

УДК 630\*561.24

## ЗНАЧЕНИЕ ЭКСПОЗИЦИИ СКЛОНОВ ДЛЯ РОСТА ЛИСТВЕННИЦЫ ГМЕЛИНА В МЕРЗЛОТНЫХ УСЛОВИЯХ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

### I. РАЗЛИЧИЯ В ДИНАМИКЕ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА ДЕРЕВЬЕВ НА СКЛОНАХ СЕВЕРНОЙ И ЮЖНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ

© 2015 г. А. В. Бенькова, Д. А. Машуков, В. Е. Бенькова,  
А. С. Прокушкин, А. В. Шашкин

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28*

E-mail: annie1977@yandex.ru, mashukov1988@gmail.com, benkova@ksc.krasn.ru,  
prokushkin@ksc.krasn.ru, shashkin@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 16.03.2015 г.

Выявлены существенные различия в динамике радиального роста деревьев лиственницы Гмелина *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr., произрастающих на многолетнемерзлых почвах в контрастных условиях склонов северной и южной экспозиции (Средняя Сибирь, 64°19'23" с. ш., 100°13'28" в. д.). Исследовали одновозрастные лиственничники, сформировавшиеся после сильного низового пожара 1899 г. на противоположных склонах северной и южной экспозиции в долине руч. Кулингдакан, в средней части которых заложили по одной временной пробной площади. Для дендрохронологического исследования отобрали 23 типичных здоровых дерева на склоне северной и 13 деревьев – южной экспозиции. С них взяли спилы на высоте 1.3 м от поверхности почвы, измерили ширину годичных колец, провели сравнительный анализ хода радиального роста деревьев. С целью выделения периодов времени в пределах сезона вегетации со значимым влиянием климатических факторов на радиальный рост лиственницы использовали метод расчета и анализа скользящих корреляционных климатических функций отклика. Расчет «скользящих средних» провели с 100-го по 243-й день года с окном в 20 дней и шагом в 5 дней за период с 1934 по 2009 г. Рассчитали падающую солнечную радиацию. Расчеты показали, что поступающая на склон северной экспозиции солнечная радиация на 20 % меньше, чем на южный. Радиационный режим благоприятствовал послепожарному интенсивному нарастанию термоизолирующего мохово-лишайникового покрова, так что к 2009 г. он на склоне северной экспозиции оказался почти в 2 раза более мощным, чем южной. Худшие биометрические характеристики, низкий радиальный прирост и тесная корреляционная связь его с температурой воздуха в период предсезонной активности камбия и интенсивного роста (май–начало июля) у деревьев на склоне северной экспозиции обусловлены относительно неблагоприятными термическими почвенными условиями, которые сформировались в связи со сравнительно низкой поступающей энергией Солнца и связанной с ней высокой мощностью мохово-лишайникового покрова.

**Ключевые слова:** радиальный прирост, климатические факторы, поток солнечной радиации, мохово-лишайниковый покров, термические почвенные условия, Центральная Эвенкия, Средняя Сибирь.

DOI: 10.15372/SJFS20150402

#### ВВЕДЕНИЕ

На севере Средней Сибири древостой на 90 % состоят из деревьев лиственницы Гмелина *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. (Абаимов et al., 2000). Абсолютное доминирование листвен-

ницы является наиболее важным фактором, определяющим равновесие в лесах криолитозоны (Поздняков, 1975; Абаимов и др., 1997). Как подчеркивал Л. К. Поздняков (1986), природные условия здесь неблагоприятны для роста леса. Многолетняя мерзлота, низкая

поступающая энергия Солнца и (в связи с этим) низкая температура воздуха сдвигают начало вегетационного периода на более позднее время и в целом обуславливают короткий сезон роста. Неблагоприятный радиационный режим предопределяет слабое развитие фотосинтетического аппарата деревьев. Этот фактор и наличие толщ многолетнемерзлых грунтов вызывают особый гидротермический режим почвы (Прокушкин и др., 2008). Деятельный слой почвы оттаивает на небольшую глубину, что резко ограничивает доступность питательных веществ. При общей низкой поступающей энергии Солнца различие по этому фактору проявляется в расположении типов леса в зависимости от экспозиции склонов, причем наиболее заметно на склонах северной и южной экспозиции (Zyryanova, Shitova, 1999). Отмечено, что лиственничники на склонах северной экспозиции отличались сравнительно низкими таксационно-биометрическими показателями и угнетенным состоянием (Yanagihara et al., 2000; Prokushkin et al., 2005). По нашим наблюдениям, в них высока доля сухостоя и суховершинных деревьев. Условия произрастания на склонах разной экспозиции обусловили разную морфологию корней у деревьев лиственницы Гмелина, разные скорости фотосинтеза и условия питания (Koike et al., 1998, 2010), различия в протекании процессов сезонного радиального роста и роста листьев (Yasue et al., 2010), а также в отклике ширины годовых колец на количество месячных осадков и заметно не сказались на отклике на температуру воздуха (Kujansuu et al., 2007; Kirduyanov et al., 2013). Между тем известно, что расчет корреляционных функций отклика стандартным методом (по среднемесячным климатическим данным) и методом скользящих средних (по среднесуточным температурам и суточным осадкам) дает разные результаты (Бенькова и др., 2012). Ранее было показано, что второй метод более эффективен, чем стандартный, для районов с коротким вегетационным сезоном (Симанько и др., 2013). Он позволяет выделить периоды времени в пределах сезона вегетации со значимым влиянием климатических факторов на радиальный прирост, не «привязываясь» к разбиению сезона на календарные месяцы.

