

Научная статья

УДК 581.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-58-72

Радиальный рост ели (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* Ledeb.) в условиях горных разработок

О.С. Барзут¹✉, канд. с.-х. наук, доц.; Researcher ID: [AFN-5294-2022](https://orcid.org/0000-0002-0338-9715),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0338-9715>

М.В. Сурсо², д-р с.-х. наук; Researcher ID: [J-2197-2018](https://orcid.org/0000-0001-7482-9848),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9848>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163000; o.barzut@narfu.ru✉

²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163069; surso@fciarctic.ru

Поступила в редакцию 25.03.21 / Одобрена после рецензирования 20.06.21 / Принята к печати 23.06.21

Аннотация. Представлены результаты изучения динамики радиального роста ели, произрастающей в центральной части Беломорско-Кулойского плато вблизи потенциального источника техногенного воздействия – карьерной разработки кимберлитовых трубок на алмазном месторождении им. М.В. Ломоносова. Керны для дендрохронологического анализа были взяты с 6 опытных участков, находящихся на разном расстоянии от действующего карьера. Изменчивость годовых радиальных приростов у ели на всех участках варьировала от средней до высокой и очень высокой. У деревьев ели фиксировалась разная длительность циклов депрессий и экспрессий. На одном и том же участке динамика норм прироста у разных деревьев могла не совпадать или быть схожей в проявлениях цикличности в отдельные периоды жизни деревьев. В большинстве случаев минимальные и максимальные экстремумы наблюдались вблизи значений общеизвестных циклов солнечной активности. Между продолжительностью и повторяемостью циклов выявлена высокая обратная связь. На всех опытных участках отмечено уменьшение амплитуды радиальных приростов, начиная с 2000 г., а затем, в еще большей степени, с 2010 по 2019 г. В последние 10–20 лет в олиготрофных местообитаниях вблизи карьера у деревьев ели установлено увеличение ширины годовых колец: у 50 % исследуемых растений на данных участках отмечался выраженный подъем радиальных приростов; высокой синхронностью динамики годовых слоев отличались деревья наиболее удаленного участка. Одновременно с этим выявлено снижение максимальных значений радиальных приростов по отношению ко всему ряду наблюдений и уменьшение амплитуды приростов, возросла повторяемость относительных индексов прироста ниже нормальных значений. Можно предположить, что изменение тренда радиального роста у ели в олиготрофных местообитаниях в значительной степени обусловлено формированием депрессионной воронки и связанным с этим общим понижением уровня грунтовых вод.

Ключевые слова: ель, радиальный прирост ели, горные разработки, месторождение алмазов

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 18-05-60151). Полевые работы проведены в рамках госзадания Федеральному исследовательскому центру комплексного изучения Арктики УрО РАН (№ госрегистрации – 122011400384-2).

Для цитирования: Барзут О.С., Сурсо М.В. Радиальный рост ели (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* Ledeb.) в условиях горных разработок // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 58–72. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-58-72>

Original article

Radial Growth of Spruce (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* Ledeb.) in the Conditions of Mining Impact

Oksana S. Barzut^{1✉}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; Researcher ID: [AFN-5294-2022](https://orcid.org/0000-0002-0338-9715),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0338-9715>

Mikhail V. Surso², Doctor of Agriculture; Researcher ID: [J-2197-2018](https://orcid.org/0000-0001-7482-9848),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9848>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, 163002, Russian Federation; o.barzut@narfu.ru✉

²N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, 163069, Russian Federation; surso@fciarctic.ru

Received on March 25, 2021 / Approved after reviewing on June 20, 2021 / Accepted on June 23, 2021

Abstract. A dynamic of radial growth of spruce near a quarry of kimberlite pipes is investigated in this study. The quarry is considered as a potential source of anthropogenic impact. The research takes place at the central part of the White Sea Kuloi plateau, at the diamond deposit named after M.V. Lomonosov. The wood cores for dendrochronological analysis are from six trail plots located at different distances from the active quarry. The annual radial increment of spruce in all plots ranges from medium to high or very high. It is noticed that spruce trees have different durations of depression and expression cycles. The growth rates of the trees from the same plot do not coincide, or they show similarities to certain periods of tree's life with cyclical patterns. In most cases, minimum and maximum extremes are observed near the well-known values of solar activity cycles. An inverse relationship is found between duration and repetition of the cycles. The measurements from all trail plots show a decrease in the amplitude of radial growth, which started in 2000. It took much greater extent in the period from 2010 to 2019. The samples of the spruce, which were taken from the oligotrophic habitats located near the quarry, indicate an increase of width of annual rings in the last 10–20 years. Fifty percent of them reveal a distinct radial extent. The trees from the most distant trail area are characterized by high simultaneity in the dynamics of the annual layers. Moreover, it is found a decrease in the maximum value of radial growth relative to the entire series of observations. Likewise, a reduce in the amplitude of increments is noted as a rise in the repeatability of relative growth indices below the regular values. It can be assumed that the change in the trend of radial growth in spruce in the oligotrophic habitats is mostly associated with the formation of a depression cone and, as a result, a general lowering of the groundwater level.

Keywords: spruce, radial growth of spruce, mining, diamond deposit

Acknowledgments: The studies were supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-05-60151). The field work was carried out within the framework of the state assignment to N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration number – 122011400384-2).

For citation: Barzut O.S., Surso M.V. Radial Growth of Spruce (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* Ledeb.) in the Conditions of Mining Impact. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 58–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-58-72>

Введение

Месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова было открыто в 1980 г., когда вскрыли кимберлитовую трубку «Поморскую», из кернов породы которой извлекли первые 38 кристаллов. Месторождение находится примерно в 100 км к северо-востоку от Архангельска и включает 6 кимберлитовых трубок: «Архангельскую», «Карпинского-1», «Карпинского-2», «Пионерскую», «Поморскую», «Ломоносова» – тянущихся цепочкой общей протяженностью около 9,5 км и представляющих собой типичные воронки взрыва с четко выраженными рас-трубами, в верхней части глубиной до 150 м [6, 20].

