

Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья

В. И. ХАРУК^{1,2}, С. Т. ИМ^{1,2}, И. А. ПЕТРОВ¹, М. Н. ЯГУНОВ³

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

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

³ Центр защиты леса Красноярского края
660036, Красноярск, Академгородок, 50а

Статья поступила 29.09.15

Принята к печати 11.01.16

АННОТАЦИЯ

Методами дистанционного зондирования, дендрохронологии, ГИС-технологий и обследованиями *in situ* анализировались причины усыхания кедровников Прибайкалья (хр. Хамар-Дабан). Установлено, что начиная с 1980-х гг. наблюдалось снижение величины индекса прироста ($R^2 = 0,69$) и снижение индекса сухости климата SPEI ($R^2 = 0,72$). В середине 2000-х гг. возрастание засушливости привело к разделению деревьев кедра на две когорты: “выживших” и “усыхающих”. Пространственное распределение указанных когорт различно: усыхающие и усохшие древостои локализованы преимущественно на элементах рельефа с повышенным риском водного стресса (крутые выпуклые склоны юго-западной экспозиции). Индекс прироста деревьев тесно связан с индексом сухости июня ($r^2 = 0,55$). Наряду с водным стрессом, усыхающие деревья подвергались воздействию стволовых вредителей и фитопатогенов. Первопричиной усыхания кедровников является водный стресс, обусловленный возрастанием засушливости климата. Ослабленные водным стрессом деревья сенсibilизировались к фитопатогенам. Синергизм климатических и биотических воздействий повлек наблюдаемое усыхание кедровых древостоев. В целом в пределах хребта Хамар-Дабана сильно поврежденные и усыхающие насаждения (> 50 % усыхающих и усохших деревьев) составляют 8–10 % общей площади темнохвойных.

Ключевые слова: усыхание лесов, леса Прибайкалья, Байкал, водный стресс, изменения климата, кедровые леса Хамар-Дабана, усыхание кедровников

Горно-таежные леса Прибайкалья являются одной из важнейших составляющих сохранения Байкала как природного объекта всемирного значения. В последние десятилетия наблюдается усыхание древостоев, сформированных в лесах хребта Хамар-Дабана

кедром (*Pinus sibirica* Du Tour) и пихтой (*Abies sibirica* Ledeb.), что связывают преимущественно с биотическими и антропогенными воздействиями [Воронин, Соков, 2005; Обзор..., 2010]. Ухудшение состояния хвойных отмечается в значительной части лесного

фонда России, а также в бореальной зоне в целом [Aitken et al., 2008; Allen et al., 2009; Worrall et al., 2010; Anderegg et al., 2013]. На Дальнем Востоке происходит усыхание *Picea ajansis* Fisch. и *Abies nephrolepis* Maxim. [Манько и др., 1998]. В Забайкалье, в горах Восточного и Западного Саяна и Кузнецкого Алатау наблюдается усыхание кедровников и пихтарников [Павлов и др., 2008; Kharuk et al., 2013a]. Наряду с усыханием темнохвойных, в первом десятилетии XXI столетия наблюдалась климатически индуцированная гибель березняков Забайкалья [Kharuk et al., 2013b]. В лесах европейской части России задокументировано массовое усыхание ели [Чупров, 2008; Замолотчиков, 2011; Ефремов и др., 2012]. В Беларуси погибла большая часть насаждений, сформированных *Picea abies* L. [Сарнацкий, 2012; Сазонов и др., 2013; Харук и др., 2016]. Массовое усыхание ельников отмечено на Украине [Усцкий, 2013], в Литве и Латвии [Архипова, 2013; Василюскас, 2013], в странах Восточной и Западной Европы [Allen et al., 2009; Yousefrouf et al., 2010; Martinez-Vilalta et al., 2012]. В лесах Северной Америки происходит усыхание древостоев, сформированных *Pinus ponderosa* Engel. [Logan et al., 2003] и *Populus tremuloides* Tausch. [Worrall et al., 2010]. Среди вероятных причин усыхания хвойных древостоев рассматриваются корневые гнили и бактерии [Павлов и др., 2008; Raffa et al., 2008; Обзор..., 2010], насекомые-вредители [Logan et al., 2003; Замолотчиков, 2011], возрастание засухливости климата [Манько и др., 1998; Kharuk et al., 2013a, б].

Цель данной работы – анализ причин, динамики и масштабов усыхания темнохвойных древостоев хр. Хамар-Дабан. Основное внимание уделено проблеме усыхания кедровников. Мы предполагаем, что основная причина усыхания кедровника – возрастание водного стресса вследствие изменений климата, повлекшее сенсбилизацию ослабленных древостоев к биотическим воздействиям.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе использованы материалы дистанционного зондирования (Landsat, QuickBird, GRACE), данные *in situ*, климатические переменные и ГИС-технологии.

Объект исследования. Исследуемые древостои (рис. 1) расположены в восточной части хребта Хамар-Дабан. Протяженность хребта составляет более 350 км при ширине 50–60 км. Максимальная высота – 2371 м (вершина Хан-Ула). Растительность хребта Хамар-Дабан имеет выраженную высотную поясность. На высотах до 1500–1600 м преобладают пихтово-кедровые древостои. Верхняя граница леса сформирована сосной кедровой. Растительность подгольцового пояса (до 1700 м) представлена пихтово-кедровым редколесьем, кустарниками и субальпийскими лугами. Выше располагается горная тундра. Среднемесячная температура воздуха на северном макросклоне Хамар-Дабана составляет в июле 14–18 °С; зимние температуры изменяются в пределах от –11 до –25 °С. Среднегодовая температура воздуха в горах (метеостанция Хамар-Дабан) составляет 3,4 °С, а на побережье – около 0 °С [Латышева и др., 2009]. Годовая сумма осадков на метеостанции “Кабанск” (460 м над ур. м.) – 350 мм в год, на метеостанции “Хамар-Дабан” (1442 м над ур. м.) – 1450 мм.

