

Анализ данных о начальном росте культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для моделирования циклов С и N при искусственном восстановлении лесов

Припутина И.В., Фролова Г.Г.

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения
Российской академии наук*

irina.priputina@gmail.com

С использованием статистических методов проанализированы данные полевых измерений показателей роста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в посадках лесных культур, созданных в 2014–2017 гг. в Южном Подмоскowie. Показан эффект усиления неоднородности состава формирующихся древостоев в первые годы после посадки саженцев за счет дифференциации деревьев по размерам. Минимальные показатели высоты деревьев и диаметра ствола в посадках разных лет сопоставимы между собой, а максимальные значения повышаются по мере возраста культур, составив 4-х кратное превышение между соснами посадки 2017 и 2014 гг. На примере модельных деревьев показаны зависимости между размерами деревьев и их массой, а также между массой хвои и суммарной массой ствола, ветвей и корней, что отражает особенности роста сосны на ранних стадиях онтогенеза. Полученные данные необходимы для параметризации системы моделей EFIMOD при моделировании продуктивности и динамики биогенных циклов С и N в посадках лесных культур.

Ключевые слова: статистические методы, полевые измерения, аллометрические зависимости, динамика роста, параметризация модели.

Analysis of the initial dynamics of the pine growth in the *Pinus sylvestris* L. plantations for modelling the C and N cycles under reforestation

Priputina I.V., Frolova G.G.

Institute of Physicochemical and biological problems in soil science of Russian academy of sciences

Using statistical methods, we analyzed the data of field measurements of the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in young plantations created in 2014–2017 in the Moscow region. The effect of enhancing the heterogeneity of the tree stands structure in the first years after planting due to tree size differentiation is shown. The minimum sizes of trees height and stem diameter in plantings of different ages are comparable with each other, and the maximum values increase with the age of plantations, amounting a 4-fold differences between plantations of 2014 and 2017. Analysis of the relationship between tree sizes and their mass, as well as between the needles and the total mass of non-assimilating organs (stem, branches, roots) of model trees shows the characteristics of the growth of Scots pine in the early stages of ontogenesis. The obtained data are necessary for the parameterization of the model system EFIMOD with the purpose of its use in the tasks of modeling the productivity of forest plantations and the dynamics of nutrient cycles of C and N in artificial reforestation.

Key words: statistical methods, field measurements, allometric relationships, dynamics of growth, model parametrization.

1. Введение

Отечественные модели роста и продуктивности лесных насаждений ориентированы на моделирование динамики лесов естественного происхождения, для которых характерны преимущественно разновозрастный и многовидовой

состава древостоя [1–6]. Вклад молодых деревьев в общий продукционный процесс в долгосрочной (100–200 лет) динамике лесов естественного развития минимален. Соответственно, при моделировании большее внимание уделяется параметризации роста деревьев, начиная с возраста 30–40 лет, для которых в лесоведении накоплены

многочисленные данные, в отличие от молодых – до 5–10 лет [7].

Но в последние годы в РФ расширяются площади под посадками лесных культур, что связано с необходимостью ускоренного восстановления лесных ресурсов после пожаров, интенсивных рубок и других нарушений [8]. Как правило, это монокультуры, которые создаются посадкой 2–3-летних сеянцев на участках после сплошной вырубке леса [9]. Соответственно начальная динамика показателей продуктивности будущего древостоя зависит от размеров саженцев и их приростов в первые годы после посадки, на что влияют многие факторы, которые необходимо учитывать в моделях.

Во многих моделях лесных насаждений и отдельных деревьев при оценке фитомассы органов деревьев (ствол, ветви, корни, листва / хвоя) и моделирования их динамики в процессе роста дерева используются аллометрические зависимости [2, 10, 11]. Эти видоспецифичные показатели изменяются в зависимости от возраста [3, 12]. Но в литературе встречаются лишь отрывочные данные для первых 5–10 лет роста лесных культур.

В этой связи, целью работы был сбор и анализ данных о начальных показателях роста культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), которая широко используется при искусственном лесовосстановлении. Наше внимание было сфокусировано на анализе варьирования лесотаксационных показателей – высоты и диаметра ствола у культур возраста 3–5 лет и на оценках соотношения масс разных органов в первые годы роста саженцев. Полученные данные будут использованы для параметризации роста сосны обыкновенной в системе моделей EFIMOD [2], в которой реализовано сопряженное описание процессов роста леса и биогенных циклов органического вещества и азота в системе «древостой–почва».

