

ИЗМЕНЕНИЕ РОСТА ДРЕВОСТОЕВ ЛИСТВЕННИЦЫ В МОСКВЕ ПО ДАННЫМ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Н.Н. Дубенок, академик РАН, А.В. Лебедев, кандидат сельскохозяйственных наук,
В.В. Кузьмичев, доктор биологических наук

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,
127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49
E-mail: alebedev@rgau-msha.ru

Исследование проводили с целью проверки гипотезы о наличии временных тенденций в изменении показателей роста и производительности древостоев лиственницы в условиях города Москвы в течение долговременных наблюдений. Материалами для исследования служили данные наблюдений на постоянных пробных площадях Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева за период с 1893 по 2015 гг. Наличие тенденций в изменении роста древостоев определяли путем моделирования таксационных показателей в зависимости от возраста и календарного года с использованием линейных моделей смешанных эффектов. Древостои на постоянных пробных площадях в разные годы подвергались влиянию окружающей среды. С конца XIX в. повысились среднегодовая температура воздуха и годовая сумма осадков. Одновременно произошло увеличение вегетационного периода и числа опасных погодных явлений, усилилось воздействие промышленных выбросов. Лиственничные древостои в урбанизированных условиях Москвы в начале и конце XX в. характеризовались разными тенденциями роста. Для одновозрастных древостоев увеличилась средняя высота (+19%), средний диаметр (+13%), средний объем стволов (+35%) и уменьшилось количество растущих деревьев (-14%). В среднем ускорение прохождения основных этапов роста за рассматриваемый временной промежуток составило 20...40 лет. Так как влияние негативных факторов со стороны города не привело к снижению продуктивности древостоев, лиственницу можно считать древесной породой, устойчивой к условиям урбанизации.

CHANGES IN THE GROWTH OF LARCH STANDS IN MOSCOW ACCORDING TO THE DATA OF LONG-TERM OBSERVATIONS

Dubenok N.N., Lebedev A.V., Kuzmichev V.V.

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
127550, Moscow, ul. Timiryazevskaya, 49
E-mail: alebedev@rgau-msha.ru

The study tests the hypothesis of the presence of temporal trends in the growth and yield of larch stands in the conditions of the city of Moscow based on long-term observations. The materials for the study were observational data on permanent trial plots of the Forest Experimental Station of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy for the period from 1893 to 2015. The presence of trends in the growth of forest stands was studied by modeling stand variables depending on age and calendar year using linear models of mixed effects. Forest stands on permanent trial plots were subjected to environmental changes in different years. Since the end of the 19th century, the average annual air temperature and the annual amount of precipitation have increased. At the same time, there was an increase in the growing season and the number of dangerous weather events. Tree stands were exposed to industrial emissions. Larch stands in the urbanized conditions of Moscow at the beginning and at the end of the 20th century had different growth trends. For forest stands of the same age, the average height (+19%), average diameter (+13%), average trunk volume (+35%) increased, and the number of growing trees decreased (-14%). On average, larch stands accelerate the passage of the main stages of growth over the considered time period by 20-40 years. Since the influence of negative factors from the side of the city did not lead to a decrease in the productivity of forest stands, larch can be considered a resistant tree species to the conditions of urbanization and recommended for use in urban landscaping.

Ключевые слова: лиственница, урбанизация, рост древостоев, продуктивность древостоев.

Key words: larch, urbanization, Moscow, growth of forest stands, productivity of forest stands.

Первые упоминания о возможных изменениях в росте древостоев в странах Центральной Европы на фоне климатических изменений и загрязнения воздуха относятся к 1980-м гг. [1]. Такие результаты на участках долговременных наблюдений изначально воспринимали как исключение из общего правила, а не в качестве общей закономерности. Дальнейшие исследования подтвердили наличие в последние 100 лет тенденции к повышению продуктивности древостоев на фоне климатических изменений [1, 2]. Результаты многолетних наблюдений на постоянных опытных участках в центре европейской части России также свидетельствуют о ускорении роста лесов и интенсивном выходе широколиственных пород в полог леса [3, 4, 5]. На фоне происходящих изменений необходима разработка стратегии адаптации системы управления лесами, учитывающей текущий климат, прогнозируе-

мое влияние климата в будущем и связанные с ними последствия для лесных экосистем и ведения лесного хозяйства.