Несмотря на то что особенностям строения лиственничников на многолетней мерзлоте в

контрастных условиях склонов северной и южной экспозиции и факторам, определяющим эти особенности, уделялось много внимания, эти вопросы не потеряли своей актуальности. В частности, склоны северной и южной экспозиции можно рассматривать как природный эксперимент создания определенных лесорастительных условий при изменении климата в сторону похолодания и потепления. Цель данной работы заключалась в установлении различий в динамике радиального роста (интенсивности роста и чувствительности годового прироста к изменению климатических факторов) деревьев лиственницы Гмелина, произрастающих на многолетнемерзлых почвах в контрастных условиях склонов северной и южной экспозиции. В задачи настоящей работы входило:

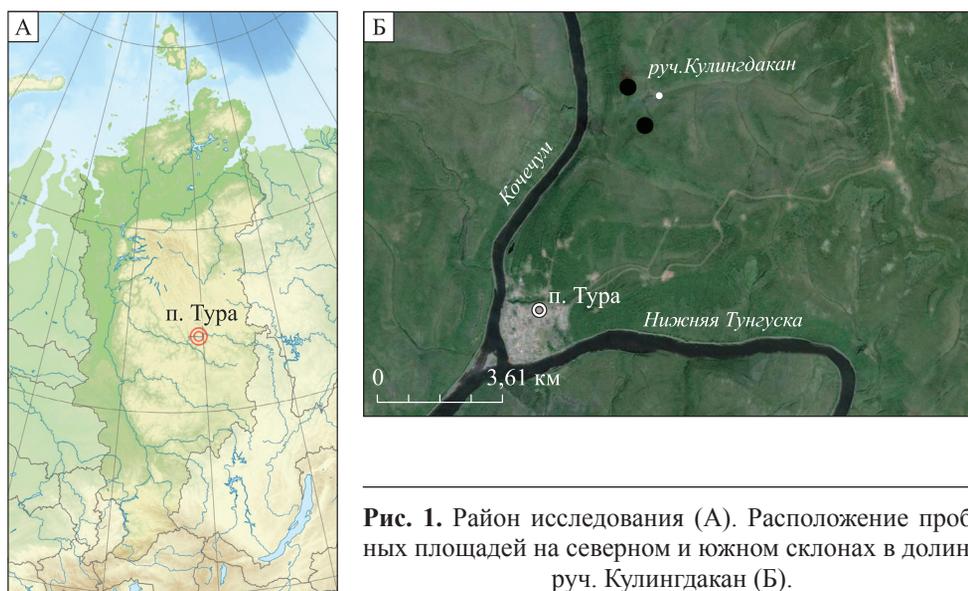
- рассчитать падающую солнечную радиацию, определяющую контрастность условий произрастания на склонах северной и южной экспозиции;

- выявить различия в динамике радиального прироста стволовой древесины у одновозрастных деревьев лиственницы Гмелина на склонах северной и южной экспозиции на многолетнемерзлых почвах в текущих климатических условиях;

- методом скользящих корреляционных функций отклика индексов радиального прироста выявить различия в реакции деревьев, произрастающих на склонах, на воздействие климатических факторов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследования находится на территории Нижне-Тунгусского округа лиственничных и лиственнично-темнохвойных северотаежных лесов и располагается в центральной части плато Сыверма (рис. 1, А). Исследования проводили в бассейне р. Нижняя Тунгуска вблизи пос. Тура (64°19'23" с. ш., 100°13'28" в. д.) на базе Эвенкийского опорного экспедиционного пункта ИЛ СО РАН. Для исследования выбрали одновозрастные лиственничники, сформировавшиеся после сильного низового пожара 1899 г. (пожар датирован 1902 г. в работе А. П. Абаимова с соавт. (1996), датировка уточнена дендрохронологическим методом (Кнорре и др., 2009)) на двух противоположно расположенных склонах се-

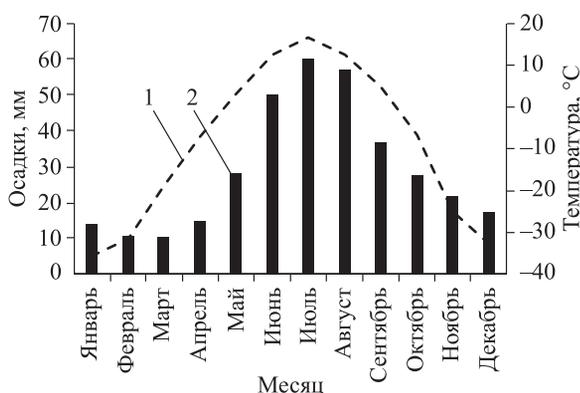


**Рис. 1.** Район исследования (А). Расположение пробных площадей на северном и южном склонах в долине руч. Кулингдакан (Б).

верной и южной экспозиции в нижнем течении руч. Кулингдакан (рис. 1, Б).

Климат резко континентальный. По данным метеостанции «Тура» за 1934–2003 гг., средняя температура января  $-36.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , июля  $+16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , среднегодовая температура  $-9.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , среднегодовое количество осадков 366 мм, причем 37 % из них приходится на май–июль – период интенсивного роста (рис. 2). Вегетационный сезон длится 70–80 дней и отличается повышенными долями весенней и осенней вегетации по сравнению с летней (Буторина, 1979). Период без заморозков на почве составляет всего 53–56 дней, или около 70 % от длительности вегетационного сезона. Снежный покров мощностью до 40–50 см сохраняется в среднем 207 дней (Прокушкин и др., 2008).

Территория имеет положительный годовой радиационный баланс, равный  $22\text{--}26\text{ ккал/см}^2$ ,



**Рис. 2.** Климатограмма района исследования по данным метеостанции «Тура» (1934–2009 гг.): 1 – температура воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ; 2 – осадки, мм.

с максимумом в июне–июле. В летнее время большая часть тепла, получаемого поверхностью, расходуется на оттаивание верхних слоев и испарение влаги и только 38 % – на нагревание воздуха (Бахтин, 1967).

Лиственница Гмелина формирует преимущественно монодоминантные древостои. Более 80 % корней лиственницы сосредоточено в подстилке и верхнем 20-сантиметровом слое минеральной почвы (Абаимов и др., 1997; Прокушкин и др., 2008).

*Склон северной экспозиции* (рис. 3, А). Крутизна склона  $7\text{--}8^{\circ}$ . Лиственничник багульниково-бруснично-голубичный лишайниково-зеленомошный. Подлесок представлен ивами боганидской *Salix boganidensis* Trautv и енисейской *S. jenisseensis* (Fr. Schmidt) B. Floder, распространен по площади равномерно. Напочвенный покров относительно однороден, общее проективное покрытие 35–40 %. Содоминируют кустарнички: багульник болотный *Ledum palustre* L. 3–5 %, брусника *Vaccinium vitis-idaea* L. 8–10 %, голубика *Vaccinium uliginosum* L. 10–15 %. Мохово-лишайниковый покров представлен в основном *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. и *Aulacomnium turgidum* (Hedw.) Schwaegr, в меньшей степени *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. (Prokushkin et al., 2005; Yanagihara et al., 2000).

