

УДК 630*562.2:631.841.7

РЕАКЦИЯ СРЕДНЕВОЗРАСТНЫХ СОСНЯКОВ КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ НА ВНЕСЕНИЕ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ И ИЗРЕЖИВАНИЕ

А. А. Онучин, Д. С. Собачкин, Р. С. Собачкин, А. Е. Петренко, В. В. Иванов

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28*

E-mail: onuchin@ksc.krasn.ru, dens@ksc.krasn.ru, romans@ksc.krasn.ru, alcorsci@bk.ru,
viktor_ivanov@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 09.11.2021 г.

На основе анализа динамики прироста древесины в средневозрастных сосняках Красноярской лесостепи различной структуры, сформированных посредством рубок ухода разной интенсивности и внесения различных доз минеральных удобрений (карбамид, 46 % действующего вещества), установлены закономерности изменения текущего ежегодного прироста. Предложена модель, позволяющая оценивать тенденции изменения прироста с возрастом и густотой насаждений, продуцирующих как с применением удобрений, так и без них. Приведены фактические данные, свидетельствующие о том, что в условиях Красноярской лесостепи за счет внесения удобрений текущий ежегодный прирост в сосновых насаждениях может быть увеличен на 1.2–6.8 м³/га по сравнению с контролем. Выявлены различия в реакции насаждений на удобрение в первые 5 лет и последующие 3 года. Установлено, что текущий ежегодный прирост существенно возрастает с 6-го года после внесения удобрений. Установлены густотно-возрастные оптимумы продуктивности сосновых древостоев, обеспечивающие кратное увеличение прироста управляемыми насаждениями по сравнению с контролем. Полученные знания представляют теоретическую основу реализации модели интенсивного использования и воспроизводства лесов в лучших лесорастительных условиях и будут полезны при создании карбоновых ферм, основное назначение которых – снижение углеродного следа промышленных предприятий, а также транспортных компаний и животноводческих комплексов.

Ключевые слова: рубки ухода, внесение удобрений, прирост, отпад, густота, запас стволовой древесины, лесоклиматические проекты, карбоновые фермы.

DOI: 10.15372/SJFS20220302

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения продуктивности насаждений становится все более актуальной по мере осознания того, что экстенсивная модель развития лесной отрасли России приводит к негативным изменениям в структуре лесного фонда и дефициту качественного сырья, востребованного предприятиями лесного комплекса (Онучин и др., 2018). При существующей системе ведения лесного хозяйства все более отчетливо обостряется дефицит качественной древесины, пользующейся спросом на рынке. Экономически и экологически доступных высокопродуктивных лесов пионерного освоения становится все меньше, поэтому возникает не-

обходимость организации процесса выращивания востребованной древесины с использованием специальных технологий, что обуславливает переход лесного хозяйства к модели интенсивного использования и воспроизводства лесов, подразумевающей и плантационное лесовыращивание (Шутов и др., 2007).

Прирост – важнейшая таксационная характеристика древостоев, которая характеризует их продуктивность и ресурсное значение. Увеличение этого показателя в результате хозяйственных мероприятий может служить мерилем обоснованности вложения сил и средств в повышение продуктивности лесов и в сокращение сроков выращивания. Текущий прирост зависит от целого комплекса экзогенных и эндогенных факто-

ров и их сочетаний, включая почвенно-климатические и погодные условия, фитоценологическую структуру насаждений, воздействие внешних природных и антропогенных факторов, возраст и наследственность. Понимание механизмов взаимообусловленности и синэфектов воздействия этих факторов на прирост дает лесоведам возможность принимать обоснованные решения в части управления процессами роста насаждений посредством рубок ухода, лесомелиоративных мероприятий и т. д. с целью получения желательного эффекта.

Одним из способов повышения биологической продуктивности лесных насаждений является применение минеральных удобрений. Информация об отклике древесных ценозов на различные дозы минеральных удобрений важна для повышения их продуктивности, особенно в контексте реализации модели интенсивного использования и воспроизводства лесов.

С учетом того что парниковая теория глобальных климатических изменений доминирует в научных и общественных кругах, большое внимание уделяется изучению основных механизмов, регулирующих процессы накопления и эмиссии углерода экосистемами. Наряду с решением традиционных для лесного хозяйства проблем, связанных с повышением продуктивности лесов и организацией системы устойчивого управления лесами, актуальной становится задача реализации так называемых лесоклиматических проектов, которые призваны увеличить депонирование углерода лесами и способствовать смягчению процессов глобального потепления. Снижения концентрации парниковых газов в атмосфере можно достичь за счет сокращения выбросов либо увеличением их поглощения наземными экосистемами. Считается, что леса обеспечивают практически весь сток углерода в растительные экосистемы (Pan et al., 2011; Швиденко, Щепаченко, 2014; Le Quere et al., 2015), соответственно они должны рассматриваться как ключевой фактор стабилизации климата нашей планеты и устойчивого функционирования биосферы. Очевидно, что результаты, полученные при решении каждой из этих задач, могут гармонично сочетаться и взаимно дополнять друг друга.

