

УДК: 57.033,045; 574.45; 630.181.351; 631.811.1

Выбор оптимальных схем посадки лесных культур: компьютерный эксперимент

И. В. Припутина^а, Г. Г. Фролова, В. Н. Шанин

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
Россия, 142290, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 2

E-mail: ^аirina.priputina@gmail.com

Получено 19 февраля 2016 г.,
после доработки 21 марта 2016 г.

В статье проанализированы результаты компьютерного эксперимента по оценке влияния пространственного размещения (схем посадки) деревьев на продукционный процесс и динамику почвенного плодородия в лесных плантациях. Для имитации роста плантаций нативной формы осины (*Populus tremula* L.) с коротким (30 лет) оборотом рубки использована система моделей EFIMOD и почвенно-климатические данные, соответствующие условиям лесной зоны Республики Марий Эл. По результатам модельных оценок, схемы посадки с расстоянием между деревьями в ряду 1–4 м и междурядьями 4–6 м характеризуются наибольшими показателями продукции биомассы, повышением почвенных запасов органического вещества и минимальными потерями азота почв за оборот рубки.

Ключевые слова: имитационное моделирование, динамика экосистем, пространственная структура, лесные плантации, схема посадки, продукция биомассы, почвенное плодородие

Substantiation of optimum planting schemes for forest plantations: a computer experiment

I. V. Priputina, G. G. Frolova, V. N. Shanin

Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS, 2 Institutskaya st., Pushchino, Moscow region, 142290, Russia

Abstract. — The article presents the results of computer simulations aimed to assess the influence of tree spatial locations (planting schemes) on the productivity and the dynamics of soil fertility in forest plantations. The growth of aspen (*Populus tremula* L.) in plantations with short rotation (30 years) was simulated in the EFIMOD system of models with the soil and climatic data matching forested lands in the Mari El Republic. The outcome reveals that higher biomass rates, increase in soil organic matter stocks, and the minimal loss of soil nitrogen can be obtained when the distance between trees in the row equals 1–4 m and 4–6 m in aisles.

Keywords: computer simulation, ecosystem dynamics, spatial structure, forest plantations, planting scheme, biomass production, soil fertility

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 333–343 (Russian).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 14.616.21.0013 от 17.09.2014, уникальный идентификатор RFMEF161614X0013).

© 2016 Ирина Владимировна Припутина, Гульфина Габдрахмановна Фролова, Владимир Николаевич Шанин

Введение

В 2013–2014 гг. А. С. Комаровым совместно с лабораторией лесной биотехнологии ФИБХ РАН были инициированы исследования, направленные на разработку математических моделей для оценки и прогнозирования продуктивности древостоев, круговоротов азота и углерода в лесных плантациях [Комаров и др., 2015]. Их целью было создание новых версий системы моделей EFIMOD, в которых были бы учтены модифицированные характеристики плантационных лесных культур (ускоренный рост, измененное соотношение биомасс органов дерева, их химического состава и др.) [Shestibratov et al., 2011]. Актуальность модельных прогнозов эффективности создания плантаций лесных культур (разного целевого назначения и в разных почвенно-климатических условиях) связана с необходимостью (1) оценки продукции биомассы, получаемой на основе биотехнологических форм деревьев, (2) определения рисков потерь почвенного плодородия в результате формирования быстрорастущих древостоев, (3) анализа изменений баланса углерода.

В отличие от моделирования естественного развития леса, где первоначальное размещение и возобновление деревьев на модельном участке описывается как случайный процесс [Грабарник, 2007], моделирование роста лесных плантаций предполагает использование регулярной сети размещения деревьев и одновозрастность древостоя, что упрощает пространственную структуру моделируемых древостоев. Но в этом случае на этапе разработки модельных сценариев возникает задача выбора схем пространственного размещения деревьев на плантации. В лесоведении хорошо известно, что густота древостоя и пространственное размещение деревьев входят в число факторов, которые способны обеспечить быстрый рост и высокую производительность лесной культуры, наряду с качеством посадочного материала, почвенно-климатическими условиями их произрастания и мероприятиями по уходу за посадками [Шутов и др., 1984; Маркова, 2004]. Но в отечественной и зарубежной литературе приводятся разные (часто противоречивые) данные и рекомендации по густоте и схемам посадки лесных культур при создании плантаций и искусственном лесовосстановлении.