2. Объекты и методы

2.1. Объекты и полевые исследования

Изучался последовательный возрастной ряд культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) от 2 до 5 лет, которые были созданы в 2014–2017 гг. в ОЛХ «Русский лес» Серпуховского района Московской области. Посадки заложены после сплошной санитарной рубки хвойно-лиственных древостоев на дерново-слабоподзолистых почвах легкого гранулометрического состава. Культуры сформированы весенней посадкой двухлетних сеянцев в дно борозды. Расстояние между саженцами в ряду – в среднем 70–80 см, размеры междурядий – 3–3.5 м.

На участках посадок разных лет были заложены пробные площади (далее ПП) размером 25×25 м (их обозначения в тексте и на графиках соответствуют году закладки культур: ПП2014, ПП2015 и т.п. На

всех ПП проведен пересчет деревьев, измерены их высоты (H) и диаметры ствола у корневой шейки (D_0). Суммарное число деревьев на разных ПП изменялось от 203 до 241. По данным измерений на ПП сформированы «большие» выборки.

Одновременно с измерением высот и диаметров саженцев на ПП, вблизи их границ были отобраны (выкопаны с корневыми системами) модельные деревья для определения массы органов (ствол, ветви, хвоя, корни). С учетом рекомендаций [13], отбирались экземпляры модельных деревьев разных размеров, чтобы они соответствовали диапазону таксационных показателей на соответствующей ПП. В зависимости от года посадки было отобрано от 9 до 16 модельных деревьев. Для них тоже были измерены H и D_0 , значения которых составили «малые» выборки.

2.2. Статистическая обработка данных

Статистическая обработка данных полевых измерений выполнена в среде статистического программирования R [14]. Для анализа варьирования таксационных показателей H и D_0 на ПП были построены графики распределения плотности вероятности соответствующих значений. Также были выполнены статистические тесты на соответствие измеренных биометрических показателей культур сосны на ПП в больших выборках и аналогичных показателей модельных деревьев в малых выборках: тест на нормальность эмпирического распределения (критерий Шапиро–Уилка), проверка на равенство дисперсий эмпирических распределений (критерий Фишера), проверка на равенство средних (критерий Вилкоксона–Манна–Уитни), проверка соответствия эмпирических распределений (критерий Колмогорова–Смирнова).

3. Результаты

Средние значения таксационных показателей H и D_0 для исследуемых культур сосны обыкновенной закономерно возрастают от посадки 2017 г. к культурам посадки 2014 г. Измеренные показатели заметно варьировали на всех ПП (рис. 1). Это варьирование усиливается по мере роста саженцев, что отражают графики плотности вероятности распределения значений H и D_0 в посадках разного возраста (рис. 2). Минимальные показатели в посадках разных лет сопоставимы между собой, а максимальные значения повышаются по мере возраста культур, составив 4-х кратное превышение для ПП2014 по сравнению с ПП2017. Полученные данные показывают, что в первые годы после посадки лесных культур происходит дифференциация состава древостоя, изначально относительно однородного по своим биометрическим характеристикам. Выявленный эффект отражает известный в лесоведении переход от стадии приживаемости саженцев к стадии их индивидуального роста, в результате которого

происходит дифференциация деревьев по размерам [5].

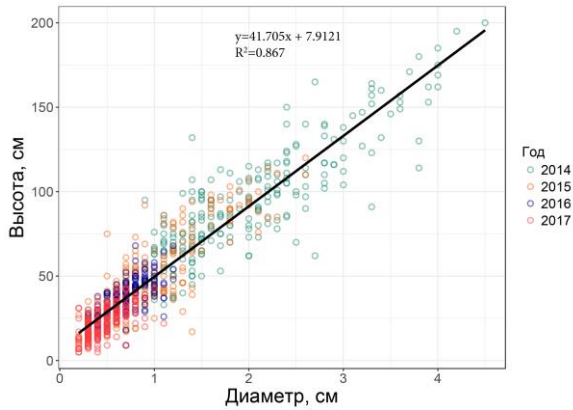


Рис. 1. Соотношение показателей размера саженцев в культурах сосны обыкновенной разного возраста (по данным измерений на ПП).

