

3. Лебедев А.В. Ход естественных процессов в древостоях ядра заповедника "Кологривский лес" // В сборнике: Вклад особо охраняемых природных территорий в экологическую устойчивость регионов: Современное состояние и перспективы. Материалы всероссийской (с международным участием) конференции. 2018. С. 6-14.

4. Лебедев А.В., Чистяков С.А., Гемонов А.В., Чернявин П.В. Промежуточные итоги реализации программы по изучению динамики нарушенных растительных сообществ в заповеднике "Кологривский лес" // В сборнике: Вклад особо охраняемых природных территорий в экологическую устойчивость регионов: Современное состояние и перспективы. Материалы всероссийской (с международным участием) конференции. 2018. С. 35-39.

5. "Flora of Russia" on iNaturalist: a dataset / Seregin A.P., Bochkov D.A., Shner J.V., Garin E.V., Pospelov I.N. et al. // Biodiversity Data Journal, 2020. № 8. Article id e59249. DOI: 10.3897/BDJ.8.e59249.

УДК 63052:630174.754

ВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ БИОМАССЫ И ПЛОТНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ *PINUS SYLVESTRIS* И *PICEA ABIES* В ЛЕСАХ ЕВРОПЫ

Лебедев Александр Вячеславович, старший преподаватель кафедры Сельскохозяйственных мелиораций, лесоводства и землеустройства, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Аннотация. Проведенное исследование показывает, что в условиях ускоряющихся темпов роста древесных растений объемы стволов и запасы древесины не должны напрямую пересчитываться в депонированный углерод с учетом исторических значений конверсионных коэффициентов. Это также следует учитывать при мониторинге, моделировании и использовании углерода и биомассы в лесах в условиях глобальных изменений.

Ключевые слова: биомасса, сосна обыкновенная, ель обыкновенная, Европа, изменения климата, модель смешанных эффектов.

Последние исследования показывают, что происходящие климатические изменения вносят значимый вклад в направления динамики биометрических показателей лесных насаждений и их породного состава [1, 2, 4]. Данное исследование направлено на выявление того, можно ли считать биомассу и плотность древесины в качестве долгосрочной константы при прочих равных параметрах или она подвергается временным тенденциям.

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) H. Karst) относятся к одним из самых распространенных древесных пород в Европе, а их древесина широко используется в лесопромышленном комплексе. Наличие систематических тенденций в изменении биомассы и

плотности древесины будет касаться не только экологических проблем, таких как ветроустойчивость деревьев, способность к депонированию углерода и др., но также и экономических и технологических вопросов, таких как пригодность древесины для строительства и для использования в энергетических целях.

В исследовании используются данные определения биомассы стволов в коре деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) H. Karst) в странах Европы, начиная с 1948 года [3]. Для анализа были отобраны наблюдения, сделанные на лесных участках на территории России, Финляндии, Швеции, Украины, Белоруссии, Польши, Чехии, Швейцарии, Испании, Великобритании и других стран.

Чтобы проверить гипотезу о влиянии календарного года на биомассу проводился регрессионный анализ с применением линейных моделей смешанных эффектов (LMM), которые позволяют выполнять прогноз с откалиброванной реакцией на особенности места произрастания. Все статистические анализы проводились в R 3.6.3. Используемые библиотеки: lme4 1.1-23, merTools 0.5.2, lmerTest 3.1-2 и performance 0.5.1.

В качестве первой базовой модели для фиксированных эффектов рассматривалась аллометрическая зависимость биомассы от объема ствола. С учетом календарного года и случайных эффектов уравнение записывается в следующем виде:

$$\ln(M_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(v_{it}) + \beta_2 \times YEAR_{it} + \beta_3 \times YEAR_{it} \times \ln(v_{it}) + b_i + \varepsilon_{it}, \quad (1)$$

где M – биомасса, кг; v – объем ствола, дм^3 ; $YEAR$ – календарный год; i – индекс пробной площади; t – индекс момента времени; β_0 - β_2 - параметры фиксированных эффектов; b_i – случайный эффект пробной площади ($b_i \sim N(0, \tau^2)$); ε_{it} – случайная ошибка ($N(0, \sigma^2)$); N – функция нормального распределения.

В качестве второй базовой модели для фиксированных эффектов использовалось аллометрическое уравнение F.X. Schumacher, F.S. Hall, которое часто применяется при моделировании биомассы. С учетом календарного года и случайных эффектов уравнение имеет следующий вид:

$$\ln(M_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(d_{it}) + \beta_2 \times \ln(h_{it}) + \beta_3 \times YEAR_{it} + \beta_4 \times YEAR_{it} \times \ln(d_{it}) + b_i + \varepsilon_{it}, \quad (2)$$

где M – биомасса, кг; d – диаметр на высоте груди, см; h – высота, м; $YEAR$ – календарный год; i – индекс пробной площади; t – индекс момента времени; β_0 - β_3 - параметры фиксированных эффектов; b_i – случайный эффект пробной площади ($b_i \sim N(0, \tau^2)$); ε_{it} – случайная ошибка ($N(0, \sigma^2)$); N – функция нормального распределения.

Достоверность моделей рассматривалась с использованием оценок условного коэффициента детерминации и предельного коэффициента детерминации (R^2). Предельный R^2 учитывает только дисперсию фиксированных эффектов и указывает, какая часть дисперсии модели объясняется только частью фиксированных эффектов. Условный R^2

учитывает как фиксированные, так и случайные эффекты и показывает, какая часть дисперсии объясняется «полной» моделью [5].

Проведенный статистический анализ позволил выявить достоверное влияние (при $p < 0,05$) календарного года на биомассу стволов в коре. Выявленные изменения биомассы сопровождаются снижением плотности древесины, что происходит в результате увеличения в структуре годичного прироста более рыхлой и менее плотной ранней древесины. Таким образом, в условиях ускоряющихся темпов роста древесных растений объемы стволов и запасы древесины не должны напрямую пересчитываться в депонированный углерод с учетом исторических значений конверсионных коэффициентов. Это также следует учитывать при мониторинге, моделировании и использовании углерода и биомассы в лесах в условиях глобальных изменений.

Наше исследование показывает, что выявленная тенденция снижения биомассы стволов деревьев сосны обыкновенной и ели обыкновенной и плотности их древесины характерна для всей территории Европы. Подобные исследования должны быть продолжены как на региональном и национальном, так и на глобальном уровнях. Выявление направлений в изменениях биомассы и предупреждение их последствий должно стать важной задачей в XXI веке для лесоведения и лесоводства.

Библиографический список

1. Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В. Динамика лесного фонда Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева за 150 лет // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2018. № 4. С. 5-19. DOI: 10.26897/0021-342X-2018-4-5-19.
2. Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В. Результаты экспериментальных работ за 150 лет в Лесной опытной даче Тимирязевской сельскохозяйственной академии: монография. М.: Наука, 2020. – 382 с.
3. Усольцев, В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционного зондирования и наземной таксации лесов Евразии: монография / В.А. Усольцев. – 2-е изд., доп. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет; Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук, 2020.
4. 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 // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 42–54. DOI: 10.37482/0536-1036-2020- 3-42-54.
5. Lüdecke D., Makowski D., Waggoner P., Patil I. Assessment of Regression Models Performance. CRAN. 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3952174.