В данной работе представлены результаты компьютерного эксперимента, цель которого — анализ влияния пространственного размещения деревьев на эффективность продукционных процессов и динамику почвенных запасов углерода и азота в плантациях быстрорастущих форм деревьев. Используемый нами метод имитационного моделирования позволил рассмотреть широкий набор вариантов пространственной структуры древостоев и проанализировать динамику их роста за 30-летний период в идентичных почвенно-климатических условиях, что практически невыполнимо в реальном эксперименте. Помимо определения оптимальных схем посадок деревьев, обеспечивающих высокую продукцию биомассы при минимальных потерях плодородия почв, мы ставили задачу протестировать работу EFIMOD в сценариях лесопользования, соответствующих начальным стадиям формирования лесных экосистем с упорядоченной пространственной структурой.

Система моделей EFIMOD: краткая характеристика

Система моделей EFIMOD, созданная А. С. Комаровым совместно с О. Г. Чертовым, при участии сотрудников лаборатории моделирования экосистем ИФХиБПП РАН, хорошо известна по многочисленным публикациям в отечественной и зарубежной литературе [Chertov et al., 2001; Komarov et al., 2003; Моделирование динамики ..., 2007]. Сопряженное описание процессов роста леса и биогенных циклов органического вещества и азота в системе «древостой–почва», которое положено в основу EFIMOD, предоставляет широкие возможности для использования моделей в научных и научно-практических целях. Апробация работы моделей и их верификация выполнялись в разные годы на примере основных лесобразующих пород европейской территории России (ЕТР), а также европейских и канадских хвойных лесов в широком диапазоне почвенно-климатических условий [Shanin et al., 2012]. Имеется положительный опыт

сравнения результатов моделирования динамики различных показателей функционирования лесных экосистем, полученных с помощью EFIMOD и других моделей [Karjalainen et al., 1999; Palosuo et al., 2008]. На наш взгляд, это позволяет использовать EFIMOD как инструмент тестовых модельных прогнозов и в тех сценариях лесопользования, для которых многолетние ряды натурных наблюдений пока отсутствуют или ограничены.

Основными функциональными блоками EFIMOD являются: (1) модель роста отдельного дерева, (2) модель древостоя с дискретным описанием пространства и (3) модель динамики органического вещества почвы ROMUL [Chertov et al., 2001], которая дополнена (4) статистическим генератором почвенного климата SCLISS [Быховец, Комаров, 2002]. Модель сочетает в себе описание динамики популяций древесных растений и круговорота органического вещества и азота в экосистеме. Модель построена на допущении, что все возможные неопределенности будут нивелированы при расчете усредненной динамики в популяции взаимодействующих особей, что позволяет представить модель роста отдельного дерева в виде простой функции на балансовом уровне, вместо детального описания роста на физиологическом уровне [Комаров, 2010].

Роль локальных взаимодействий между соседними деревьями учитывается через описание конкуренции за свет и доступный азот почвы [Моделирование динамики, 2007]. Каждое дерево характеризуется своей зоной корневого питания и создаваемой им зоной затенения, которые увеличиваются по мере роста дерева и могут перекрываться с соответствующими зонами других деревьев. Редукция потенциальных приростов биомассы каждого дерева, связанная с недостатком солнечной радиации (ФАР) или доступного пула почвенного азота, происходит в соответствии с правилом Либиха. Влияние других экологических факторов (длительных засух, аномально низких температур и т. п.) на интенсивность роста, продуктивность или гибель деревьев в модели не учитываются, но есть возможность задать интенсивность самоизреживания древостоя в результате гибели отдельных деревьев, что реализовано в модели как случайный процесс.

Обратная связь древостоя с почвой реализуется в EFIMOD через поступление в почву различных когорт растительного опада (наземного и корневого), которые характеризуются видовоспецифичным содержанием азота. Модель динамики органического вещества ROMUL описывает разложение опада организмами-деструкторами и трансформацию гумусовых веществ с помощью системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка с переменными коэффициентами, зависящими от температуры и влажности почвы, а также содержания азота в опаде [Chertov et al., 2001]. Модель рассчитывает количество доступного азота образующегося при минерализации органического вещества лесной подстилки и минеральных горизонтов почв. Предполагается, что он полностью потребляется деревьями и идет на создание прироста их биомассы.