Месторождение расположено в центре Беломорско-Кулойского плато, в карстовом районе со сложной коммуникацией подземных вод. Уровень залегания подземных вод составляет в среднем 5–8 м, на глубине более 100 м наблюдается высокая степень их минерализации (до 15–20 г/дм³). Территория месторождения характеризуется развитой гидрографической сетью и сильной заболоченностью [3, 18].

Промышленное освоение месторождения им. М.В. Ломоносова на трубке «Архангельская» было начато в 2003 г., на трубке «Карпинского-1» – в 2007 г. Проектная глубина карьера 1-й очереди на трубке «Архангельская» – 324 м, «Карпинского-1» – 260 м, размеры карьеров (по поверхности) – 1131×1191 и 1150×1030 м соответственно. Горные работы ведутся открытым (карьерным) методом. Вывоз вскрышных пород производится во внешние отвалы, а руды – на рудные склады или на обогатительную фабрику. Для откачки подземных вод создан дренажный контур из 75 водопонижающих скважин глубиной 220 м, расстояние между скважинами – 100–200 м. Погружные насосы установлены в них на глубине 180–200 м. Общая протяженность дренажного контура водопонижающих скважин составляет около 8 км. Производительность – более 5 тыс. м³/ч. Подземные воды, просачивающиеся в карьеры (около 20 % общего объема водоотлива), и атмосферные осадки откачиваются насосными станциями, установленными на дне карьеров [2]. Отвод воды через отсеки отстаивания и фильтрующие дамбы производится в р. Золотица.

Основным экологическим фактором, негативно влияющим на растительный покров при осушении карьера, является формирование депрессионной воронки (по разным оценкам, диаметром от 6 до 15 км), которая в настоящее время наиболее активно развивается в восточном и северо-восточном направлениях, что способствует понижению уровня и загрязнению грунтовых и межпластовых подземных вод, активизации карстовых и эрозионных процессов [18, 19]. Отрицательное воздействие на лесные экосистемы также оказывают загрязнение атмосферного воздуха мелкодисперсной сапониновой пылью, вырубка лесов и загрязнение земель в промзоне предприятия.

Интрогрессивный гибрид ели европейской *Picea abies* (L.) Karst. и ели сибирской *P. obovata* Ledeb. является одним из лесообразующих хвойных видов Европейского Севера и широко используется в биоиндикационных и дендрохронологических исследованиях [1, 10, 12–16, 22–26]. Корневая система у ели поверхностного типа. Взрослые деревья чувствительны к изменениям гидрологического режима и могут служить их индикатором.

Цель работы – изучение динамики радиального роста деревьев ели, произрастающих в составе естественных старовозрастных древостоев суходольных и олиготрофных местообитаний в районе разработок алмазного месторождения им. М.В. Ломоносова.

Объекты и методы исследования

Керны деревьев ели для дендрохронологического анализа были взяты с 6 опытных участков, представляющих собой спелые и перестойные насаждения разных типов леса и расположенные на различном удалении от промзоны месторождения им. М.В. Ломоносова (рис. 1).



Рис. 1. Местоположение опытных участков 1–6

Fig. 1. Location of trail plots No. 1–6

Участок 1 расположен вблизи места впадения р. Белая в р. Золотица, на расстоянии примерно 8 км к северу от карьера. Перестойный разновозрастный хвошево-долгомошно-сфагновый ельник, примыкающий к верховому болоту, имеет состав 10Е и характеризуется V классом бонитета. Увлажнение – постоянное застойное избыточное.

Участок 2 лежит в 2,5 км к северу от пос. Поморье, примерно в 4,5 км к северу от карьера. Произрастающий здесь ельник является перестойным разновозрастным осоко-травяно-сфагновым, примыкает к редкостойному осоко-сфагновому сосняку. Состав – 10Е+Сед.Б, V класс бонитета. Увлажнение – постоянное слабопроточное избыточное.

Участок 3 (контроль) расположен примерно в 30 км к юго-юго-западу от карьера, является эталонным коренным северотаежным перестойным разновозрастным черничным ельником. Состав – 9Е1Б, III класс бонитета.

Участок 4 отдален на 2 км от юго-восточной части карьера и представляет собой разновозрастный ельник переходного типа – чернично-долгомошно-хвощево-сфагновый, увлажнение характеризуется как временное застойное избыточное. Состав древостоя – 8Е1С1Б, IV класс бонитета.

Участок 5 находится в 1 км к юго-востоку от карьера, на левом пологом берегу ручья Светлый. Тип леса – сосняк ерничково-можжевельниковый. Состав – 9С1Еед.Б, бонитет – IV, полнота – 0,5. Средние высота и диаметр ели – 14 м и 20 см соответственно. Подрост – 9Е1С+Б (0,5 тыс. шт./га). Подлесок представлен карликовой березой и можжевельником. В напочвенном покрове преобладают осоки, злаки, встречаются бодяк разнолистный, вереск. Моховой покров выражен слабо. Почва слабоподзолистая, среднесуглинистая, на суглинке.

Участок 6 расположен в 1,5 км к юго-востоку от карьера, на правом слабобугристом берегу ручья Светлый. Тип леса – сосняк брусничный. Состав 9С1Еед.Б, бонитет – IV, полнота – 0,7. Подрост – 9Е1С+Б (2,0 тыс. шт./га). В подлеске присутствуют рябина и можжевельник. В напочвенном покрове преобладают кустарнички (брусника, реже черника), лесное мелкотравье (седмичник, майник двулистный, дерен шведский, ожика волосистая, золотарник, голокучник трехраздельный, лерхенфельдия), зеленые листостебельные мхи. Почва слабоподзолистая, легкосуглинистая, на суглинке.

На каждом из опытных участков у 5–10 деревьев ели 1-го яруса, близких по таксационным показателям, с отсутствием фауности, механических повреждений, косо- и водослойности при помощи бурава Пресслера с южной стороны ствола на высоте груди брались керны для дендрохронологического анализа. Количество исследованных кернов – 48.

