

Научная статья
УДК 630.181.7:630.231.332:630.174.7.754
EDN DSFQAM
DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.4.03

Влияние азотных удобрений на сезонный рост хвои сосны обыкновенной в условиях торфяно-болотных почв Севера России

Лилия Валерьевна Зарубина¹

доктор сельскохозяйственных наук

Сергей Сергеевич Макаров²

доктор сельскохозяйственных наук

Аннотация. Представлены результаты исследования особенностей сезонного роста и формирования ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в сфагновом типе леса в условиях северной тайги европейской части России после внесения азотного удобрения. Переувлажненность почвенного профиля и низкое содержание в нем элементов минерального питания приводят к ослаблению функциональной деятельности корневой системы сосны в сфагновых насаждениях, что влияет на рост и развитие надземной части древесных растений, обуславливает снижение запаса и продуктивности древостоя в целом. Азотные удобрения, вносимые в заболоченные сосняки, положительно воздействуют на годичный прирост побегов и хвои *P. sylvestris*. Результатом возрастания интенсивности и продолжительности роста хвои, ее функциональности является повышение жизнеспособности сосны и увеличение ее годичного прироста, а также продуктивности избыточно увлажненных сосновых древостоев. Установлено, что зависимость скорости роста хвои и физиологических процессов от погодных условий и уровня почвенно-грунтовых вод у сосны в заболоченных древостоях в полной мере сохраняется и при повышенном азотном питании. Основной прирост молодой хвои у *P. sylvestris* в сфагновых сосняках приходится на июль. Для получения наибольшего эффекта от применения азотного удобрения в заболоченных сосняках предварительно необходимо провести осушительные работы путем прокладки дренажных канав глубиной 50 см и с расстоянием между ними 30–50 м с последующим (через 2 года) внесением азота в дозе 180 кг/га.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, сосняк сфагновый, азотное удобрение, физиологические процессы, сезонный рост хвои, торфяно-болотные почвы.

Для цитирования: Зарубина Л.В., Макаров С.С. Влияние азотных удобрений на сезонный рост хвои сосны обыкновенной в условиях торфяно-болотных почв Севера России. – Текст : электронный // Лесохозяйственная информация. 2023. № 4. С. 29–40. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.4.03. <https://elibrary.ru/dsfqam>.

¹ Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина, профессор кафедры лесного хозяйства (Вологда, Российская Федерация), liliya270975@yandex.ru

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, заведующий кафедрой декоративного садоводства и газоноведения (Москва, Российская Федерация); Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, профессор кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов (Архангельск, Российская Федерация), makarov_serg44@mail.ru

Original article

EDN DSFQAM

DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.4.03

The Influence of Nitrogen Fertilizers on the Seasonal Growth of Scots Pine Needles in Peat-bog Soils of the North of Russia

Lilia V. Zarubina¹*Doctor of Agricultural Sciences***Sergey S. Makarov²***Doctor of Agricultural Sciences*

Abstract. The article presents the results of a study of the characteristics of seasonal growth and the formation of the assimilation apparatus in *P. sylvestris* in a sphagnum forest type in the northern taiga of the European part of Russia after the application of nitrogen fertilizer. Waterlogging of the soil profile and low content of mineral nutrition elements in sphagnum plantations lead to a decrease in the functional activity of the pine root system, which directly affects the growth and development of the aboveground part of woody plants, reducing the stock and productivity of the forest stand as a whole. Nitrogen fertilizers applied to swampy pine forests have a positive effect on the annual growth of shoots and needles of *P. sylvestris*. The result of an increase in the intensity and duration of needle growth and its functional activity is an increase in the viability of pine and an increase in its annual growth, an increase in the productivity of excessively moistened pine stands. It has been established that the dependence of the growth rate of needles and physiological processes on weather conditions and the state of GWL in pine in swampy stands is fully preserved even with increased nitrogen nutrition. The main increase in young needles of *P. sylvestris* in sphagnum pine forests occurs in July. To obtain the greatest effect from the use of nitrogen fertilizer in waterlogged pine forests, first of all, it is necessary to carry out drainage work through shallow reclamation with a ditch depth of 50 cm and a distance between them of 30–50 m, followed – after 2 years – by applying nitrogen at a dose of 180 kg/ha.

Key words: Scots pine, sphagnum pine forest, trees, nitrogen fertilizer, physiological processes, seasonal growth of needles.

For citation: Zarubina L., Makarov S. The Influence of Nitrogen Fertilizers on the Seasonal Growth of Scots Pine Needles in Peat-bog Soils of the North of Russia. – Text : electronic // Forestry information. 2023. № 4. P. 29–40. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.4.03. <https://elibrary.ru/dsfqam>.

¹ Vologda State Dairy Academy named after N.V. Vereshchagin, Professor of the Department of Forestry (Vologda, Russian Federation), liliya270975@yandex.ru

² Russian Timiryazev State Agrarian University, Head of Decorative Gardening and Lawn Science Chair (Moscow, Russian Federation); Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Professor of the Landscape Architecture and Artificial Forests Chair (Arkhangelsk, Russian Federation), makarov_serg44@mail.ru

Введение

К основным факторам, определяющим жизненное состояние, продолжительность роста и работу ассимиляционного аппарата у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в сфагновых типах леса, относятся погодные условия и условия корневого питания. Переувлажненность почвенного профиля и низкое содержание элементов минерального питания в почве приводят к ограничению функциональности корневой системы сосны, что оказывает негативное влияние на рост и развитие надземной части растений, снижает запас и продуктивность древостоя в целом [1–17].