Ряд моментов, связанных с особенностями EFIMOD, будут влиять на результаты моделирования роста лесных плантаций. Размер элементарной ячейки решетки в модели древостоя предполагает ограничение густоты моделируемого древостоя минимально возможным расстоянием между деревьями (0.5 м). Но такое пространственное разрешение вполне соответствует задачам моделирования роста плантационных культур, поскольку в литературе редко встречаются данные о посадке саженцев в ряду ближе 0.5 м, а наиболее типичное расстояние между рядами составляет 3–6 м. Регулярное размещение деревьев в пространстве модельной решетки и характерные для плантационных посадок одновозрастность и одновидовой состав древостоя ведут к тому, что смыкание и последующее перекрытие крон и корневых систем соседних деревьев в модели будут происходить на определенном шаге моделирования для большинства деревьев. При квадратных схемах посадки (0.5×0.5, 1×1, 1.5×1.5 и т. п.) одновременно будут смыкаться кроны практически всех модельных деревьев, в прямоугольных схемах смыкание будет происходить в два этапа: сначала в ряду, затем в междурядьях. Следствием массового смыкания крон и корневых систем модельного древостоя может быть снижение его суммарной продуктивности за счет редукции потенциальных приростов большинства деревьев, или снижение запасов биомассы древостоя за счет гибели части деревьев как результат сокращения количества доступного азота и/или ФАР.

Описание модельного эксперимента

В модельном эксперименте использована одна из версий системы моделей EFIMOD — EFIMOD-fbr-REG_ME, разработанная для моделирования роста плантаций в почвенно-климатических условиях лесной зоны Республики Марий Эл [Отчет ..., 2015]. Моделировали рост плантаций нативной формы осины (*Populus tremula* L.) при разных схемах посадки саженцев. Критическими параметрами модели были расстояния между точками на условной решетке размещения деревьев, соответствующие начальному положению саженцев в ряду и между рядами. Имитационные эксперименты выполнены для двух вариантов почвенных условий, имитирующих относительно бедные и более плодородные почвы. Это дало возможность сопоставить результаты модельных оценок при разных показателях почвенного плодородия. Остальные характеристики моделируемой экосистемы и входные данные модели были одинаковыми для всех вариантов эксперимента. Использован сценарий создания лесных плантаций на бывших сельскохозяйственных землях с коротким (30 лет) оборотом рубки, без промежуточных рубок ухода за культурами и без применения удобрений. Самоизреживание древостоев считали постоянной величиной, равной 1.3 % в год от числа деревьев [Lieseback et al., 1999].

Включенный в компьютерный эксперимент набор схем посадки (таблица 1) определялся на основе данных литературы и с учетом возможностей их реализации в EFIMOD. В зависимости от схемы посадки начальная густота модельных древостоев изменялась в пределах от <500 шт. га⁻¹ до >10 тыс. шт. га⁻¹. Также рассмотрен вариант максимально плотной схемы посадки 0.5×0.5 м, при котором число деревьев составляет >39 тыс. шт. га⁻¹, что сопоставимо с начальной густотой осинников при их естественном возобновлении [Таблицы и модели..., 2006]. Существующие правила искусственного лесовосстановления регламентируют посадку саженцев с плотностью древостоя 2–3 тыс. шт. га⁻¹ в зависимости от культуры и почвенного плодородия [Маркова, 2004]. Эти нормативы соответствуют относительно плотному размещению деревьев (через 1–2 м в ряду и 2–5 м между рядами).

Таблица 1. Варианты схем и исходной густоты посадки в модельных экспериментах, шт. га⁻¹ (полужирным шрифтом выделены варианты, соответствующие нормативной плотности посадок лесных культур)

Расстояние, м		Между рядами								
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6
В ряду	0.5	40000	20000	13333	10000	8000	6667	5000	4000	3333
	1		10000	6667	5000	4000	3333	2500	2000	1667
	1.5			4444	3333	2667	2222	1667	1333	1111
	2				2500	2000	1667	1250	1000	833
	2.5					1600	1333	1000	800	667
	3						1111	833	667	556
	4							625	500	417
	5								400	333
	6									278

Начальные почвенные характеристики (запасы азота и органического вещества для слоя 0–50 см) были рассчитаны на основе данных для серых лесных и светло-серых лесных почв Республики Марий Эл, представленных в Едином государственном реестре почвенных ресурсов (ЕГРПР, электронный ресурс: <http://egrpr.esoil.ru/egrpr.php?show=RUREG&ValueID=966>). Данные почвы различаются по запасам азота более чем в 2 раза и примерно в 2.5 раза — по содержанию органического вещества (таблица 2). Поскольку имитировался рост лесных плантаций на бывших сельскохозяйственных землях, в моделируемых почвах на начальном этапе отсутствует органический горизонт, соответствующий лесной подстилке. Водно-физические свойства почв, необходимые для оценки их водного режима, были получены из ЕГРПР и агроклиматических справочников [Справочник..., 1986]. Климатические характеристики, необходимые для

учета гидротермических условий деструкции растительного опада и минерализации органического вещества почв, рассчитывались в использованной версии модели на основе средних многолетних данных для Республики Марий Эл [Агроклиматические ресурсы..., 1972].