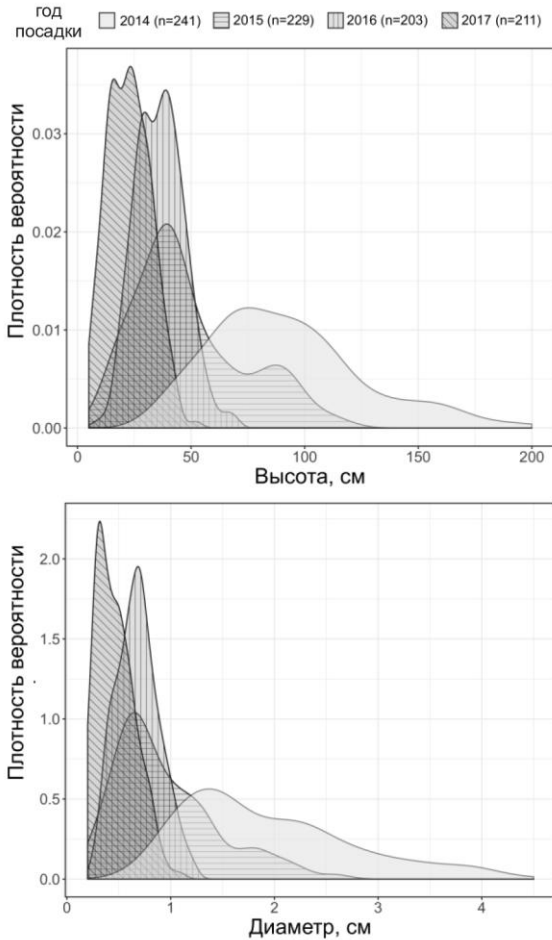


Рис. 2. Распределение плотности вероятности значений таксационных показателей (H и $D0$) в посадках сосны обыкновенной (n – число деревьев на ПП разных лет посадки).

Анализ результатов статистических тестов на соответствие измеренных значений H и $D0$ в больших и малых выборках, соответствующих одному году посадки, показал их принадлежность

одной генеральной совокупности (уровень значимости 0.05). Это позволяет использовать полученные количественные соотношения между размерами и массой органов модельных деревьев для определения аллометрических зависимостей, соответствующих ювенильному и начальному имматурному онтогенетическим состояниям сосны обыкновенной. В частности, линейный характер зависимости получен для соотношения массы хвои и неассимилирующих органов (рис. 3).

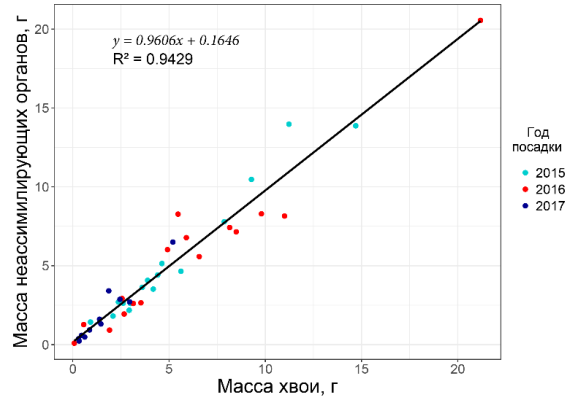


Рис. 3. Соотношение массы хвои и суммарной массы неассимилирующих органов (ствол, ветви, корни) для модельных деревьев.

4. Заключение

Опыт использования EFIMOD в задачах моделирования посадок лесных культур и лесных плантаций [15–16] показал необходимость уточнения данных о начальных стадиях роста лесообразующих пород: размеров и фитомассы саженцев, динамики их таксационных показателей (H и $D0$) на стадиях приживаемости и индивидуального роста, анализа и учета в модели влияния факторов, определяющих вариабильность параметров.