Установлено, что в сфагновых типах леса происходит увеличение линейного прироста *P. sylvestris* и ее отдельных органов как при применении азота, фосфора и калия по отдельности, так и при их совместном воздействии [3, 5, 12, 14, 18–20]. При этом ход сезонного роста и фотосинтез хвой деревьев *P. sylvestris* под влиянием удобрений в целом изучен слабо, практически не исследовалось и влияние минеральных удобрений на формирование ассимиляционного аппарата в сфагновых типах леса, особенно в условиях северной тайги.

Своеобразие почвенно-гидрологических условий, высокая заболоченность торфяных почв, неустойчивость уровня почвенно-грунтовых вод (УПГВ) и другие факторы обуславливают ряд особенностей сезонного роста на них древесных растений и их отдельных органов [14, 15, 17]. В связи с этим выявление закономерностей формирования ассимиляционного аппарата у сосны обыкновенной на заболоченных почвах под воздействием удобрений имеет практическое значение при разработке мероприятий, направленных на ускорение роста деревьев и повышение продуктивности древостоев.

Цель исследований – изучить особенности сезонного роста и формирования ассимиляционного аппарата у *P. sylvestris* в сфагновом типе леса после внесения азотного удобрения в условиях северной тайги европейской части России.

Объекты и методы исследований

Исследования проводили в Архангельской обл., в природно-климатических условиях Северо-таежного района европейской части Российской Федерации в 2017–2019 гг. Объектом исследований стал сосняк кустарничково-сфагновый 33-летнего возраста, сформировавшийся из подраста сосны после рубки материнского древостоя и занимающий значительную часть бывшего экспериментального участка академика И.С. Мелехова («Опытное поле»). Древостой относится к гидроморфному экологическому ряду лесов с избыточным увлажнением. В 1947 г. на данном участке был вручную вырыт осушительный канал, который в настоящее время захламлен упавшими деревьями, а движение воды в нем отсутствует. Состав древостоя – 10С, густота – 2,0 тыс. шт./га, средняя высота деревьев сосны – 1,6 м, средний диаметр – 4,0 см, полнота – 0,5, класс бонитета – V. Почва на участке – мощный торфяник верхового типа глубиной более 3 м, подстилаемый тяжелым моренным суглинком со значительной динамикой УПГВ в летний период и сложным мозаичным рельефом, где редкие небольшие мочажины перемежаются бугристыми участками, занятыми сосной обыкновенной, биогруппами багульника (*Ledum palustre* L.), кассандры (*Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench), подбела (*Andromeda polifolia* L.) и моховой растительностью.

Азотное удобрение в виде карбамида (содержание азота – 46 %), как наиболее концентрированное и легкоусвояемое растениями [21], в дозе 180 кг/га д.в. вносили в почву 05.06.2017 г. вручную на двух подготовленных опытных площадках размером 30 × 30 м. Считается, что для подкормки молодой сосны данная доза азота является наиболее эффективной и значительно повышает скорость фотосинтеза и передвижение ассимилятов в растении [7, 8, 12]. На опытных площадках удобряли только отдельные деревья из-за их небольшого размера и мозаичного рельефа. Согласно принятой в опыте дозе, на одно дерево требовался 1 кг технического удобрения (460 г д.в. азота). Контролем служила площадка без внесения удобрений. Для наблюдений за уровнем

почвенно-грунтовых вод на всех площадках были подготовлены по 2 смотровые скважины с установлением нулевых отметок (в соответствии с нивелировкой).

На опытных (N_{180}) и контрольной площадках подобрано по 10 типичных для всего участка наиболее жизнеспособных деревьев *P. sylvestris* I и II классов роста (по Г. Крафту), характеризующихся сходной величиной годового прироста осевых побегов за последние годы. С помощью штангенциркуля и линейки в конце вегетационного периода измеряли прирост в высоту отобранных модельных деревьев, а также определяли длину 5 хвоинок, взятых в срединной части кроны с юго-западной стороны в разные периоды, начиная от фенофазы появления хвои на молодом побеге до фенофазы окончания ее роста. В это же время выявляли влияние азотного удобрения и УПГВ на основные показатели энергетического метаболизма сосны. Интенсивность фотосинтеза определяли радиометрическим методом с помощью радиоуглеродной метки [22] при удельной радиоактивности газовой смеси в замкнутой системе 0,2 мБк/л. Интенсивность транспирации устанавливали методом быстрого взвешивания [23]. Дополнительно измеряли уровень почвенно-грунтовых вод. Статистическую обработку полученных данных выполняли с использованием общепринятых методик [24] и программного обеспечения Microsoft Office Excel 2016.

Результаты и обсуждение

В годы исследований (2017–2019 гг.) вегетационные периоды по показателям микроклимата были крайне неоднозначными. Так, вегетационный период 2017 г. характеризовался неустойчивой холодной и пасмурной погодой с обилием атмосферных осадков, низкими дневными и ночными температурами весной и в первой половине лета, поздним началом роста и развития растений. Редкие короткие теплые дни сменялись достаточно продолжительным периодом похолодания, иногда с выпадением снега и ночными заморозками. Температура воздуха

большую часть мая и в июне днем не превышала 5...14 °С, в ночные часы – 3...7 °С. Вследствие недостатка тепла и слабой испаряемости почва оттаивала медленно, в течение длительного периода оставаясь занятой верховодкой. Из-за постоянно плотной облачности освещенность была небольшая, что в совокупности с холодной погодой и частыми осадками не способствовало активному фотосинтезу у *P. sylvestris*. Согласно литературным источникам [13, 25–28], микроклиматические условия, которые сложились на опытном объекте в первой половине вегетационного периода, могли препятствовать нормальному росту *P. sylvestris* и ее отдельных органов. Вторая половина июля и август характеризовались небольшим количеством осадков и достаточно высокими дневными температурами (18...24 °С).