Целью описанного в данной статье эксперимента была оценка реакции средневозрастных сосновых насаждений на внесение азотных удобрений и проведение рубок ухода различной интенсивности в условиях Красноярской лесостепи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований реакции на азотные удобрения стали высокоплотные средневозрастные сосновые насаждения I класса бонитета, произрастающие в Красноярской лесостепи (экспериментальное хозяйство «Погорельский бор»). Эксперимент с внесением различных доз удобрений (карбамид, 46 % действующего вещества – д.в.) был заложен в 2010 г., во второй половине вегетационного периода: на четырех пробных площадях (0.15 га) вносилось соответственно 100, 200, 300 и 400 кг д.в./га. На пятой пробной площади (0.3 га) удобрения не применялись, она служила в качестве контроля. Удобрения равномерно разбрасывались ручным способом по поверхности без заделки в почву. Почвенные условия и напочвенный покров подробно рассмотрены О. А. Шапченковой с соавт. (2015).

Исследуемые насаждения имели близкие таксационные показатели (табл. 1).

Их густота колебалась от 2.64 до 2.9 тыс. шт./га, сумма площадей сечений стволов – от 48.87 до 54.36 м²/га, запас стволовой древесины – от 423 до 481 м³/га, средний диаметр – от 15.3 до 15.9 см, а средняя высота – от 18.3 до 18.5 м.

На каждой пробной площади проведен сплошной пересчет деревьев с замером диаметров на высоте 1.3 м по общепринятым методикам (Побединский, 1966; Моисеев, 1971). Для определения основных средних таксационных показателей древостоев подбирались модельные деревья, по 25–30 экз. исходя из принципов равномерно-ступенчатой представленности, с замером диаметра и высоты у каждой модели. Эти данные использовались для построения зависимостей высоты от диаметров. После внесения удобрений по тем же методикам в 2015 и 2018 гг. проводились повторные измерения с замерами модельных деревьев, на основе которых рассчитывались текущие ежегодные приросты стволовой древесины и отпад.

Объектами исследований влияния рубок ухода на структуру и продуктивность древостоев служили чистые по составу средневозрастные сосновые насаждения, сформированные на вырубке 1965 г., типичные для сосновых боров Красноярской лесостепи. В 2011 г. заложены две постоянные пробные площади (пп) в сосняке зеленомошном I класса бонитета.

На пп 0.15 га произрастало более 300 деревьев, что обеспечило репрезентативность ре-

Таблица 1. Таксационные показатели сосновых древостоев с внесенными удобрениями

Внесенные удобрения, кг д.в./га	Возраст, лет	Густота, шт./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Сумма поперечных сечений стволов, м ² /га	Полнота	Запас	Текущий
							стволовой древесины	ежегодный прирост
							м ³ /га	
<i>2010 г.</i>								
Контроль	52	2640	15.4 ± 0.2	18.4 ± 0.1	48.87	1.3	423	–
100	52	2733	15.9 ± 0.3	18.3 ± 0.2	54.36	1.5	481	–
200	52	2907	15.3 ± 0.3	18.4 ± 0.2	53.24	1.4	461	–
300	52	2773	15.4 ± 0.3	18.3 ± 0.2	51.83	1.4	449	–
400	52	2827	15.5 ± 0.3	18.5 ± 0.2	53.18	1.4	462	–
<i>2015 г.</i>								
Контроль	57	2353	17.0 ± 0.2	19.4 ± 0.1	53.54	1.4	482	15.1
100	57	2253	18.1 ± 0.4	19.8 ± 0.1	58.12	1.5	535	15.4
200	57	2480	16.9 ± 0.3	19.3 ± 0.1	55.57	1.5	498	10.4
300	57	2573	16.7 ± 0.3	19.2 ± 0.1	56.17	1.5	501	12.4
400	57	2480	17.1 ± 0.3	19.4 ± 0.1	56.86	1.5	511	12.6
<i>2018 г.</i>								
Контроль	60	2160	18.1 ± 0.2	20.6 ± 0.1	55.73	1.4	512	14.0
100	60	2053	19.5 ± 0.4	21.0 ± 0.1	61.12	1.5	575	16.5
200	60	2187	18.4 ± 0.3	20.6 ± 0.1	57.94	1.5	533	17.2
300	60	2347	17.8 ± 0.3	20.4 ± 0.1	58.18	1.5	531	15.4
400	60	2200	18.5 ± 0.3	20.6 ± 0.1	58.97	1.5	544	15.0