Климатические переменные. Анализируемые климатические параметры включали температуру воздуха, осадки и индекс сухости (SPEI). SPEI представляет меру интенсивности и длительности засухи [Vicente-Serrano et al., 2010]. SPEI определяется как разность (D_i) между величинами осадков (P_i) и потенциальной эвапотранспирации (PET_i), где i – период времени:

$$D_i = P_i - PET_i.$$

PET (мм) вычисляется по формуле:

$$PET = 16 \times K \times (10 \times T \times I^{-1})^m,$$

где T – средняя месячная температура, °С; I – индекс потока тепла; m – коэффициент, зависящий от I ; K – корректирующий коэффициент, вычисляемый как функция широты и времени года, учитывающий продолжительность солнечного сияния в течение дня. Данные SPEI получены с сайта <http://sac.csis.es/spei>; пространственное разрешение – 0,5 × 0,5°. Климатические данные получены с метеостанции Хамар-Дабан (51°53′ с. ш., 103°59′ в. д., 1442 м над ур. м.).

Наземные исследования. Наземные работы выполнялись в зоне основных поврежде-

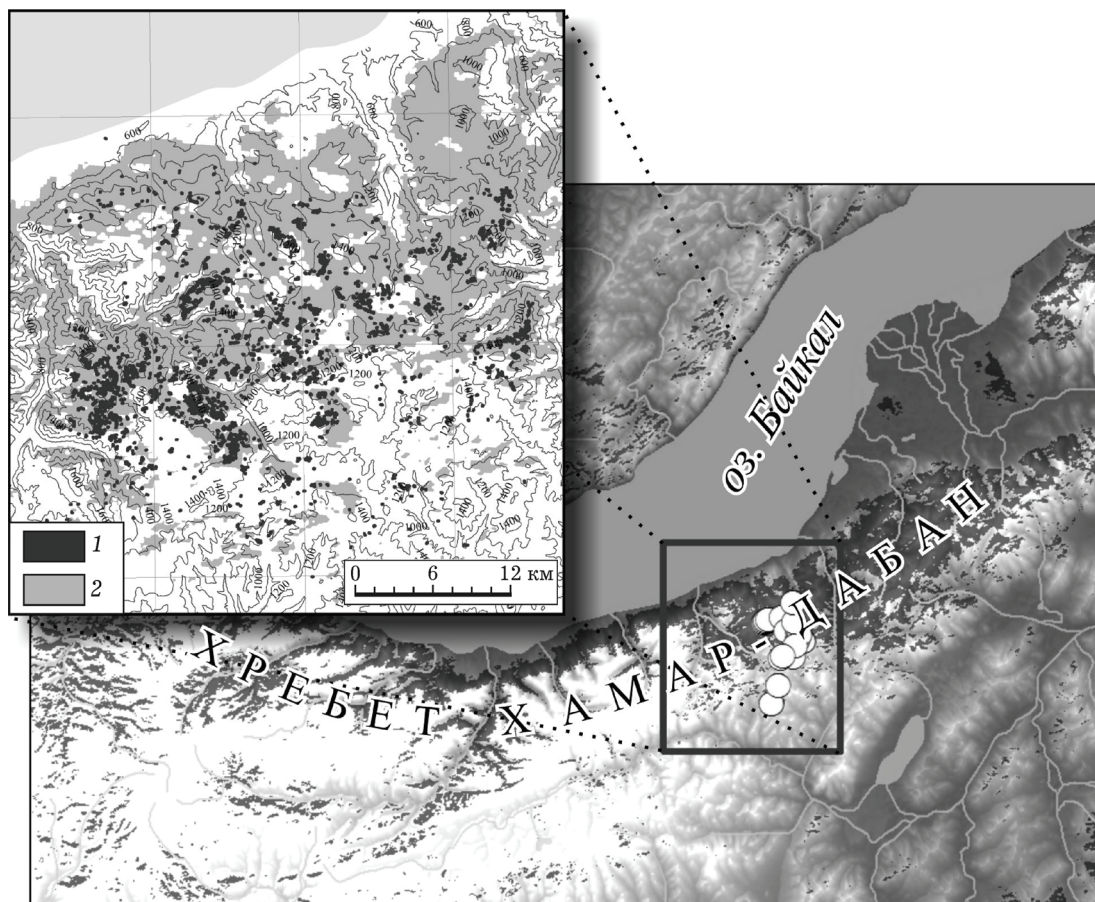


Рис. 1. Схема расположения основной зоны повреждений лесов Хамар-Дабана (отмечена прямоугольником).

Сомкнутые темнохвойные древостои обозначены черным цветом. Пробные площади указаны белыми точками. Вставка: картосхема древостоев (1 – погибшие древостои, 2 – иные категории состояния древостоев)

ний древостоев Хамар-Дабана (см. рис. 1). Исследования проводились по трансекте, ориентированной по градиенту высоты; начало трансекты соответствовало границе сомкнутых темнохвойных древостоев в долине р. Мысовка, конец – границе сомкнутых темнохвойных древостоев на южном склоне Хамар-Дабана (см. рис. 1). Вдоль трансекты на временных пробных площадях (ПП; $N = 23$) проведены обследования древостоев, цель которых состояла в получении информации для дешифрирования космоснимков, данных об условиях произрастания древостоев, а также взятии образцов для дендрохронологического анализа. Инвентаризация древостоев выполнялась на круговых площадках ($R = 9,8$ м). На ПП определялся тип леса, видовой состав и количество деревьев, их высота и диаметр, описывались напочвенный по-

кров и почва, топографические характеристики рельефа (направление, крутизна, выпуклость/вогнутость склона, высота над ур. м.). В пределах ПП деревья для взятия образцов отбирались в случайном порядке на территории $\sim 0,5$ га. Образцы для дендрохронологического анализа брались на высоте груди ($\sim 1,3$ м) с южной стороны приростным буром, либо выпиливались мотопилой по всему диаметру дерева.

Материалы дистанционного зондирования. Дешифрирование усыхающих древостоев и анализ их пространственного распределения выполнен по материалам съемки Landsat (L8/OLI: 25.06.2015, 18.06.2015; L5/TM: 30.09.1989, 15.10.1992; L4/MSS: 29.09.1989; <http://glovis.usgs.gov>), снимкам высокого (0,41–0,5 м) разрешения WorldView и GeoEye (18.08.2010, 17.09.2010, 11.09.2010; www.google).

com/maps; www.bing.com/maps), и цифровой модели рельефа (разрешение 30 м; SRTM; earthexplorer.usgs.gov). Данные дистанционного зондирования (ДЗ) обрабатывались в программном пакете Erdas Imagine (www.hexagongeospatial.com). ГИС-анализ выполнялся с помощью программ ESRI ArcGIS (www.esri.com), статистический анализ – Microsoft Excel и StatSoft Statistica (www.statsoft.ru). Топографическая коррекция снимков Landsat выполнена методом C-коррекции с использованием цифровой модели рельефа SRTM.