Влияние азота на рост 1-летней хвои сосны и интенсивность физиологических процессов 2-летней хвои в сосняке кустарничково-сфагновом в условиях северной тайги европейской части России в 2017–2019 гг. приведены в таблице.

В год внесения удобрений (2017 г.) у *P. sylvestris* наблюдалось самое позднее за весь период исследований набухание вегетативных почек. Первые признаки начала набухания и разрушения на них покровных чехликов были обнаружены только 9–10 июня, т.е. на 3 нед. позже, чем в обычные сроки для данного региона. В целом год характеризовался запоздалым началом вегетационного периода и роста побегов [12, 17, 19]. Появление молодой хвои и первые явные признаки начала ее активного морфогенеза наблюдались одновременно на контрольной и опытных площадках. К 1 июля длина молодой хвои в контроле и у опытных растений *P. sylvestris* составляла 5,1 мм (см. таблицу). В этот период дневная температура воздуха уже повысилась до 21,5 °С, температура в корнеобитаемом горизонте – до 13 °С, УПГВ опустился ниже 14,5 см от поверхности почвы. К 11 июля, периоду полного окончания роста осевых побегов, на контрольной площадке с естественным уровнем азота длина молодой хвои на главном побеге достигла 12,3 мм, на опытных площадках – 13,0 мм. Перед

ВЛИЯНИЕ АЗОТНОГО УДОБРЕНИЯ НА РОСТ 1-ЛЕТНЕЙ ХВОИ СОСНЫ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 2-ЛЕТНЕЙ ХВОИ В 2017–2019 ГГ.

ДАТА	УПГВ, см	t, °C	Хвоя 1-летняя				Прошлогодня (2-летняя) хвоя			
			КОНТРОЛЬ		ОПЫТ*		Транспирация, мг H ₂ O/(г·ч)		Фотосинтез, мг CO ₂ /(г·ч)	
			ДЛИНА, мм	ПРИРОСТ, мм	ДЛИНА, мм	ПРИРОСТ, мм	КОНТРОЛЬ	ОПЫТ	КОНТРОЛЬ	ОПЫТ
2017										
11.06	14,5	11,2	3,0	3,0	3,0	3,0	н/о	н/о	1,1	1,0
1.07	3,0	21,5	5,1	2,1	5,1	2,1	8	7	2,4	2,5
11.07	10,5	20,5	12,3	7,2	13,0	7,9	89	86	6,0	6,6
14.07	8,5	11,0	15,2	2,9	18,3	5,3	123	108	6,8	7,3
28.07	10,0	18,5	27,4	12,2	32,1	13,8	256	242	12,2	13,5
11.08	3,5	21,0	34,3	6,9	40,4	8,3	204	198	9,4	10,0
16.08	10,0	16,0	36,2	1,9	42,4	2,0	152	144	11,3	12,8
18.08	12,0	24,0	36,4	0,2	42,6	0,2	162	149	11,5	12,9
2018										
23.05	5,0	20,0	2,0	2,0	2,0	2,0	108	109	2,5	2,5
16.06	15,0	29,0	7,0	5,0	7,0	5,0	209	187	3,2	3,4
24.06	20,5	21,5	12,5	5,5	13,3	6,3	269	255	6,3	6,9
4.07	7,5	20,0	18,9	6,4	22,4	9,1	148	140	10,8	12,0
11.07	24,0	23,5	26,9	8,0	35,5	13,1	209	197	14,2	18,8
23.07	35,5	24,0	34,1	7,2	45,9	10,4	284	277	16,7	20,6
27.07	50,0	24,5	37,0	2,9	49,8	3,9	282	265	17,3	21,8
6.08	45,0	12,5	39,1	2,1	53,0	3,2	264	247	16,5	20,2
14.08	36,0	25,5	39,1	0	55,0	2,0	146	140	12,7	15,3
18.08	23,5	22,5	39,1	0	55,0	0	116	112	8,6	10,2
2019										
15.05	6	13,0	2,0	2,0	2,0	2,0	н/о	н/о	8,0	10,5
11.06	14	25,5	7,6	5,6	8,9	6,9	158	144	н/о	н/о
20.06	20	20,0	10,5	2,9	12,8	3,9	179	166	18,3	21,6
2.07	18	17,5	17,5	7,0	20,3	7,5	192	185	н/о	н/о
9.07	14	16,0	22,9	5,4	26,4	6,1	128	120	н/о	н/о
18.07	13	16,5	25,8	2,9	31,1	4,7	148	137	н/о	н/о
27.07	18	22,0	28,9	3,1	34,1	3,0	202	185	17,9	22,2
6.08	6	12,0	30,7	1,8	37,8	3,7	114	107	н/о	н/о
16.08	7	16,5	33,5	2,8	41,5	3,7	126	120	7,9	11,0

* По площадкам с внесением азотного удобрения приведены усредненные данные; н/о – не определяли.

внесением удобрения содержание общего азота в 5–10-сантиметровом слое почвы составляло 2,01 %, в 10–20-сантиметровом – 2,10 %, после внесения удобрения содержание азота в 1-й год возросло до 2,58 и 2,50 % соответственно.

