

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 911.2; 911.52 (571.121)

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРИРОСТ ДЕРЕВЬЕВ
НА МЕРЗЛОТНЫХ БУГРАХ ПУЧЕНИЯ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИИ.В. Воловинский¹, К.Н. Дьяконов²^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра физической географии и ландшафтоведения*¹ *Аспирант; e-mail: volovinskiy@gmail.com*² *Зав. кафедрой, проф., чл.-кор. РАН; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru*

При решении проблемы взаимосвязи ландшафтного пространства и ландшафтного времени часто используются связи приростов деревьев с климатическими показателями для индикации изменений в функционировании ландшафтов. В статье анализируется влияние климатических факторов на приросты кедров сибирского (*Pinus sibirica*) в последние 140 лет на буграх пучения в основном миграционного типа на севере Западной Сибири в заболоченных ландшафтах подзоны северной тайги. Построены дендрохронологии для 47 площадок опробования, расположенных на буграх пучения разных типов. Установлено, что большая часть дендрохронологий коррелирует между собой, хотя различия между буграми значительны. Наихудшее соответствие модальной дендрохронологии у площадок опробования, примыкающих к термокарстовым провалам. Выявлено, что достоверной связи между средними годовыми температурами и приростами деревьев нет, а наибольшие приросты деревьев наблюдаются в годы с высокими майскими температурами воздуха. Идеальными условиями для прироста деревьев являются холодные малоснежные зимы и теплые и влажные летние сезоны. Обнаружено, что в периоды с аномально высокими температурами воздуха приросты деревьев снижаются, что связано с тем, что при деградации мерзлотных бугров и увеличении сезонно-талого слоя снижается глубина залегания почвенных вод, а верхний горизонт почвы иссушается.

Ключевые слова: дендрохронология, ландшафтоведение, геокриология, бугры пучения, Западно-Сибирская равнина, сосна сибирская

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-3-14

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений исследований пространственно-временной организации ландшафтов выступает раздел, характеризующий закономерности проявлений внутривековых циклов на разных территориальных уровнях [Дьяконов, 1997; Хорошев и др., 2008]. Без решения проблемы взаимосвязи ландшафтного пространства и ландшафтного времени нельзя решить такие вопросы, как функционирование и динамика мерзлотных форм рельефа и связанные с ними прикладные проблемы устойчивой эксплуатации техногенных объектов в условиях изменения климата. Чаще всего используются связи приростов деревьев с климатическими показателями для индикации изменений в функционировании ландшафтов. Основными факторами, влияющими на ежегодный прирост деревьев, являются средние годовые температуры и количество осадков [Ferguson, 1970; Матвеев, Румянцев, 2013;

Тишин, Чижикова, 2018]. Так, в годы с низкими температурами (в особенности летними) приросты деревьев, как правило, существенно ниже, чем в годы с высокими температурами [Schweingruber, 2012; Ferguson, 1970; Шиятов, 2000]. Экстремально малое или, напротив, большое количество осадков также приводит к низкому ежегодному приросту [Schweingruber, 2012]. Тем не менее мы можем предположить, что на южной границе распространения многолетней мерзлоты, где развиты особые мерзлотные формы рельефа, обладающие высокой степенью подвижности, миграционные бугры пучения, а также плоскобугристые торфяники, связь приростов деревьев со среднегодовой температурой и осадками должна быть сложнее.

В настоящее время Е.А. Вагановым, С.Г. Шиятовым, Р.М. Хантемировым выполнена большая работа по составлению дендрохронологий Северной Евразии [Ваганов, 1998; Хантемиров, 1999; Шиятов, 2002]. По

результатам многолетних исследований дендрохронологий от Северного Урала до Чукотки ими установлена значительная корреляция надрегионального масштаба между дендрохронологиями в разных областях северной части европейской территории России и Сибири. Основным фактором прироста деревьев определены средние месячные температуры июня – июля, при этом к востоку вклад июльских температур уменьшается. Также авторы для всех районов фиксируют вклад малого ледникового периода, который обусловил снижение приростов деревьев до конца XIX в. Высокий прирост деревьев характерен для XX в. При этом на европейской территории России высокий прирост последних десятилетий проявляется более ярко, чем в Сибири [Ваганов, Шиятов, 2005].

Существует также большое количество работ, посвященных приростам деревьев в условиях многолетней мерзлоты [Giddings, 1941; Allard et al., 1996; Lloyd et al., 2003; Beltrami et al., 1995; Huscroft, 2003; Kajimoto, 2003; Vaganov, Kirilyanov, 2010]. Как правило, они посвящены или послепожарной динамике древостоев, или приростам деревьев в условиях естественной деградации многолетней мерзлоты. В этих работах отмечено, что важными факторами, которые определяют рост деревьев, являются температура почв, а также их влажность [Nikolayev, Fyodorov, 2009]. Ранее Ю.Н. Бочкаревым и К.Н. Дьяконовым [Бочкарев, 2006, 2014; Дьяконов, Бочкарев, 2019] исследовались приросты деревьев, произрастающих на буграх пучения. Установлено, что дендрохронологические ряды на буграх пучения разного типа сильно разнятся, что объясняется неравномерностью протаивания, т. е. почвенного климата. В последние годы «фронт» полевых исследований в северотаежной подзоне Западной Сибири расширился.

Цель исследования – выявить значимость климатических факторов для радиальных приростов деревьев за период с доступными метеорологическими данными (1883–2019) на буграх пучения междуречья Надыма и Хейгияхи, расположенного на севере Западно-Сибирской равнины.

Предмет исследования – проверка гипотез о синхронности приростов на урочищах бугров пучения, возможной связи приростов со средними годовыми и месячными температурами воздуха, о связи приростов со средними годовыми и месячными значениями осадков, а также сопоставление вклада температуры воздуха и осадков в прирост деревьев.

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория – междуречье Надыма, Хейгияхи и Малой Хетты – расположена в 40 км к юго-западу от города Надым в Ямало-Ненецком автономном округе и имеет географические коор-

динаты 65° с. ш., 72° в. д. Территория относится к Полуйской провинции подзоны северной тайги Западной Сибири [Гвоздецкий и др., 1968].

Основная поверхность относится к ландшафтам озерно-аллювиальных равнин с песчаными отложениями с кедровыми лишайниковыми лесами на языковатых подзолах, а также к плоскобугристым и крупнобугристым мерзлым торфяникам (кустарничково-мохово-лишайниковым по буграм и торфяно-моховым по понижениям) [Атлас Тюменской области..., 1971].