Дешифрирование темнохвойных древостоев выполнено методом максимального правдоподобия с использованием пороговой функции threshold (с уровнями 0,05–0,3). На начальном этапе анализа получена маска темнохвойных до периода значительных проявлений повреждений (1989–1992 гг.). Для этой цели применены 10 обучающих выборок по 699 ± 117 пикселей. На основе полученных результатов составлена маска темнохвойных на анализируемую территорию (как на весь хр. Хамар-Дабан, так и на фрагмент, представленный на рис. 1). К классу темнохвойных отнесены древостои с преобладанием (> 70 %) кедр и пихты сомкнутостью > 0,3. Дальнейший анализ выполнялся с использованием указанной маски. Для выделения усыхающих древостоев на снимках Landsat (2015 г.) применены обучающие выборки, полученные на основе материалов наземных обследований и снимков сверхвысокого разрешения. Разрешение снимков WorldView позволяет идентифицировать отдельные деревья и дифференцировать погибшие и живые деревья. Использовано 30 обучающих выборок по ~ 600 пикселей в каждой. Точность классификаций оценивалась методом каппа (к)-статистики. Для темнохвойных древостоев (в пределах фрагмента на рис. 1) $k = 0,99$, ошибка пропуска 16 %, ошибка включения 0,1 %. Далее выделялись следующие категории состояния древостоев: неповрежденные и слабо поврежденные (количество усыхающих и усохших деревьев < 25 %), средне поврежденные (25–50 %), сильно поврежденные (50–75 %) и погибшие насаждения (> 75 %). Однако категории “неповрежденные и слабо поврежденные” и “средне поврежденные” в последующем анализе объедини-

ли вследствие большой вероятности перепутывания. Для анализа пространственных (по элементам рельефа) закономерностей усыхания темнохвойных древостоев применена цифровая модель SRTM. Азимуты рассчитывали для восьми секторов (северное, северо-восточное, восточное и т. д.); крутизна склонов определялась с шагом в один градус. Анализировалась также связь усыхания древостоев с кривизной территории (распределение по выпуклым и вогнутым элементам рельефа).

Дендрохронологические измерения. Дендрохронологический анализ выполнен на основе репрезентативной выборки ($N = 89$) деревьев кедр. Образцы древесины живых деревьев извлекались с помощью приростного бурава, образцы древесины мертвых деревьев брались в виде дисков. Для проведения измерений поверхность каждого образца полировалась, подрезалась скальпелем и при необходимости обрабатывалась контрастирующим порошком. Измерения проводились на платформе LINTAB 3 с точностью 0,01 мм. В результате получены абсолютные индивидуальные хронологии для каждого дерева. Для проверки качества датировки использовались программы TSAP и COFECHA [Holmes, 1983; Rinn, 1996]. Определение даты гибели усохших деревьев осуществлялось методом перекрестной датировки, для чего составлена мастер-хронология, включившая 20 деревьев с минимальными признаками повреждения. Средний межсерийный коэффициент корреляции составил 0,52. Общая выборка разделена на усыхающие ($N = 69$) и “выжившие” ($N = 20$) деревья. Для каждой группы построена стандартизированная хронология в программе ARSTAN; детрендрование осуществлялось методом линейной регрессии или отрицательной экспоненциальной кривой [Cook, Holmes, 1986]. В дендроклиматическом анализе использовались стандартизированные хронологии, представленные безразмерным относительным индексом прироста.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика климатических переменных. На исследуемой территории максимум осадков соответствует июлю – августу, минимум – зимнему и весеннему периодам; мак-