Измерение ширины годичных колец проводили под бинокулярным микроскопом МБС-10 при увеличении объектива в 4 раза и окуляра со шкалой микрометра – в 8 раз. Точность измерений – 0,05 мм. Статистический анализ результатов измерений основан на стандартных методиках [5] и выполнен с помощью программы Microsoft Excel 2007. Построены графики динамики радиальных приростов и изучена цикличность радиального роста ели как для каждого дерева, так и для каждого отдельного участка.

Результаты исследования и их обсуждение

Обобщенное описание радиального роста деревьев дано в табл. 1.

Изменчивость годичного радиального прироста у ели варьирует, по классификации С.А. Мамаева [9], от средней (2,9 % деревьев) до повышенной (22,8 %), высокой (45,7 %) и очень высокой (28,6 %). Линейная зависимость диаметра деревьев ели от возраста характеризуется слабой теснотой связи при низком коэффициенте детерминации ($R^2 = 0,27$), что объясняется неоднородностью условий местопроизрастания. На фоне общего линейного тренда снижения приростов при умеренной тесноте связи ($R^2 = 0,48$) прослеживаются несколько волн спада (от 90 до 130 лет и от 180 лет и более) и подъема (до 80 лет и от 140 до 170 лет) средних значений ширины годичного кольца. Деревья, произрастающие на разных участках, достигшие возраста 150–160 лет и более, показывают общую тенденцию снижения среднего абсолютного радиального прироста отдельно взятых растений.

Таблица 1

Общая характеристика исследованных образцов
General characteristics of the examined samples

Уча- сток	Условный возраст деревьев, лет		Средний диаметр ствола на высоте груди, см	Ширина годичного кольца, мм		Индивидуальная изменчивость радиаль- ных приростов, %	
	средний	диапазон		средняя	минимум– максимум	средняя	минимум– максимум
1	104	33–132	19,1	0,95	0,10–3,15	47,4	42,9–56,5
2	162	107–256	18,7	0,56	0,10–3,10	51,4	34,4–63,7
3	147	127–194	40,7	1,32	0,25–4,30	34,4	26,1–39,6
4	105	69–176	24,3	1,11	0,10–4,50	50,9	45,7–63,4
5	62	30–184	22,9	2,31	0,15–6,70	28,3	17,1–47,7
6	104	40–206	20,6	1,20	0,05–3,50	48,1	28,0–79,7

Сравнение средних радиальных приростов отдельных деревьев ели за указанные периоды в районе настоящих исследований выявило, что этот показатель варьирует в очень широком диапазоне (от 0,36 до 2,99 мм). На одних участках у всех деревьев в последние 10-летия наблюдалось его увеличение, а для других эта закономерность не выявлена. Около 42,86 % всех растений характеризовались повышением абсолютного радиального прироста в период 2000–2009 гг. и 51,43 % – в период 2010–2019 гг., причем для суходольных местопроизрастаний соотношение деревьев составило 50 и 60 % соответственно, для олиготрофных – 40 и 60 % соответственно, а для контрольного участка – 40 и 30 % соответственно.

Несколько отличные от наших данные получены Е.В. Лопатиным [8, 22]: в северной подзоне тайги Республики Коми отмечается увеличение среднего радиального прироста ели за период с 1951 по 2000 г. (0,75 мм) по сравнению с приростом за период с 1901 по 1950 г. (0,60 мм). Это, по мнению автора, связано с изменением климата. Близкие к нашим результаты получены для национального парка «Лосиный остров» [14], расположенного на территории Москвы и Московской области: средняя ширина годичного кольца у ели возрастом до 140 лет здесь была стабильной (около 1 см), а затем увеличилась до 1,5 см. Основным климатическим фактором, определившим такое увеличение, авторы [14] называют сумму осадков в мае–июле.

С целью нивелирования возрастного тренда проведено сглаживание дендрохронологических рядов, предлагаемое разными исследователями в размерности от 3–5 лет до 31 года [13]. Наряду с наиболее известным и простым способом получения средних значений радиальных приростов – 10-летнего индексирования дендрохронологических рядов – оправданы и более короткие периоды осреднения, позволяющие сохранить циклы, меньшие, чем период сглаживания. Более короткие интервалы осреднения дают более длинный дендрохронологический ряд. Методом 5-летнего скользящего сглаживания рассчитаны показатели нормы прироста для каждого дерева и получены графические изображения, показывающие ход осредненных за 5 лет значений прироста с шагом в 1 год (рис. 2). На разных участках у деревьев ели чаще всего наблюдалась разная длительность циклов депрессий и экспрессий (табл. 2). На одном и

том же участке динамика норм прироста у разных деревьев могла не совпадать или иметь схожую динамику проявления цикличности в отдельные периоды жизни деревьев.

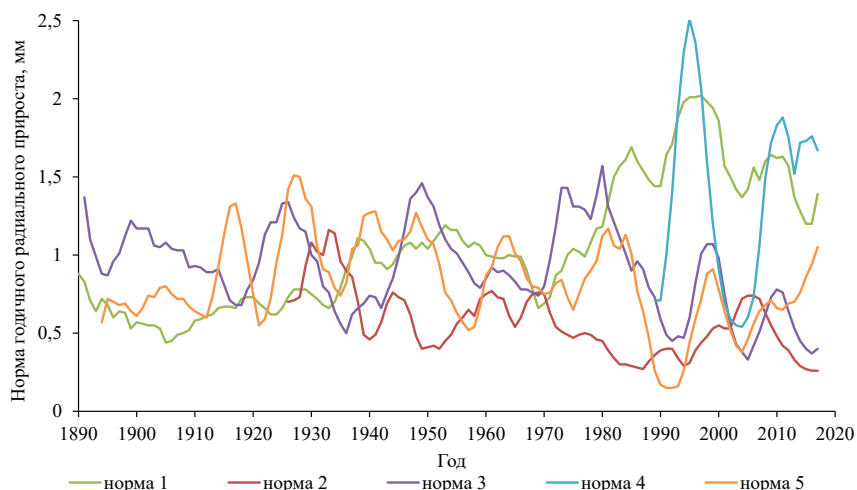


Рис. 2. Норма абсолютного годичного радиального прироста отдельных деревьев ели на участке 1 (пример)