Для региона характерен континентальный тип климата с непродолжительным прохладным летом и длинной холодной зимой. Безморозный период продолжается с мая по сентябрь и составляет 90–150 дней. Сумма положительных температур на изучаемой территории составляет 1200–1300°C, а сумма температур выше 10°C – 900°C. Средняя годовая температура равна –5°C, средняя температура января – –23°C с абсолютным минимумом –67°C. Средняя температура июля составляет +16°C с абсолютным максимумом +40°C. Переход через 0°C происходит в середине октября и в конце мая [Атлас ЯНАО..., 2004].

Территория характеризуется избыточным режимом увлажнения. Среднегодовое количество осадков составляет 460 мм, испаряемость – 350 мм. Снежный покров устанавливается в октябре и достигает 60 см; он начинает разрушаться в мае, при этом его плотность сильно увеличивается. Окончательное разрушение снежного покрова происходит в июне. Таким образом, формирование сезонно-талого слоя начинается в конце мая – начале июня. Промерзание сезонно-талого слоя происходит во второй половине октября – начале ноября.

Средняя скорость ветра не превышает 3 м/с. Несмотря на относительно невысокую скорость ветра, на буграх пучения происходит постоянное перераспределение снежного покрова [Геоэкология СССР..., 1989], что приводит к их неравномерному промерзанию.

Большая часть территории занята торфяниками. Их мощность в среднем составляет от 0,5 м на буграх пучения до 2 м в понижениях. Развита островная мерзлота. Характерная черта геоэкологических условий данного района – большие участки на озерно-аллювиальной равнине с несливающейся мерзлотой, на которых кровля многолетнемерзлых пород залегает на глубине 5–20 м. Температура мерзлоты различна. Так, в пределах бугристых торфяников температура составляет –3,5...–4°C, а на залесенных участках – –0,2...1°C. Глубина сезонного протаивания различна и зависит от вмещающих пород. На участках с торфянистым слоем протаивание составляет 60–80 см, на участках с торфянистым слоем менее 20 см – до 200 см [Геоэкология СССР..., 1989].

На территории развиты различные мерзлотные формы рельефа. К ним относятся плоскобугристые и крупнобугристые образования. Плоскобугристые торфяники представляют собой комбинацию торфяных бугров пучения высотой до 2 м и от 50 до 200 м в диаметре и сфагновых периодически обводненных понижений. Расстояние между буграми пучения не превышает 100 м. Зачастую бугры сливаются между собой. Мощность торфа на данном типе урочищ составляет около 2 м. Ниже залегают супеси, постепенно переходящие в пески. Многолетняя мерзлота на плоскобугристых торфяниках залегает на глубине от 50 см, залегание многолетней мерзлоты в обводненных понижениях превышает 2 м, иногда она отсутствует вовсе. Почвенный покров на плоскобугристых торфяниках представлен торфяными олиготрофными почвами.

Крупные миграционные бугры пучения можно разделить на минеральные и торфяно-минеральные. Торфяно-минеральные бугры пучения являются преобладающим типом. Тем не менее происхождение, современное функционирование, почвы и растительность двух типов бугров практически идентичны. Главным различием является залегание торфяных и песчаных линз. В зависимости от растительного покрова на торфяно-минеральных буграх залегают торфяные олиготрофные или торфяные эутрофные почвы, а на минеральных – торфяно-подзолы глеевые с торфяной подстилкой от 20 до 50 см.

Стоит отметить, что бугры пучения распространены не только пятнами, как бугры плоскобугристых торфяников, но и грядами. Зачастую один бугор пучения сливается с другим или плавно переходит в тундровые урочища. Высота подобных бугров достигает 5–10 м, отдельные бугры достигают 15 м в высоту. Их диаметр может превышать 200 м. Торфяно-минеральные бугры пучения имеют относительно крутые склоны (до 20°). В некоторых случаях склоны бугров пучения обваливаются и в таких случаях могут быть отвесными. При этом они не прямые, а с ярко выраженным ступенчатым рельефом.

Рельеф бугров пучения осложнен трещинами, некоторые из которых имеют глубину до 2 м. Помимо трещин на буграх пучения встречаются пятна-медальоны – участки, на которых выдавливается песчано-глинистый материал. Бугры пучения характеризуются многочисленными микропонижениями. Амплитуда микрорельефа может составлять от 30 см до 1,5–2 м.

Сложный микрорельеф обуславливает крайне высокую степень мозаичности данных типов урочищ. В пределах одного бугра пучения залегание многолетней мерзлоты может варьировать от 30–35 см до нескольких метров или даже полного ее отсутствия.

Особым типом урочищ являются термокарстовые котловины, имеющие широкое распространение. Наибольший интерес представляют зарождающиеся термокарстовые котловины, которые, как правило, могут увеличиваться на несколько метров в год. Подобные котловины могут иметь площадь в несколько десятков квадратных метров и диаметр до 100 м. Как правило, такие котловины заняты водой, однако у них может быть большая сплавина из болотных травянистых растений: осок (*Carex*), вахты трехлистной (*Menyanthes trifoliata*).

Нами были использованы данные полевых исследований, включающие в себя ландшафтные описания, керны деревьев, метеорологические данные по станциям Надым и Салехард. Наблюдения на метеостанции Надым начались в 1960 г., а в Салехарде – в 1883 г. По этой причине данные с 1883 по 1960 г. обладают чуть меньшей точностью, тем не менее корреляция между среднегодовыми температурами в Надыме и Салехарде является достоверной и составляет 0,96, что позволяет их использовать.

Полевые данные собраны Ю.Н. Бочкаревым с 2013 по 2019 г., в 2018–2019 гг. – с участием И.В. Волонинского. Ландшафтные описания и отбор кернов кедров сибирского (*Pinus sibirica*) (реже лиственницы сибирской (*Larix sibirica*)) происходили в начале – середине августа. За время экспедиций всего было исследовано 23 бугра пучения различных типов с 47 площадок опробования. Охарактеризован растительный и почвенный покров на склонах и вершинах (видовой состав деревьев, кустарников, кустарничков, мхов и лишайников; мощность горизонтов почв). Использован метод микропрофилирования. Так, в большинстве случаев описывалась сплавина перед грядой, болотные кочки в нижней части склона, склон гряды, основная поверхность и противоположный склон. Для каждой фации было выполнено стандартное физико-географическое описание, в том числе измерена мощность сезонного протаивания. Описание включало и оценку степени разрушения бугра. Для этого использовались такие параметры, как количество микротрещин, расчлененность микрорельефа, наклон деревьев, контрастность условий промерзания.