Результаты ранее проведенных исследований охватывают значительные географические регионы и в целом могут быть интерполированы на большую часть Европы, в том числе европейскую часть России. Однако вопрос о том, как сказываются климатические изменения на росте древостоев на фоне воздействия различных антропогенных факторов в урбанизированных условиях, остается открытым. Большое количество исследований в разных городах мира направлено на изучение влияния условий урбанизированной среды на рост и продуктивность отдельных деревьев [6, 7, 8]. Например, в Японии, Германии, Канаде, Франции, Чили, Южной Африки, Вьетнама, Австралии и США была выявлена общая тенденция, что с 1960-гг.

деревья в городах растут быстрее, чем, находящиеся в естественной среде [7]. Климатические изменения объясняют в среднем 35 % ускорения роста, в том числе 21 % приходится на эффект глобального потепления и 14 % на городской островной тепловой эффект.

Цель исследования – проверка гипотезы о наличии временных тенденций в изменении показателей роста и производительности древостоев лиственницы в условиях города Москвы по материалам долговременных наблюдений.

Результаты оценки моделей изменения роста древостоев лиственницы

Показатель	Переменная	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	p-value	Условный R ²	Предельный R ²
Средняя высота							
Фиксированные эффекты	<i>Intercept</i>	β_0	-8,027e+00	1,057e+00	2,04e-10	0,916	0,839
	<i>ln(Age)</i>	β_1	2,835e+00	1,496e-01	< 2e-16		
	<i>ln(Age)</i> ²	β_2	-2,837e-01	2,032e-02	< 2e-16		
	<i>Year</i>	β_3	2,221e-03	4,779e-04	2,29e-05		
	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение				
Случайные эффекты	Пробная площадь	b_i	0,1008				
	Остатки	ε_{it}	0,1058				
Средний диаметр							
	Переменная	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	p-value	Условный R ²	Предельный R ²
Фиксированные эффекты	<i>Intercept</i>	β_0	-4,967e+00	1,243e+00	0,000174	0,953	0,873
	<i>ln(Age)</i>	β_1	1,857e+00	1,433e-01	< 2e-16		
	<i>ln(Age)</i> ²	β_2	-1,380e-01	2,056e-02	2,18e-10		
	<i>Year</i>	β_3	1,501e-03	5,767e-04	0,011738		
	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение				
Случайные эффекты	Пробная площадь	b_i	0,1353				
	Остатки	ε_{it}	0,1042				
Объем ствола							
	Переменная	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	p-value	Условный R ²	Предельный R ²
Фиксированные эффекты	<i>Intercept</i>	β_0	-22,742837	3,093306	6,28e-10	0,948	0,865
	<i>ln(Age)</i>	β_1	5,469366	0,379324	< 2e-16		
	<i>ln(Age)</i> ²	β_2	-0,446206	0,053350	1,22e-14		
	<i>Year</i>	β_3	0,003750	0,001418	0,0107		
	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение				
Случайные эффекты	Пробная площадь	b_i	0,3186				
	Остатки	ε_{it}	0,2536				
Число деревьев							
	Переменная	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	p-value	Условный R ²	Предельный R ²
Фиксированные эффекты	<i>Intercept</i>	β_0	12,706788	1,661924	4,73e-13	0,935	0,358
	<i>ln(Age)</i>	β_1	-0,623652	0,067600	< 2e-16		
	<i>Year</i>	β_2	-0,001916	0,000965	0,0482		
	Уровень	Параметр	Стандартное отклонение				
Случайные эффекты	Пробная площадь	b_i	0,4106				
	Остатки	ε_{it}	0,1383				

Методика. Материалами для исследования служили данные инвентаризаций древостоев лиственницы на постоянных пробных площадях Лесной опытной дачи Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, которая расположена в северо-западной части города Москвы. Преобладающие древесные породы лесного фонда – сосна, лиственница, дуб, береза и липа. По итогам лесоустройства 2009 г. площадь Лесной опытной дачи составляет 248,7 га, в том числе покрытых лесом земель – 233,4 га (93,8 %). Лиственничные древостои произрастают на площади 34,8 га с общим запасом 11900 м³ [9]. В исследовании использованы данные по 37 постоянным пробным площадям с лиственничными древостоями [10]. Измерения таксационных показателей проводили с 1893 по 2015 гг., когда возраст древостоев составлял от 14 до 146 лет.