Ежегодный прирост массы отдельного дерева рассчитывается в EFIMOD на основе данных о максимальной биологической продуктивности соответствующего вида в разных почвенно-климатических условиях в зависимости от двух факторов – доступной фотосинтетически активной радиации (ФАР) и количества доступного азота почвы, которые определяются конкуренцией за ресурсы между соседними деревьями [2, 4, 15]. Но для лесных культур в первые годы после посадки (при соблюдении технологии ухода) влияние этих факторов, как правило, минимально. Более значимо может быть влияние других факторов. Заметно отстают в росте саженцы, заглубленные при посадке или в результате размыва бортов посадочных борозд, или посаженные вблизи оставшихся на участке пней и куртин поросли других видов (березы, осины). Эти факторы и качество посадочного материала, по нашему мнению, определили эффект дифференциации деревьев по

размерам, что требует соответствующего учета в модели.

5. Благодарности

Исследования проводятся при финансовой поддержке РФФИ и Министерства инвестиций и инноваций Московской области (грант №17-45-50038).

6. Список литературы

1. Корзухин М.Д. К эколого-физиологической модели лесной динамики. В: *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 9. С. 259–276.
2. Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., et al. EFIMOD 2 – a model of growth and elements cycling of boreal forest ecosystems. *Ecological Modelling*. 2003. V. 170. № 2–3. P.373–392.
3. Чумаченко С.И. Концепция построения биоэкологических моделей многовидовых разновозрастных лесных насаждений для зоны хвойно-широколиственных лесов и южной тайги. *Лесной вестник*. 2006. № 2. С. 7–13.
4. *Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах*. Под. ред. Кудеярова В.Н. М.: Наука, 2007. 380 с.
5. Рогозин М.В., Разин Г.С. Модели динамики и моделирование развития древостоев. *Сибирский лесной журнал*. 2015. № 2. С. 55–70.
6. Колобов А.Н., Лонкина Е.С., Фрисман Е.Я. Моделирование и анализ горизонтальной структуры смешанных древесных сообществ (на примере пробных площадей заповедника «Бастак» в Среднем Приамурье). *Сибирский лесной журнал*. 2015. № 3. С. 45–56.
7. Разин Г.С., Рогозин М.В. О законах и закономерностях роста и развития, жизни и отмирания древостоев. *Лесное хозяйство*. 2010. № 2. С. 19–20
8. Желдак В.И., Сидоренков В.М. Лесные плантации как элемент интенсификации лесовоспроизводства и лесопользования при сохранении экологически ценных лесов. В: *Инновации и технологии в лесном хозяйстве: Тез. докл. V межд. науч.-практ. конф.* СПб: СПбНИИЛХ, 2016. С. 61–62.
9. Писаренко А.И., Мерзленко М.Д. *Создание искусственных лесов*. М.: Агропромиздат, 1990. 270 с.
10. Уткин А.И., Замолотчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Нефедьев В.В. и др. Определение запаса углерода насаждений на пробных площадях: сравнение аллометрического и конверсионно-объемного методов. *Лесоведение*. 1997. № 5. С. 51–66.
11. Демаков Ю. П., Пуряев А.С., Черных В.Л., Черных Л.В. Использование аллометрических

зависимостей для оценки фитомассы различных фракций деревьев и моделирования их динамики. *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2015. Т. 26. № 2. С. 19–36.

12. Evstigneev O.I., Korotkov V.N. Ontogenetic stages of trees: an overview. *The Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2016. V. 1. P. 1–31. doi: [10.21685/2500-0578-2016-2-1](https://doi.org/10.21685/2500-0578-2016-2-1).
13. Усольцев В.А. *Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения*. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.
14. *R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2015. URL: <http://www.R-project.org/> (дата обращения: 10.07.2018).
15. Комаров А.С., Чертов О.Г., Быховец С.С., Припутина И.В. и др. Воздействие осинового плантаций с коротким оборотом рубки на биологический круговорот углерода и азота в лесах бореальной зоны: модельный эксперимент. *Математическая биология и биоинформатика*. 2015. Т. 10. № 2. С. 398–415. doi: [10.17537/2015.10.398](https://doi.org/10.17537/2015.10.398).
16. Припутина И.В., Фролова Г.Г., Быховец С.С., Шанин В.Н. и др. Моделирование продуктивности лесных плантаций при разных схемах пространственного размещения деревьев. *Математическая биология и биоинформатика*. 2016. Т. 11. № 2. С. 245–262. doi: [10.17537/2016.11.245](https://doi.org/10.17537/2016.11.245).