Таблица 2. Начальные запасы органического вещества и азота в почвах (рассчитано по данным ЕГРПП)

Название почв, тип землепользования	Почвенные горизонты	Запасы (в слое 0–50 см), кг м ⁻²	
		органическое вещество	азот
Светло-серые лесные (Л1), бывшие с.-х. угодья	Органический	0	0
	Минеральный	9.4	0.417
Серые лесные (Л2), бывшие с.-х. угодья	Органический	0	0
	Минеральный	23.4	0.983

Обсуждение результатов

В России участки под плантациями быстрорастущих форм осины есть в Республике Татарстан и Республике Марий Эл, Ленинградской, Кировской и Воронежской областях. Но в литературе приводятся лишь отрывочные сведения о динамике лесотаксационных показателей на плантационных участках, которые можно было бы использовать для определения продуктивности древостоев и сравнения с результатами модельных оценок [Газизулин и др., 2011; Жигунов и др., 2014]. Практически отсутствуют натурные данные об изменении почвенных характеристик под плантационными культурами. Все это затрудняет верификацию моделей. Как вариант, для более плотных схем посадки, сопоставимых по густоте с естественными древостоями, таксационные показатели, рассчитываемые в EFIMOD, можно сравнить с данными таблиц хода роста (ТХР) для осинников хвойно-широколиственной подзоны лесов ЕТР, условия произрастания которых близки к почвенно-климатическим условиям Республики Марий Эл. Но следует отметить, что в ТХР приведены расчетные данные для осиновых древостоев порослевого происхождения [Таблицы и модели..., 2006] или для определенных типов леса [Усольцев, 2002], данные по которым довольно сильно разнятся (таблица 3).

Динамика плотности (густоты) древостоев

Изменение густоты древостоя в имитационном эксперименте с разными схемами пространственного размещения деревьев для сценариев со светло-серой и серой лесной почвами в целом было схожим. Результаты оценок динамики показателей плотности и абсолютной плотности древостоя в варианте с наиболее плотной схемой посадки (0.5×0.5 м) сопоставимы с данными ТХР для осинников черничных II класса бонитета. Схемы посадки 1.5×0.5 и 3×1 м имеют показатели, близкие к таксационным характеристикам полных осиновых древостоев Ia или Ib классов бонитета кисличного и снытевого типов леса. Результаты моделирования, полученные для варианта посадки 1×1 м, хорошо согласуются с динамикой показателей плотности в ТХР для осинников II класса бонитета Среднего Поволжья.

В модельном эксперименте с плотными схемами посадки заметное сокращение числа деревьев происходит в возрасте 10–15 лет, после массового смыкания крон и корневых систем (рис. 1). В плантационном лесоразведении этот процесс (примерно в эти же сроки) также хорошо известен и регулируется рубками ухода, в ходе которых с участка (в зависимости от целевой культуры) рекомендуется удалять от 30 до 70 % от общего числа деревьев [Шутов и др., 1984]. В зависимости от первоначальной густоты посадок сокращение числа деревьев в нашем модельном эксперименте составляло от 40 до 85 %. Для вариантов разреженных посадок уменьшение плотности древостоев (примерно на 40 % от первоначальной численности) определялось только «случайной гибелью» деревьев, что отражают приведенные на рис. 1 данные динамики плотности древостоев для схем 1.5×4 и 5×5 м.

Таблица 3. Показатели плотности и полноты древостоя в ТХР [Усольцев, 2002; Таблицы и модели..., 2006] и в модельных экспериментах

Характеристика древостоя, тип данных	Число деревьев, шт. га ⁻¹		Абсолютная полнота древостоя в 30 лет, м ² га ⁻¹
	в 10 лет	в 30 лет	
ТХР: полные осиновые древостои зоны смешанных лесов ЕТР, бонитет Ib, осинники кисличные	2469	1083	31.8
ТХР: нормальные осинники Белоруссии, бонитет Ic, осинники кисличные	2100	1032	32.1
Модельный эксперимент: схема посадки 3×1 м	2886	1206	32.8
ТХР: полные осиновые древостои, Среднее Поволжье, бонитет II	8670	2164	23.5
Модельный эксперимент: схема посадки 1×1 м	8736	3053	20
ТХР: полные осиновые древостои зоны смешанных лесов ЕТР, бонитет Ia, осинники кисличные и сныгевые	10697	2702	28.2
ТХР: полные осиновые древостои порослевого происхождения; бонитет Ia	15061	2023	36.5
ТХР: сомкнутые осиновые насаждения, бонитет II	10553	2159	24.0
Модельный эксперимент: схема посадки 1.5×0.5 м	11458	2092	28.8
ТХР полных осиновых древостоев зоны смешанных лесов Европейской части, бонитет II, осинники черничные	22590	3562	23.5
Модельный эксперимент: схема посадки 0.5×0.5 м	23400	5136	31.0