На каждом описанном бугре пучения были отобраны керны деревьев. В большинстве случаев отбирались керны кедров сибирского, хотя на двух буграх произрастала лиственничная формация лесов. Керны отбирались отдельно для деревьев на склоне и на основной поверхности гряд. Обычно число отобранных кернов на одну площадку составляло 10–15 (всего 512 кернов). Отбор производился буром Пресслера на высоте 1,3 м от уровня земли. При этом образцы отбирались с двух сторон дерева – в сторону наклона и в противоположную сторону.

Анализ кернов деревьев осуществлен на оборудовании Lintab-5 с программным обеспечением TsapWin. При анализе кернов применен метод перекрестного датирования. Для составления обобщенной дендрохронологии для площади опробования использован программный пакет ARSTAN [Cook, Holmes, 1986], который нивелирует биологический возраст дерева и многовековые колебания.

Процесс «удаление трендов». Выполнен первый детрендинг, а именно приведение дендрохронологической шкалы в соответствие отрицательной экспоненциальной кривой или линейной регрессии. Второй детрендинг позволяет сглаживать большие колебания внутри циклов приростов деревьев. Нами были исключены низкочастотные колебания с периодом более 50 лет. Наконец, команда «Список значений в серии» позволяет составить общую хронологию для точки опробования [Cook, Holmes, 1986]. Ниже в работе приводятся не абсолютные значения приростов деревьев, а значения, полученные в пакете ARSTAN после детрендинга.

При анализе климатических и дендрохронологических данных использовался ряд статистических методов, которые были реализованы в программном пакете Statistica 7.0. В первую очередь была выполнена проверка на нормальность распределения дендрохронологий и климатических данных с помощью теста Колмогорова – Смирнова. Корреляции между дендрохронологиями и климатическими показателями рассчитывались с помощью параметрической корреляции Пирсона, поскольку данные удовлетворяют критериям нормального распределения. Для анализа совместного вклада температу-

ры воздуха и количества атмосферных осадков был проведен регрессионный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Синхронность дендрохронологий с разных участков описывает одинаковый ход событий на них и отвечает нормальному распределению. По этой причине для проверки гипотезы о синхронности приростов на площадках опробования была составлена матрица корреляций Пирсона. Было выяснено, что на большинстве площадок опробования приросты достоверно коррелируют друг с другом. Большая часть корреляций варьирует в диапазоне $R = 0,5–0,8$ при $p < 0,05$. Тем не менее на ряде площадок опробования коэффициенты корреляции близки к нулевым, отрицательные или статистически недостоверные. Речь идет о девяти площадках из 47. Большая часть этих площадок склоны к термокарстовым провалам с угнетенными деревьями. Также не подчиняется общей хронологии ряд разрушающихся бугров пучения с амплитудами микрорельефа более полутора метров.

Рассмотрим график приростов деревьев за последние 40 лет (рис. 1). На графике наглядно видно, что, хотя в некоторые годы приросты деревьев на площадках опробования разнонаправлены, абсолютно большая часть приростов синхронна. Речь идет, например, о 2007, 1997, 1987, 1980 гг. с низкими приростами и о 1998 г. с максимальным приростом. Подобные годы наблюдались и ранее: низкие приросты почти на всех точках опробования зафиксированы в 1961, 1941, 1923 гг., высокие – в 1948, 1909, 1880, 1835 гг.

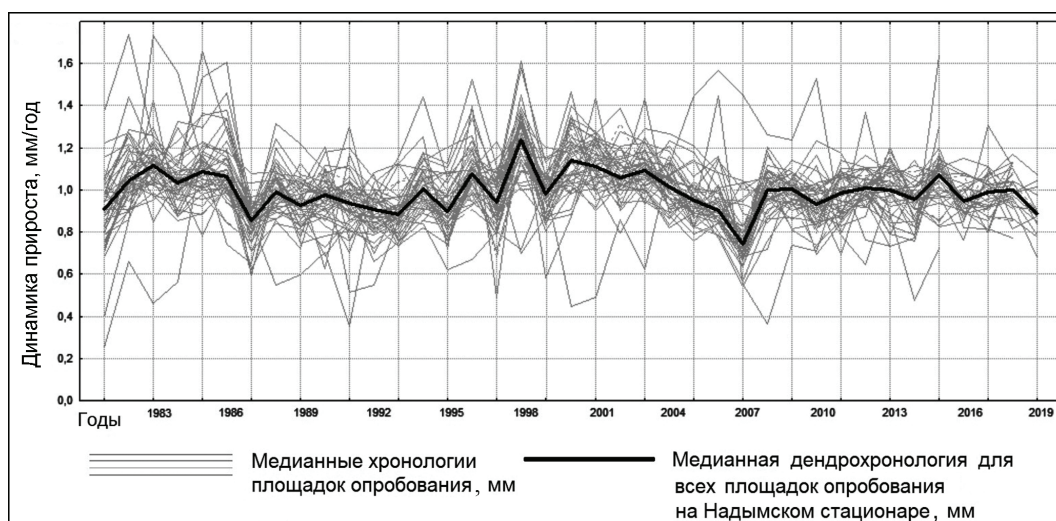


Рис. 1. Динамика приростов за последние 40 лет на площадках опробования. Коэффициент корреляции Пирсона между медианной дендрохронологией для всей исследуемой территории и отдельных площадок опробования является статистически достоверным и составляет от 0,1 до 0,85

Fig. 1. Growth dynamics over the past 40 years at sampling sites. The Pearson correlation coefficient between the median dendrochronology for the entire study area and individual sampling sites is statistically significant ranging from 0,1 to 0,85

Необходимо также отметить, что помимо лет с экстремально высокими или низкими приростами, мы наблюдаем длительные периоды с высокими или низкими приростами, которые могут быть связаны, в том числе, с солнечной активностью [Распоров, 2004]. Так, на графике особенно отчетливо выделяется период высоких приростов с 1865 по 1885 г. и период низких приростов с 1962 по 1981 г. (рис. 2).

В результате выделены периоды, приведенные в табл. 1.

Таким образом, выдвинутая гипотеза о синхронности приростов на площадках опробования подтверждена частично, поскольку приросты на площадках опробования, обращенных к термокарстовым провалам или на разрушающихся буграх, не коррелируют с остальными дендрохронологиями. Этот результат свидетельствует о том, что, хотя ведущими являются региональные климатические вклады, локальные факторы (различия урочищ) также имеют важное значение.

