forests: A western North American perspective // J. Forestry. 2013. Vol. 111, N 3. P. 214–228.
- Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bull. 1983. Vol. 44. P. 69–75.
- Kharuk V. I., Im S. T., Dvinskaya M. L., Golukov A. S., Ranson K. J. Climate-induced mortality of spruce stands in Belarus // Environ. Res. Lett. 2015. Vol. 10, 125006. DOI:10.1088/1748-9326/10/12/125006.
- Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Dvinskaya M. L., Fedotova E. V., Ranson K. J. Fir decline and mortality in the Southern Siberian Mountains // Regional Environ. Change. 2017a. Vol. 17, N 3. P. 803–812. DOI:10.1007/s10113-016-1073-5.
- Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Golyukov A. S., Ranson K. J., Yagunov M. N. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed, Siberia // Forest Ecol. and Management. 2017b. Vol. 384. P. 191–199.
- Kharuk V. I., Im S. T., Dvinskaya M. L., Ranson K. J., Petrov I. A. Tree wave migration across an elevation gradient in the Altai Mountains, Siberia // J. Mountain Sci. 2017c. Vol. 14, N 3. P. 442–452. DOI: 10.1007/s11629-016-4286-7.
- Kloppel B. D., Gower S. T., Trechel I. W., Kharuk V. Foliar carbon isotope discrimination in *Larix* species and sympatric evergreen conifers: a global comparison // Oecologia. 1998. Vol. 14. P. 153–159.
- Kolb T. E., Fettig C. J., Ayres M. P., Bentz B. J., Hicke J. A., Mathiasen R., Stewart J. E., Weed A. S. Observed and anticipated impacts of drought on forests insects and diseases in the United States // For. Ecol. Manage. 2016. Vol. 380. P. 321–324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.051>.
- Lloyd A. H., Bunn A. G. Responses of the circumpolar boreal forest to 20th century climate variability // Environ. Res. Lett. 2007. Vol. 2, N 4. 045013. Available at: (<http://iopscience.iop.org/1748-9326/2/4/045013>) [Accessed April 22, 2014].
- Millar C. I., Stephenson N. L. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance // Science. 2015. Vol. 349, N 6250. P. 823–826. DOI:10.1126/science.aaa9933.
- Novick K. A., Ficklin D. L., Stoy P. C., Williams C. A., Boh G., Oishi A. C., Papuga S. A. et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes // Nature Climate Change. 2016. DOI:10.1038/NCLIMATE3114.
- Restaino C. M., Peterson D. L., Littell J. Increased water deficit decreases Douglas fir growth throughout western US forests // Proc. National Acad. of Sci. 2016. Vol. 113 (34). DOI:10.1073/pnas.1602384113
- Rinn F. TSAP V. 3.6. Reference manual: Computer program for tree-ring analysis and presentation. Germany, Heidelberg: Frank Rinn Distrib., 1996. 293 p.
- Rossi S., Deslauriers A., Griçar J., Seo J.-W., Rathgeber C. B. K., Anfodillo T., Morin H., Levanic T., Oven P., Jalkanen R. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates // Global Ecol.

and Biogeogr. 2008. Vol. 17. P. 696–707. DOI:10.1111/j.1466-8238.2008.00417.x.
Speer J. H. Fundamentals of Tree-Ring Research. University of Arizona Press, 2010. 509 p.

StatSoft Inc. Electronic statistics textbook. 2013. Available at: (<http://www.statsoft.com/textbook>) [Accessed April 22, 2014].

Comparative Reaction of Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) Radial Increment to Climate Change in the Forest-Steppe and Highlands of Southern Siberia

V. I. KHARUK^{1,2}, I. A. PETROV¹, M. L. DVINSKAYA¹, S. T. IM^{1,2,3}, A. S. SHUSHPANOV¹

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: kharuk@ksc.krasn.ru

² Siberian Federal University
660041, Krasnoyarsk, Svobodny ave., 79

³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy ave., 31

The influence of climate changes on larch radial increment (*Larix sibirica* Ledeb.) in conditions of a limited (forest-steppe) and sufficient (highlands of Kuznetsky Alatau, floodplain stands) humidification was considered. The relationship between growth index of larch trees ($N = 257$) and ecological-climatic variables was analyzed. In the forest-steppe, with the onset of warming, decrease in climate aridity, and increase in duration of growing season (1980s), an increase in larch growth index followed by its depression in the 1990s was observed. Radial increment depression was caused by an increase in vapor pressure deficit and arid climate due to rising air temperature. In the 2000s, radial increment fluctuations occurred with average values not exceeding those before the beginning of the current climate warming period. In the highlands, since the 1970s, there has been a general trend of increasing the larch radial increment, closely associated with the main limiting factor of growth – air temperature. At the same time, in arid years, radial increment depression was also noted in high-mountain and floodplain larch forests. When implementing «hard» climate scenarios (RCP 6.0, RCP 8.5), it is likely that larch growth index in the forest-steppe will decrease further and increase in areas of sufficient moisture.

Key words: larch, climate change, forest-steppe, highland forests, growth index, water deficit, drought index, water stress and stress.