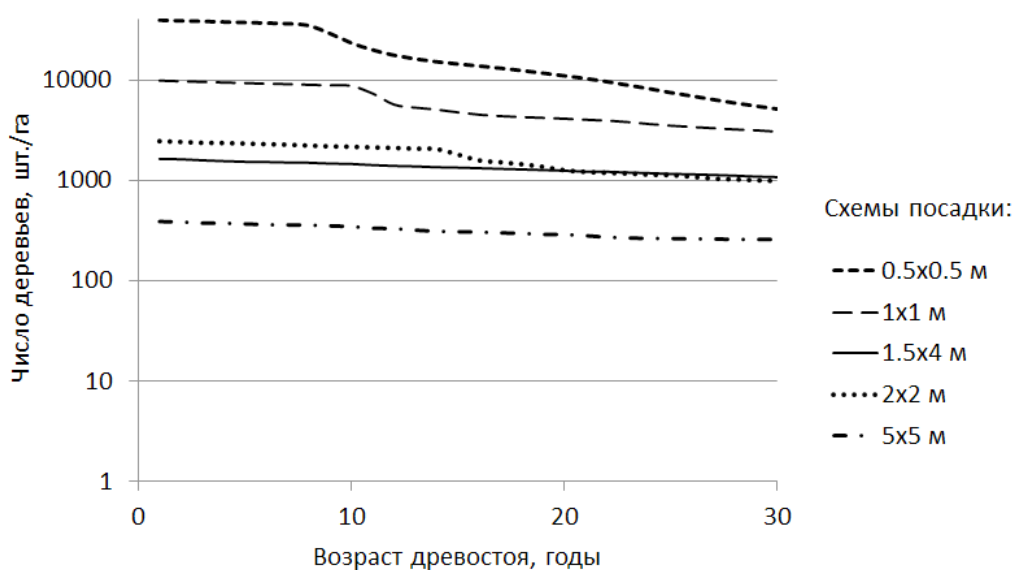


Рис. 1. Динамика плотности древостоев в модельном эксперименте при разных схемах посадки (почва Л2)

Продуктивность древостоев

Осина относится к быстрорастущим видам, требовательным к почвенному плодородию и обеспеченности светом на всех этапах ее роста. Лимитирование этими факторами может сдерживать потенциальную продуктивность лесной культуры или даже вести к гибели части древостоя по мере плотного смыкания крон деревьев в излишне густых посадках [Михайлов, 1985]. В модельном эксперименте с имитацией условий серой лесной почвы величина суммарной продукции биомассы древостоя на момент рубки (30-й шаг моделирования) в зависимости

от схемы посадки изменялась в широком диапазоне величин — от 8 до 25.7 кг м⁻², или 80–257 т га⁻¹ (таблица 4). Минимальные значения соответствуют данным по продуктивности осинников III класса бонитета того же возраста, а максимальные — показателям высокопродуктивных осинников бонитетов Ic и Ib. Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии прямой корреляции между начальным количеством саженцев и биомассой, накопленной древостоем за 30-летний период. Кроме того, в рассмотренных вариантах схемы посадки не видно единого тренда зависимости продуктивности от расстояния между деревьями в ряду или между рядами.

Таблица 4. Продукция биомассы древостоев, кг м⁻² (за 30-летний оборот рубки) при разных схемах посадки деревьев (приведены данные для серой лесной почвы; полужирным шрифтом выделены минимальные и максимальные значения)

Расстояние, м		Между рядами								
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6
В ряду	0.5	19.0	15.0	16.6	18.1	18.3	16.3	16.4	15.4	13.3
	1		10.3	10.4	11.0	17.1	16.5	23.1	21.8	21.4
	1.5			8.1	10.6	11.6	8.0	24.4	24.5	23.8
	2				8.0	11.5	15.6	25.7	25.5	25.0
	2.5					10.2	14.2	25.7	24.6	25.1
	3						12.4	24.4	25.1	25.4
	4							24.6	25.2	24.1
	5								23.9	20.5
6									19.8	

Повышенные показатели биомассы (20–25 кг м⁻²) характерны для плантационных посадок осины с междурядьями 4–6 м при расстоянии между деревьями в ряду 1–4 м (рис. 2). Как следует из графика, увеличение ширины междурядий с 4 до 6 м не оказывает заметного влияния на продуктивность моделируемых древостоев, а в максимально разреженных посадках (5×5, 5×6, 6×6 м) продуктивность снижается из-за сокращения общего числа деревьев. И хотя, с учетом затрат на приобретение и посадку саженцев, максимально разреженные посадки более эффективны, но на практике такие посадки требуют большего ухода, связанного с удалением нежелательной растительности в пространстве между лесными культурами [Шутов и др., 1984] и имеют пониженную устойчивость к ветровым нагрузкам [Рожков, Козак, 1989].