Таблица 2. Таксационные показатели сосновых древостоев, пройденных рубками ухода различной интенсивности

Номер пп	Возраст, лет	Густота, шт./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Сумма поперечных сечений стволов, м ² /га	Полнота	Запас	Текущий
							стволовой древесины	ежегодный прирост
							м ³ /га	
1	37	2727	13.2	17.6	37.5	1.1	308	13.3
	47	2420	15.8	19.0	47.4	1.4	415	14.5
	51	1280	18.0	19.7	32.5	1.0	293	17.6
	55	1247	20.3	21.0	40.4	1.0	396	21.9
2	37	4020	12.4	17.1	48.2	1.5	388	10.2
	47	2073	17.1	19.6	50.5	1.5	456	13.7

зультатов. К 37-летнему возрасту насаждения обладали высокими полнотой и густотой и характеризовались значительной дифференциацией деревьев по диаметру. Рубки ухода (прочистки) проводились по низовому методу интенсивностью 43–55 % по числу стволов, густота после проведения рубок составила 2.4–2.7 тыс. шт./га. В возрасте 51 год на пп 1 проведена рубка ухода (прореживание) интенсивностью 47 % по числу стволов (табл. 2).

В качестве контроля служила та же пробная площадь, что и при внесении удобрений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ влияния удобрений на рост средневозрастных сосновых высокополнотных древостоев показал, что за первые 5 лет после начала эксперимента не выявлено ожидаемого влияния удобрений на средний текущий прирост. Наибольший прирост отмечался на контроле и в варианте опыта с наименьшей дозой внесения удобрений, однако в последующие 3 года такая реакция стала проявляться (рис. 1). Вероятно, это обусловлено определенным лагом до-

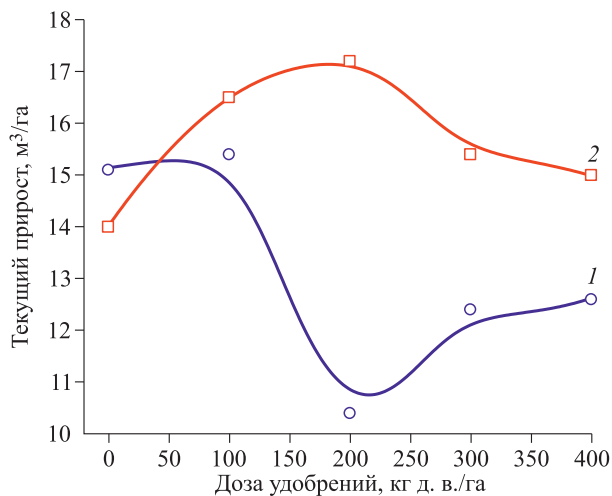


Рис. 1. Средний годичный текущий прирост в первые 5 лет наблюдений – с 2011 по 2015 гг. (1) и в последующие 3 года – с 2016 по 2018 гг. (2).

ступности удобрений относительно сроков их внесения. Такое запаздывание отмечалось и в результатах ранее проведенных исследований (Победов, Волчков, 1975; Бузыкин и др., 1996), свидетельствующих о том, что в первые годы после внесения, минеральные удобрения потребляются мхами, живым напочвенным покровом, аккумулируются в подстилке и почве, поскольку труднодоступны для деревьев. Только по истечению ряда лет, по мере достижения элементами питания корнеобитаемого слоя крупных деревьев, они становятся доступными и способствуют увеличению их прироста.

Запаздывание реакции прироста на внесение удобрений отмечалось также и в заболоченных сосняках Европейского Севера России, где после осушения проводились комплексные уходы (Мариничев, 2009).

Известно, что уже в первый год после внесения минеральных удобрений содержание азота во мхах по сравнению с контролем возрастает в 2–2.5 раза. Наибольшее накопление азота в живом покрове происходит на 2-й год после подкормки, в последующем количество его снижается. Интенсивно поглощенный в первые 2 года и биологически закрепленный азот в дальнейшем постепенно возвращается в почву. Живой напочвенный покров, особенно в первые годы после подкормки, может рассматриваться как главный конкурент древостою в отношении поглощения элементов питания, что и подтвердили анализы тонких корней сосны (*Pinus L.*) на содержание макроэлементов (Бузыкин и др., 1996).

В течение первых 5 лет после начала эксперимента наибольший прирост отмечен на участ-

ке с дозой удобрения 100 кг д.в./га, где он составил 15.4 м³/га, наименьший – 10.4 м³/га при дозе удобрения 200 кг д.в./га (табл. 1, рис. 1). На участках с внесением удобрений в количестве 300 и 400 кг д.в./га прирост составил соответственно 12.4 и 12.6 м³/га. Таким образом, очевидно, что в первые годы эффект влияния удобрений на прирост не отмечен, а наблюдаемые различия в приросте, вероятно, обусловлены фитоценотическими особенностями насаждений.