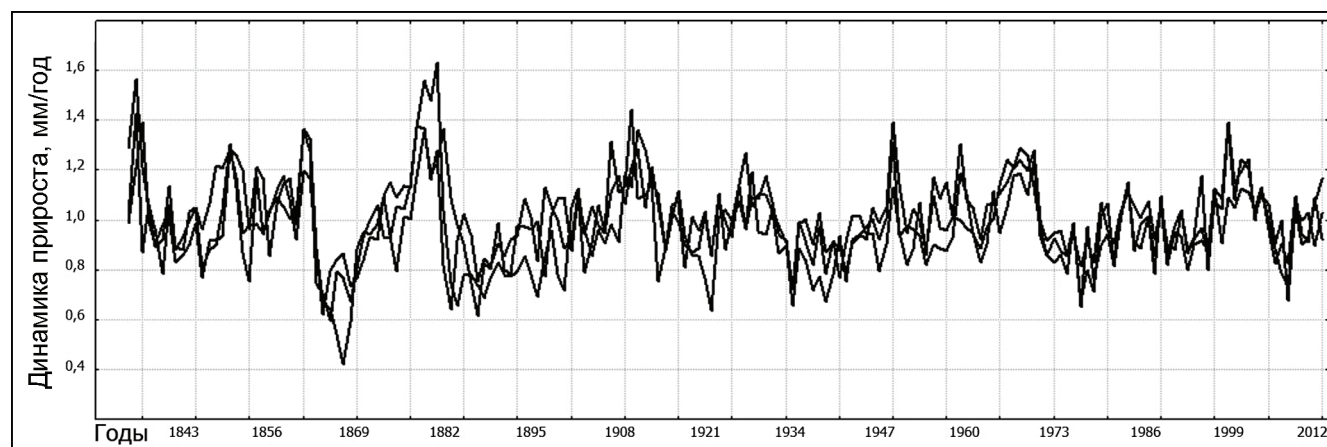


Рис. 2. Динамика приростов за последние 190 лет на примере трех площадок опробования.

Коэффициент корреляции Пирсона между выбранными дендрохронологиями 13–8, 19–6 и 19–10 составляет от 0,7 до 0,8

Fig. 1. Growth dynamics over the past 190 years on the example of three sampling sites.

The Pearson correlation coefficient between the selected dendrochronologies 13–8, 19–6 and 19–10 is from 0.7 to 0.8

Таблица 1

**Периоды прироста деревьев и их соотношение с солнечной активностью
на Надымском стационаре**

Период, год	Величина прироста, мм	Средние месячные числа Вольфа
1841–1863	0,7–1,4	3,2–131,9
1863–1875	0,5–1,1	5,2–97,3
1875–1881	0,9–1,7	2,2–140,3
1881–1892	0,3–1,1	2,7–74,6
1892–1906	0,7–1,4	1,5–87,9
1906–1913	0,8–1,6	1,5–64,2
1913–1931	0,7–1,4	3,5–105,4
1931–1940	0,5–1,1	7,7–119,2
1940–1949	0,7–1,5	3,4–151,8
1949–1962	0,6–1,4	3,4–201,3
1962–1968	0,8–1,6	9,6–110,6
1968–1980	0,5–1,1	12,2–164,5
1980–1986	0,7–1,7	12,3–118,5
1986–1996	0,4–1,4	8,0–158,5
1996–2019	0,55–1,6	0,4–120,8

Связь приростов с температурой воздуха. Основной тенденцией, которая прослеживается практически на всех точках опробования, является несоответствие средних годовых температур и приростов деревьев, что противоречит гипотезе о том, что между ними существует положительная связь. Так, с 1980 по 2020 г. наблюдается значительное увеличение средних годовых температур от -6 до -3°C [Специализированные..., 2020], однако величина среднего годового прироста деревьев уменьшается на всех площадках опробования (рис. 3). Подобная картина была в 1930–1947 гг., когда также наблюдались низкие приросты деревьев и близкая к современной средняя годовая температура. Например, в 1943 г. на метеостанции Салехард наблюдались самые высокие средние годовые температуры за историю метеонаблюдений – $-3,0^{\circ}\text{C}$. Этот рекорд был побит только в 2016 г., когда средняя годовая температура составила $-2,9^{\circ}\text{C}$ [Специализированные..., 2020].

Для того чтобы выявить вид зависимости между температурой воздуха и годичными приростами де-

ревьев, была построена матрица корреляций Пирсона. Бралась такие параметры, как средняя годовая температура воздуха, температура летнего периода с мая по сентябрь, когда возможна вегетация, а также зимние температуры предыдущего сезона (с октября прошедшего по апрель рассматриваемого года). Помимо этого, мы рассматривали каждый месяц по отдельности. Так, май – июнь, когда начинается вегетационный период, должны быть более важными месяцами для прироста, нежели август или сентябрь.

Согласно построенной матрице корреляций Пирсона, достоверные связи между средними годовыми температурами и приростами деревьев прослеживаются на 16 точках из 47, причем они имеют отрицательный характер. На большинстве остальных площадок опробования взаимосвязи хотя и статистически недостоверны, но также имеют отрицательный характер. Таким образом, в холодные годы наблюдается больший прирост. Наглядно подобное несоответствие видно на рис. 3.

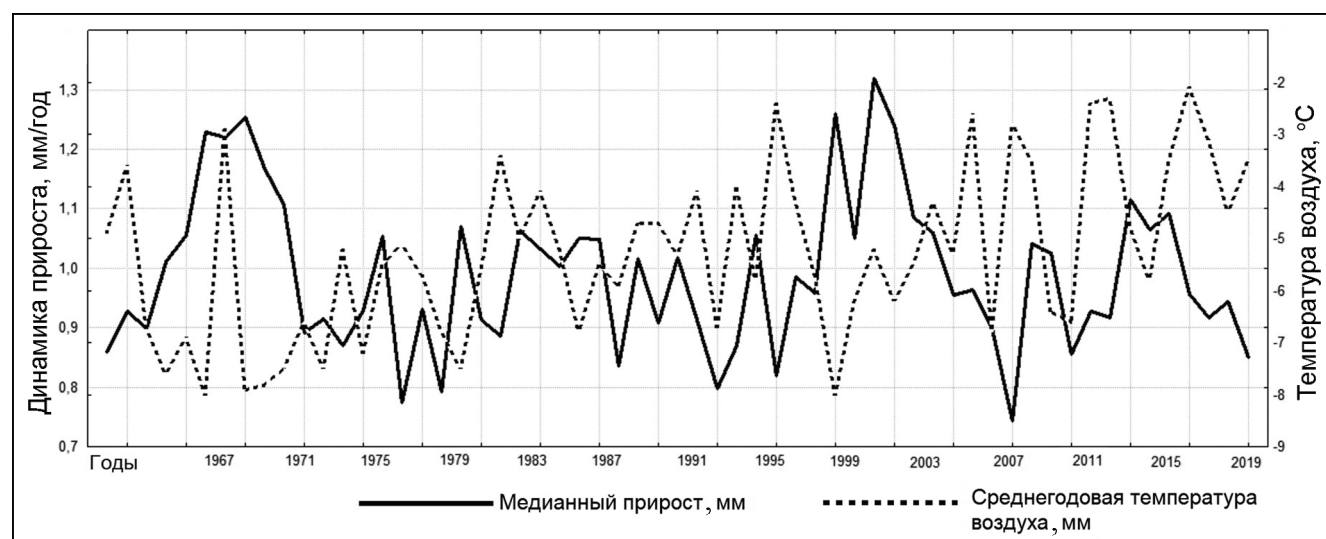


Рис. 3. Несоответствие медианного значения приростов деревьев на торфяно-минеральном бугре пучения (H19t10-верш) и хода среднегодовых температур (1960–2019). $R = -0,30$, $p < 0,05$