Почвы имеют среднесуглинистый гранулометрический состав (доля физической глины 41 %), характеризуются повышенной влажностью и наличием надмерзлотного стока воды.



Рис. 3. Лиственничники на склонах северной (А) и южной (Б) экспозиции.

Сезонное оттаивание составляет  $(42 \pm 10)$  см в буграх мерзлотного пучения и  $(6 \pm 6)$  см в западинах. Мощность органического горизонта варьирует в пределах 11–25 см ( $(18.9 \pm 3.8)$  см,  $n = 16$ ), а глубина корнеобитаемого слоя не превышает 25 см.

Склон южной экспозиции (рис. 3, Б). Крутизна склона около  $10^\circ$ . Лиственничник бруснично-толокнянковый. В подросте встречается единично ель. Подлесок представлен можжевельником сибирским *Juniperus sibirica* Burgsd., который распространен куртинно; встречаются одиночные экземпляры розы иглистой *Rosa acicularis* Lindl. и жимолости голубой *Lonicera caerulea* L. Напочвенный покров относительно однороден, общее проективное покрытие 60–80 %. Абсолютным доминантом является толокнянка *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng., содоминирует брусника. Мохово-лишайниковый покров развит главным образом в микропонижениях; представлен в основном *Pleurozium schreberi*, встречаются виды кладонии *Cladonia* spp., цетрарии *Cetraria* spp. и *Aulacomnium turgidum* (Hedw.) Schwaegr. (Prokushkin et al., 2005).

Почвы в большей степени дренированные, чем на склоне северной экспозиции. По механическому составу они также среднесуглинистые с долей физической глины 45.1 %, которая убывает вниз по почвенному профилю, достигая 13 % на глубине 100 см, где залегает почвообразующая порода. Сезонное оттаивание составляет более 100 см; положительные температуры распространяются в почвообразующую породу. Мощность органического горизонта варьирует в пределах 4–9 см ( $(3.6 \pm 0.8)$  см,  $n = 10$ ), а корнеобитаемый слой достигает 70 см.

Во время комплексных экспедиций в 2009 и 2010 гг. сотрудниками Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН было заложено по одной временной пробной площади (ПП) размером  $500 \text{ м}^2$  в средней части склонов на высоте около 200 м над ур. м. У всех деревьев на ПП измерены высота, диаметр ствола на высоте 1.3 м от поверхности почвы и протяженность кроны и по ним рассчитаны средние характеристики древостоев. Единновременно (27.07.2009) измерены температура и влажность почвы под моховым покровом и на

глубине 10 см. Температуру измеряли почвенным термометром, объемную влажность – прибором Hydro Sense™, Campbell Scientific Australia Pty. Ltd.

Для исследования динамики радиального прироста отобрали 23 типичных здоровых дерева на склоне северной и 13 деревьев – южной экспозиции. С них взяли спилы на высоте 1.3 м от поверхности почвы. Ширину последовательных годовых колец измеряли по двум радиусам с точностью 0.01 мм на полуавтоматическом измерительном комплексе LINTAB v3.0 с пакетом программного обеспечения TSAP v3. Датировку и построение древесно-кольцевых хронологий проводили с использованием общепринятых в дендрохронологии программ Arstan и Cofecha (методика подробно описана в работах: Fritts, 1976; Шиятов, 2000).

С целью выделения периодов времени в пределах сезона вегетации со значимым влиянием климатических факторов на радиальный рост лиственницы использовали метод расчета и анализа скользящих корреляционных климатических функций отклика. Рассчитывалась корреляция индексов ширины годовых колец с сериями скользящих с окном в 20 дней и шагом в 5 дней среднесуточных температур и суточных осадков. Ранее было показано, что эти значения окна и шага являются оптимальными для мест с коротким сезоном роста (Симанько и др., 2013). Суточные климатические данные (температура воздуха и количество осадков) по метеостанции «Тура», ближайшей к объектам исследования, взяты с сайта «National Weather Service. Internet Weather Source», <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/ghcn/daily/>; данные приемлемого качества на сайте представлены с 1934 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для сравнительной оценки радиационного режима на исследуемых ПП применен расчетный метод, так как многолетние измерения потока ежедневной солнечной радиации не проводились.

**Расчет общего потока солнечной радиации.** Приход солнечной радиации  $S_s$  на наклонную поверхность обычно вычисляется по данным актинометрических измерений ее потока на перпендикулярную к лучам поверх-

ность и по известному углу падения солнечных лучей на заданную поверхность (Кондратьев и др., 1978):

$$S_s = S_0 \cos i, \quad (1)$$

$$\cos i = \cos \alpha \sin h + \sin \alpha \cos h \cos \psi,$$

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \Omega,$$

$$\cos \psi_o = \frac{\sin h \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cos \varphi},$$

$$\sin \psi_o = \frac{\cos \delta \sin \Omega}{\cos h},$$

$$\cos \Omega = \text{ctg } \varphi \text{ tg } \delta,$$

где  $S_0$  – солнечная постоянная, равная 117.2 МДж/(м<sup>2</sup>·день),  $\alpha$  – угол наклона поверхности по отношению к горизонтальной плоскости,  $\psi = \psi_o - \psi_s$  ( $\psi_o$  и  $\psi_s$  – азимуты Солнца и проекции нормали к склону на горизонтальную плоскость: для склона северной экспозиции  $\psi_s = \pi$ , южной –  $\psi_s = 0$ );  $\Omega$  – длительность дня,  $\delta$  – склонение Солнца,  $\varphi$  – широта местности,  $h$  – высота стояния Солнца.

Важно оценить и количество рассеянной солнечной радиации  $S_{diff}$ , активно действующей на растительность. Расчет этой составной части солнечной энергии довольно сложен, однако для простых оценок можно воспользоваться формулой Берлаге (Сивков, 1968):

$$S_{diff} = 0.5(S_0 - S_s) \sin h. \quad (2)$$

Общий поток солнечной радиации на произвольно ориентированную в пространстве наклонную поверхность на широте  $j$  в соответствующий момент времени равен

$$S = S_s + S_{diff}. \quad (3)$$

Алгоритм расчета  $S$  по уравнениям (1–3) введен в эколого-физиологическую модель (Бенькова, 2003), по которой рассчитаны значения  $S$  для исследованных ПП (рис. 4, кривые 1 и 2).