Наличие тенденций в изменении роста древостоев изучали путем моделирования таксационных показателей в зависимости от возраста и календарного года. Для изучения изменения средней высоты, среднего квадратического диаметра и среднего объема дерева использовали следующую структуру линейной модели смешанных эффектов:

$$\ln(Y_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(Age_{it}) + \beta_2 \times \ln(Age)^2 + \beta_3 \times YEAR_{it} + b_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

где Y – моделируемый показатель; Age – возраст древостоя, лет; $YEAR$ – календарный год; i – индекс пробной площади; t – индекс момента времени; $\beta_0 \dots \beta_3$ – параметры фиксированных эффектов; b_i – случайный эффект пробной площади $b_i \sim N(0, \tau^2)$; ε_{it} – случайная ошибка $b_i \sim N(0, \sigma^2)$; N – функция нормального распределения.

Зависимость между количеством растущих деревьев и возрастом может быть представлена монотонной убывающей кривой. Для определения связи между величинами этих показателей с учетом календарного года использовали линейную модель смешанных эффектов следующего вида:

$\ln(Y_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(Age_{it}) + \beta_2 \times YEAR_{it} + b_i + \varepsilon_{it}$, (2)
 где Y – моделируемый показатель; Age – возраст древостоя, лет; $YEAR$ – календарный год; i – индекс пробной площади; t – индекс момента времени; $\beta_0 \dots \beta_2$ – параметры фиксированных эффектов; b_i – случайный эффект пробной площади $b_i \sim N(0, \tau^2)$; ε_{it} – случайная ошибка $b_i \sim N(0, \sigma^2)$; N – функция нормального распределения.

Включение в модель логарифмических значений возраста и таксационных показателей позволяет в достаточной степени охватить нелинейный характер связи с использованием линейной регрессии [2]. Введение в уравнение случайных эффектов позволяет избежать автокорреляции в регрессионных остатках. Для оценки достоверности моделей использовали условный и предельный коэффициенты детерминации (R^2). Предельный R^2 учитывает только дисперсию фиксированных эффектов и указывает, какую часть дисперсии модели объясняет только часть фиксированных эффектов. Условный R^2 учитывает, как фиксированные, так и случайные эффекты и показывает, какую часть дисперсии объясняет «полная» модель. Для всех расчетов использовали статистическую программу R 4.0.3, в частности функцию lmer из пакета lme4 [11].

Результаты и обсуждение. На территории Москвы за последние 100 лет произошло значительные изменения среднегодовой температуры, количества выпадающих осадков и состояния окружающей среды. С конца XIX в. среднегодовая температура повысилась в среднем более чем на 80 %, рост годовой суммы осадков составил около 20 %. Одновременно произошло увеличение вегетационного периода и числа опасных погодных явлений (ливни, ураганные ветры, заморозки и др.). Исследуемые лиственничные древостои в разные годы подвергались воздействию промышленных выбросов (1920–1990 гг.), выбросов от железнодорожного (1900–1950 гг.) и автомобильного транспорта (с 1950 г.), а также отдыхающего на природе населения города (с середины XIX в.). Результатом промышленного развития города стали повышенные концентрации в атмосферном