Fig. 2. Rate of absolute annual radial growth of selected spruce trees at plot No. 1 (example)

Таблица 2

Цикличность радиального роста деревьев ели на опытных участках
Cyclicality of radial growth of spruce trees in experimental areas

Участок	Количество циклов		Среднее значение цикла	
	депрессий	экспрессий	депрессий	экспрессий
1	$\frac{7-163}{92}$	$\frac{5-357}{120}$	$\frac{17,4-46,8}{37,0}$	$\frac{12,8-61,0}{39,6}$
2	$\frac{84-244}{161}$	$\frac{88-233}{145}$	$\frac{34,3-77,4}{50,3}$	$\frac{36,3-69,5}{48,8}$
3	$\frac{77-184}{135}$	$\frac{23-190}{119}$	$\frac{35,3-58,0}{45,0}$	$\frac{14,6-69,0}{46,0}$
4	$\frac{19-245}{136}$	$\frac{28-259}{134}$	$\frac{24,0-54,6}{36,4}$	$\frac{15,8-48,0}{35,7}$
5	$\frac{1-496}{134}$	$\frac{6-424}{119}$	$\frac{11,0-56,3}{24,3}$	$\frac{9,7-59,7}{25,0}$
6	$\frac{4-201}{111}$	$\frac{6-157}{92}$	$\frac{14,8-42,8}{28,6}$	$\frac{19,3-45,9}{30,0}$

Примечание: В числителе – диапазон, в знаменателе – среднее значение.

Цикличность природных процессов связана с циклами солнечной активности [4]. Н.В. Ловелиус [7] обнаружил ее влияние на ширину годичного кольца хвойных на северной границе распространения лесов, причем чаще такая синхронность видна в 11-летнем цикле, иногда с запаздыванием на 2 года, с меньшей вероятностью проявляются 5–6- и 4-летние циклы.

На основе кривых норм прироста построены графические изображения повторяемости циклов разной длительности. Наиболее часто минимальные экстремумы отмечались вблизи значений общеизвестных циклов солнечной активности (11, 22, 33-летнего и векового) (рис. 3).

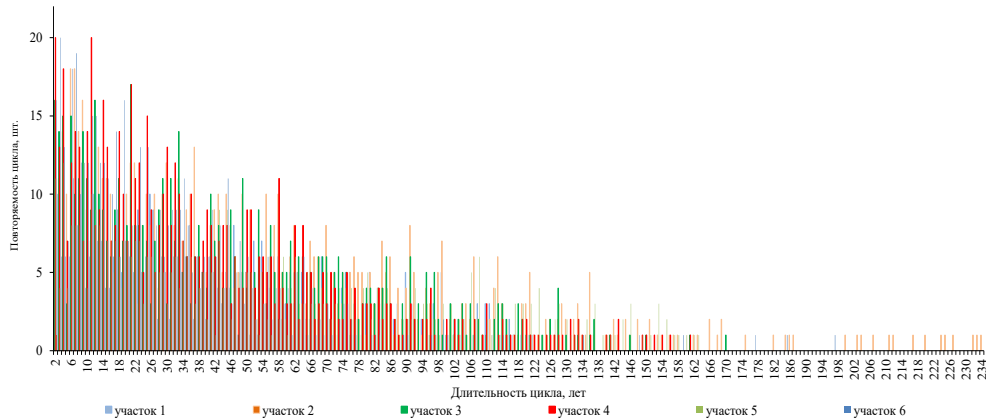


Рис. 3. Повторяемость циклов разной периодичности между минимумами нормы абсолютного годового прироста деревьев ели (общее)

Fig. 3. Repeatability of cycles with diverse periodicity between the minima of absolute annual growth rate of spruce trees (in general)

Из циклов малой периодичности наиболее представлены 4- и 6–7-летний полуциклы. Из циклов, близких к магнитному (22-летний цикл Хейла), наиболее выражены 21- и 33-летний (Брикнеровский) циклы. Менее представлены 41, 43, 45, 49, 58 и 62-летние циклы. Высокая повторяемость 91, 99, 106 и 108-летних циклов свидетельствует о проявлении векового цикла солнечной активности (цикла Гляйсберга) продолжительностью около 70–100 лет. Отмечено проявление циклов 128, 133, 136 и 146 лет. Наблюдался и 2-вековой цикл Зюсса, когда 1 раз в 200 лет происходит устойчивое снижение солнечной активности, которое может продолжаться десятки лет.

Цикличность наступления максимумов радиального прироста (рис. 4) несколько отличается от циклов минимумов. Среди малых циклов наибольшую повторяемость имеют 4- и 6-летний полуциклы. Широко представлена цикличность 11- и 14-летней длительности, что соответствует солнечному циклу, или циклу Швабе (11 лет), а также 20–21-летней длительности (близкий к циклу Хейла, или магнитному – 22 года). О такой же циклической составляющей периодом 4–8 лет говорят П.А. Феклистов и В.М. Барзут для 50 % исследованных дендрохронологических рядов ели, отмечая как наиболее частые гармоники с периодом 12–16 лет [17]. В нашем случае ярко выражен Брикнеровский цикл (тройной солнечный), который отмечен с 30–31- и 35-летней циклическостью. Несколько реже представлены 55-, 64–65-летние (полувековые) и 87–90-, 99–100-летние (приближенные к вековому циклу солнечной активности) и еще реже – 122–124-летние циклы. Самые длительные хорошо обнаруживаемые циклы: 141–143, 154–158, 181, 199–200, 206, 217-летние, 3 последних соответствуют 2-вековому циклу. Наибольшую схожесть в совпадении длительности циклов экспрессий имели участки 2 и 4.