Расчеты показали, что с третьей декады мая до десятых чисел июля общий поток солнечной радиации на склоны максимален; в этот период, соответствующий началу и времени интенсивного радиального роста (Брюханова, 2011), разница между абсолютными значениями особенно велика. С начала апреля до конца августа среднедневная солнечная энергия, достигающая поверхности на склоне южной экспозиции, приблизительно на 20 % больше, чем северной (рис. 4).

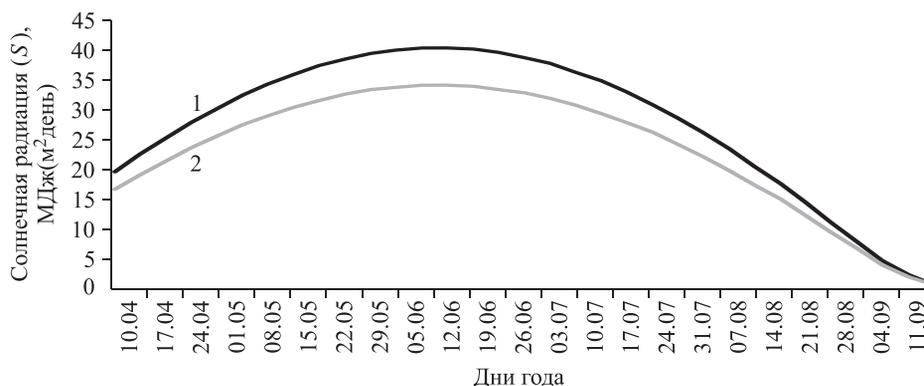


Рис. 4. Изменение среднедневного потока солнечной радиации на склоны южной (1) и северной (2) экспозиции с 10 апреля по 10 сентября.

**Характеристика древостоев лиственницы Гмелина на ПП.** Древостой на ПП, расположенной на склоне южной экспозиции, имеет меньшую густоту и лучшие биометрические характеристики: в 1.9 раз больший средний диаметр ствола, в 1.6 раз большую среднюю высоту (табл. 1); деревья отличаются более развитой кроной (см. рис. 3, Б) и в 1.6 раз большим средним радиальным приростом за последние 74 года (с 1934 по 2009 г.) по сравнению с древостоем на склоне северной экспозиции (см. табл. 1). Хорошо известно, что у деревьев, произрастающих в более благоприятных условиях, образуются более широкие годовые кольца, отличающиеся по анатомическому строению (Яценко-Хмелевский, 1954).

На склоне северной экспозиции органический горизонт, включающий мохово-лишайниковый ярус на поверхности минеральной почвы, был в 5 раз мощнее, а глубина сезонного оттаивания – существенно меньше. Радиаци-

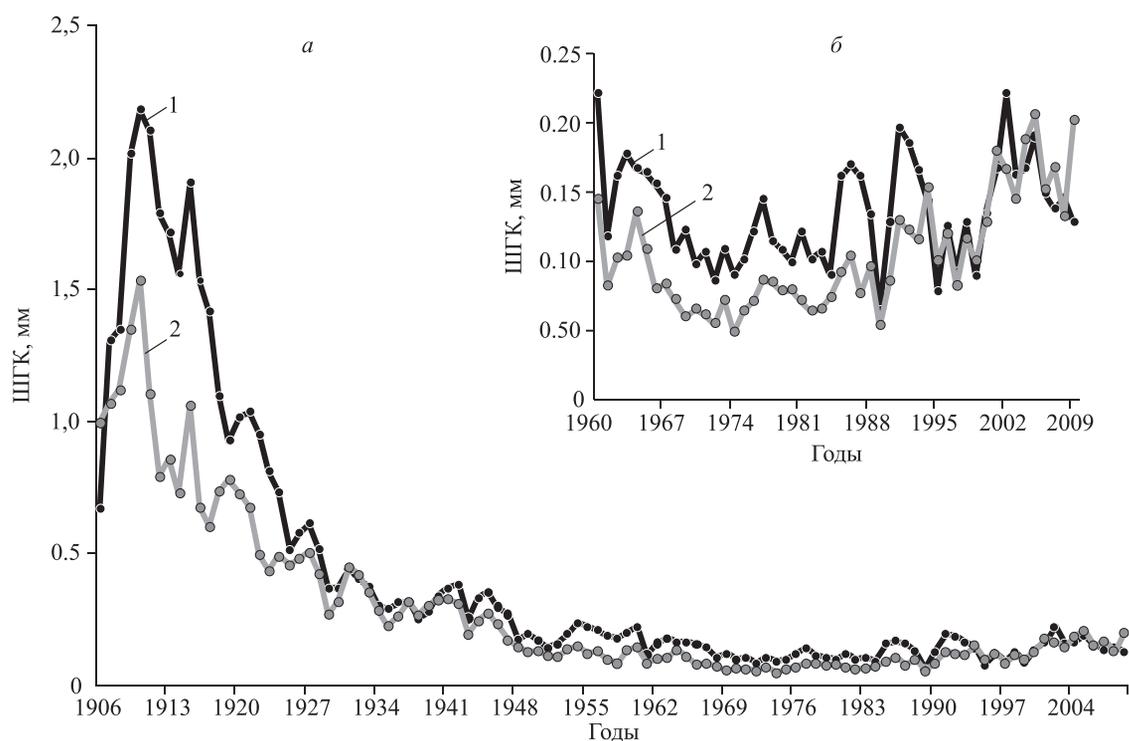
онный режим на склоне северной экспозиции оказался благоприятным для послепожарного развития мохово-лишайниковой подушки и обусловил интенсивное ее нарастание, так что к 2009 г. она оказалась почти в 2 раза более мощной, чем на склоне южной экспозиции (см. табл. 1).