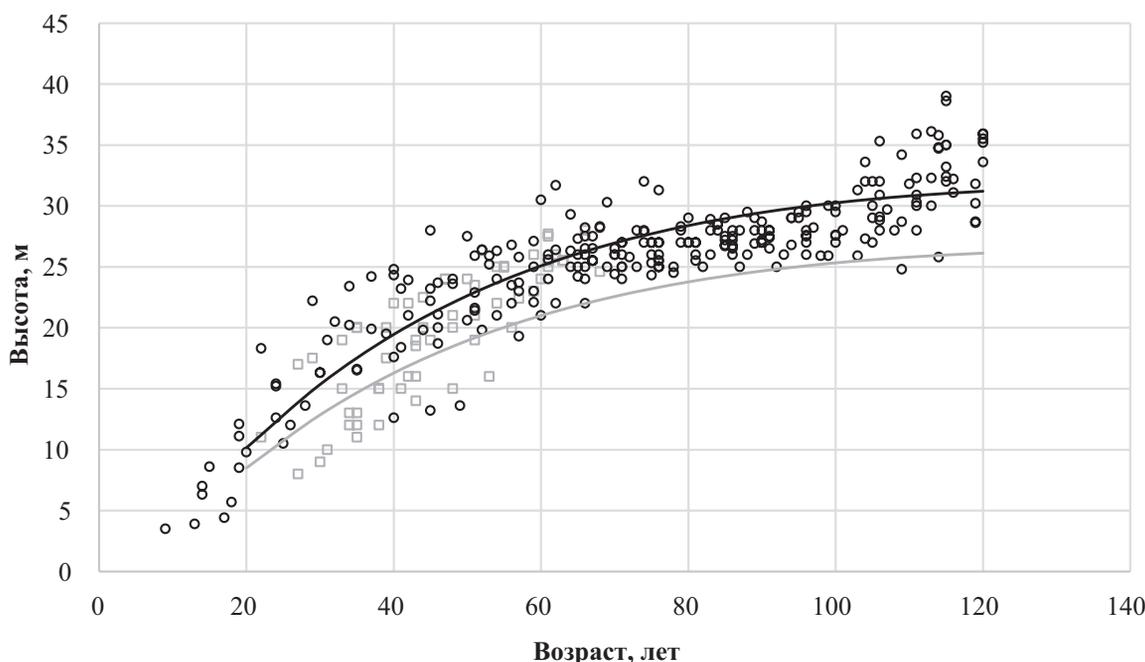


Рис. 1. Возрастные тренды средних высот древостоев: □ – данные 1860–1940 гг.; ○ – данные 1940–2020 гг.; — — — — модель 1900 г.; — — — — модель 1980 г.

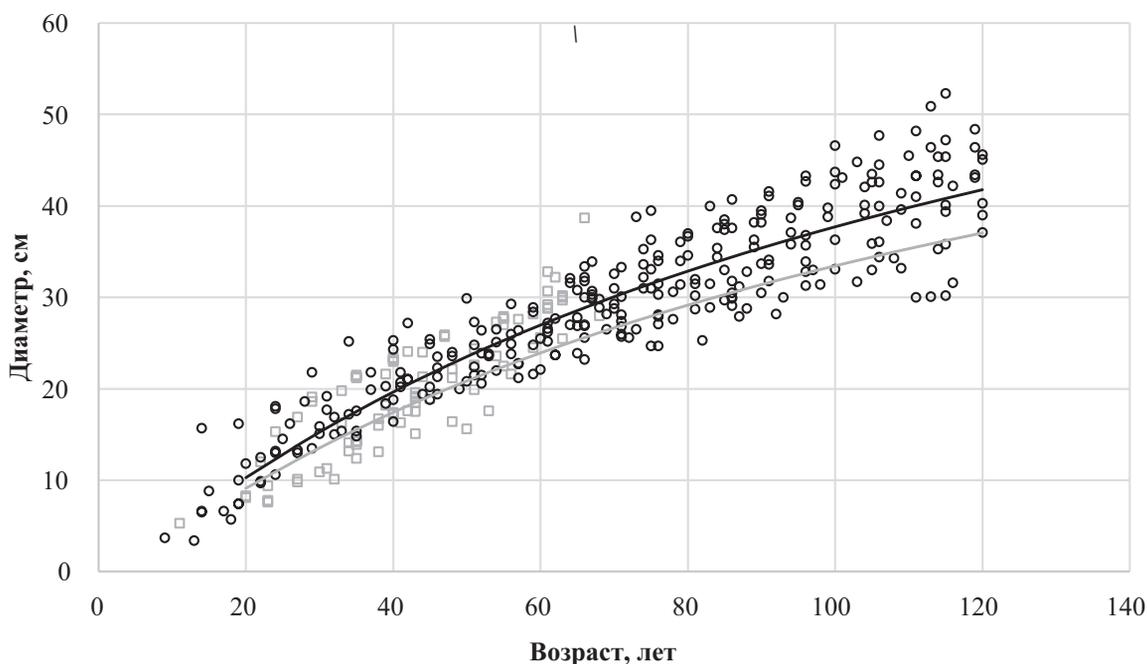


Рис. 2. Возрастные тренды средних диаметров древостоев: □ – данные 1860–1940 гг.; ○ – данные 1940–2020 гг.; — — модель 1900 г.; — — модель 1980 г.