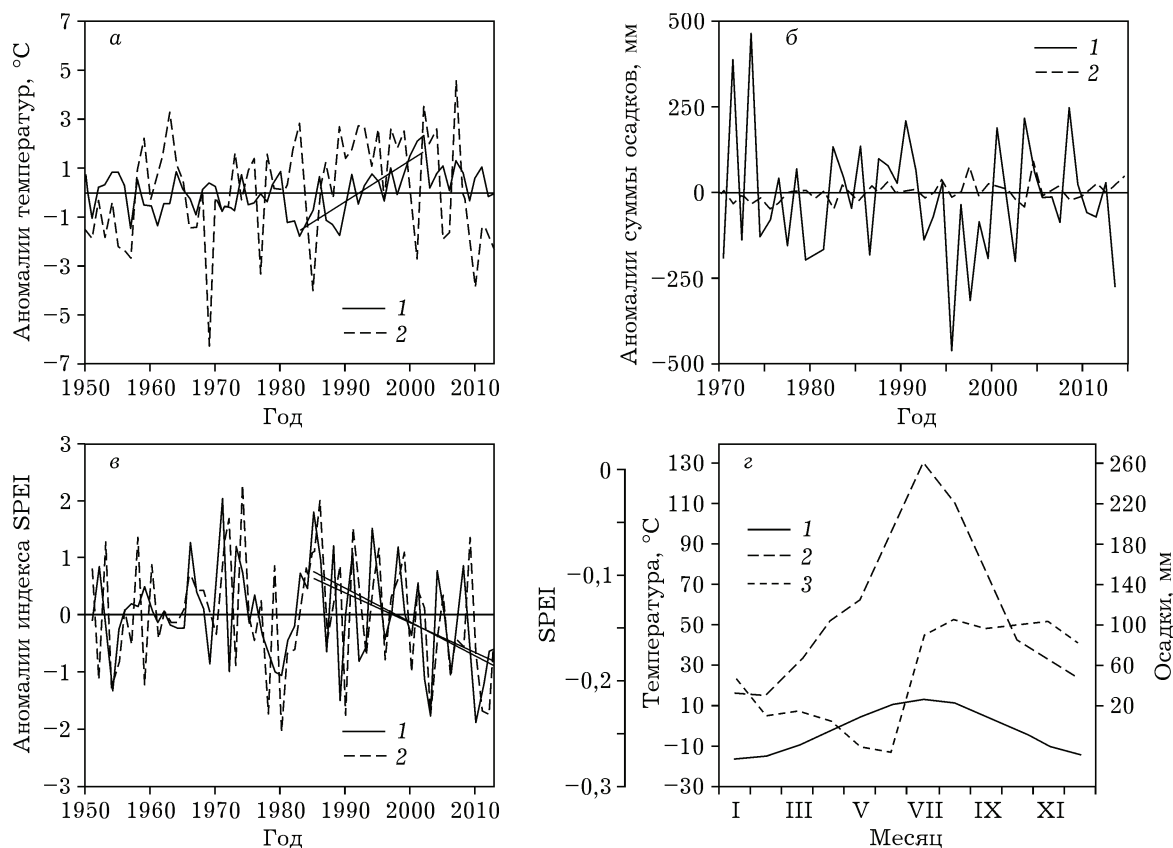


Рис. 2. Динамика аномалий температуры воздуха (а), осадков (б) и индекса сухости SPEI (в); 1 – летний период (ИИА), 2 – зимний (ДЯФ). Тренды значимы для среднелетних температур ($p < 0,05$); климатограмма (период 1980–2014 гг.) (z); 1 – температура, 2 – осадки, 3 – SPEI.

симум засухливости наблюдается в мае (рис. 2, z). Положительный тренд летней температуры воздуха наблюдался в 1980–2002 гг. (см. рис. 2, а). Начиная с середины 1980-х гг. происходит возрастание засухливости климата (см. рис. 2, в). Значимых трендов осадков не выявлено.

Древостои и почвы. Изученные древостои представляют собой пихтово-кедровые насаждения различной степени повреждения (включая полное усыхание кедра), а также практически неповрежденный контрольный участок (без признаков повреждений). Величина сомкнутости древостоев составляет 0,5–0,8. Состав древостоев 7КЗП. Средняя высота кедра составляет 17,5 м, диаметр 36,0 см, пихты – 15 м и 10 см соответственно. Средний возраст кедра составляет 105 лет, пихты – 90 лет. Кустарники представлены *Juniperus sibirica* Burgsd., *Duschekia fruticosa* Rupr., *Spiraea salicifolia* L. Напочвенный по-

кров сформирован *Bergenia crassifolia* L., *Vaccinium myrtillus* L., *Carex* sp., а также различными видами мхов и лишайников. Древостои произрастают на подбурых супесчаных почвах. Мощность горизонта A_0 составляет 3–5 см, глубина залегания материнской породы (горизонт C_0) – 15–25 см. Почвы сухие (реже свежие), характеризуются хорошим дренажем.

Усыхание темнохвойных: связь с элементами рельефа. Пространственное распределение усыхающих (по состоянию на 2015 г.) и всех древостоев (по состоянию на 1989 г., т. е. до начала заметных повреждений) существенно различаются. Усыхающие древостои занимают преимущественно более крутые выпуклые склоны юго-западной экспозиции и расположены относительно выше над ур. м. (рис. 3). Максимум (мода) и медиана распределения усыхающих древостоев равны 15 и 17° соответственно, тогда как для всех дре-

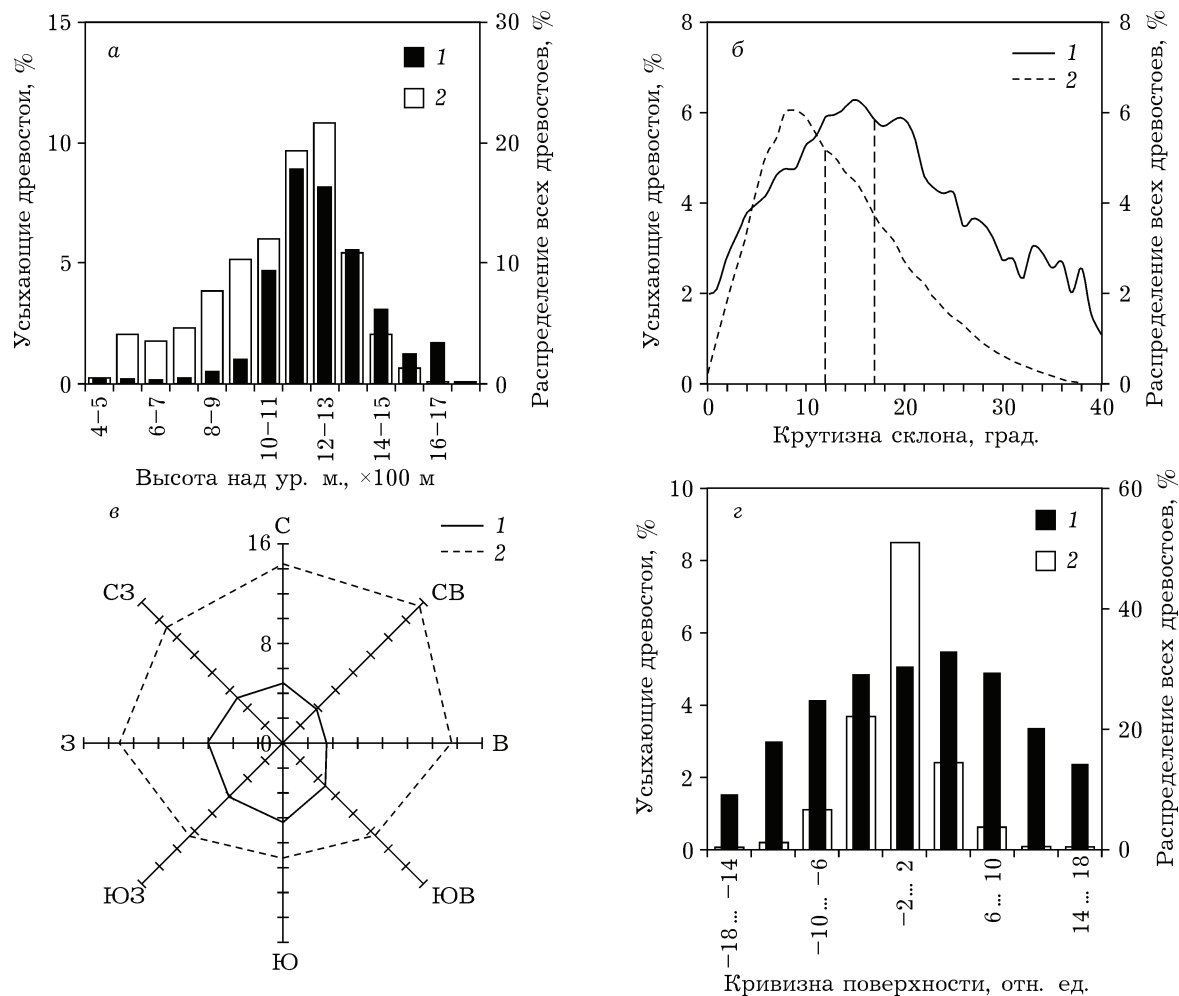


Рис. 3. Пространственное распределение усыхающих (1) и всех темнохвойных древостоев (2) в пределах зоны наибольших повреждений древостоев Хамар-Дабана.