Fig. 3. Discrepancy between the median value of tree growth on the peat-mineral frost mound (H19m10-top) and the course of mean annual temperatures (1960–2019). $R = -0,30$, $p < 0,05$

Рассмотрим отдельно влияние на приросты зимних и летних температур. В обоих случаях достоверные взаимосвязи выявлялись относительно редко (7 из 49 для зимних температур и 20 из 49 для летних). Получившиеся недостоверные взаимосвязи между приростами и зимними температурами в основном отрицательные. Взаимосвязи между приростами и летними температурами также чаще отрицательные.

Также была проверена гипотеза о взаимосвязи между приростами деревьев и средними месячными

температурами отдельных месяцев. По матрице корреляций установлено, что наиболее значимыми месяцами для прироста являются май и сентябрь. Так, корреляция между майскими температурами и приростами в большинстве случаев положительна, хотя достоверно положительные связи наблюдаются лишь на пяти площадках из 47. Отсутствие достоверных корреляций на остальных площадках может быть объяснено большим вкладом локальных факторов (динамикой бугра, особенностями залегания многолетней мерзлоты). Корреляции

между сентябрьскими температурами и приростами, напротив, почти всегда отрицательны, при этом достоверно отрицательные взаимосвязи прослеживаются уже на восьми площадках, которые относятся, как правило, к стабильным буграм. Возможно, отрицательную корреляцию между приростами и сентябрьскими температурами можно объяснить чувствительностью деревьев к резким заморозкам. Так, после теплого сентября температура может резко переходить через нуль, что сказывается на снижении приростов.

Одно из объяснений отрицательных корреляций между средней годовой, а также средними летними и средними зимними температурами воздуха и приростами деревьев – крайняя инерционность мерзлотных геосистем. Для деревьев, произрастающих в условиях многолетней мерзлоты, более значимым фактором являются не температуры воздуха, а залегание многолетнемерзлых толщ [Nikolayev, 2009]. Стоит также учесть, что мощность сезонно-талого слоя зависит не только от температуры воздуха, но и от теплоизоляционных свойств торфа. Даже не-

смотря на то, что многие площадки опробования не имеют многолетней мерзлоты на глубине до 2 м, благодаря теплоизоляционным свойствам торфа на этих площадках почвенная температура все равно существенно ниже, чем температура воздуха. Так, согласно данным Г.В. Матышака, средняя температура торфяных почв на глубине 50 см на исследуемой территории в июле составляет 8,5°C [Бобрик и др., 2015]. По этой причине корректнее рассматривать не конкретные годы, а более продолжительные циклы. При этом рассматривались данные более отдаленной метеостанции Салехард, поскольку в масштабе 120 лет можно выделить большее количество климатических циклов. В большинстве случаев мы находим соответствие между графиком средних годовых температур и ежегодными приростами. Исключением являются периоды с 1930 по 1947 г. и с 1999 по 2019 г., когда аномально высокие температуры (до -3°C) не предопределили высокий прирост деревьев (рис. 4). Возможно, что в эти годы происходила активная деградация многолетней мерзлоты, что повлекло снижение годовичного прироста деревьев.



Рис. 4. Сравнение средней годовой температуры на метеостанции Надым в 1962–2019 гг. (тонкая линия) с медианным приростом деревьев на 47 площадках опробования (жирная линия)

Fig. 4. Comparison of mean annual temperature at the Nadym weather station in 1962–2019 (thin line) with the median tree growth at 47 sampling sites (thick line)

Затем по нескольким моделям было рассмотрено, есть ли запаздывание на 1, 2, 3 года и 5 лет между температурами воздуха и приростами деревьев. Были построены матрицы корреляций Пирсона между приростами деревьев за рассматриваемый год и температурами воздуха за предыдущий год. Затем подобные матрицы корреляций были построены для приростов и температур воздуха за 2, 3 и 5

лет до рассматриваемого года. Этот анализ не дал достоверных корреляций, таким образом, выделить запаздывание невозможно. Стоит также повторить, что подавляющая часть деревьев имеет относительно синхронные приросты (см. рис. 2, 3), при этом они произрастают в разных условиях.

Связь приростов с количеством осадков. Количество атмосферных осадков – крайне важный

фактор для ежегодного прироста деревьев. Так, в годы с экстремально низким или, наоборот, экстремально высоким количеством осадков прирост деревьев должен быть низким. Также количество осадков играет важную роль для состояния многолетнемерзлых толщ и развития бугров пучения, что опять же важно для прироста деревьев, произрастающих на этих буграх. Так, Матти Сеппеля было доказано, что важнейшим фактором для развития бугров пучения является высота снежного покрова, которая напрямую зависит от количества осадков в зимний период [Seppälä, 1982]. В годы с менее мощным снежным покровом происходит более активное промерзание бугра, благодаря которому активизируется его рост. В снежные годы из-за недостаточного промерзания бугра, напротив, происходит его деградация. Однако Н.А. Шполянской доказано (2010), что в северной тайге Западной Сибири более важным фактором становится весенне-летнее увлажнение территории. Высокая интенсивность испарения предопределяет зависимость температуры грунтов от их влажности. На более влажных участках фиксируется менее высокая температура грунта. Таким образом, высокая влажность сезонного слоя способствует сохранению высокого положения многолетней мерзлоты [Шполянская, 2010].

Следует также сказать, что количество осадков и температура воздуха – взаимозависимые величины, – в снежные зимы при господстве циклонального типа погоды температуры, как правило, выше, а в дождливое лето, напротив, ниже. Так, выпадение осадков в летний период на территории исследо-

вания в основном связано с холодными арктическими вторжениями [Орлова, 1962]. Тем не менее корреляции между температурой воздуха и количеством осадков на метеостанции Надым за 60-летний период наблюдений не очень строгие и составляют $R = 0,29$ при $p = 0,04$ для зимнего периода и $R = -0,16$ при $p = 0,24$ для летнего периода, из чего следует, что величину прироста следует рассматривать в совокупности двух факторов.