С 6-го года эксперимента наибольший текущий ежегодный прирост стволовой древесины отмечается на участке с дозой удобрения 200 кг д.в./га, где он составил 17.2 м³/га, наименьший – 14.0 м³/га на контрольном участке. В то же время на участках с внесением удобрений в количестве 100, 300 и 400 кг д.в./га прирост составил соответственно 16.5, 15.4 и 15.0 м³/га (табл. 1, рис. 1). Полученные результаты не позволяют утверждать о наличии очевидной количественной связи прироста с дозой внесенных удобрений, тем не менее с начала действия удобрений во всех вариантах с внесением удобрений наблюдается увеличение текущего прироста по сравнению с предыдущим периодом, за исключением контроля, где он уменьшился. Проявляющаяся в этом возрасте сильная конкуренция за ресурсы и недостаток самих ресурсов привели к снижению текущего прироста на контроле, что характерно также для высокопродуктивных плотных сосняков, произрастающих в различных регионах (Швиденко и др., 2008). На участках с внесением удобрения, напротив, во всех вариантах отмечается увеличение текущего прироста (табл. 1, рис. 1), что свидетельствует об улучшении условий минерального питания деревьев. При этом максимальные значения как собственно текущего прироста, так и его увеличения по сравнению с предыдущим периодом отмечаются в варианте с дозой удобрения 200 кг д.в./га. Вероятно, реакция прироста на удобрение начинает проявляться уже при дозах менее 100 кг д.в./га, а с увеличением дозы свыше 200 кг д.в./га соответствующего повышения прироста в наших экспериментах не наблюдается (рис. 1).

На основе полученных данных можно сделать вывод лишь о том, что внесение удобрений в различных дозах способствует увеличению прироста. При оценке влияния доз вносимых удобрений на изменение прироста зависимость доза–эффект должна, по-видимому, иметь сигмоидную форму, как и в большинстве случаев, связанных с оценкой эффекта влияния некоторого лиганда на биологический объект. Однако

по экспериментальным данным в силу специфики выборки говорить об этом не представляется возможным.

Многие исследователи при изучении реакции прироста сосняков на внесение удобрений применяли дозы 120–200 кг д.в./га (Степаненко, 1993; Федорец и др., 2018; Valinger et al., 2019). При этом при многократном внесении удобрений некоторые из них отмечали значимые эффекты после первых приемов и снижение прироста после серии внесений (Jacobson, Pettersson, 2010).

Полученные результаты позволяют констатировать, что в Красноярской лесостепи за счет применения азотных удобрений можно увеличить прирост средневозрастных сосняков на 1.2–6.8 м³/(га · год) по сравнению с контролем. Актуальной задачей оценки эффективности применения удобрений для повышения биологической продуктивности сосняков является определение продолжительности действия удобрений. Необходимо отметить, что в условиях средней и южной подзон тайги в сосняках Европейского Севера России, где лесорастительные условия уступают таковым по сравнению с лесостепью, дополнительный прирост за счет применения удобрений колеблется в пределах 2.8–4.7 м³/га и в 1.5–2 раза превышает естественный средний прирост древесины в исследуемых типах леса для условий средней и южной подзон тайги (Мариничев, 2009).

Результаты долгосрочного эксперимента в среднетаежной подзоне Карелии по применению минеральных удобрений в культурах сосны выявили положительное их влияния на запас стволовой древесины. Ежегодное применение удобрений с 6-летнего возраста в дозе 120 кг д.в./га в течение 30 лет обеспечило к 53-летнему возрасту культур повышение запаса на 35–229 м³/га в зависимости от вида комбинации удобрений. При этом наибольшей эффективностью отличались азотные удобрения, а максимальный эффект обеспечивало сочетание азотных удобрений с фосфорными (Федорец и др., 2018).

В зарубежной практике в условиях бореальных лесов Финноскандии в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) достаточно широко используется комплексный подход, заключающийся в сочетании рубок ухода и внесения удобрений (N, а также P, K, Ca, Mg). Дозировка удобрений, как правило, составляет 150 кг д.в./га (Valinger et al., 2019), но внесение может осуществляться в несколько приемов с разной периодичностью (2–10 лет) и в итоге суммарная внесенная доза может составлять до 1650 кг д.в./га (Jacobson, Pettersson, 2010). При

этом разнообразии вариантов эффектов от этого достаточно велико – от значимого увеличения прироста в первые годы после внесения до небольшого его снижения после серии внесений удобрения по сравнению с контролем (Pettersson, Högbom, 2004). Также возможно увеличение сбежистости стволов после комплексного ухода (Karlsson, 2006). Исследователи отмечают, что по сравнению с однократным внесением удобрений, рубки ухода имеют более длительный эффект.