Интенсивный рост молодой хвои у *P. sylvestris* отмечался с 14 по 28 июля. За этот период длина молодой хвои в контроле увеличилась на 12,2 мм, в опыте с удобрениями – на 13,8 мм. С 29 июля по 11 августа, в начале периода завершения роста,

длина молодой хвои в контроле увеличилась еще на 6,9 мм, в опыте – на 8,3 мм, т.е. скорость прироста хвои составляла 0,63 и 0,73 мм/сут соответственно. К периоду полного окончания роста (18 августа) длина молодой хвои в контроле достигала 36,4 мм, в опыте – 42,6 мм. Несмотря на указанные различия, характер сезонного формирования ассимиляционного аппарата у *P. sylvestris* в опыте и контроле оставался одинаковым.

Колебания в темпах роста хвои в основном связаны с изменениями температурного режима воздуха и почвы и в меньшей мере с динамикой УПГВ.

В 2017 г. из-за высокого УПГВ, нарушившего нормальную работу корней, азот не оказал существенного влияния на рост хвои. Наиболее явно разница между опытными и контрольными растениями обозначилась лишь с 14 июля. В этот период хвоя *P. sylvestris* на площадках с внесением удобрения была длиннее на 3 мм, чем на контрольной. Перед завершением периода роста (18 августа) разница в длине молодой хвои между опытом и контролем увеличилась до 6,2 мм (на 17 %). Кроме того, окраска молодой хвои *P. sylvestris* на площадках с удобрением стала более интенсивной, чем в контроле, что указывало на увеличение концентрации хлорофилла.

Таким образом, зависимость скорости роста хвои от погодных условий и УПГВ в сосняках сфагновых в полной мере сохранилась и при дополнительном азотном питании. Также выявлено, что в 1-й год после внесения азотного удобрения процесс роста хвои на площадках с внесенным удобрением и естественным уровнем азотного питания завершился одновременно – 18 августа. Линейный прирост хвои *P. sylvestris* на опытных площадках происходил в те же сроки, что и на контрольной. Основной прирост хвои произошел в июле: в контроле он составил 67 % общего прироста за вегетационный период, в опыте с внесением удобрений – 68 %.

Ранее отмечалось, что в сосняках лишайниковых [12] и сосняках черничных [3, 18] при благоприятных погодных условиях азотное удобрение в 1-й год после внесения на 8–10 сут увеличивает продолжительность срока формирования

ассимиляционного аппарата у сосны и способствует значительному повышению ее годичного прироста. В нашем опыте для *P. sylvestris* в сосняке кустарничково-сфагновом в 1-й год после внесения азотного удобрения такой закономерности не выявлено. Основные причины этого – неблагоприятные погодные условия начала и середины вегетационного периода (пасмурная погода, низкие температуры, частые осадки), сдвинувшие на более поздние сроки естественный ритм развития растений, а также длительное переувлажнение торфяного профиля, нарушившее работу корневой системы и вызвавшее снижение ее реакции на действие внесенного удобрения. Обнаружена прямая, но довольно слабая корреляция между сезонным ростом молодой хвои в опыте и контроле с коэффициентом корреляции $r = 0,32 \pm 0,031$.

Эффективность влияния удобрения на рост хвои на 2-й год (2018 г.) после его внесения значительно возросла (см. таблицу). В 2018 г. дополнительный прирост хвои *P. sylvestris* на опытных площадках по сравнению с контролем составил 41 % (14,9 мм), в то время как в 2017 г. – 17 % (6,2 мм). Активному росту хвои в 2018 г. способствовали благоприятные погодные условия. Уже во 2-й декаде мая дневная температура воздуха повысилась до 19...29 °С, 3-я декада мая также характеризовалась достаточно теплой погодой с температурой воздуха днем 18,5...24,0 °С, ночью – 8...12 °С. В июне отмечалась теплая погода с дневными температурами воздуха 23...24 °С и ночными – 10...15 °С, с небольшим количеством осадков и УПГВ 18–25 см. С 11 июля вплоть до окончания вегетационного периода установилась сухая и жаркая погода, которая и предопределила активный рост хвои. Большую часть вегетационного периода УПГВ располагался ниже корнеобитаемого слоя почвы и не препятствовал активной работе корней *P. sylvestris*.

Первые явные признаки набухания и освобождения вегетативных почек от покровных чехликов обозначились уже 19–20 мая (на 3 нед. раньше, чем в 2017 г.). Почки растений на опытных площадках интенсивно набухали, а покровные чехлики на них начали разрушаться на 1–2 сут раньше, чем в контроле. По данным

исследований ряда авторов [3, 12, 18], формирование нового фотосинтетического аппарата у сосны на 2-й год после внесения азотного удобрения в дренированные почвы начинается на 2–4 сут раньше и заканчивается на 2–8 сут позже, чем на участках с естественным уровнем азотно-питания.

Исследования показали, что на 2-й год рост верхушечного побега на участке контроля завершился 24 июня, а на площадках с внесением удобрения – 4 июля: его длина в контроле составляла $10,3 \pm 0,4$ см, на опытных участках – $18,0 \pm 0,6$ см. Интенсивный рост молодой хвой на главных побегах зафиксирован с 24 июня, а максимальный ее прирост наблюдался с 11 по 23 июля: длина молодой хвой в контроле увеличилась на 15,2 мм, на опытных площадках – на 23,5 мм, т.е. скорость ее прироста составляла 1,2 и 1,8 мм/сут соответственно (см. таблицу). Этот период совпал с благоприятным температурным ($24 \dots 30$ °С) и водным режимами почвы (УПГВ располагался ниже 20 см от поверхности почвы). В июле прирост хвой в контроле составил 63 % по отношению к общему приросту за год, в опыте с удобрениями – 66 %.