По результатам моделирования, в наиболее плотной посадке 0.5×0.5 м продукция биомассы достигает 19 кг м⁻², что объясняется максимально большим числом деревьев, которое (при небольшом темпе самоизреживания) обеспечивает высокую плотность древостоев в течение всего периода роста. Для других вариантов равномерного размещения деревьев (1×1, 1.5×1.5, 2×2, 2.5×2.5, 3×3) в модельном эксперименте получены наиболее низкие значения продукции биомассы, что требует специального анализа. По мнению лесоводов [Писаренко, Мерзленко, 1990], равномерная посадка деревьев должна способствовать наилучшей обеспеченности древостоев светом и элементами питания, хотя в литературе нет экспериментальных данных, подтверждающих эффективность «квадратных» посадок по сравнению с «прямоугольными». Но в модельных экспериментах В. В. Галицким и А. С. Комаровым [1976; Галицкий, 1979] уже был обнаружен эффект «коллективного самоугнетения» древостоев с регулярным размещением.

В сценарии светло-серых лесных почв накопленная древостоем величина биомассы в среднем в 1.5 раза ниже: от 5 до 15.2 кг м⁻², или 50–152 т га⁻¹, что соответствует осинникам I–III классов бонитета. Полученные различия в продукции биомассы на разных вариантах почв отражают влияние фактора почвенного плодородия на продуктивность древостоя. Как и в сценарии серых лесных почв, наибольшие показатели биомассы (13–15 кг м⁻²) получены для схем посадок с междурядьями 4–6 м и расстояниями в ряду 1–4 м, а минимальные — при равномерном размещении деревьев на расстоянии от 1 до 3 м в рядах и междурядьях.

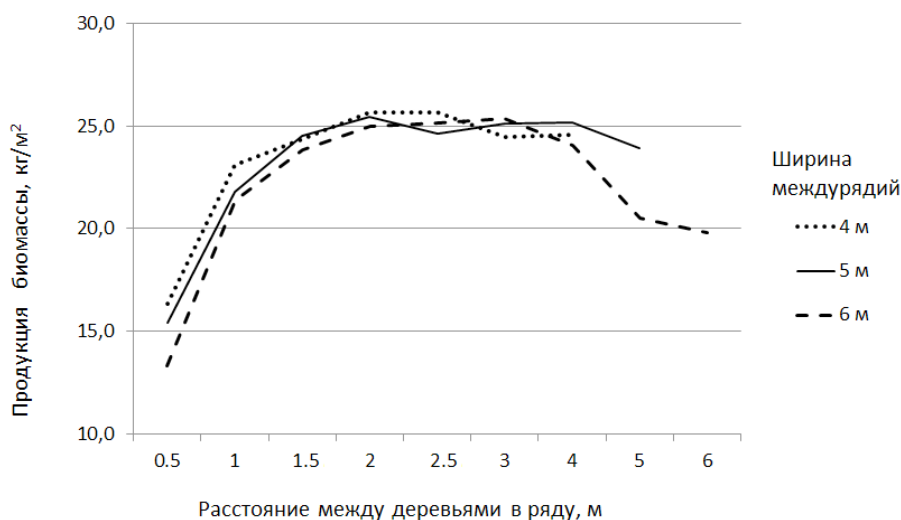


Рис. 2. Продукция биомассы древостоя в посадках с широкими междурядьями (почва Л2)

Изменение почвенных запасов углерода и азота

Влияние плантаций быстрорастущих форм осины на почвенное плодородие оценивалось по разности почвенных пулов органического вещества и азота на начальном и конечном (30-ом) шаге моделирования. В сценарии светло-серых лесных почв для большей части рассмотренных вариантов схем посадки наблюдали увеличение пула органического вещества. Рост запасов составил от 0,2–0,3 до 1,5–1,6 кг С м⁻² в зависимости от плотности посадки. Прослеживается положительная зависимость изменений почвенного пула органического вещества от продуктивности древостоев. Для схем посадки 1×1 и 1,5×1,5 м, дающих минимальную продукцию биомассы, динамика запасов углерода была отрицательной.

В сценарии серых лесных почв картина динамики почвенного пула С при разных схемах посадки более сложная (таблица 5). В 10 вариантах схемы посадки из 45 было сокращение первоначальных запасов на 0,077–0,659 кг С м⁻², характерное для древостоев с продукцией биомассы ниже 12,5 кг м⁻². Для схем посадок с продуктивностью древостоев > 20 кг м⁻² модельные расчеты показывают рост запасов органического вещества в почве на 1,5–2 кг С м⁻².