Известно, что наряду с дозой вносимых удобрений на прирост оказывают влияние и фитоценоотические факторы. Поскольку в опыте с внесением удобрений все древостои были близки по таксационным показателям, выявить влияние структуры древостоев на изменение прироста в комплексе с дозой вносимых удобрений оказалось проблематичным. В этой связи в анализ были вовлечены результаты экспериментов с проведением рубок ухода различной интенсивности в средневозрастных сосняках Красноярской лесостепи, продуцирующих без применения удобрений (табл. 2). Как свидетельствуют полученные данные, рубки ухода в целом способствуют увеличению текущего прироста древостоев, который зависит как от возраста насаждений, так и от интенсивности изреживания. В насаждениях, не пройденных рубками, в зависимости от возраста и густоты текущий прирост варьирует от 10.2 до 15.1 м³/(га · год), тогда как в насаждениях, пройденных рубками ухода различной интенсивности, в том числе неоднократными, достигает 13.7–21.9 м³/(га · год), (табл. 1, 2).

После обработки методом множественного регрессионного анализа всей совокупности данных, в которую были включены результаты экспериментов с внесением различных доз удобрений, а также полученные при проведении рубок ухода различной интенсивности, выявлена зависимость текущего прироста от густоты, возраста насаждений и дозы вносимых удобрений, которая выражается следующим уравнением:

$$Pr = -66.7 + 1.7 \times A + 0.57 \times A \times N - 0.012 \times A^2 \times N + 0.12 \times \ln(D + 2) \times N, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.85; \sigma = 1.39; F = 17.34,$$

где Pr – текущий прирост, м³/(га · год); N – текущая густота, тыс. шт./га; A – возраст насаждений, лет; D – доза внесенных удобрений, кг/га; R^2 – коэффициент множественной детерминации; σ – стандартная ошибка уравнения, шт./га; F – критерий Фишера.

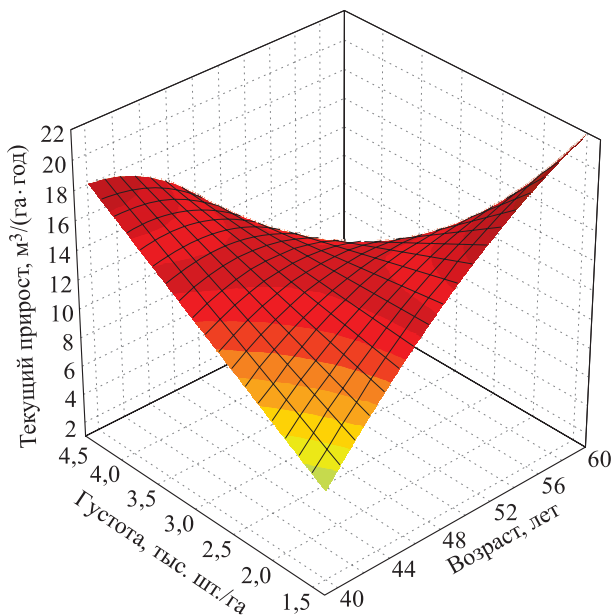


Рис. 2. Текущий прирост средневозрастных сосняков, густота которых регулировалась рубками ухода различной интенсивности без внесения удобрений.

Следует отметить, что попытка использования в качестве независимой переменной интенсивности изреживания не увенчалась успехом. Вероятно, это обусловлено определенными различиями исходной густоты в различных вариантах опыта. В то же время, как следует из результатов моделирования, актуальная густота насаждений хорошо отражает показатели текущего прироста.

Анализ графической формы модели (1) позволяет констатировать следующее. В высокополнотных древостоях, густота которых превышает 4 тыс. шт./га, происходит снижение текущего прироста древесины с возрастом, в то же время в насаждениях, густота которых не превышает 3 тыс. шт./га, он возрастает (рис. 2).