Формирование нового фотосинтетического аппарата у деревьев *P. sylvestris* на контрольной площадке завершилось 6–8 августа, на опытных площадках – 14–17 августа. Окончание роста хвой у сосны в данном случае не зависело от температуры воздуха и определялось, по-видимому, генетическими особенностями древесной породы и условиями ее местопроизрастания [11, 12], поскольку температура воздуха в этот период продолжала оставаться еще достаточно высокой ($22 \dots 26$ °С), а УПГВ располагался ниже корнеобитаемого горизонта. Колебания интенсивности сезонного роста хвой в основном были связаны с динамикой температурного режима воздуха и почвы, а также УПГВ почвы. При похолодании и затоплении корней суточные темпы роста хвой снижались, при потеплении и понижении УПГВ – повышались. На 2-й год рост хвой в опытном древостое не только ускорился, но и стал более продолжительным (почти на 10 сут) по сравнению с контролем. Выявленная в 1-й год

при повышенном азотном питании зависимость сезонного роста хвой от погодных и почвенных условий в полной мере сохранялась и на 2-й год.

Третий вегетационный период (2019 г.) оказался аномально холодным для роста *P. sylvestris* даже в условиях северного региона, хотя в общих чертах повторялись погодные условия летнего сезона 2017 г. Редкие теплые периоды сменялись частым и продолжительным похолоданием, нередко с выпадением обильных осадков. Рост сосны в 2019 г., как и в 2017 г., был крайне неравномерным: непродолжительные периоды повышения интенсивности роста молодых побегов сменялись ее длительным снижением.

Активный рост молодой хвой у *P. sylvestris* в этот год начался 8–10 июня – почти на месяц раньше, чем в 2017 г., так как к этому времени температура воздуха поднялась до 25 °С, а УПГВ располагался ниже 14 см от поверхности почвы. Длина молодой хвой 11 июня в контроле составляла 7,6 мм, на площадках с внесением удобрения – 8,9 мм. Прирост хвой на опытных участках был на 1,3 мм больше, чем на контрольном. Максимальный прирост хвой у всех отобранных деревьев пришелся на период с 20 июня по 2 июля, когда корневая система полностью освободилась от затопления. В результате прирост молодой хвой (за 12 сут) в контроле составил 7 мм, в опыте с удобрением – 7,5 мм. В дальнейшем рост хвой из-за наступившего похолодания замедлился и со 2 по 9 июля в контроле не превышал 5,4 мм, на площадках с удобрением – 6,1 мм, а с 9 по 18 июля – 2,9 и 4,7 мм соответственно. Как и в предыдущие 2 года, на 3-й год основной прирост молодой хвой пришелся на июль: за этот месяц прирост на центральном побеге по отношению к длине хвой в контроле составил 55 % (18,4 см), а на удобренных участках – 52 % (21,3 см).

Длина молодой хвой на верхушечных побегах в конце периода роста (16 августа) достигла в контроле 33,5 мм, на опытных площадках – 41,5 мм (см. таблицу). Прирост молодой хвой на центральном побеге на опытных участках составил 8 мм, что на 24 % выше, чем в контроле.

Сезонный ход физиологических процессов у *P. sylvestris* в кустарничково-сфагновом сосняке

в основном определялся УПГВ, освещенностью, температурой воздуха и почвы и в меньшей мере оказался зависимым от азотного питания.

В нашем опыте в мае – августе 2017 г. интенсивность фотосинтеза и транспирации у 2-летней хвои из-за постоянно высоких УПГВ и сильной облачности на опытных площадках и в контроле сохранялась примерно на одном уровне. В 2018 г. колебания УПГВ из-за частого выпадения осадков привели к неустойчивости физиологических процессов: при высоких уровнях почвенно-грунтовых вод интенсивность процессов снижалась, при освобождении корневой системы от затопления – возрастала (см. таблицу).

Сезонная ритмичность физиологических процессов у формирующегося ассимиляционного аппарата *P. sylvestris* и 2-летней хвои несколько отличалась. В результате неустойчивого водного режима почв и температуры воздуха в 2017–2019 гг. появление хвои на побегах сосны и, следовательно, наибольшая интенсивность ее фотосинтеза и транспирации наблюдались в разные сроки вегетационного периода. В начале вегетационного периода, когда длина молодой хвои не превышала 5–7 мм, интенсивность ее физиологических процессов была в 10–15 раз ниже, чем у 2-летней хвои, и составляла: интенсивность фотосинтеза – 0,9–1,3 мг $\text{CO}_2/(\text{г} \cdot \text{ч})$, интенсивность транспирации – 8–12 мг $\text{H}_2\text{O}/(\text{г} \cdot \text{ч})$. Ранее проведенные исследования сезонной динамики транспорта ассимилятов у сосны показали, что жизненный уровень молодой хвои в этот период определяется количеством поступающих ассимилятов [9, 19, 28] и водным режимом торфяных почв [29]. Однако, несмотря на небольшие размеры (5–7 мм), уже на этом этапе онтогенеза у молодой хвои начинает проявляться существенная разница в интенсивности физиологических процессов между растениями на опытных площадках и в контроле.

Интенсивное наращивание физиологической активности формирующимся ассимиляционным аппаратом у *P. sylvestris* отмечалось в фазе его активного роста, когда происходило увеличение линейных размеров, формирование внутренней структуры и пигментного комплекса.