воздухе диоксида серы (до $0,24 \text{ мг/м}^3$) в период с 1950 по начало 1990 гг. и диоксида азота (до $0,10 \text{ мг/м}^3$) с 1960 по 2010 гг. Таким образом, с одной стороны изменения климатических условий должны способствовать повышению скорости роста и продуктивности древостоев, а с другой, комплекс неблагоприятных факторов урбанизированной среды может замедлять эти процессы.

Для всех изучаемых таксационных показателей числовые оценки перед переменной календарного года статистически значимы ($p < 0,05$). Более высокие величины условного R^2 (более 0,9), по сравнению с предельным R^2 , указывают на хорошую обобщающую способность модели (см. табл.).

В урбанизированных условиях для древостоев лиственницы с 1900 по 1980 гг. произошло увеличение средней высоты, среднеквадратического диаметра и среднего объема ствола, а также снижение числа растущих деревьев. Оценить изменения трендов таксационных показателей можно с учетом оценок параметров модели при нулевых случайных эффектах. С 1900 по 1980 гг. увеличение средней высоты древостоев составило +19 %, или +4,8 м в возрасте 100 лет. Таким образом, согласно бонитетной шкале [12] произошло повышение продуктивности на 1 класс бонитета. Средний диаметр столов деревьев относится к одним из основных таксационным показателей, определяющих

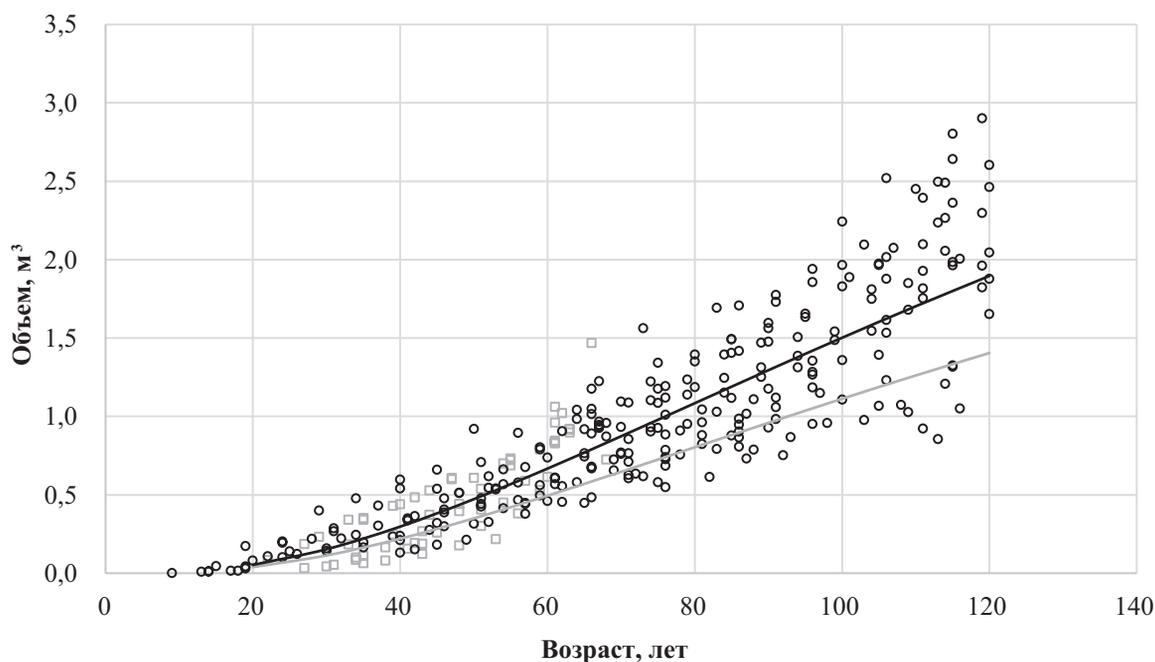


Рис. 3. Возрастные тренды объема ствола среднего дерева: □ – данные 1860–1940 гг.; ○ – данные 1940–2020 гг.; — — модель 1900 г.; — — модель 1980 г.