Полученная модель может служить инструментом определения густотно-возрастных оптимумов продуктивности, которые должны учитываться в первую очередь при ведении лесного хозяйства на основе модели интенсивного использования и воспроизводства лесов в лучших лесорастительных условиях (Онучин, Данилова, 2021). Период кульминации текущего прироста в насаждениях различной начальной густоты наступает в разные сроки. В высокополнотных насаждениях максимум прироста наступает раньше, чем в насаждениях редкостойных, однако раньше там наблюдается и резкое его снижение, поэтому регулирование густоты с целью повышения продуктивности древостоев следует на-

чинать до кульминации текущего прироста, что обеспечит его поддержание и депонирование углерода на максимально высоком уровне. Как показывает анализ динамики прироста средневозрастных сосняков, максимальные его значения наблюдаются в насаждениях, густота которых находится в диапазоне от 1.5 до 2 тыс. шт./га. С ее увеличением прирост резко снижается, что обусловлено обострением конкурентных отношений за ресурсы среды (рис. 2). В то же время в спелых сосняках Красноярской лесостепи, пройденных выборочными рубками различной интенсивности, максимальный текущий прирост (от 6 до 9 м³/га) наблюдается в древостоях, финальная густота которых находится в пределах 450–600 шт./га (Иванов, Семенякин, 2021). Увеличение или снижение густоты насаждений, выходящее за отмеченные пределы оптимума, в спелом возрасте ведет к потере прироста древесины. В 40-летних древостоях с позиций получения максимального прироста будет вероятно оптимальная густота около 4 тыс. шт./га, а в 60-летних – не более 1.5 тыс. шт./га (рис. 2).

Одна из основных задач лесоводства – повышение продуктивности лесов. Следовательно, задача увеличения текущего прироста посредством лесохозяйственных мероприятий – весьма актуальна и будет определяться всем комплексом факторов и условий произрастания лесов, включая возраст, породный состав, структуру фитоценозов, специфику лесорастительных условий и т. д. Эти факторы определяют доступный ресурс среды (Борисов, 2013), который может реализоваться в соответствующем приросте древесины при соответствующем жизненном состоянии деревьев – носителей этого прироста (Нагимов, 2000).

Результаты модельных экспериментов свидетельствуют о том, что за счет применения удобрений в высокополнотных древостоях их прирост увеличивается на 1.8 м³/га (с 13.0 до 14.8 м³/га), а в низкополнотных – всего на 0.5 м³/га (с 16.5 до 17.0 м³/га). В то же время, его фактическое увеличение за счет применения различных доз удобрений, как отмечалось выше, возрастает от 1.2 до 6.8 м³/га. На основе полученной модели можно сделать вывод, что применение удобрений несколько ослабляет эффект подавления прироста за счет обострения конкурентных отношений в высокополнотных средневозрастных сосняках (рис. 3).

Так, в насаждениях, растущих без применения удобрений, с увеличением их густоты с 1.5 до 4.5 тыс. шт./га прирост снижается с 16.5 до

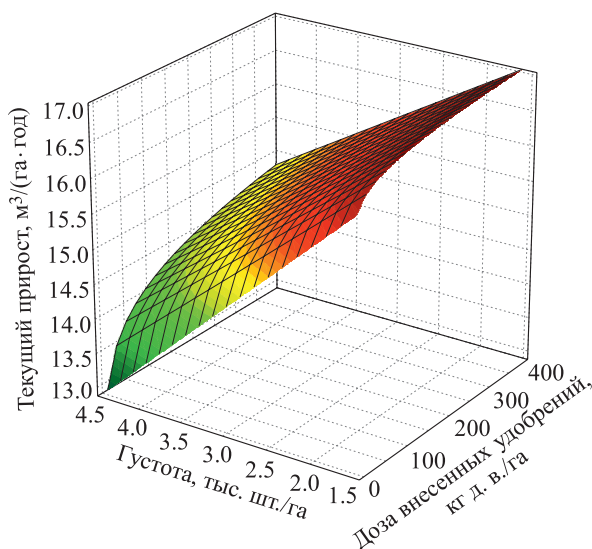


Рис. 3. Влияние удобрений на текущий прирост 55-летних сосняков различной густоты.

13 м³/га (на 3.5 м³/га), тогда как с применением удобрений – с 17 до 14.8 м³/га (всего на 2.2 м³/га).

Очевидно, что регулярным и своевременным разреживанием древостоя, начиная от молодняка до спелости, можно существенно увеличить средний прирост насаждений и повысить продуктивность древостоев на I–II класса бонитета (Рогозин, Разин, 2015).

С полной уверенностью можно утверждать, что лесоводственный эффект от рубок ухода значительно выше, чем от применения удобрений. При этом необходимо понимать, что комбинированные ухода могут быть эффективнее отдельно взятых лесохозяйственных мероприятий. В этой связи следует продолжать начатые эксперименты, расширив их посредством увеличения как числа повторностей, так и за счет включения дополнительных комбинаций факторов, влияющих на продуктивность насаждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В средневозрастных сосновых древостоях Красноярской лесостепи положительное влияние азотных удобрений на прирост стволовой древесины начинает проявляться по истечению 5 лет после внесения. Запаздывание отклика древостоя на применение удобрений относительно сроков их внесения обусловлено первоначальным потреблением элементов питания живым напочвенным покровом и аккумуляцией в подстилке. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что за счет применения азот-

ных удобрений текущий ежегодный прирост можно повысить на 1.2–6.8 м³/га по сравнению с контролем, однако полученные результаты не позволяют утверждать о наличии четкой зависимости: доза–эффект.