Так, в 2018 г. с 16 июня по 4 июля длина молодой хвои на главном побеге в контроле увеличилась с 7,0 до 18,9 мм, интенсивность фотосинтеза возросла с 5,5 мг до 17,9 мг $\text{CO}_2/(\text{г} \cdot \text{ч})$, а интенсивность транспирации – с 5,4 мг до 157 мг $\text{H}_2\text{O}/(\text{г} \cdot \text{ч})$, что значительно превышало физиологические показатели 2-летней хвои. Аналогичный характер сезонной ритмичности физиологических процессов у формирующейся хвои сосны в связи с онтогенезом ранее был отмечен в сосняках лишайниковых и брусничных [9, 19], но при более высоких абсолютных значениях процессов.

Азотное удобрение, внесенное на участке сосняка кустарничково-сфагнового, существенно усилило работу ассимиляционного аппарата у *P. sylvestris*. В 1-й год после внесения интенсивность фотосинтеза прошлогодней хвои на площадках с азотом в июле была невысокой и превышала контроль лишь на 7,3 %, но уже на 2-й год – на 23 %, на 3-й год – 24 %. Наибольшие различия наблюдались в периоды, когда корневая система сосны освобождалась от затопления грунтовыми водами. Для сравнения: в сосняках лишайниковых в 1-й год после внесения азотного удобрения в дозе 180 кг/га фотосинтез сосны повышался по сравнению с контролем на 26 %, на 2-й год – на 52 % [14, 19].

Выводы

Проведенные комплексные исследования показали, что в сосняках сфагновых в условиях северной тайги Архангельской обл. календарные сроки роста и физиологическая активность хвои *P. sylvestris* определяются уровнем влагообеспеченности торфяного профиля и погодными условиями. Низкие температуры воздуха и почвы в весенний период, длительное переувлажнение торфяной почвы в сфагновых сосняках по сравнению с сосняками лишайниковыми сдвигают начало роста молодых побегов и хвои сосны на более поздние сроки, а их окончание – на более ранний период по сравнению с обычными годами. Эти неблагоприятные экологические условия

в сфагновых сосняках нарушают нормальный ход морфогенеза хвои сосны и процесс формирования ассимиляционного аппарата, ухудшают его функциональную деятельность по выработке энергопластических субстратов, необходимых для осуществления ростовых и компенсаторных процессов.

Азотные удобрения, вносимые в заболоченные сосняки, положительно влияют на годичный прирост побегов и хвои *P. sylvestris*. Однако из-за недостатка весеннего тепла и высоких уровней почвенно-грунтовых вод в 1-й год после внесения они не оказали существенного влияния на календарные сроки начала и окончания роста ассимиляционного аппарата, темпы его формирования. На 2-й год весенний рост побегов начался на 1–2 сут раньше, на 8–10 сут увеличилась продолжительность сезонного формирования ассимиляционного аппарата, значительно усилилась его функциональная деятельность, что связано с погодными условиями и положительно отразилось и на ростовых процессах. В 2018 г. прирост хвои *P. sylvestris* на опытных площадках по сравнению с контролем составил 41 % (14,9 мм), в то время

как в 2017 г. – 17 % (6,2 мм). На 3-й год различия в размерах хвои между опытными и контрольной площадками составили 24 %.

Как правило, результатом возрастания интенсивности и продолжительности роста хвои, ее функциональности служит повышение жизнеспособности сосны и увеличение ее годичного прироста, а также продуктивности избыточно увлажненных сосновых древостоев. Однако по сравнению с суходольными типами леса в заболоченных сфагновых древостоях эффективность действия вносимого азотного удобрения значительно снижается, так как в них полной мере сохраняется зависимость скорости роста хвои и физиологических процессов от погодных условий и УПГВ.

Для получения наибольшего эффекта от применения азотного удобрения в заболоченных сосняках необходимо провести осушительные работы путем прокладки дренажных каналов глубиной 50 см с расстоянием между ними 30–50 м с последующим (через 2 года) внесением азота в дозе 180 кг/га. Подобные опыты имеются в Ленинградской и Архангельской областях [2, 14].