Данные представлены в процентах усыхающих древостоев (1) и всех темнохвойных (%), на заданном элементе рельефа (2) (по состоянию на 2015 и 1992 гг. соответственно). а – зависимость усыхания от высоты над уровнем моря; б – крутизны склонов; в – азимута; г – кривизны поверхности (отрицательные значения – вогнутые, положительные – выпуклые)

востоев указанные величины составляют 9 и 12° (см. рис. 3, б).

Усыхание темнохвойных: данные дендрохронологии. В динамике прироста деревьев кедров начиная с 1980-х гг. прослеживается негативный тренд ($R^2 = 0,69$); одновременно происходило возрастание засушливости ($R^2 = 0,72$; см. рис. 4). Наряду с возрастанием засушливости, “триггером” усыхания стали периодические засухи (2003, 2006 и 2010 гг.), после которых последовало разделение анализируемой когорты деревьев на усыхающие и выжившие (рис. 4).

Усыхание темнохвойных: связь с климатическими переменными. Индекс прироста

(ИП) кедров и индекс сухости SPEI связаны значимой корреляционной зависимостью ($R^2 = 0,55$; рис. 5, а); именно в июне, как следует из климатограммы (см. рис. 2, г), наблюдается максимум засушливости (минимум SPEI). Корреляционная связь ИП с температурой июня ниже ($R^2 = 0,33$; см. рис. 5, б). С осадками значимых корреляций не выявлено.

Антропогенные воздействия. Заслуживает внимания эффект возрастания индекса прироста кедров, последовавший за перекрытием Ангары (1956 г.), и последующий подъем уровня Байкала на 0,8–1,2 м (см. рис. 4). В дальнейшем пуск Байкальского ЦБК (1966 г.) совпал со снижением величины ИП; указан-

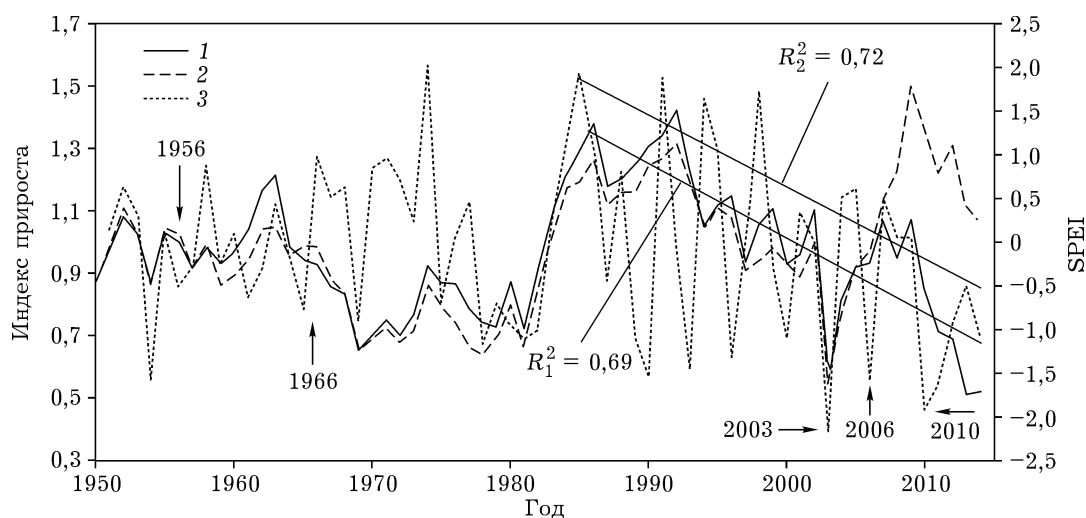


Рис. 4. Динамика индекса прироста усыхающих (1) и живых (2) деревьев кедра; (3) – SPEI (уменьшение величины SPEI соответствует возрастанию засухливости).

Светлыми стрелками отмечены даты перекрытия Ангары (1956 г.) и пуска Байкальского ЦБК (1966 г.); темные стрелки – засухи 2003, 2006 и 2010 гг. Тренды значимы ($p < 0,01$)

ное снижение произошло на фоне уменьшения засухливости климата (т. е. улучшения условий произрастания; см. рис. 4).

Биотические воздействия. Наряду с климатическими и антропогенными факторами, кедровые и пихтовые древостои Хамар-Дабана подвержены биотическим воздействиям: на всех пробных площадях (исключая контроль, где повреждений не наблюдалось, хотя и происходило снижение величины радиального прироста в последние десятилетия) усыхающие и погибшие деревья оказались за-

селены либо отработаны стволовыми вредителями (пихтовый усач *Monochamus urusovi* Fischer., гравер байкальский *Pityogenes conjunctus* Rtt.). Наряду с воздействием стволовых вредителей, древостои подвергались атакам сибирского шелкопряда (*Dendrolimus superans sibiricus* Tscetv.); отмечались также бактериальные заболевания и повреждения корневыми фитопатогенами [Обзор..., 2010].

Площадь повреждений. В зоне наиболее интенсивных повреждений древостоев (см.