Мохово-лишайниковый ярус благодаря своим термоизоляционным свойствам препятствует переносу тепловой энергии из приземного воздушного слоя в почву (Романовский, 1993) и поглощает значительную часть падающей на поверхность солнечной радиации, тем самым влияя на процессы оттаивания и прогрева активного слоя почвы. В результате на склоне северной экспозиции сформировались неблагоприятные для роста лиственницы термические почвенные условия, что негативно отразилось на биометрических характеристиках древостоя. Здесь в западных формах рельефа ледяная мерзлота сохранялась на протяжении всего вегетационного периода;

Т а б л и ц а 1

Характеристика древостоев на ПП

Показатель	Склон северной экспозиции	Склон южной экспозиции
Густота, дер./га	4075	1960
Состав	10Лц	10Лц + Е
Средний возраст, лет	103±3	103±3
Средний диаметр деревьев, см	5.8	10.8
Средняя высота, м	7.7	12.2
Средний радиальный прирост лиственницы за последние 74 года	0.16±0.06	0.25±0.10
Мощность мохово-лишайникового покрова (min–max), см	7–15	4–9
Глубина сезонного оттаивания на момент наблюдения (min–max), см	0–49	> 100
Температура (°C) / влажность (%) почвы на глубине 10 см (27.07.2009)	6.5/40	12.5/25



**Рис. 5.** Изменение средней ширины годичных колец у опытных деревьев лиственницы Гмелина на склонах южной (1) и северной (2) экспозиции.

в конце июля в своем максимуме температура почвы на глубине 10 см не превышала  $7^{\circ}\text{C}$ , что 1.9 раз ниже, чем наблюдавшаяся на склоне южной экспозиции, при этом влажность почвы была в 1.6 раз выше (см. табл. 1).

Кривые хода роста (зависимости ширины годичных колец от времени их образования в календарных датах), построенные для каждой ПП путем усреднения по деревьям (рис. 5, а), имеют одинаковые особенности: максимум на кривых совпадает с границей между ювенильной и взрослой древесиной и соответствует 10–15-летнему возрасту, до достижения 50-летнего возраста (до 1950-х гг.) радиальный прирост экспоненциально убывает, а с 1970-х гг. слабо возрастает. По интенсивности радиального роста деревья на склонах наиболее сильно различались в 20–30-летнем возрасте; в старшем возрасте это различие становится менее выраженным, а с 1995 по 2009 г. деревья по этим показателям заметно не различались (рис. 5, б). Экспоненциально убывающий возрастной тренд является типичным для большинства деревьев, а возрастающий тренд мы связываем с текущим потеплением в районе исследования (Оценочный доклад..., 2008). Для детального сравнительного анализа динамики радиального роста деревьев ниже

будут использованы индексированные древесно-кольцевые хронологии и скользящие корреляционные функции отклика индексов ширины годичных колец (ШГК) на влияние погодных факторов.

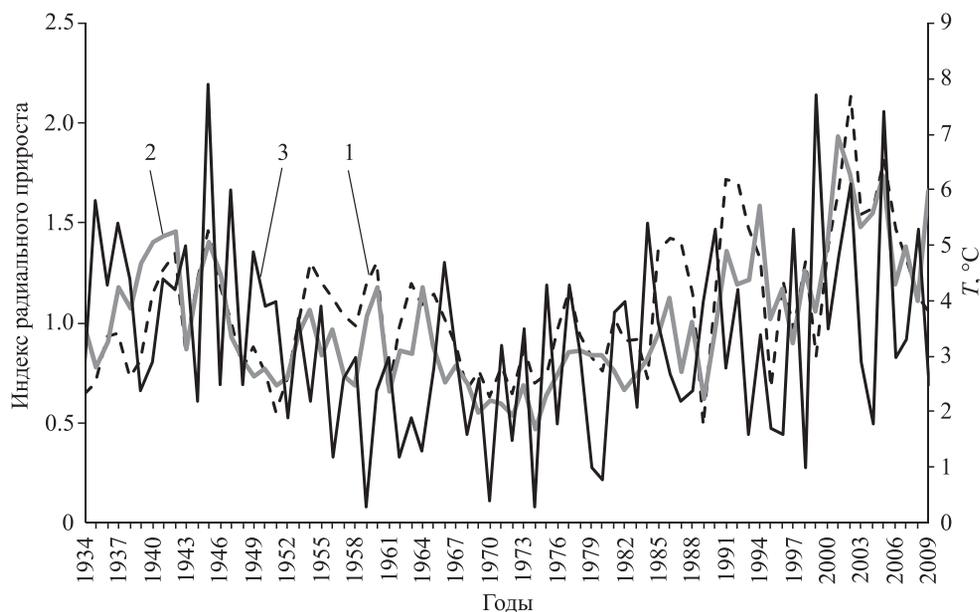
*Древесно-кольцевые хронологии* деревьев, произрастающих на склонах северной и южной экспозиции, построены для 1934–2009 гг., при этом ювенильный период и период резкого падения радиального прироста, закончившийся у деревьев к 1934 г. (см. рис. 5, а), исключались из рассмотрения. Абсолютные древесно-кольцевые хронологии (кривые 1 и 2) отличаются высокой синхронностью:  $R = 0.90$  при  $P \geq 0.95$ . Коэффициенты вариации и чувствительности хронологий для склона северной экспозиции выше (табл. 2), т. е. радиальный прирост деревьев больше зависит от погодных и внутрисезонных изменений климатических факторов (это наглядно будет показано с помощью скользящих функций отклика). Очевидно, что экологические условия роста деревьев на склонах по-разному модифицируют климатический сигнал, содержащийся в хронологиях.

Индексирование (удаление возрастного тренда) древесно-кольцевых хронологий проводилось отрицательной экспоненциальной

Т а б л и ц а 2

**Статистические характеристики абсолютных древесно-кольцевых хронологий для склонов северной и южной экспозиции (1934–2009 гг.,  $P \geq 0.95$ )**

Статистические характеристики	Склон северной экспозиции	Склон южной экспозиции
Длительность хронологии с 1934 г.	74	74
Средняя ширина годичного кольца, мм	0.16	0.25
Коэффициент вариации, %	59	40
Коэффициент чувствительности	0.32	0.27



**Рис. 6.** Индексированные древесно-кольцевые хронологии радиального прироста лиственницы для склонов южной (1) и северной (2) экспозиции. 3 – среднемесячная майская температура воздуха по данным метеостанции «Тура» за период 1934–2009 гг.

функцией. Синхронность индексированных хронологий также довольно высока:  $R = 0.76$  при  $P \geq 0.95$  (рис. 6, кривые 1 и 2).