Список источников

1. Паршевников, А.Л. Повышение продуктивности хвойных лесов в Архангельской области применением минеральных удобрений / А.Л. Паршевников, В.С. Серый, Ю.М. Бахвалов // Повышение продуктивности лесов Европейского Севера. – Архангельск : АИЛиЛХ, 1974. – С. 163–181.
2. Вомперский, Э.С. Осушительная мелиорация / Э.С. Вомперский, Е.Д. Сабо, А.С. Формин. – Москва : Лесная промышленность, 1975. – 296 с.
3. Кищенко, И.Т. Сезонный рост побегов и хвои сосны в разных типах леса / И.Т. Кищенко // Лесоведение. – 1978. – № 2. – С. 29–32.
4. Савельев, В.В. Влияние минерального питания на фотосинтез и накопление хлорофилла / В.В. Савельев, М.Д. Нестерович // Известия БССР. Сер. Биол. науки. – 1980. – № 1. – С. 6–9.
5. Heinze, M.J. Wasserverbrauch, Ernährung und Wachstum von Kiefersamlingen bei verschiedener Belichtung, Be-wässerung und Düngung / M.J. Heinze, H.J. Fiedler // Flora. – 1980. – Vol. 169. – № 1. – P. 89–103.
6. Малкина, И.С. Фотосинтез сосны обыкновенной / И.С. Малкина // Лесоведение. – 1981. – № 4. – С. 53–59.
7. Победов, В.С. Исследование и обоснование применения минеральных удобрений в интенсивном лесном хозяйстве: автореф. дисс. ... д-ра с.-х. наук / В.С. Победов. – Москва : МЛТИ, 1981. – 38 с.
8. Паавилайнен, Э. Применение минеральных удобрений в лесу [пер. с фин.] / Э. Паавилайнен; перевод Л.В. Блюдник. – Москва : Лесная промышленность, 1983. – 96 с.
9. Малкина, И.С. Газообмен и образование ассимилятов в разновозрастной хвое сосны обыкновенной / И.С. Малкина // Лесоведение. – 1984. – № 6. – С. 26–33.
10. Абражко, М.А. Влияние азотных удобрений на изменение массы и фракционный состав корней ели / М.А. Абражко // Лесоведение. – 1986. – № 6. – С. 75–80.
11. Меняйло, Л.Н. Гормональная регуляция ксилогенеза хвойных / Л.Н. Меняйло. – Новосибирск : Наука, 1987. – 185 с.
12. Листов, А.А. Влияние минеральных удобрений на сезонный рост сосны в высоту / А.А. Листов, В.Н. Коновалов // Лесоведение. – 1988. – № 1. – С. 33–42.
13. Чернобровкина, Н.П. Экофизиологическая характеристика использования азота сосной обыкновенной / Н.П. Чернобровкина. – Санкт-Петербург : Наука, 2001. – 175 с.
14. Коновалов, В.Н. Эколого-физиологические особенности хвойных на удобренных почвах / В.Н. Коновалов, Л.В. Зарубина. – Архангельск : АГТУ, 2011. – 338 с.
15. Коновалов, В.Н. Отток и распределение ¹⁴C-ассимилятов у ели при выборочных рубках в северотаежных фитоценозах / В.Н. Коновалов, Л.В. Зарубина // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2019. – № 2. – С. 40–55.
16. Коновалов, В.Н. Транспорт, распределение и потребление ¹⁴C-ассимилятов у сосны и ели в северотаежных фитоценозах при различном световом и азотном питании / В.Н. Коновалов, Л.В. Зарубина // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2020. – № 4. – С. 77–93.
17. Зарубина, Л.В. Сезонный рост сосны обыкновенной на заболоченных почвах Севера / Л.В. Зарубина, Р.С. Хамитов // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2021. – № 3. – С. 86–100.
18. Кищенко, И.Т. Сезонный рост сосны при внесении азотных удобрений / И.Т. Кищенко // Лесоведение. – 1985. – № 2. – С. 73–78.
19. Коновалов, В.Н. Сезонный рост и фотосинтез сосны обыкновенной под влиянием азотных удобрений / В.Н. Коновалов, А.А. Листов // Повышение продуктивности лесов Европейского Севера : сб. науч. тр. – Архангельск : АИЛиЛХ, 1992. – С. 151–159.
20. Kaczmarck, D.J. The Relationship between Soil Nutrient Availability and Foliar Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Hardwoods / D.J. Kaczmarck, P.E. Pope // Amer. Soc. Agron. Annu. Meet. – 1993. – P. 336.
21. Ратнер, Е.И. Питание растений и применение удобрений / Е.И. Ратнер. – Москва : Наука, 1965. – 223 с.

22. Вознесенский, Л.В. Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений / Л.В. Вознесенский, О.В. Заленский, О.А. Семихатова. – Москва-Ленинград : Наука, 1965. – 305 с.
23. Иванов, Л.А. О методе быстрого взвешивания для определения транспирации в естественных условиях / Л.А. Иванов // Ботанический журнал. – 1950. – Т. 35. – Вып. 2. – С. 171–185.
24. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований): учеб. ; изд. 6-е / Б.А. Доспехов. – Москва : Альянс, 2011. – 350 с.
25. Бобкова, К.С. Сезонная динамика роста побегов и корней / К.С. Бобкова, А.И. Патов // Эколого-биологические основы повышения продуктивности лесов Европейского Севера : сб. ст. – Ленинград : Наука, 1981. – С. 93–103.
26. Цветков, В.Ф. Сосняки Крайнего Севера / В.Ф. Цветков, Б.А. Семенов. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 116 с.
27. Динамика дыхания корней сосны и ели в северотаежных фитоценозах / Л.В. Зарубина, В.Н. Коновалов, П.А. Феклистов [и др.] // Вестник САФУ им. М.В. Ломоносова. – 2014. – № 2. – С. 52–59.
28. Коновалов, В.Н. Влияние дозы азота при подкормках на отток 14С-ассимилятов у сосны в сосняках лишайниковых / В.Н. Коновалов, Л.В. Зарубина // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2012. – № 1. – С. 7–13.
29. Веретенников, А.В. Транспорт, распределение и потребление 14С-ассимилятов у сосны обыкновенной при различном водном режиме торфяной почвы / А.В. Веретенников, Ю.И. Кузьмин // Лесоведение. – 1977. – № 3. – С. 34–41.