Нами была построена матрица корреляций между приростами деревьев на точках опробования и количеством осадков. Отдельно рассматривались осадки в зимний и летний периоды (октябрь – апрель и май – сентябрь, соответственно), а также осадки за каждый месяц. Достоверных корреляций между приростами деревьев и осадками в зимний период не обнаружено, встречаются и положительные, и отрицательные корреляции с крайне низким уровнем достоверности, что соответствует данным Н.А. Шполянской. В летний период, напротив, для многих точек опробования обнаружена достоверная прямая корреляция (до $R = 0,30$ при $p < 0,05$) между количеством осадков и приростами деревьев, т. е. чем больше выпадает осадков летом, тем выше приросты деревьев. Особенно много достоверных положительных корреляций между количеством осадков и приростами наблюдается в июле и августе, при этом в сентябре и октябре взаимосвязи отрицательны (табл. 2), что можно объяснить тем, что холодные осадки в сентябре и октябре не вовлекаются в транспирацию деревьями, зато способствуют анаэробным условиям в почве.

Таблица 2

Корреляции между приростом деревьев на отдельных площадках опробования и среднемесечным количеством осадков ($p < 0,05$)

Номер точки	Н18т1- верш	Н18т2- верш	Н18т2- склон	Н18т5- верш	Н13т4- верш	Н13т8- верш	Н19т2- верш	Н19т6- верш	Н19т7- верш
Корреляция июль (R)	0,19	0,29	0,26	0,08	0,19	0,14	0,15	0,20	0,31
Корреляция август (R)	0,27	0,18	0,14	0,28	0,14	0,07	0,14	0,09	0,18
Корреляция сентябрь (R)	-0,22	-0,31	-0,33	-0,31	-0,28	-0,27	-0,35	-0,35	-0,12

Результат можно объяснить несколькими способами: теплые осадки способствуют увеличению сезонного талого слоя в летний период, таким образом, с увеличением протаивания повышаются приросты деревьев. Торфяно-минеральный характер бугров пучения обуславливает быструю фильтрацию осадков в грунт. Подобная фильтрация происходит с большей

интенсивностью в провалах и трещинах, не занятых мерзлотой. Далее влага может как стекать в нижележащий водоем (болото или термокарстовое озеро), так и застаиваться. Данный процесс, однако, зависит от индивидуальных характеристик бугров пучения. Стоит также отметить, что кедр сибирский является влаголюбивым видом, он не произрастает в районах,

в которых средняя влажность воздуха составляет менее 45%. В некоторых случаях кедр может произрастать на переувлажненных участках. Таким образом, повышенная влажность почв на буграх пучения скорее положительно влияет на величину приростов данного вида [Крылов, Таланцев, 1983].

ВЫВОДЫ

Радиальные приросты деревьев на большей части фаций, в которых осуществлено опробование, синхронны. Исключения составляют фации, примыкающие к термокарстовым провалам.

Достоверной связи между средними годовыми температурами и приростами деревьев не выявлено. Корреляции между этими параметрами чаще отрицательные.

Выявлена отрицательная связь между приростами деревьев и зимними температурами воздуха. Вероятно, в холодные зимы бугры более стабильны, что объясняется более глубоким промерзанием почв и грунтов, благодаря чему не происходит активной деградации бугров пучения.

Наиболее важный месяц для прироста деревьев – май (положительная взаимосвязь), поскольку в середине – конце мая начинается вегетационный период, а его сдвиг на июнь при прочих равных погодных условиях снижает прирост.

В периоды с аномально высокими температурами воздуха приросты снижаются, что может быть связано с тем, что при деградации мерзлотных бугров и увеличении сезонно-талого слоя снижается глубина залегания почвенных вод, а верхний горизонт почвы иссушается.

Установлена положительная взаимосвязь между летними осадками и приростами деревьев, что, скорее всего, связано с экологией кедра сибирского (*Pinus sibirica*).

Наиболее благоприятные условия для произрастания деревьев в заболоченных ландшафтах подзоны северной тайги Западной Сибири – малоснежная зима, теплый май и лето при повышенных атмосферных осадках в этот период. Самым негативным фактором для приростов является позднее наступление лета.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-05-00786). Авторы выражают благодарность канд. геогр. наук Ю.Н. Бочкареву за предоставленные материалы дендрохронологии и дистанционного зондирования и за консультации; А.В. Хорошева, О.Е. Пономареву (ИКЗ СО РАН, Тюмень) за организацию полевой практики на Надымском стационаре СО РАН; студентов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Н.В. Ильинову и О.М. Подгорного за помощь при сборе полевых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Тюменской области. Вып. 1. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1971. 198 с.
- Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа / под ред. С.И. Ларина. Омск: ФГУП «Омская картографическая фабрика», 2004. 303 с.
- Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Москаленко Н.Г., Пономарева О.Е., Огнева О.А. Взаимосвязь геокриологических условий и гидротермических параметров почв плоскобугристых торфяников севера Западной Сибири (стационар Надым) // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 4. С. 31–38.
- Бочкарев Ю.Н. Изучение внутривековой динамики ландшафтов северной тайги Западной Сибири методами дендрохронологии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2006. № 3. С. 62–67.
- Бочкарев Ю.Н. Многолетняя динамика бугров пучения на севере Западной Сибири по данным дендрохронологии // Вопросы географии. 2014. Т. 138. С. 251–270.
- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Хантемиров Р.М., Наурзбаев М.М. Изменчивость летней температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария за последние 1,5 тыс. лет: сравнительный анализ данных годовичных колец деревьев и ледовых кернов // Доклады РАН. 1998. Т. 358. № 5. С. 681–684.
- Ваганов Е.А., Шиятов С.Г. Дендроклиматические и дендрохронологические исследования в Северной Евразии // Лесоведение. 2005. № 4. С. 18–27.
- Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование СССР. М.: МГУ, 1968. 576 с.
- Дьяконов К.Н. Функционально-динамическое направление в экспериментальных ландшафтных исследованиях // Известия РАН. Сер. геогр. 1997. № 2. С. 62–75.
- Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 454 с.
- Крылов Г.В., Таланцев Н.К., Козакова Н.Ф. Кедр. М.: Лесная промышленность, 1983. 216 с.
- Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. Дендрохронология. Воронеж: ВГЛТА, 2013. 140 с.
- Орлова В.В. Климат СССР. Западная Сибирь. Л.: Гидрометеоздат, 1962. 144 с.
- Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 416 с.
- Тишин Д.В., Чижикова Н.А. Дендрохронология. Казань: Казанский университет, 2018. 34 с.
- Хантемиров Р.М. Древесно-кольцевая реконструкция летних температур на севере Западной Сибири за последние 3248 лет // Сибирский экологический журнал. 1999. Т. 6. № 2. С. 185–191.