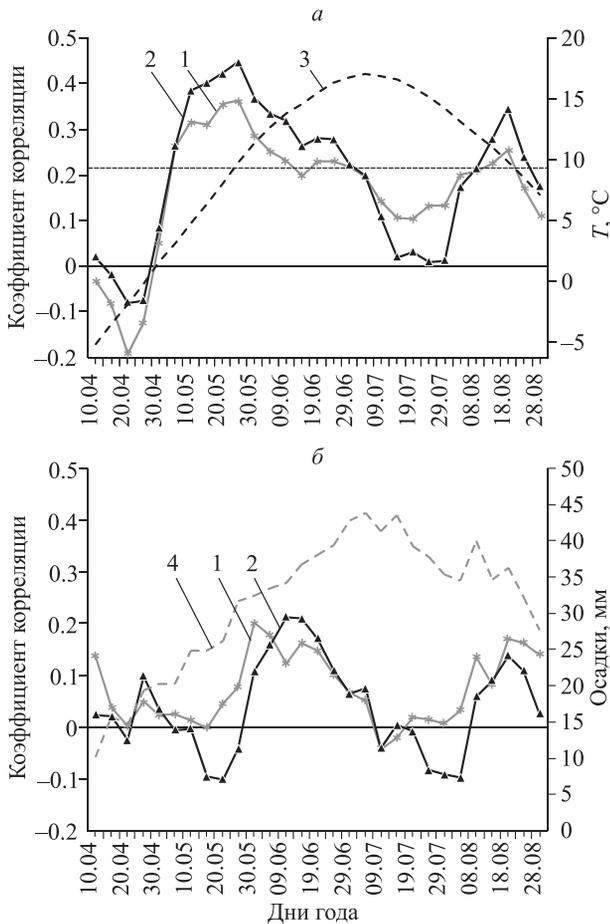
В обеих индексированных хронологиях в промежутке времени 1970–2009 гг. сохранились возрастающие тренды, которые по углу наклона совпадают не только между собой, но и с возрастающим трендом среднемесячной майской температуры воздуха (кривая 3). Таким образом, можно утверждать, что возрастающие с начала 1970-х гг. тренды в абсолютных и индексированных древесно-кольцевых хронологиях имеют климатическую природу и связаны с зафиксированной по метеостанции «Тура» тенденцией возрастания температуры мая.

**Скользящие корреляционные климатические функции отклика индексов радиального прироста.** Расчет «скользящих средних»

(рис. 7) проводился с 100-го по 243-й день года с окном в 20 дней и шагом в 5 дней за период с 1934 по 2009 г. (коэффициенты корреляции ( $R$ ) выше 0.22 являются значимыми при  $P > 0.95$ ).

Выделяются два периода в пределах сезона, когда температура воздуха положительно коррелирует с шириной годичных колец: в мае–июне и во второй половине августа (см. рис. 7). На склоне северной экспозиции первый период длится с 5 мая по 4 июля и второй – с 13 по 28 августа (кривая 2), а южной экспозиции (кривая 1) – с 5 мая по 19 июня и с 18 по 28 августа.

Таким образом, интервал с 18 по 28 августа приходится на самый конец вегетации, когда годичное кольцо древесины практически сформировано. Если судить по значениям коэффициента корреляции, температура воздуха в первый период играет определяющую роль



**Рис. 7.** Скользящие 20-дневные функции отклика индексов радиального прироста деревьев на склонах южной (1) и северной (2) экспозиции на температуру воздуха (а) и количество осадков (б). 3 и 4 – среднееголетние значения среднесуточной температуры и суточных осадков, «сглаженные» в окне в 20 дней (1934–2009 гг.).

в величине радиального прироста стволовой древесины на высоте 1.3 м от поверхности почвы у деревьев на обоих склонах, а второй период гораздо менее значим для величины прироста, так что августовский период нами был исключен из анализа как незначимый для развития кольца. Следует также отметить, что по значениям коэффициентов корреляции деревья на склоне северной экспозиции отличаются относительно высокой чувствительностью к изменению температуры воздуха (см. рис. 7, а).

Количество осадков в апреле–августе не оказывает заметного влияния на радиальный прирост лиственницы на ПП обоих склонов:  $R < 0.22$  при  $P > 0.95$  (см. рис. 7, б).

Ранее было установлено, что сезон радиального роста деревьев лиственницы Гмелина в 5–20 км от наших ПП начинается в первых

числах июня и заканчивается, как правило, во второй половине августа, а иногда (при благоприятных погодных условиях) – в начале сентября (Yasue et al., 2010; Брюханова, 2011). Начало сезона роста предваряет предсезонная реактивация камбия, которая может длиться около месяца (Prislan et al., 2011). Таким образом, от температуры воздуха в майский период, т. е. в период предсезонной реактивации камбия, прямо зависит ширина годичного кольца у деревьев на обоих склонах. Последующий период заметного прямого влияния температурного фактора на годичный прирост на склоне северной экспозиции длится приблизительно на 2 недели дольше, чем на склоне южной, и охватывает фактически весь период интенсивного роста. Между тем ожидалось, что обе эти особенности температурного отклика будут характерны для деревьев, растущих на более теплых почвах склона южной, а не северной экспозиции, что соответствовало бы результатам, полученным ранее (Бенькова и др., 2014). В упомянутой работе исследования проведены на ПП, расположенных на склоне северо-западной экспозиции той же возвышенности, т. е. радиационный режим на них был одинаков. ПП отличались температурой почвы в связи с разными свойствами мохово-лишайникового слоя. Выявлено, что худшие термические свойства почвы в текущих климатических условиях определили сравнительно низкий радиальный прирост деревьев лиственницы на ПП и пониженную их чувствительность к изменению температуры воздуха. Опираясь на эти результаты, можно утверждать, что дополнительная солнечная энергия, поступающая на склон южной экспозиции и по расчетам составляющая 20 % от поступающей на северный склон, плюс менее развитый мохово-лишайниковый покров, слабо экранирующий от нее почву, обусловили такой благоприятный термический режим активного почвенного слоя, который вызвал «неожиданный» (относительно деревьев на склоне северной экспозиции) отклик радиального прироста на температуру воздуха (см. рис. 7, а). Для того чтобы предоставить косвенное доказательство этого утверждения, мы рассмотрели особенности изменения среднемесячной майской температуры воздуха (см. кривая 3 на рис. 6). С 1943 по 1970 г. наблюдалась тенденция к ее уменьшению