Во всех вариантах эксперимента обнаружено сокращение запасов азота в почве, которое для светло-серых лесных почв составило 0,06–0,12 кг N м⁻² (таблица 6). С учетом размера первоначального пула азота (0,417 кг N м⁻²) потери этого элемента оцениваются в 15–30 %. Для серых лесных почв абсолютные показатели потерь азота были выше (0,09–0,21 кг N м⁻²), но относительно первоначальных запасов (0,983 кг N м⁻²) они составили 9–22 %.

Таблица 5. Изменение почвенных запасов углерода (кг м⁻²) при разных схемах посадки в сценарии серой лесной почвы (полужирным шрифтом выделены отрицательные значения)

Расстояние, м		Между рядами								
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6
В ряду	0,5	1.231	0.708	0.944	1.213	1.238	0.924	0.889	0.787	0.532
	1		-0.229	-0.132	0.125	1.232	1.140	1.472	1.383	1.306
	1,5			-0.655	-0.201	-0.077	-0.387	1.803	1.763	1.731
	2				-0.659	-0.262	0.504	1.947	1.886	1.860
	2,5					-0.410	0.253	1.891	1.887	1.850
	3						-0.096	1.811	1.843	1.767
	4							1.548	1.733	1.720
	5								1.599	1.545
	6									1.419

Таблица 6. Изменение запасов азота почвы (кг м^{-2}) при разных схемах посадки деревьев в сценарии светло-серых лесных почв

Расстояние, м		Между рядами								
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6
В ряду	0.5	-0.088	-0.094	-0.091	-0.079	-0.079	-0.086	-0.092	-0.091	-0.095
	1		-0.121	-0.110	-0.102	-0.069	-0.067	-0.065	-0.070	-0.074
	1.5			-0.121	-0.107	-0.086	-0.072	-0.062	-0.064	-0.066
	2				-0.112	-0.092	-0.071	-0.062	-0.063	-0.064
	2.5					-0.096	-0.075	-0.064	-0.064	-0.066
	3						-0.085	-0.064	-0.066	-0.068
	4							-0.066	-0.066	-0.067
	5								-0.065	-0.063
6									-0.063	

Заключение

Представленные результаты компьютерного эксперимента выступают тестовой оценкой работы системы моделей EFIMOD в рамках решения задач, связанных с моделированием среднесрочной динамики лесных экосистем с упорядоченной пространственной структурой, к которым относятся лесные плантации и искусственно восстанавливаемые леса. С учетом затрат на создание таких лесов важность прогноза эффективности плантационного и искусственного лесовосстановления в разных природно-климатических условиях не вызывает сомнений, а математические модели служат инструментом для прогнозного анализа. Моделирование начальных стадий роста лесных плантаций (как и начального восстановления лесов после сплошных рубок, интенсивных пожаров и массовых вспышек вредителей) требует количественного описания процессов с неравновесной динамикой и затруднено отсутствием длительных рядов почвенно-геоботанических наблюдений, необходимых для верификации моделей. Александр Сергеевич Комаров, как никто другой, осознавал все эти сложности, но считал необходимым развитие системы моделей EFIMOD в этом направлении.

Задача моделирования роста одновозрастных одновидовых древостоев с *равномерной* пространственной структурой возникла в наших исследованиях менее года назад. Представленные результаты модельных оценок продуктивности быстрорастущих осиновых древостоев в целом согласуются с данными литературы по плантационному лесоразведению. Проведенный компьютерный эксперимент позволил получить новые данные о возможном влиянии лесных плантаций быстрорастущих форм деревьев с коротким оборотом рубки на почвенное плодородие. Часть полученных результатов требует дальнейшего, более детального, анализа. К ним относятся вариабельность показателей продуктивности древостоев при одних и тех же почвенно-климатических условиях в разных схемах посадки. Также необходим дополнительный анализ снижения продуктивности древостоев в равномерных схемах посадки, что наблюдалось в результатах эксперимента.

Список литературы

- Агроклиматические ресурсы Марийской АССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1972.
- Быховец С. С., Комаров А. С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. — 2002. — № 4. — С. 443–452.
- Газизуллин А. Х., Гарипов Н. Р., Пуряев А. С., Ятманова Н. М., Хакимова З. Г., Чернов В. И. Результаты исследования четырехлетних опытных культур осины, созданных в Республике Татарстан методами биотехнологии // Вестник Казанского ГАУ. — № 3 (21) 2011. — С. 118–120.