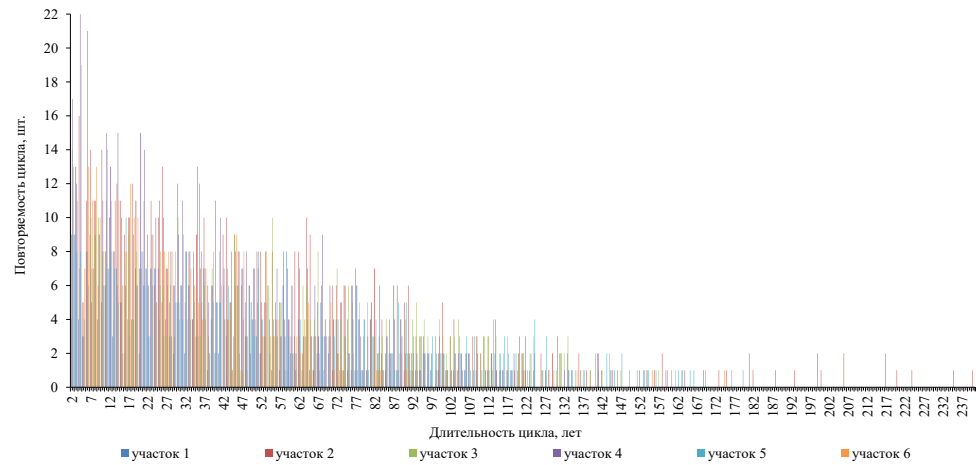


Рис. 4. Повторяемость циклов разной периодичности между максимумами нормы абсолютного годичного прироста деревьев ели (общее)

Fig. 4. Repeatability of cycles with diverse periodicity between the maxima of absolute annual growth rate of spruce trees (in general)

В целом, чем старше дерево, тем больше средняя продолжительность цикла как экспрессии, так и депрессии, при этом у одного и того же дерева показатели средней цикличности наступления минимумов и максимумов отличаются. Повторяемость периодов минимальных и максимальных экстремумов аппроксимируется полиномом 6-го порядка, коэффициенты детерминации составили соответственно 0,947 и 0,945 (рис. 5).

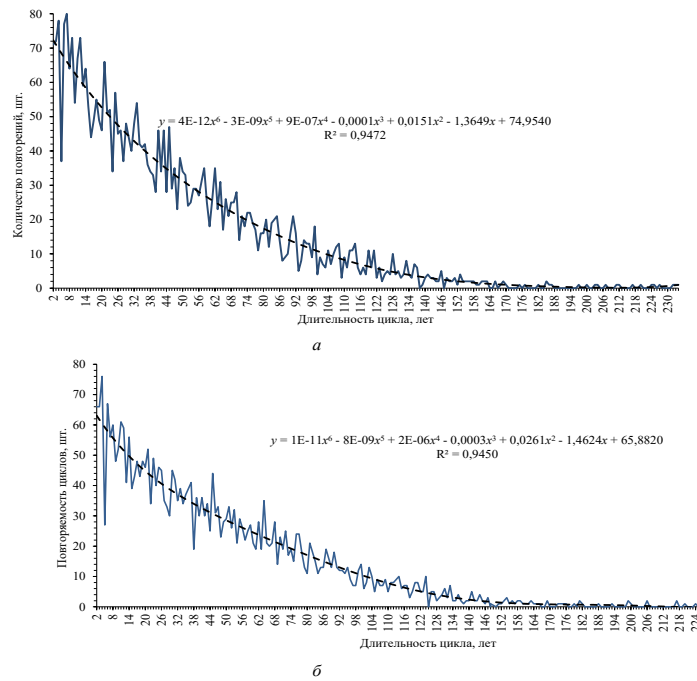


Рис. 5. Суммарная повторяемость циклов разной периодичности между минимумами (а) и максимумами (б) нормы абсолютного годичного прироста деревьев ели

Fig. 5. Total repeatability of cycles with diverse periodicity between (a) the minima and (b) the maxima of absolute annual growth rate of spruce trees

Динамика средних относительных индексов радиального прироста ели показана на рис. 6.

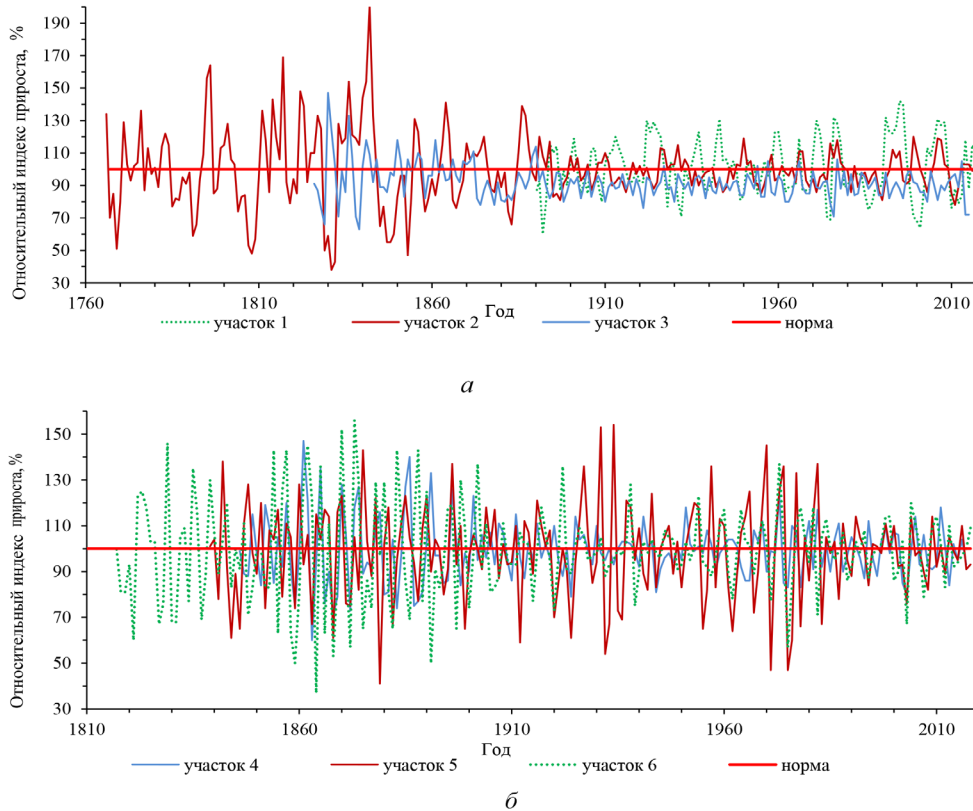


Рис. 6. Динамика средних относительных индексов годичного радиального прироста ели на участках: *а* – 1–3; *б* – 4–6

Fig. 6. Dynamics of average relative radial growth indices of spruce trees on the trail plots: *a* – 1–3; *b* – 4–6

Средние относительные индексы радиального прироста ели, рассчитанные по всем деревьям для каждого из 6 участков, и их повторяемость в различных диапазонах времени приведены в табл. 3.