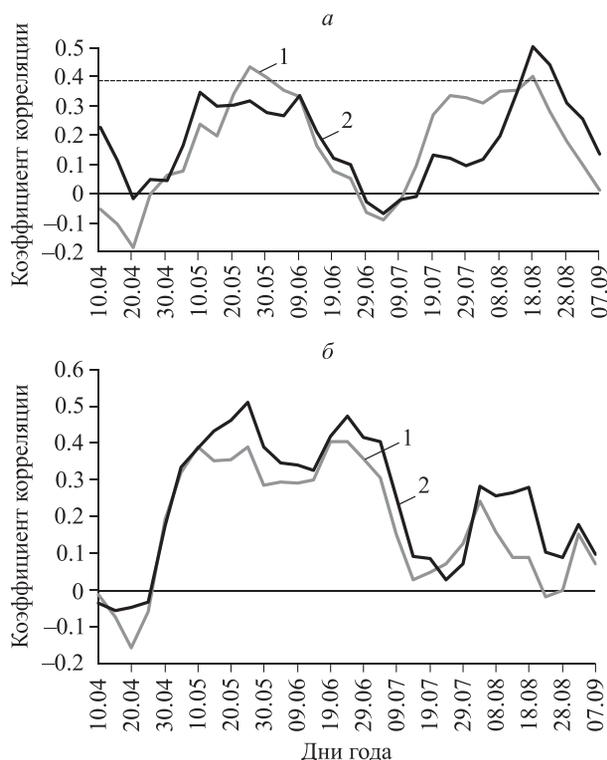


Рис. 8. Скользящие 20-дневные функции отклика индексов радиального прироста деревьев на склонах южной (1) и северной (2) экспозиции на температуру воздуха: а – период 1943–1970 гг., б – период 1970–2009 гг.

(период весеннего похолодания), а с 1970 по 2009 г. – к ее увеличению (период весеннего потепления). Скользящие температурные функции отклика для этих периодов приведены на рис. 8. Действительно, в период весеннего похолодания реакция на температуру воздуха у деревьев на склоне южной экспозиции оказалась существенно выше, а в период весеннего потепления – ниже по сравнению с деревьями на склоне северной экспозиции.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В лиственничниках послепожарного возобновления, типичных для Центральной Эвенкии, произрастающих на склонах северной и южной экспозиции, сложились разные гидро-термические почвенные условия под влиянием ряда факторов. В данной работе нами акцентировано внимание на особо важных: это общий поток солнечной радиации, определяющий контрастность условий произрастания на склонах северной и южной экспозиции, и мощность термоизолирующего мохово-лишайникового слоя. На склоне северной экспо-

зиции солнечная радиация на 20 % меньше. Радиационный режим оказался благоприятным для послепожарного нарастания термоизолирующего мохово-лишайникового покрова, так что к 2009 г. он оказался почти в 2 раза более мощным, чем на склоне южной экспозиции. Худшие почвенные условия обусловили сравнительно низкий радиальный прирост деревьев лиственницы, а сами деревья отличались повышенной чувствительностью к температуре воздуха в период камбиальной реактивации, в начале и во время интенсивного роста. Возможно, что по этой же причине в стволах нарушается процесс транспорта воды от корней к кроне, который приводит к сухостершинности деревьев – явлению, широко распространенному в районе исследования. Мы коснемся этого вопроса в следующей статье серии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (14-04-01005, 14-04-00443) и СО РАН (Интеграционный проект № 69).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абаимов А. П., Прокушкин С. Г., Зырянова О. А. Эколого-фитоценотическая оценка воздействия пожаров на леса криолитозоны Средней Сибири // Сиб. экол. журн. 1996. № 1. С. 51–60.
- Абаимов А. П., Прокушкин С. Г., Зырянова О. А., Каверзина Л. Н. Особенности формирования и функционирования лиственничных лесов на мерзлотных почвах // Лесоведение. 1997. № 5. С. 13–23.
- Бахтин Н. П. Радиационные факторы широтной зональности и вертикальной поясности растительности Средней Сибири // Гидрологические исследования в лесах Сибири. М.: Наука, 1967. С. 5–28.
- Бенькова А. В. Моделирование динамики нетто-продуктивности хвойных в пределах Циркумполярного кольца и средней тайги: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.28. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева, 2003. 19 с.
- Бенькова В. Е., Шашкин А. В., Наурызбаев М. М., Прокушкин А. С., Симанько В. В. Значение микроэкологических условий для роста лиственницы Гмелина в экотоне верхней границы леса на полуострове Таймыр // Лесоведение. 2012. № 4. С. 73–84.