- Хорошев А.В., Артемова О.А., Матасов В.М., Коцеева А.С. Иерархические уровни взаимосвязей между рельефом, почвами и растительностью в среднетаежном ландшафте // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2008. № 1. С. 66–72.
- Шиятов С.Г., Хантемиров Р.М., Горланова Л.А. Тысячелетняя реконструкция температуры лета на Полярном Урале: данные древесных колец можжевельника сибирского и лиственницы сибирской // Археология, этнография и антропология Евразии. 2002. Т. 1. № 9. С. 2–5.
- Шполянская Н.А. Вечная мерзлота и глобальные изменения климата. М.: Ин-т компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2010. 199 с.
- Allard M., Caron S., Bégin Y. Climatic and ecological controls on ice segregation and thermokarst: the case history of a permafrost plateau in northern Quebec, *Permafrost and Periglacial Processes*, 1996, vol. 7, no. 3, p. 207–227.
- Beltrami H., Chapman D.S., Archambault S., Bergeron Y. Reconstruction of high resolution ground temperature histories combining dendrochronological and geothermal data, *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, vol. 136, no. 3–4, p. 437–445.
- Cook E.R., Holmes R.L. Program ARSTAN user's manual, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, 1984, 15 p.
- Giddings J.L. Dendrochronology in northern Alaska. The University of Arizona, 1941, 162 p.
- Ferguson C.W. Concepts and techniques of dendrochronology, *Scientific methods in medieval archaeology*, 1970, p. 183–200.
- Huscroft C.A., Lipovsky P.S., Bond J.D. Permafrost and landslide activity: Case studies from southwestern Yukon Territory, *Yukon exploration and geology*, 2003, p. 107–119.
- Kajimoto T., Matsuura Y., Osawa A., Prokushkin A.S., Abaimov A.P. Root system development of *Larix gmelinii* trees affected by micro-scale conditions of permafrost soils in central Siberia, *Roots: The Dynamic Interface between Plants and the Earth*, Springer, Dordrecht, 2003, p. 281–292.
- Lloyd A.H., Yoshikawa K., Fastie C.L., Hinzman L., Frazer M. Effects of permafrost degradation on woody vegetation at arctic treeline on the Seward Peninsula, Alaska, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, no. 2, p. 93–101.
- Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Influence of climate and soil hydrothermal regime on radial growth of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia, Russia, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 24, no. 3, p. 217–226.
- Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kolström T. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, vol. 209, no. 1–4, p. 127–139.
- Schweingruber F.H. Tree rings: basics and applications of dendrochronology. Springer Science & Business Media, 2012, 275 p.
- Seppälä M. An experimental study of the formation of palsas, *Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference*, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, 1982, p. 36–42.
- Tech R. TSAP-Win: Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications (Version 0), Heidelberg, Germany, 2010.
- Vaganov E.A., Kirilyanov A.V. Dendrochronology of larch trees growing on Siberian permafrost, *Permafrost Ecosystems*, Springer, Dordrecht, 2010, p. 347–363.

Электронный ресурс

Специализированные массивы для климатических исследований. ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://aisori-meteo.ru/waisori/select.xhtml> (дата обращения 15.05.2020).

Поступила в редакцию 18.03.2021

После доработки 25.12.2021

Принята к публикации 13.05.2022

INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS OVER TREE GROWTH ON FROST MOUNDS IN WESTERN SIBERIA

I.V. Volovinsky¹, K.N. Diakonov²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

¹ Postgraduate Student; e-mail: volovinskiy@gmail.com

² Head of the Department, Professor, Corresponding Member of the RAS; e-mail: diakonov.geofak@mail.ru

When solving the problem of the relationship between landscape space and landscape time, we often use the relationships between tree growth and climatic parameters to indicate changes in landscape functioning. The article analyzes the influence of climatic factors during recent 140 years on the growth of Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) on frost mounds in the north of Western Siberia within bog landscapes of the northern taiga subzone. Dendrochronologies were constructed for 47 sampling sites located on various types of frost mounds. It was found that most of dendrochronologies correlate with each other, although the mounds are significantly different. Sampling sites adjacent to thermokarst sinkholes are the least consistent with the modal

dendrochronology. It was found that there is no reliable relationship between mean annual temperatures and tree growth; the most considerable tree growth is observed in years with high May air temperatures. The ideal conditions for tree growth are cold winters with little snow and warm and humid summers. It was found that during periods with abnormally high air temperatures tree growth decreases. It happens due to the degradation of permafrost mounds and the increasingly thicker seasonally thawed layer. So the depth of soil water decreases, and the upper soil horizon dries up.

Keywords: dendrochronology, landscape science, permafrost studies, frost mounds, West Siberian plain, Siberian pine

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 19-05-00786). The authors express their gratitude to Yu.N. Bochkareva, Ph.D., for materials in dendrochronology and remote sensing and for consultations; to A.V. Khoroshev and O.E. Ponomareva, Institute of the Earth's Cryosphere, for organization of field training at the Nadym station of the RAS Siberian Branch; to N.V. Il'ina and O.M. Podgorny, students of the MSU Faculty of Geography for their assistance in field data collection.