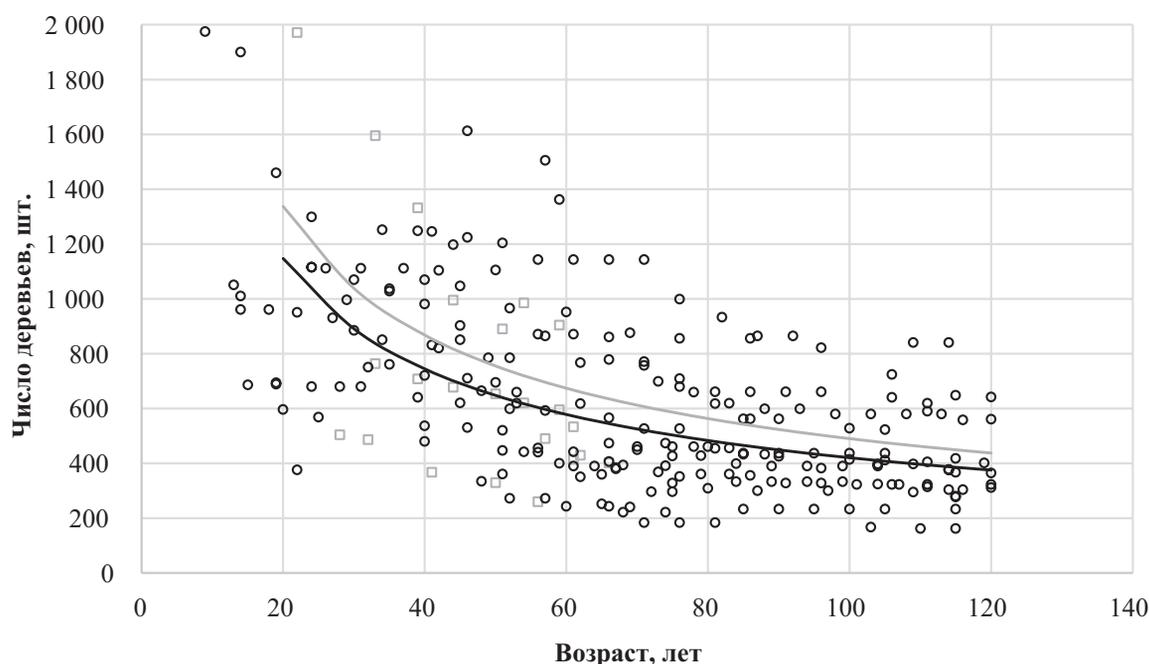


Рис. 4. Возрастные тренды изменения числа деревьев: □ – данные 1860–1940 гг.; ○ – данные 1940–2020 гг.; — — модель 1900 г.; — — модель 1980 г.

в эксплуатационных лесах выход деловой древесины. За рассматриваемый временной промежуток изменение среднего диаметра составило +13 % (рис. 2). Об увеличении количества крупномерной древесины свидетельствует изменение среднего объема стволов деревьев на +35 % (рис. 3). Уменьшение количества растущих деревьев на единицы площади в среднем составило –14 % (рис. 4).

Для изучаемых древостоев лиственницы время достижения целевых показателей сократилось. Например, пороговый средний диаметр 40 см в 1980 г. отмечали раньше, чем в условиях 1900 г., на 30 лет, а средний объем дерева в 1 м³ – на 20 лет. В среднем ускорение древостоями лиственницы прохождения основных периодов роста за рассматриваемый временной промежуток составило 20...40 лет.

Согласно результатам ранее проведенных исследований, повышение продуктивности деревьев и древостоев происходит благодаря росту температуры воздуха и количества выпадающих осадков, увеличению продолжительности вегетационного периода и повышению уровня CO₂ в атмосфере [1, 13, 14]. Эти причины можно рассматривать в качестве основных в ускорении роста и повышении продуктивности древостоев лиственницы в Москве. Считается, что высокие концентрации SO₂ и NO₂ в атмосферном воздухе могут вызывать повреждения деревьев напрямую через хвою и косвенно через почву [15, 16], приводя к снижению прироста. Последствия повышенных содержаний загрязняющих веществ могут сказываться на функционировании лесных экосистем на протяжении нескольких десятилетий. Лиственница в условиях Москвы показала значительную устойчивость к комплексу неблагоприятных воздействий со стороны города, кроме того, продемонстрировала значительное повышение продуктивности.