- Бенькова В. Е., Зырянова О. А., Шашкин А. В., Бенькова А. В., Собачкин Д. С., Симанько В. В., Зырянов В. И.* Влияние пространственной мозаичности мохово-лишайникового покрова на радиальный рост лиственницы Гмелина (Центральная Эвенкия) // Лесоведение. 2014. № 4. С. 41–49.
- Брюханова М. В.* Зависимость радиального роста лиственницы Гмелина от гидротермического режима почв в подзоне северной тайги Средней Сибири // Вестн. СибГАУ. 2011. № 7 (40). С. 80–84.
- Буторина Т. Н.* Биоклиматическое районирование Красноярского края. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. 231 с.
- Кнорре А. А., Кирдянов А. В., Прокушкин А. С.* Оценка скорости подъема мерзлоты в лиственничниках Центральной Эвенкии методами дендрохронологии // Лесоведение. 2009. № 2. С. 77–80.
- Кондратьев К. Я., Пивоварова З. И., Федорова М. П.* Радиационный режим наклонных поверхностей. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 170 с.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. 29 с.
- Поздняков Л. К.* Даурская лиственница. М.: Наука, 1975. 312 с.
- Поздняков Л. К.* Мерзлотное лесоведение. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 192 с.
- Прокушкин С. Г., Абаймов А. П., Прокушкин А. С.* Структурно-функциональные особенности лиственницы Гмелина в криолитозоне Центральной Эвенкии. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2008. 161 с.
- Романовский Н. Н.* Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
- Сивков С. И.* Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 232 с.
- Симанько В. В., Бенькова А. В., Шашкин А. В.* Применение метода «скользящих функций отклика» для выявления влияния климатических факторов на радиальный рост деревьев // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 7. С. 188–194.
- Шиятов С. Г.* Методы дендрохронологии. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учеб.-метод. пособ. Ч. I. Красноярск: Изд-во КГУ, 2000. 80 с.
- Яценко-Хмелевский А. А.* Основы и методы анатомического исследования древесины. М.; Л., 1954. 337 с.
- Abaimov A. P., Zyryanova O. A., Prokushkin S. G., Koike T., Matsuura Y.* Forest ecosystems of the cryolithic zone of Siberia: regional features, mechanisms of stability and pyrogenic changes // Euras. J. For. Res. 2000. N. 1. P. 1–10.
- Fritts H. C.* Tree-rings and climate. London, New York, San-Francisco: Acad. Press, 1976. 576 p.
- Kirryanov A. V., Prokushkin A. S., Tabakova M. A.* Tree ring growth of Gmelin larch under contrasting local conditions in the north of Central Siberia // Dendrochronologia. 2013. V. 31. N. 2. P. 114–119.
- Koike T., Mori S., Matsuura Y., Prokushkin S. G., Zyryanova O. A., Kajimoto T., Abaimov A. P.* Photosynthesis and foliar nutrient dynamics in larch and spruce grown on contrasting north and south-facing slopes in the Tura experiment forest in Central Siberia / Eds. S. Mori, Y. Kanasawa, Y. Matsuura, G. Inoue // Proc. Sixth Symp. Joint Sib. Permafrost Stud. Betw. Japan and Russia in 1997. Tsukuba, 1998. P. 3–10.
- Koike T., Mori S., Zyryanova O. A., Kajimoto T., Matsuura Y., Abaimov A. P.* Photosynthetic characteristics of trees and shrubs growing on the north and south facing slopes in Central Siberia / Eds. A. Osawa, O. A. Zyryanova, Y. Matsuura, T. Kajimoto, R. W. Wein // Permafrost Ecosystem: Siberian Larch Forest. Ecol. Stud. V. 209. Springer, 2010. P. 273–287.
- Kujansuu J., Yasue K., Koike T., Abaimov A. P., Kajimoto T., Takeda T., Tokumoto M., Matsuura Y.* Climatic responses of tree-ring widths of *Larix gmelinii* on contrasting north-facing and south-facing slopes in Central Siberia // J. Wood Sci. 2007. N. 53. P. 87–93.
- Prislan P., Schmitt U., Koch G., Gričar J., Čufar K.* Seasonal ultrastructural changes in the cambial zone of beech (*Fagus sylvatica*) grown at two different altitudes // IAWA J. 2011. V. 32. N. 4. P. 443–459.
- Prokushkin A. S., Kajimoto T., Prokushkin S. G., McDowell W. H., Abaimov A. P., Matsuura Y.* Climatic factors influencing fluxes of

dissolved organic carbon from forest floor in a continuous-permafrost Siberian watershed // *Can. J. For. Res.* 2005. N. 35. P. 2130–2140.

Yanagihara Y., Koike T., Matsuura Y., Mori S., Shibata H., Satoh F., Masyagina O. V., Zyryanova O. A., Prokushkin A. S., Prokushkin S. G., Abaimov A. P. Soil respiration on the contrasting north and south facing slopes of a larch forest in Central Siberia // *Euras. J. For. Res.* 2000. N. 1. P. 19–29.

Yasue K., Kujansuu J., Kajimoto T., Nakai Y., Koike T., Abaimov A. P., Matsuura Y. Seasonal changes in stem radial growth of *Larix gmelinii* in Central Siberia in relation to its climatic responses / Eds. A. Osawa, O. A. Zyryanova, Y. Matsuura, T. Kajimoto, R. W. Wein // *Permafrost Ecosystem: Siberian Larch Forest. Ecol. Stud.* V. 209. Springer, 2010. P. 331–345.

Zyryanova O. A., Shitova S. A. Spatial distribution regularities of the Central Evenkian larch forests: a cartographic model // *Proc. 4th Symp. Joint Sib. Permafrost Stud. Betw. Japan and Russia in 1995* / Ed. M. Fukuda. Sapporo, Japan, 1999. P. 65–69.

**The Effect of Slope Exposition on the Growth Dynamics of *Larix Gmelinii* in Permafrost Conditions of Central Siberia.**

### I. Differences in Tree Radial Dynamics Growth in the North- and South-Facing Slopes

A. V. Benkova, D. A. Mashukov, V. E. Benkova, A. S. Prokushkin, A. V. Shashkin

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch  
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: annie1977@yandex.ru, mashukov1988@gmail.com, benkova@ksc.krasn.ru, prokushkin@ksc.krasn.ru, shashkin@ksc.krasn.ru

This paper is devoted to revealing the distinctive characteristics of radial growth of larch trees (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) growing in permafrost contrast conditions of the north and south facing slopes (Central Siberia, 64°19'23" N, 100°13'28" E). Even-aged larch stems regenerated after strong fire in 1899 in opposite north and south facing slopes of the hills situated on the banks of Kulingdakan stream were under study. Two sample sites at the middle part of the slopes were established. 23 model trees in the north facing slope and 13 ones in the south-facing slope were selected for dendrochronological analysis. From each tree, disks at 1.3 m height of the stems were taken. Tree ring widths were measured, comparative analysis of dynamics of radial growth in the slopes was made. In order to separate time intervals, characterized by distinctive climate impact on radial increment, sliding response functions were calculated and analyzed. Daily solar radiation for both sample sites was calculated. The results showed that solar radiation in the north-facing slope is 20 % less than that in south-facing slope. Solar radiation regime promotes intensive thickening of moss-lichen cover, so that its thickness to 2009 was nearly two times thicker than in south-facing slope. Both factors affected the thermal soil growth conditions in the north facing slope. The latter was responsible for narrower ring widths formation in the stems and governed higher sensitivity of the trees to air temperature in the periods of cambium reactivation, start and intensive growth.

**Keywords:** radial increment, climate factors, solar radiation, moss-lichen cover, thermal soil properties, Central Evenkia, Central Siberia.

**How to cite:** Benkova A. V., Mashukov D. A., Benkova V. E., Prokushkin A. S., Shashkin A. V. The effect of slope exposition on the growth dynamics of *Larix gmelinii* in permafrost conditions of Central Siberia. I. Differences in tree radial dynamics growth in the north- and south-facing slopes // *Sibirskij Lesnoj Zurnal* (Siberian Journal of Forest Science). 2015. N. 4: 18–29 (in Russian with English abstract).