Рубки ухода в целом способствуют увеличению текущего прироста древостоев, а их эффективность будет определяться финальной плотностью насаждений в том или ином возрасте. Получена модель изменения текущего прироста средневозрастных сосняков в зависимости от возраста, плотности древостоев и дозы вносимых удобрений, которая может служить инструментом определения густотно-возрастных оптимумов продуктивности насаждений при ведении лесного хозяйства на основе модели интенсивного использования и воспроизводства лесов в лучших лесорастительных условиях. Задача определения таких оптимумов продуктивности актуальной остается для всего периода жизни насаждений и попытки этого предпринимаются (Иванов, Семенякин, 2021; Онучин и др., 2022).

Очевидно, что лесоводственный эффект от рубок ухода значительно выше, чем от применения удобрений. При этом необходимо понимать, что комбинированные ухода могут быть эффективнее отдельно взятых лесохозяйственных мероприятий. В этой связи следует расширить эксперименты посредством увеличения числа повторностей и за счет включения дополнительных комбинаций факторов, влияющих на продуктивность насаждений.

Полученные результаты могут служить основой реализации проектов лесопользования в целях решения традиционных задач лесного хозяйства, связанных с повышением продуктивности лесов, и увеличения секвестра углерода на землях лесного фонда и на бывших сельскохозяйственных угодьях. В реализации такого рода проектов должны быть заинтересованы и промышленные предприятия, продукция которых поступает на международный рынок, где к ней предъявляются требования по соблюдению принципа углеродной нейтральности.

Исследование выполнено в рамках проекта «Развитие научно-образовательного Центра мониторинга климатически активных веществ (Углерод в экосистемах: мониторинг) в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисов А. Н. Метод оценки распределения ресурса между деревьями в древостое // Состояние лесов и актуальные проблемы лесопользования: материалы Всерос. конф. с междунар. участ. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2013. С. 293–296.
- Бузыкин А. И., Прокушкин С. Г., Пшеничникова Л. С. Реакция сосняков на изменение условий азотного питания // Лесоведение. 1996. № 3. С. 3–15.
- Иванов В. В., Семенякин Д. А. Влияние выборочных рубок на продуктивность сосновых древостоев в условиях Красноярской лесостепи // Сиб. лесн. журн. 2021. № 1. С. 58–67.
- Мариничев Е. А. Внесение минеральных удобрений на осушаемых торфяных почвах // Лесные ресурсы таежной зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участ. Петрозаводск, 2009. С. 201–202.
- Моисеев В. С. Таксация молодняков. Л.: ЛЛТА, 1971. 344 с.
- Нагимов З. Я. Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.03. Екатеринбург: УГЛТА, 2000. 40 с.
- Онучин А. А., Данилова И. В. Технологии формирования карбоновых полигонов с высокими углерод депонирующими функциями // Наука и технологии. 2021. № 1. С. 50–52.
- Онучин А. А., Петренко А. Е., Собачкин Д. С., Собачкин Р. С. Реакция сосновых молодняков Красноярской лесостепи на изреживание и внесение азотных удобрений // Сиб. лесн. журн. 2022. № 3. С. 6–14.
- Онучин А. А., Соколов В. А., Рыбаков Г. К. К вопросу эффективного использования и воспроизводства лесов России // Pulp & Paper Industry. 2018. № 1/5. С. 6–10.
- Побединский А. В. Изучение лесовосстановительных процессов. М.: Наука, 1966. 60 с.
- Победов В. С., Волчков Е. В. Влияние азотных удобрений на величину текущего прироста сосновых насаждений // Лесовед. и лесн. хоз-во. Вып. 9. Минск: Вышэйш. шк., 1975. С. 140–149.
- Рогозин М. В., Разин Г. С. Развитие древостоев. Модели, законы, гипотезы. Пермь: Перм. гос. науч.-иссл. ун-т, 2015. 277 с.
- Степаненко И. И. Влияние минеральных удобрений на строение и формирование древесины сосны в связи с типами леса: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. М.: МГУЛ, 1993. 24 с.
- Федорец Н. Г., Соколов А. И., Солодовников А. Н. Последствие минеральных удобрений в посевах сосны в долгосрочном эксперименте в Карелии // Лесоведение. 2018. № 5. С. 372–380.
- Шапченкова О. А., Ковалева Н. М., Иванов В. В., Собачкин Р. С., Собачкин Д. С., Петренко А. Е. Влияние азотных удобрений на свойства подстилки и живой напочвенный покров в сосновых насаждениях Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2015. № 1. С. 44–51.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 69–92.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильсон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Изд. 2-е, доп. М.: Междунар. ин-т приклад. систем. анализа, 2008. 886 с.
- Шутов И. В., Маркова И. А., Омеляненко А. Я., Постников М. В., Товкач Л. Н., Власов Р. В., Подшиваев Е. Е., Сергиенко В. Г. Плантационное лесоводство. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2007. 366 с.
- Jacobson S., Pettersson F. An assessment of different fertilization regimes in three boreal coniferous stands // Silva Fenn. 2010. V. 44. Iss. 5. P. 815–827.
- Le Quere C., Moriarty R., Andrew R. M., Peters G. P., Ciais P., Friedlingstein P., Jones S. D., Sitch S., Tans P., Arneeth A., Boden T. A., Bopp L., Bozec Y., Canadell J. G., Chevallier F., Cosca C. E., Harris I., Hoppema M., Houghton R. A., House J. I., Jain A. K., Johannessen T., Kato E., Keeling R. F., Kitidis V., Goldewijk K. K., Koven C., Landa C. S., Landschützer P., Lenton A., Lima I. D., Marland G., Mathis J. T., Metz N., Nojiri Y., Olsen A., Ono T., Peters W., Pfeil B., Poulter B., Raupach M. R., Regnier P., Rödenbeck C., Saito S., Salisbury J. E., Schuster U., Schwinger J., Séférian R., Segsneider J., Steinhoff T., Stocker B. D., Sutton A. J., Takahashi Y.-P., Wanninkhof R., Wiltshire A., Zeng N. Global carbon budget 2014 // Earth Syst. Sci. Data. 2015. V. 7. N. 1. P. 47–85.
- Pan Y., Birdsey R. A., Fang J., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W. A., Phillips O. L., Shvidenko A., Lewis S. L., Canadell J. G., Ciais P., Jackson R. B., Pacala S. W., McGuire A. D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests // Science. 2011. V. 333. N. 6045. P. 988–993.
- Pettersson F., Högbom L. Long-term growth effects following forest nitrogen fertilization in *Pinus sylvestris* and *Picea abies* stands in Sweden // Scand. J. For. Res. 2004. V. 19. Iss. 4. P. 339–347.
- Karlsson C. Fertilization and release cutting increase seed production and stem diameter growth in *Pinus sylvestris* seed trees // Scand. J. For. Res. 2006. V. 21. Iss. 4. P. 317–326.
- Valinger E., Sjögren H., Nord G., Cedergren J. Effects on stem growth of Scots pine 33 years after thinning and/or fertilization in northern Sweden // Scand. J. For. Res. 2019. V. 34. Iss. 1. P. 33–38.