В последние два 10-летия у деревьев на большинстве участков возросла повторяемость относительных индексов прироста ниже нормального значения (менее 100 %). Указанный период времени совпадает с началом горных работ на месторождении им. М.В. Ломоносова. Для всех участков (в том числе и для контрольного), за исключением участков 2 и 6, отмечается общее снижение величины максимальных приростов по отношению ко всему ряду наблюдений, а следовательно, и уменьшение амплитуды прироста. Участки 2 и 6 отличаются от других участков тем, что количество относительных индексов приростов больше и меньше нормы одинаково в течение 2000–2020 гг. Для деревьев ели на участках 2, 4 и 6 повторяемость относительных индексов радиального прироста со значениями выше и ниже нормы за весь период наблюдений с 2000 по 2020 г. была почти одинаковой. На участках 1, 3 и 5 за этот же период времени наблюдалось увеличение доли средних относительных индексов прироста ели, имеющих показатели ниже нормы.

Таблица 3

Средние относительные индексы радиального прироста за разные периоды времени для всего ряда наблюдений и за 2 последних 10-летия
Average relative radial growth indices over different time periods for the entire observation series in the last two decades

Период	Относительный индекс прироста, %			Повторяемость значений относительных индексов прироста, %		
	мини-мальный	макси-мальный	амплитуда	100	более 100	менее 100
<i>Участок 1 (128 лет)</i>						
Весь ряд	60	142	82	1,57	47,65	50,78
2000–2019	64	131	67	0	55,67	44,40
2010–2019	76	118	42	0	37,50	62,50
<i>Участок 2 (252 года)</i>						
Весь ряд	38	201	163	1,19	44,05	54,76
2000–2019	81	118	37	5,50	55,60	38,90
2010–2019	78	103	25	0	50,00	50,00
<i>Участок 3 (190 лет)</i>						
Весь ряд	63	147	84	1,05	15,79	83,16
2000–2019	72	105	33	0	6,25	93,75
2010–2019	72	105	33	0	16,70	83,30
<i>Участок 4 (172 года)</i>						
Весь ряд	60	147	87	1,74	44,19	54,07
2000–2019	80	118	38	0	44,40	55,60
2010–2019	84	118	34	0	50,00	50,00
<i>Участок 5 (180 лет)</i>						
Весь ряд	41	154	113	3,33	50,00	46,67
2000–2019	76	114	38	0	31,58	68,42
2010–2019	89	110	21	0	33,33	66,67
<i>Участок 6 (202 года)</i>						
Весь ряд	37	156	119	3,47	45,54	50,99
2000–2019	67	120	53	5,26	47,37	47,37
2010–2019	83	114	31	11,11	44,44	44,44

Примечание: Полужирным шрифтом выделены значения, имеющие большую повторяемость в указанных диапазонах.

Для более полного понимания динамики радиального прироста ели в течение последнего 20-летия показан фрагмент графиков средних относительных индексов прироста для каждого участка за 100-летний период – с 1920 по 2019 г. (рис. 7).

На всех участках наблюдалось уменьшение амплитуды прироста с 2000 по 2003 г., а затем, в еще большей степени, с 2010 по 2019 г. В последнее 10-летие участки 2 и 3 отличаются снижением относительных индексов прироста (в большинстве случаев они менее 100 %).

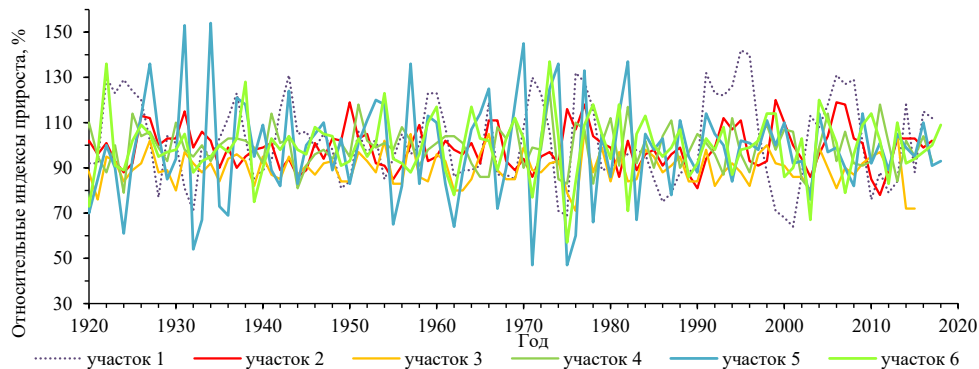


Рис. 7. Динамика средних относительных индексов годичного радиального прироста ели для всех участков за последние 100 лет

Fig. 7. Dynamics of average relative radial growth indices of spruce trees on the whole experimental area over the last 100 years

Радиальный прирост определяется множеством внешних факторов [11, 21, 23]. Учитывая это, целесообразно, кроме последствий техногенного воздействия, изучить влияние на радиальный рост ели в зоне горных разработок и других экологических факторов (температуры воздуха, количества осадков, высоты снежного покрова и пр.), что не предполагалось настоящим исследованием.

Выводы

1. Ширина годичных колец ели, произрастающей в экологических условиях, создаваемых горнодобывающей промышленностью, колеблется от 0,05 до 6,7 мм и отличается высокой изменчивостью, как индивидуальной, так и в пределах рассматриваемых участков, составляя диапазон средних приростов для отдельных деревьев в олиготрофных местообитаниях – 0,36–1,69 мм, в суходольных – 0,43–2,99 мм и на контроле – 0,82–1,77 мм.