REFERENCES

- Allard M., Caron S., Bégin Y. Climatic and ecological controls on ice segregation and thermokarst: the case history of a permafrost plateau in northern Quebec, *Permafrost and Periglacial Processes*, 1996, vol. 7, no. 3, p. 207–227.
- Atlas Tyumenskoy oblasti, vyp. 1* [Atlas of the Tyumen oblast, iss. 1], Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR, 1971, 198 p. (In Russian)
- Atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga* [Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug], S.I. Larin (ed.), FGUP "Omsk cartographic factory", 2004, 303 p. (In Russian)
- Beltrami H., Chapman D.S., Archambault S., Bergeron Y. Reconstruction of high resolution ground temperature histories combining dendrochronological and geothermal data, *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, vol. 136, no. 3–4, p. 437–445.
- Bobrik A.A., Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Ryzhova I.M., Moskalenko N.G., Ponomareva O.E., Ogneva O.A. Vzaimosvyaz' geokriologicheskikh usloviy i gidrotermicheskikh parametrov pochv ploskobugrystykh torfyanikov severa Zapadnoy Sibiri (statsionar Nadym) [Interrelation of geocryological conditions and hydrothermal parameters of peatland soils in the north of Western Siberia (Nadym station)], *Kriosfera Zemli*, 2015, vol. 19, no. 4, p. 31–38. (In Russian)
- Bochkarev Yu.N. Izucheniye vnutriviekovoi dinamiki landshaftov severnoi taigi Zapadnoi Sibiri metodami dendrokronologii [Intracentennial dynamics of the northern taiga landscapes of Western Siberia using dendrochronological methods], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2006, no. 3, p. 62–67. (In Russian)
- Bochkarev Yu.N. Mnogoletnyaya dinamika bugrov pucheniya na severe Zapadnoi Sibiri po dannym dendrokronologii [Long-term dynamics of frost mounds in the north of Western Siberia according to dendrochronology data], *Voprosy geografii*, vol. 138, Moscow, Kodeks Publ., 2014, p. 251–270. (In Russian)
- Cook E.R., Holmes R.L. *Program ARSTAN user's manual*, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, 1984, 15 p.
- Dyakonov K.N. Funktsional'no-dinamicheskoe napravlenie v eksperimental'nykh landshaftnykh issledovaniyakh [Functional-dynamic course in experimental landscape research], *Izvestiya RAN, Ser. geogr.*, 1997, no. 2, p. 62–75. (In Russian)
- Ferguson C.W. Concepts and techniques of dendrochronology, *Scientific methods in medieval archaeology*, 1970, p. 183–200.
- Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir'* [Geocryology of the USSR. Western Siberia], E.D. Ershov (ed.), Moscow, Nedra Publ., 1989, 454 p. (In Russian)
- Giddings J.L. *Dendrochronology in northern Alaska*, The University of Arizona, 1941, 162 p.
- Gvozdeckij N.A. *Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie SSSR* [Physical-geographical zoning of the USSR], Moscow, MGU Publ., 1968, 576 p. (In Russian)
- Huscroft C.A., Lipovsky P.S., Bond J.D. Permafrost and landslide activity: Case studies from southwestern Yukon Territory, *Yukon exploration and geology*, 2003, p. 107–119.
- Kajimoto T., Matsuura Y., Osawa A., Prokushkin A.S., Abaimov A.P. Root system development of Larix gmelinii trees affected by micro-scale conditions of permafrost soils in central Siberia, *Roots: The Dynamic Interface between Plants and the Earth*, Springer, Dordrecht, 2003, p. 281–292.
- Khantemirov R.M. Drevesno-kol'tsevaya rekonstruktsiya letnikh temperatur na severe Zapadnoi Sibiri za poslednie 3248 let [Tree-ring-based reconstruction of summer temperatures in the north of Western Siberia for the last 3248 years], *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1999, vol. 6, no. 2, p. 185–191. (In Russian)
- Khoroshev A.V., Artemova O.A., Matasov V.M., Koshcheeva A.S. Ierarkhicheskie urovni vzaimosvyazei mezhdu rel'efom, pochvami i rastitel'nost'yu v srednetaezhnom landshafte [Hierarchical levels of interrelations between relief, soils and vegetation within a middle taiga landscape], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2008, no. 1, p. 66–72. (In Russian)
- Krylov G.V., Talancev N.K., Kozakova N.F. *Kedr* [Cedar], Moscow, Lesnaya promyshlennost', 1983, 216 p. (In Russian)
- Lloyd A.H., Yoshikawa K., Fastie C.L., Hinzman L., Fraver M. Effects of permafrost degradation on woody vegetation at arctic treeline on the Seward Peninsula, Alaska, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, no. 2, p. 93–101.
- Matveev S.M., Rumyantsev D.E. *Dendrokronologiya* [Dendrochronology], Voronezh, VGLTA Publ., 2013, 140 p. (In Russian)
- Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Influence of climate and soil hydrothermal regime on radial growth

- of *Larix cajanderi* and *Pinus sylvestris* in Central Yakutia, Russia, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 24, no. 3, p. 217–226.
- Orlova V.V. *Klimat SSSR. Zapadnaja Sibir'* [Climate of the USSR. Western Siberia], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1962, 144 p. (In Russian)
- Puzachenko Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* [Mathematical Methods in Environmental and Geographic Studies], Moscow, Akademiya Publ., 2004, 410 p. (In Russian)
- Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kolström T. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, vol. 209, no. 1–4, p. 127–139.
- Schweingruber F.H. *Tree rings: basics and applications of dendrochronology*, Springer Science & Business Media, 2012, 275 p.
- Seppälä M. An experimental study of the formation of palsas, *Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference*, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, 1982, C. 36–42.
- Shiyatov S.G., Khantemirov R.M., Gorlanova L.A. Tysyacheletnyaya rekonstruktsiya temperatury leta na Polyarnom Urale: dannye drevesnykh kolets mozhzhevel'nika sibirskogo i listvennitsy sibirskoi [Millennial reconstruction of summer temperature in the Polar Urals: tree ring data of Siberian juniper and Siberian larch], *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Evrazii*, 2002, vol. 1, no. 9, p. 2–5. (In Russian)
- Shpolyanskaya N.A. *Vechnaya merzlota i global'nye izmeneniya klimata* [Permafrost and global climate change], Izhevsk, Regul'nyy i Khaotich. Dinamika Publ., 2010, 199 p. (In Russian)
- Tech R. TSAP-Win: *Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications* (Version 0), Heidelberg, Germany, 2010.
- Tishin D.V., Chizhikova N.A. *Dendrokhnologiya* [Dendrochronology], Kazan, Kazan Univ. Publ., 2018, 34 p. (In Russian)
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G. Dendroklimaticheskie i dendrokhnologicheskie issledovaniya v Severnoi Evrazii [Dendroclimatic and dendrochronological studies in Northern Eurasia], *Lesovedenie*, 2005, no. 4, p. 18–27. (In Russian)
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Khantemirov R.M., Naurzbaev M.M. The variability of summer air temperature at high latitudes in the Northern Hemisphere for the last 1,5 ka: a comparative analysis of the data on annual tree rings and ice cores, *Doklady Earth Sciences*, 1998, vol. 359, no. 2, p. 267–270.
- Vaganov E.A., Kirdyanov A.V. Dendrochronology of larch trees growing on Siberian permafrost, *Permafrost Ecosystems*, Springer, Dordrecht, 2010, p. 347–363.
- Web source*
Spetsializirovannye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy, VNIIGMI-MTsD [Specialized arrays for climate research VNIIGMI-MTsD], URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (access date 15.05.2020). (In Russian)

Received 18.03.2021

Revised 25.12.2021

Accepted 13.05.2022