REACTION OF MIDDLE-AGED PINE STANDS IN KRASNOYARSK FOREST-STEPPE TO NITROGEN FERTILIZERS AND THINNING

A. A. Onuchin, D. S. Sobachkin, R. S. Sobachkin, A. E. Petrenko, V. V. Ivanov

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: onuchin@ksc.krasn.ru, dens@ksc.krasn.ru, romans@ksc.krasn.ru, alcorsci@bk.ru,
viktor_ivanov@ksc.krasn.ru

Based on the analysis of the wood increment dynamics in the middle-aged pine forests of the Krasnoyarsk forest-steppe of various structure, formed through thinning of different intensities and the introduction of various doses of mineral fertilizers (carbamide, 46 % of the active substance), the regularities of changes in the current annual increment were established. A model allowing assessing the trends in increment with age and density of stands growing both without and with the use of fertilizers has been proposed. Data are presented indicating that in the conditions of the Krasnoyarsk forest-steppe, due to the application of fertilizers, the current annual increment in pine plantations can be increased by 1.2–6.8 m³/ha compared to the reference site. Differences in the response of stands to fertilization in the first five years and the next three years were revealed it has been found that the current annual increment increases significantly starting from the sixth year after fertilization. The density-age optima of the productivity of pine stands, providing a multiple increase in the increment of managed stands as compared to the reference site were established. The obtained knowledge is the theoretical basis for the implementation of a model of intensive use and reproduction of forests in the best forest growing conditions, and will also be useful in creating carbon farms, which main purpose is to reduce the carbon footprint of industrial enterprises.

Keywords: *thinning, fertilization, increment, mortality, density, stock of stem timber, forest-climate projects, carbon farms.*

How to cite: *Onuchin A. A., Sobachkin D. S., Sobachkin R. S., Petrenko A. E., Ivanov V. V. Reaction of middle-aged pine stands in Krasnoyarsk forest-steppe to nitrogen fertilizers and thinning // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 3. P. 15–23 (in Russian with English abstract).*