2. В динамике радиального роста ели на всех опытных участках прослеживается цикличность: периоды минимальных приростов хорошо сопряжены с 11, 22, 33-летними и вековым солнечными циклами; для максимумов наиболее выражены 11, 14 и 20–21-летние циклы, что в целом также близко к солнечным циклам; среди экстремумов подъема и спада малой периодичности часты 4- и 6-летний полуциклы.

3. Большинство исследованных участков характеризуются спадом относительных индексов радиального прироста ели ниже нормального значения (показатели менее 100 %) в последние 10–20 лет. Изменение тренда радиального роста у ели в олиготрофных местообитаниях может быть вызвано формированием депрессионной воронки и общим понижением уровня грунтовых вод. Вместе с тем в местообитаниях с застойным избыточным увлажнением (постоянным или временным), расположенных на расстоянии до 8 км от карьера, у деревьев ели в последние 10–20 лет наблюдается увеличение, иногда довольно существенное, ширины годичных колец, что может быть связано с эффектом лесосушения.

4. Водоносные горизонты четвертичных отложений карстового района представляют собой единую гидродинамическую систему. Поэтому в отдаленной перспективе, после затопления карьеров, общее повышение уровня грунтовых вод приведет, вероятнее всего, к началу процессов заболачивания и постепенному изменению всего облика растительного покрова на прилегающей территории.

5. Влияние других значимых экологических факторов, кроме воздействия близко расположенного предприятия горнодобывающей промышленности, на радиальный рост ели в настоящей работе не учитывалось. Это может послужить предметом дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александрова Е.Ю. Биоиндикационная оценка качества городской среды // Проблемы развития территории. 2015. Вып. 5(79). С. 170–178.

Aleksandrova E.Yu. Bioindicative Assessment of the Urban Environment Quality. *Problemy razvitiya territorii* = Problems of Territory's Development, 2015, no. 5(79), pp. 170–178. (In Russ.).

2. АО «Севералмаз»: офиц. сайт. Режим доступа: <http://www.severalmaz.ru/> (дата обращения: 22.01.2022).

JSC Severalmaz. Official website: <http://www.severalmaz.ru/>

3. Атлас Архангельской области. М.: ГУГК, 1976. 72 с.

Atlas of the Arkhangelsk Region. Moscow, Glavnoye upravleniye geodezii i kartografii USSR Publ., 1976. 72 p. (In Russ.).

4. Дергачев В.А., Распопов О.М. Долговременные процессы на Солнце, определяющие тенденцию изменения солнечного излучения и поверхностной земной температуры // Геомагнетизм и аэронавигация. 2000. Т. 40, № 3. С. 9–14.

Dergachev V.A., Raspopov O.M. Long-Term Processes on the Sun That Determine Change in Tendency of Solar Radiation and Surface Temperature of Earth. *Geomagnetizm i aeronomiya* = Geomagnetism and Aeronomy, 2000, vol. 40, no. 3, pp. 9–14. (In Russ.).

5. Ивантер Э.В. Основы практической биометрии: Введение в статистический анализ биологических явлений. Петрозаводск: Карелия, 1979. 95 с.

Ivanter E.V. *Fundamentals of Practical Biometry: Introduction to Statistical Analysis of Biological Phenomena*. Petrozavodsk, Kareliya Publ., 1979. 95 p. (In Russ.).

6. Ларченко В.А., Степанов В.П., Минченко Г.В., Кечик И.А. Алмазность кимберлитов и родственных им пород Зимнего Берега // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. 2004. № 2. С. 134–147.

Larchenko V.A., Stepanov V.P., Minchenko G.V., Kechik I.A. Diamond Content of Kimberlites and Related Minerals of the Zimniy Bereg. *Vestnik of Voronezh State University, Series: Geology*, 2004, no. 2, pp. 134–147. (In Russ.).

7. Ловелиус Н.В. Изменчивость прироста деревьев. Дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. Л.: Наука, 1979. 232 с.

Lovelius N.V. *Variability in Tree Growth. Dendroindication of Natural Processes and Anthropogenic Impacts*. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 232 p. (In Russ.).

8. Лопатин Е.В. Анализ динамики радиального прироста основных лесобразующих пород Республики Коми: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2010. 20 с.

Lopatin E.V. *Analysis of Radial Growth Dynamics of the Dominant Forest Forming Species in the Komi Republic*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2010. 20 p. (In Russ.).

9. Мамаев С.А. Уровни изменчивости анатомо-морфологических признаков сосны // Ботан. исслед. на Урале. Сер.: Зап. Свердлов. отд-ния Всесоюз. ботан. о-ва. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1970. Вып. 5. С. 50–67.

Mamayev S.A. Levels of Variability in Anatomical and Morphological Properties of Pine Trees. *Zapiski Sverdlovskogo otdeleniya Vsesoyuznogo botanicheskogo obshestva, Series: Botanicheskie issledovaniya na Urale*, Sverdlovsk, UNTs, AN USSR, 1970, vol. 5, pp. 50–67. (In Russ.).

10. Мацковский В.В. Климатический сигнал в ширине годичных колец хвойных деревьев на севере и в центре Европейской территории России. М.: ГЕОС, 2013. 148 с.

Matskovskiy V.V. *Climate Signal in Width of Annual Rings of Conifers in Northern and Central European Russia*. Moscow, GEOS Publ., 2013. 148 p. (In Russ.).

11. Мусеев П.А., Григорьева А.В., Главацких К.В. Радиальный прирост ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) разного возраста на верхнем пределе ее произрастания в горах Южного Урала (на примере массива Ирмель) // Молодой ученый. 2016. № 11(115). С. 573–577.

Moiseyev P.A., Grigoryeva A.V., Glavatskikh K.V. Radial Growth of Siberian Spruce (*Picea obovata* Ledeb.) of Several Ages at the Upper Limit of Its Growth in the Mountains of the Southern Urals (Using the Iremel Mountain Range as an Example). *Molodoy uchenyy*, 2016, no. 11(115), pp. 573–577. (In Russ.).