- Галицкий В. В. О коллективном самоугнетении в однородном растительном сообществе и колебательных изменениях биомассы его членов // Доклады АН СССР. — 1979. — Т. 246, № 4. — С. 1013–1015.
- Галицкий В. В., Комаров А. С. Дискретные модели популяции деревьев // Моделирование почвенных процессов и автоматизация их исследований. — М.: Наука, 1976. — С. 91–106.
- Грабарник П. Я. Моделирование пространственной структуры древостоев // Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Отв. ред. В. Н. Кудеяров. — М.: Наука, 2007. — С. 132–146.
- Жигунов А. В., Шабунин Д. А., Бутенко О. Ю. Лесные плантации триплоидной осины, созданные посадочным материалом *in vitro* // Вестник ПГТУ. — 2014. — № 4 (24). — С. 21–30.
- Комаров А. С. Пространственные индивидуально-ориентированные модели лесных экосистем. Лесоведение. — 2010. — № 2. — С. 60–68.
- Комаров А. С., Чертов О. Г., Быховец С. С., Припутина И. В., Шанин В. Н., Видягина Е. О., Лебедев В. Г., Шестибратов К. А. Воздействие осиновых 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.
- Маркова И. А. Обобщение 30-летнего опыта плантационного лесовыращивания в таежной зоне России // Тр. СПбНИИЛХ. — 2004. — Вып. 2 (12). — С. 58–76.
- Михайлов Л. Е. Осина. — М.: Агропромиздат, 1985. — 72 с.
- Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Отв. ред. В. Н. Кудеяров. — М.: Наука, 2007.
- Отчет о выполнении НИР по теме «Разработка математических моделей оценки и прогнозирования продуктивности древостоя, круговоротов азота и углерода в искусственных лесных экосистемах». Этап 2. — Пущино: ИФХиБПП РАН, 2015.
- Писаренко А. И., Мерзленко М. Д. Создание искусственных лесов. — М.: Агропромиздат, 1990.
- Рожков А. А., Козак В. Т. Устойчивость лесов. — М.: Агропромиздат, 1989.
- Справочник агронома по сельскохозяйственной метеорологии. Нечерноземная зона Европейской части СССР / Под ред И. Г. Грингофа. — Л.: Гидрометеиздат, 1986.
- Таблицы и модели хода роста древостоев лесов Российской Федерации. — М.: Агропромиздат, 2006.
- Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. — Екатеринбург: УРО РАН, 2002.
- Шутов И. В., Маслаков Е. Л., Маркова И. Л., Полянский Е. В. Лесные плантации (ускоренное выращивание ели и сосны). — М.: Лесная промышленность, 1984.
- Chertov O. G., Komarov A. S., Nadporozhskaya M. A., Bykhovets S. S., Zudin S. L. ROMUL — a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modelling // Ecological Modelling. — 2001. — Vol. 138. — P. 289–308. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00409-9.
- Karjalainen T., Spiecker H., Laroussinie O. (eds.) Causes and consequences of accelerated tree growth in Europe. Proceedings of the International Seminar held in Nancy, France, 14–16 May 1998. — EFI Proceedings. — No. 27. — 1999.
- Komarov A. S., Chertov O. G., Zudin S. L., Nadporozhskaya M. A., Mikhailov A. V., Bykhovets S. S., Zudina E. V., Zoubkova E. V. EFIMOD 2 — a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecological Modelling. — 2003. — Vol. 70. — P. 373–392. doi: 10.1016/S0304-3800(03)00240-0.
- Liesebach M., von Wuechlich G., Muhs H. J. Aspen for short-rotation coppice plantations on agricultural sites in Germany: Effects of spacing and rotation time on growth and biomass production of

- aspen progenies // *Forest Ecology & Management*. — 1999. — Vol. 121. — P. 25–39. doi: 10.1016/S0378-1127(98)00554-4.
- Palosuo T., Peltoniemi M., Mikhailov A., Komarov A., Faubert P., Thürig E., Lindner M.* Projecting effects of intensified biomass extraction with alternative modelling approaches // *Forest Ecology and Management*. — 2008. — Vol. 255. — P. 1423–1433. doi: 10.1016/j.foreco.2007.10.057
- Shanin V. N., Komarov A. S., Bykhovets S. S.* Simulation modelling for sustainable forest management: a case-study // *Procedia Environmental Sciences*. — 2012. — Vol. 13. — P. 535–549.
- Shestibratov K., Lebedev V., Podrezov A., Salmova M.* Transgenic aspen and birch trees for Russian plantation forests // *BMC Proceedings*. — 2011. — Vol. 5, Suppl. 7. — P. 124. doi: 10.1186/1753-6561-5-S7-P124.