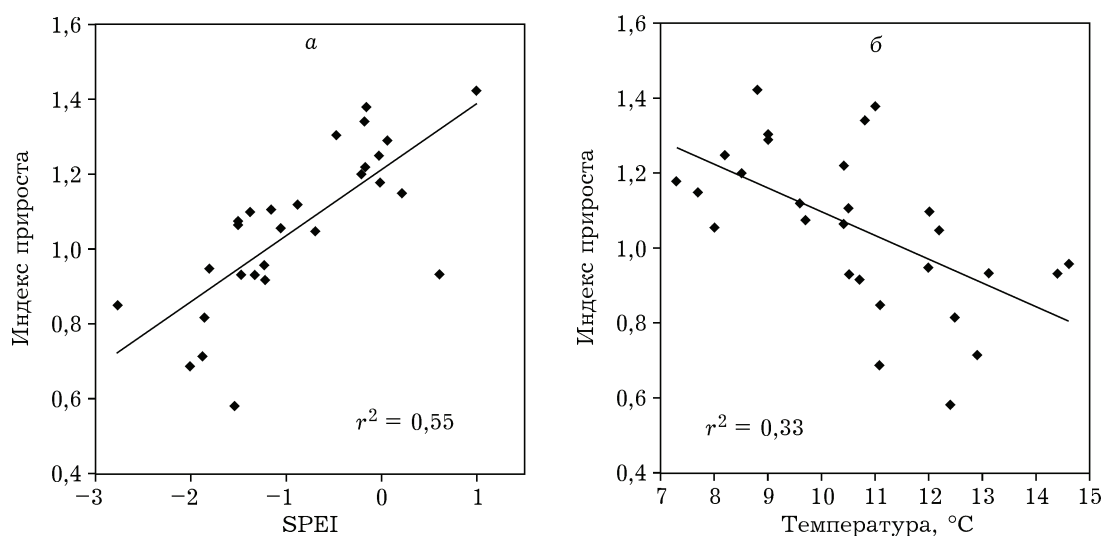


Рис. 5. Зависимости между индексом прироста усыхающих деревьев кедра и индексом сухости SPEI (а) (июнь) и температурой воздуха (б) (июнь) ($p < 0,01$)

рис. 1; $S = \sim 3300 \text{ км}^2$) площадь темнохвойных древостоев составляет 1110 км^2 . Из них усохшие и усыхающие древостои ($> 75 \%$ усохших деревьев в древостое) занимают 60 км^2 ($\sim 5,4 \%$ от общей площади темнохвойных). Площадь категории “сильно поврежденные” ($50\text{--}75 \%$ усыхающих и усохших) составляет 47 км^2 ($\sim 4,2 \%$ от темнохвойных древостоев). В целом в пределах фрагмента доля усыхающих и усохших древостоев составляет $\sim 9,6 \%$. Дешифрирование слабо- и средне поврежденных древостоев по данным Landsat недостоверно.

Общая площадь темнохвойных древостоев хр. Хамар-Дабан (по данным анализа съемки Landsat) составляет $\sim 4900 \text{ км}^2$. Из них усыхающие древостои ($> 75 \%$ усыхающих и усохших деревьев в древостое) занимают 158 км^2 ($\sim 3,2 \%$), сильно поврежденные древостои ($50\text{--}75 \%$ усыхающих) – 258 км^2 ($\sim 5,3 \%$). В целом территория, на которой наблюдается усыхание ($> 50 \%$ усыхающих и усохших деревьев), охватывает $\sim 8,5 \%$ площади темнохвойных.

ОБСУЖДЕНИЕ

В пространственном распределении усыхающих и здоровых древостоев наблюдаются различия: усыхающие древостои локализованы на склонах с большей крутизной и выпуклостью, чем здоровые. Различия наблюдаются и в азимутальном распределении: усыхание приурочено преимущественно к юго-западным склонам (см. рис. 3). Таким образом, усохшие древостои расположены на таких элементах рельефа, где наиболее вероятен риск водного стресса. По градиенту высоты максимум усыхания древостоев соответствует высотам $1000\text{--}1500 \text{ м}$; ниже этих отметок водный стресс смягчается воздействием влаги, приносимой с Байкала, выше – увеличением уровня осадков по градиенту высоты, а также возрастанием частоты нахождения древостоев в облачном покрове; известно, что кедр – это “дерево туманов”. На ведущую роль водного стресса в усыхании кедра указывает также тесная корреляционная связь индекса прироста и индекса сухости ($R = 0,55$, см. рис. 5). Отметим, что максимум корреляции наблюдается между

июньскими значениями индексов; именно на июнь приходится максимум засушливости (см. рис. 2, з). Вслед за возрастанием индекса прироста (ИП) в период уменьшения засушливости климата в начале 1980-х гг. наблюдался длительный период снижения величины ИП, происходивший параллельно с увеличением засушливости (см. рис. 4). В середине 2000-х гг. общее возрастание засушливости (в сочетании с засухами 2003, 2006 и 2010 гг.) привело к разделению деревьев кедра в древостое на “выживших” и “усыхающих и усохших” (см. рис. 4). Сохранению “выживших” способствовало, вероятно, последовавшее в 2011–2014 гг. снижение засушливости, тогда как жизненное состояние деревьев когорты “усыхающих и усохших” не позволило им отреагировать на улучшение условий произрастания.

В пределах исследуемой территории высок риск почвенной засухи: усыхающие кедровники произрастали на маломощных ($1\text{--}3 \text{ см}$) хорошо дренированных щебнистых супесях с поверхностным ($15\text{--}25 \text{ см}$) залеганием материнской породы. Указанные условия произрастания, в сочетании с относительно высокой крутизной склонов, на которых преимущественно находятся древостои (величина медианы 17°), создают предпосылки для возникновения почвенной засухи.

В целом в пределах Хамар-Дабана древостои, в которых наблюдаются сильные повреждения и усыхание ($50\text{--}75 \%$ и $> 75 \%$ усыхающих и усохших деревьев соответственно) включают $8\text{--}10 \%$ от общей площади темнохвойных. Отметим, что усыхание не связано с перестойностью насаждений: средний возраст кедра на исследуемой территории составляет – 105 лет, пихты – 90 лет. Следует отметить, что подрост как кедра, так и пихты в целом жизнеспособен. Сохранность подроста можно объяснить защитой верхнего полога от избыточной эвапотранспирации. В ряде других исследований [Манько и др., 1998] также отмечается сохранность подроста при усыхании верхнего полога.

Повышенная чувствительность древостоев Хамар-Дабана, особенно на восточной его части обусловлена тем, что произрастающие там кедр и пихта находятся вблизи границы

их ареалов. К востоку от Хамар-Дабана (Баргузинский хребет) на смену этим влаголюбивым видам приходят засухоустойчивые лиственница и сосна.