12. Попова Л.Ф. Химическое загрязнение урбоэкосистемы Архангельска: моногр. Архангельск: САФУ, 2014. 231 с.

Popova L.F. *Chemical Pollution of the Urban Ecosystem of Arkhangelsk: Monograph*. Arkhangelsk: NArFU Publ., 2014. 231 p. (In Russ.).

13. Румянцев Д.Е. История и методология лесоводственной дендрохронологии: моногр. М.: МГУЛ, 2010. 109 с.

Rumyantsev D.E. *History and Methodology of Forestry Dendrochronology: Monograph*. Moscow, MSFU Publ., 2010. 109 p. (In Russ.).

14. Румянцев Д.Е., Киселева В.В., Воробьева Н.С. Динамика радиального прироста в ценопопуляции ели европейской из Алексеевской рощи Национального парка «Лосинный остров» // Междунар. науч.-исслед. журн. 2020. № 9 (99), ч. 1. С. 49–54.

Rumyantsev D.E., Kiseleva V.V., Vorobyeva N.S. Dynamics of Radial Growth in European Spruce Cenopopulation from Alekseevskaya Grove of National Park “Losiny Ostrov”. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*, 2020, vol. 9, no. 99, part 1, pp. 49–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.99.9.010>

15. Рунова Е.М., Аношкина Л.В., Гаврилин И.И. Некоторые особенности использования дендрохронологической оценки прироста *Pinus sylvestris* L. при проведении биоиндикационных исследований в урбанизированной среде северных территорий // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. № 5. С. 146–150.

Runova E.M., Anoshkina L.V., Gavrilin I.I. Some Peculiarities of Application of Dendrochronological Estimation of *Pinus sylvestris* L. at Conducting Bioindicative Researches in Urban Environment of Northern Territories. *Lesnoi vestnik = Forest Bulletin*, 2014, vol. 5, pp. 146–150. (In Russ.).

16. Туровцев В.Д., Краснов В.С. Биоиндикация. Тверь: ТвГУ, 2004. 260 с.

Turovtsev V.D., Krasnov V.S. *Bioindication*. Tver State University Publ., 2004. 260 p. (In Russ.).

17. Феклистов П.А., Барзут В.М. Цикличность радиального прироста сосны и ели на Европейском Севере // Экология и защита леса: Взаимодействие компонентов лесных экосистем: межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛТА, 1985. С. 24–28.

Feklistov P.A., Barzut V.M. Cyclicity of Radial Growth of Pine, and Spruce in the European North. *Ecology and Forest Protection: Interaction of Components of Forest Ecosystems*. Collection of articles. Leningrad, Lesotekhnicheskaya akademiya Publ., 1985, pp. 24–28. (In Russ.).

18. Шевелёва А.В., Шварцман Ю.Г. Проблемы экологической безопасности при разработке месторождения алмазов имени Ломоносова // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2012. № 2. С. 40–46.
- Sheveleva A.V., Shvartsman Yu.G. Problems of Ecological Safety at Development of Lomonosov Diamond Deposit. *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University, Series: Natural Sciences*, 2012, no. 2, pp. 40–46. (In Russ.).
19. Шкиль И.Э., Поршнев А.И., Малов А.И. Изменение гидрогеологических условий при осушении карьеров южной группы трубок месторождения им. М.В. Ломоносова // Проблемы недропользования. 2016. № 3. С. 105–114.
- Shkil I.E., Porshnev A.I., Malov A.I. Hydro-Geo-Ecological Conditions Changing Under Pits Drainage of the Southern Group of Tubes in the M.V. Lomonosov Deposit. *Problemy ne-dropol'zovaniya* = Problems of Subsoil Use, Ekaterinburg, 2016, no. 3, pp. 105–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.03.105>
20. Юзмухаметов Р.Н. Из истории открытия месторождения алмазов имени Ломоносова // Вестн. Помор. ун-та. Сер.: Гуманитар. и соц. науки. 2010. № 3. С. 32–37.
- Yuzmukhametov R.N. On the History of Diamond Deposit Discovery Named After Lomonosov. *Vestnik Pomorskogo universiteta, Series: Humanitarian and Social Sciences*, 2010, no. 3, pp. 32–37. (In Russ.).
21. Alekseev A.S., Sharma S.K. Long-Term Growth Trends Analysis of Norway Spruce Stands in Relation to Possible Climate Change: Case Study of Leningrad Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 3, pp. 42–54. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-42-54>
22. Lopatin E., Kolström T., Spiecker H. Impact of Climate Change on Radial Growth of Siberian Spruce, and Scots Pine in North-Western Russia. *IForest: Biogeosciences and Forestry*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 13–21. <https://doi.org/10.3832/ifor0447-0010013>
23. Mäkinen H., Nöjd P., Kahle H.-P., Neumann U., Tveite B., Mielikainen K., Röhle H., Spiecker H. Radial Growth Variation of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across Latitudinal and Altitudinal Gradients in Central and Northern Europe. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 171, no. 3, pp. 243–259. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00786-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00786-1)
24. Tree Ring. Online International Tree-Ring Data Bank. NOAA, National Centers for Environmental Information. Available at: www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring (assessed 05.03.2022).
25. Parzych A., Mochnecký S., Sobisz Z., Polláková N., Šimanský V. Needles and Bark of *Picea abies* (L.) H. Karst and *Picea omorika* (Pančić) Purk. as Bioindicators of Environmental Quality. *Folia Forestalia Polonica, Series A: Forestry*, 2018, vol. 60, no. 4, pp. 230–240. <https://doi.org/10.2478/ffp-2018-0024>
26. Rodriguez-Catón M., Villalba R., Srur A.M., Luckman B. Long-Term Trends in Radial Growth Associated with Nothofagus Pumilio Forest Decline in Patagonia: Integrating Local- into Regional-Scale Patterns. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 339, pp. 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.12.004>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article