Таким образом, лиственничные древостои в урбанизированных условиях Москвы в начале и в конце XX в. имели разные тенденции роста. Для одновозрастных древостоев увеличилась средняя высота,

средний диаметр, средний объем дерева и уменьшилось количество растущих деревьев. Так как влияние негативных факторов со стороны города не привело к снижению продуктивности древостоев, то лиственницу можно считать древесной породой, устойчивой к условиям урбанизации и рекомендовать для использования в городском озеленении. Выявленные тенденции указывают на повышение предоставления экосистемных услуг городскими лиственничными лесными массивами. При организации будущих наблюдений на постоянных пробных площадях в городских условиях необходимо фиксировать как показатели роста и продуктивности древостоев, так и условия окружающей среды с целью более точного выявления причин изменения в трендах таксационных показателей.

Литература.

1. *Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870* / H. Pretzsch, P. Biber, G. Schütze, et al // *Nature Communications*. 2014. No. 5. article number 4967. doi: 10.1038/ncomms5967.
2. *Changes of forest stand dynamics in Europe. Facts from long-term observational plots and their relevance for forest ecology and management* / H. Pretzsch, P. Biber, G. Schütze, et al // *Forest Ecology and Management*. 2014. Vol. 316. P. 65-77. doi: 10.1016/j.foreco.2013.07.050.
3. *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* // *Lesnoi Zhurnal*. 2020. T. 31. № 1-2. С. 42–54. doi: 10.37482/0536-1036-2020-3-42-54.
4. *Влияние экологических и социально-экономических факторов на формирование лесов Подмосквы* / С.А. Коротков, Л.В. Стоноженко, В.В. Киселева и др. // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2020. Т. 31. № 1-2. С. 90-115. doi: 10.21513/0207-2564-2020-1-90-115.
5. *Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В. Результаты экспериментальных работ за 150 лет в Лесной*

- опытной даче Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – М.: Наука, 2020. 382 с.
6. Monteiro M.V., Levanič T., Doick K.J. Growth rates of common urban trees in five cities in Great Britain: A dendrochronological evaluation with an emphasis on the impact of climate // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017. No. 22. P. 11-23. doi: 10.1016/j.ufug.2017.01.003.
 7. Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide / H. Pretzsch, P. Biber, E. Uhl, et al // *Scientific Reports*. 2017. No. 7. id 15403. doi: 10.1038/s41598-017-14831-w.
 8. Urban tree growth and ecosystem services under extreme drought / T. Rötzer, A. Moser-Reischl, M.A. Rahman, et al // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2021. No. 308-309. id 108532. doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108532.
 9. Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В. Рост и продуктивность древостоев сосны и лиственницы в условиях городской среды // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2018. № 1(37). С. 54-71. doi: 10.15350/2306-2827.2018.1.54.
 10. Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gemonov A.V. Data set of long-term experiments in Forest Experimental Station of the Timiryazev Agricultural Academy since 1862 // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. P. 012025. doi: 10.1088/1755-1315/876/1/012025.
 11. *Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4* / D. Bates, M. Mächler, B. Bolker, et al. // *Journal of Statistical Software*. 2015. No. 67(1). P. 1–48. doi: 10.18637/jss.v067.i01.
 12. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии. Нормативно-справочные материалы / А.З. Швиденко, Д.Г. Щенащенко, С. Нильсон и др. М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.
 13. Production of *Picea abies* in south-east Norway in response to climate change: A case study using process based model simulation with field validation / D. Zheng, M. Freeman, J. Bergh, et al. // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2002. No. 17(1). P. 35-46.
 14. Regional differences in climatic responses of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Norway / K. Andreassen, S. Solberg, O.E. Tveito, et al. // *Forest Ecology and Management*. 2006. No. 222(1-3). P. 211-221. doi: 10.1016/j.foreco.2005.10.029.
 15. Impacts of Air Pollution and Climate Change on Forest Ecosystems-Emerging Research Needs / E. Paoletti, A. Bytnerowicz, C. Andersen, et al. // *Scientific World Journal*. 2007. No. 7. P. 1–8.
 16. Chojnacka-Ożga L., Ożga W. The Impact of Air Pollution on the Growth of Scots Pine Stands in Poland on the Basis of Dendrochronological Analyses // *Forests*. 2021. No. 12. P. 1421. doi: 10.3390/f12101421.

Поступила в редакцию 22.01.2022
 После доработки 21.02.2022
 Принята к публикации 05.05.2022