В этой связи следует отметить положительное воздействие подъема уровня Байкала (на 0,8–1,2 м) вследствие перекрытия Ангары при постройке Иркутской ГЭС в 1956 г. (см. рис. 4). Стимулирующий эффект может быть объяснен возрастанием влажности вследствие увеличения водной поверхности озера. В дальнейшем пуск Байкальского ЦБК (1966 г.) совпал со снижением величины индекса прироста. Отметим, что снижение величины прироста произошло на фоне уменьшения засушливости климата (т. е. улучшения условий произрастания; см. рис. 4). Однако причинно-следственные связи между техногенным воздействием требуют дальнейших исследований, включая анализ временной динамики аэротехногенных эмиссий ЦБК. Имеющиеся публикации по данной проблеме не позволяют сделать количественные оценки воздействия ЦБК на состояние древостоев Прибайкалья.

Биотические воздействия. Усыхание кедровников Прибайкалья сопровождается воздействием стволовых вредителей (пихтовый усач *Monochamus urusovi* Fischer., гравер байкальский *Pityogenes conjunctus* Rtt.) и корневых фитопатогенов. Биотические воздействия как фактор усыхания лесов Байкала отмечен в ряде исследований [Обзор..., 2010]. Необходимо отметить, что приуроченность к рельефу территории отмечается также у вспышек размножения сибирского шелкопряда [Kharuk et al., 2009], однако массовых повреждений древостоев Хамар-Дабана этим насекомым не наблюдалось [Обзор..., 2010].

Размножение короедов в ослабленных древостоях наблюдалось и в других зонах усыхания темнохвойных Сибири и ельников Европейской части России [Чупров, 2008; Замолотчиков, 2011; Ефремов и др., 2012]. В Беларуси усыхание ельников сопровождалось массовым размножением короедов и грибных заболеваний [Сазонов и др., 2013; Сарнацкий, 2012]. Аналогичные явления описаны в ослабленных хвойных лесах Европы и Северной Америки [Logan et al., 2003; Raffa et al., 2008; Worrall et al., 2010]. Однако первопричиной

усыхания древостоев является возрастание засушливости климата, частоты и интенсивности засух, повлекшее ослабление древостоев. Водный стресс сенсibilизировал древесные растения к воздействию насекомых-вредителей и иных фитопатогенов; синергизм указанных факторов повлек усыхание древостоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Начиная с 1980-х гг. наблюдалось снижение величины индекса прироста кедра на фоне возрастания засушливости климата, повлекшее разделение деревьев на две когорты: “выживших” и “усыхающих”. Пространственное распределение этих когорт различно: усыхающие и усохшие древостои локализованы преимущественно на элементах рельефа с повышенным риском водного стресса (крутые выпуклые склоны юго-западной экспозиции, подстилаемые маломощными хорошо дренированными супесями). Индекс прироста кедра тесно связан с индексом сухости SPEI. Наряду с водным стрессом, усыхающие деревья подвергались атакам стволовых вредителей и фитопатогенов. Первопричина наблюдаемого усыхания кедровников Прибайкалья – возрастание засушливости климата в сочетании с периодическими засухами. Ослабление древесных растений водным стрессом сенсibilизировало их к фитопатогенам. Синергизм климатических и биотических воздействий повлек усыхание кедровых древостоев. В целом в пределах хребта Хамар-Дабана сильно поврежденные и усыхающие насаждения (> 50 % усыхающих и усохших деревьев) составляют 8–10 % общей площади темнохвойных.

В настоящее время возрастание усыхания кедра и пихты наблюдается в большей части ареалов этих видов. Географически усыхание начиналось на границах ареалов (что относится и к темнохвойным хр. Хамар-Дабан), и на элементах рельефа, соответствующих максимальному риску водного стресса. В пределах горных массивов усыхание наиболее выражено в зонах перевалов, где происходит перенос сухих воздушных масс. Обычно (но не в случае кедровников Прибайкалья) усыхание начинается с нижних элементов рельефа,

уменьшаясь по градиенту высоты вследствие возрастания уровня осадков и увлажнения.

В XXI в. наиболее вероятно дальнейшее повышение температуры воздуха, возрастание засушливости климата в различных частях лесов бореальной зоны (включая южные части ареалов кедра и пихты) [Climate..., 2014]. Наряду с собственно ослаблением древостоев это может стимулировать возникновение вспышек массового размножения насекомых-вредителей, что в синергизме с водным стрессом может привести к элиминации кедра и пихты из части их ареалов, к замене этих влаголюбивых хвойных на толерантные виды (например, на лиственницу, сосну обыкновенную, мелколиственные). Аналогичные явления прогнозируются и для других лесных территорий бореальной зоны [Lloyd, Bunn, 2007; Aitken et al., 2008; Climate..., 2014].

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 14-24-00112.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипова Н. Г. Проблема усыхания елей (*Picea abies* (L.) Karst.) в Латвии // Проблемы усыхания еловых насаждений: мат-лы Междунар. науч.-практ. семинара. Минск: ООО «КолорПоинт», 2013. С. 11.
- Василяускас В. Усыхания ельников в Литве и главные их причины // Там же. С. 16–21.
- Воронин В. И., Соков М. К. Фитотоксичность сероорганических компонентов выбросов байкальского ЦБК // Лесоведение. 2005. № 2. С. 62–64.
- Ефремов Д. Ф., Захаренков А. С., Копейкин М. А. и др. Профилактика и меры предупреждения лесных пожаров в системе лесопользования Российской Федерации / под ред. Е. П. Кузьмичева. М.: Всемирный банк, 2012. 104 с.
- Замолодчиков Д. Г. Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учетов лесного фонда // Успехи соврем. биологии. 2011. Т. 131, № 4. С. 382–392.
- Латышева И. В., Синюкович В. Н., Чумакова Е. В. Современные особенности гидрометеорологического режима южного побережья оз. Байкал // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле». 2009. Т. 2, № 2. С. 117–133.
- Манько Ю. И., Гладкова Г. А., Бутовец Г. Н., Норихиза Камибаяси. Мониторинг усыхания пихтово-еловых лесов в Центральном Сихотэ-Алине // Лесоведение. 1998. № 1. С. 3–16.
- Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов Республики Бурятия в 2009 г. и прогноз лесопатологической ситуации на 2010 г. Улан-Удэ: Фил. ФГУ «Рослесозащита» «Центр защиты леса Республики Бурятия», 2010. С. 102–105.
- Павлов И. Н., Рухуллаева О. В., Барабанова О. А., Аре-ев А. А. Оценка роли корневых патогенов в ухудшении состояния лесного фонда Сибирского федерального округа // Хвойные бореальной зоны. 2008. № 3–4. С. 262–268.
- Сазонов А. А., Кухта В. Н., Блинцов А. И. и др. Проблема массового усыхания ельников Беларуси и пути ее решения // Лесное и охотничье хозяйство: научный, производственно-практический журнал для работников лесной отрасли. Минск, 2013. № 7. С. 10–15.
- Сарнацкий В. В. Зонально-типологические закономерности периодического массового усыхания ельников Беларуси // Тр. БГТУ. Лесное хозяйство. 2012. С. 274–276.
- Усцкий И. М. Особенности усыхания ельников в Украине // Проблемы усыхания еловых насаждений: мат-лы Междунар. науч.-практ. семинара. Минск: ООО «КолорПоинт», 2013. С. 12–15.
- Харук В. И., Им С. Т., Двинская М. Л. Усыхание ели (*Picea abies*) в лесах Беларуси // Экология. 2016. В печати.
- Чупров Н. П. К проблеме усыхания ельников в лесах европейского Севера России // Лесное хозяйство. 2008. № 1. С. 24–26.
- Aitken S. N., Yeaman S., Holliday J. A. et al. Adaptation, migration or extirpation: Climate change outcomes for tree populations // Evolutionary Appl. 2008. Vol. 1, N 1. P. 95–111.
- Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H. et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests // Forest Ecol. and Management. 2009. Vol. 259, N 4. P. 660–684.
- Anderegg L. D. L., Anderegg W. R. L., Berry J. A. Tree Physiology review: Not all droughts are created equal: translating meteorological drought into woody plant mortality // Tree Physiol. 2013. Vol. 33, N 7. P. 701–712.
- Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (2014). IPCC Working Group II Contribution to AR5. Yokohama, Japan. March 2014.
- Cook E. R., Holmes R. L. Chronology development, statistical analysis, Guide for computer program ARSTAN. Laboratory of Tree Ring Research, the University of Arizona, 1986. P. 50–65.
- Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bull. 1983. Vol. 43. P. 69–78.
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T. Siberian silkmoth outbreak pattern analysis based on SPOT VEGETATION data // Int. Journ. Remote Sensing. 2009. Vol. 30, N 9. P. 2377–2388.
- Kharuk V. I., Im S. T., Oskorbin P. A., Petrov I. A., Ranson K. J. Siberian Pine Decline and Mortality in Southern Siberian Mountains // Forest Ecol. Management. 2013a. Vol. 310. P. 312–320.
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Oskorbin P. A., Im S. T., Dvinskaya M. L. Climate induced birch mortality in trans-Baikal lake region, Siberia // Ibid. 2013b. Vol. 289. P. 385–392.
- Lloyd A. H., Bunn A. G. Responses of the circumpolar boreal forest to 20th century climate variability // Environ. Res. Lett. 2007. Vol. 2. 045013.
- Logan J. A., J. Re'gnie're, Powell J. A. Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics // Frontiers Ecol. Environ. 2003 Vol. 1. P. 130–137.

- Martínez-Vilalta J., Lloret F., Breshears D. D. Drought-induced forest decline: causes, scope and implications // *Biol. Lett.* 2012. Vol. 8, N 5. P. 689–691.
- Raffa K. F., Aukema B. H., Bentz B. J. et al. Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruptions // *Bioscience*. 2008. Vol. 58. P. 501–517.
- Rinn F. TSAP V 3.6 Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation. Germany: Heidelberg, 1996. 263 p.
- Yousefpour R., Hanewinkel M., Le Moguédec G. Evaluating the suitability of management strategies of pure Norway Spruce Forests in the Black Forest Area of Southwest Germany for Adaptation to or Mitigation of Climate Change // *Environ. Management*. 2010. Vol. 45, N 2. P. 387.
- Vicente-Serrano S. M., Begueria S., López-Moreno J. I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming. The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index // *J. Climate*. 2010. Vol. 23. P. 1696–1718.
- Worrall J. J., Marchetti S. B., Egeland L. et al. Effects and etiology of sudden aspen decline in southwestern Colorado, USA // *Forest Ecol. and Management*. 2010. Vol. 260. N 5. P. 638–648.

Dark Needle Conifer Stands Decline in Baikal Region

V. I. KHARUK^{1,2}, S. T. IM^{1,2}, I. A. PETROV¹, M. N. YAGUNOV³

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, Svobodnyi ave., 79

³ Center for Forest Protection in Krasnoyarsk Krai
660036, Krasnoyarsk, KrasnAkademgorodok, 50a

The reasons for Siberian pine and fir decline were analyzed by remote sensing techniques, dendrochronology, GIS technology and *in situ* observations in Baikal region (Khamar-Daban). It was found that since the 1980s, there was a decrease in the value of the growth index ($R^2 = 0.69$) and an increase of aridity of the climate SPEI ($R^2 = 0.72$). In the mid-2000s, the increase in aridity led to the division of Siberian pine trees in two cohorts, “survivors” and “decliners”. The spatial distribution of these cohorts is different: dead and declining stands are located mainly on the relief elements with an increased risk of water stress (steep, convex slopes, southwest exposure). The growth index of the trees is closely related to the dryness index in June ($r^2 = 0.55$). In addition to water stress, drying trees are exposed to stem pests and plant pathogens. The primary cause of Siberian pine decline is water stress due to increasing aridity. Weakened water-stressed trees are sensitized to pathogens. Synergism of climatic and biotic impacts led to observed decline of Siberian pine stands. In general, within the Khamar-Daban region heavily damaged and dead stands (> 50 % dying and dead trees) make up 8–10 % of the total area of dark needle conifers.

Key words: stands decline, forests in Baikal region, Baikal, water stress, climate change, Khamar-Daban Siberian pine stands, Siberian pine stands decline.