References

1. Parshevnikov, A.L. Povyshenie produktivnosti hvoynyh lesov v Arhangel'skoj oblasti primeneniem mineral'nyh udobrenij / A.L. Parshevnikov, V.S. Seryj, Yu.M. Bahvalov // Povyshenie produktivnosti lesov Evropejskogo Severa. – Arhangel'sk : AILiLH, 1974. – S. 163–181.
2. Vomperskij, E.S. Osushitel'naya melioraciya / E.S. Vomperskij, E.D. Sabo, A.S. Formin. – Moskva : Lesnaya promyshlennost', 1975. – 296 s.
3. Kishchenko, I.T. Sezonnij rost pobegov i hvoi sosny v raznyh tipah lesa / I.T. Kishchenko // Lesovedenie. – 1978. – № 2. – S. 29–32.
4. Savel'ev, V.V. Vliyanie mineral'nogo pitaniya na fotosintez i nakoplenie hlorofilla / V.V. Savel'ev, M.D. Nesterovich // Izvestiya BSSR. Ser. Biol. nauki. – 1980. – № 1. – S. 6–9.
5. Heinze, M.J. Wasserverbrauch, Ernährung und Wachstum von Kiefersamlingen bei verschiedener Belichtung, Be-wässerung und Düngung / M.J. Heinze, H.J. Fiedler // Flora. – 1980. – Vol. 169. – № 1. – P. 89–103.
6. Malkina, I.S. Fotosintez sosny obyknovennoj / I.S. Malkina // Lesovedenie. – 1981. – № 4. – S. 53–59.
7. Pobedov, V.S. Issledovanie i obosnovanie primeneniya mineral'nyh udobrenij v intensivnom lesnom hozyajstve : avtoref. diss. ... d-ra s.-h. nauk / V.S. Pobedov. – Moskva : MLTI, 1981. – 38 s.
8. Paavilajnen, E. Primenenie mineral'nyh udobrenij v lesu [per. s fin.] / E. Paavilajnen; perevod L.V. Blyudnik. – Moskva : Lesnaya promyshlennost', 1983. – 96 s.
9. Malkina, I.S. Gazoobmen i obrazovanie assimilyatov v raznovozrastnoj hvoe sosny obyknovennoj / I.S. Malkina // Lesovedenie. – 1984. – № 6. – S. 26–33.
10. Abrazhko, M.A. Vliyanie azotnyh udobrenij na izmenenie massy i frakcionnyj sostav kornej eli / M.A. Abrazhko // Lesovedenie. – 1986. – № 6. – S. 75–80.
11. Menyajlo, L.N. Gormonal'naya regulyaciya ksilogeneza hvoynyh / L.N. Menyajlo. – Novosibirsk : Nauka, 1987. – 185 s.
12. Listov, A.A. Vliyanie mineral'nyh udobrenij na sezonnij rost sosny v vysotu / A.A. Listov, V.N. Konovalev // Lesovedenie. – 1988. – № 1. – S. 33–42.

13. Chernobrovkina, N.P. Ekofiziologicheskaya karakteristika ispol'zovaniya azota sosnoj obyknovnoy / N.P. Chernobrovkina. – Sankt-Peterburg : Nauka, 2001. – 175 s.
14. Konovalov, V.N. Ekologo-fiziologicheskie osobennosti hvoynyh na udobrennyh pochvah / V.N. Konovalov, L.V. Zarubina. – Arhangel'sk : AGTU, 2011. – 338 s.
15. Konovalov, V.N. Ottok i raspredelenie 14S-assimilyatov u eli pri vyborochnykh rubkah v severotaezhnykh fitocenoazah / V.N. Konovalov, L.V. Zarubina // IVUZ. Lesnoj zhurnal. – 2019. – № 2. – S. 40–55.
16. Konovalov, V.N. Transport, raspredelenie i potreblenie 14S-assimilyatov u sosny i eli v severotaezhnykh fitocenoazah pri razlichnom svetovom i azotnom pitanii / V.N. Konovalov, L.V. Zarubina // IVUZ. Lesnoj zhurnal. – 2020. – № 4. – S. 77–93.
17. Zarubina L.V. Sezonnnyy rost sosny obyknovnoy na zabolochennykh pochvah Severa / L.V. Zarubina, R.S. Hamitov // IVUZ. Lesnoj zhurnal. – 2021. – № 3. – S. 86–100.
18. Kishchenko, I.T. Sezonnnyy rost sosny pri vnesenii azotnykh udobrenij / I.T. Kishchenko // Lesovedenie. – 1985. – № 2. – S. 73–78.
19. Konovalov, V.N. Sezonnnyy rost i fotosintez sosny obyknovnoy pod vliyaniem azotnykh udobrenij / V.N. Konovalov, A.A. Listov // Povyshenie produktivnosti lesov Evropejskogo Severa : sb. nauch. tr. – Arhangel'sk : AILiLH, 1992. – S. 151–159.
20. Kaczmarck, D.J. The Relationship between Soil Nutrient Availability and Foliar Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Hardwoods / D.J. Kaczmarck, P.E. Pope // Amer. Soc. Agron. Annu. Meet. – 1993. – P. 336.
21. Ratner, E.I. Pitanie rastenij i primenenie udobrenij / E.I. Ratner. – Moskva : Nauka, 1965. – 223 s.
22. Voznesenskij, L.V. Metody issledovaniya fotosinteza i dyhaniya rastenij / L.V. Voznesenskij, O.V. Zalenskij, O.A. Semihatova. – Moskva-Leningrad : Nauka, 1965. – 305 s.
23. Ivanov, L.A. O metode bystrogo vzveshivaniya dlya opredeleniya transpiracii v estestvennykh usloviyakh / L.A. Ivanov // Botanicheskij zhurnal. – 1950. – T. 35. – Vyp. 2. – S. 171–185.
24. Dospikhov, B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy) : ucheb. ; izd. 6-e / B.A. Dospikhov. – Moskva : Al'yans, 2011. – 350 s.
25. Bobkova, K.S. Sezonnaya dinamika rosta pobegov i kornej / K.S. Bobkova, A.I. Patov // Ekologo-biologicheskie osnovy povysheniya produktivnosti lesov Evropejskogo Severa : sb. st. – Leningrad : Nauka, 1981. – S. 93–103.
26. Cvetkov, V.F. Sosnyaki Krajnego Severa / V.F. Cvetkov, B.A. Semenov. – Moskva : Agropromizdat, 1985. – 116 s.
27. Dinamika dyhaniya kornej sosny i eli v severotaezhnykh fitocenoazah / L.V. Zarubina, V.N. Konovalov, P.A. Feklistov [i dr.] // Vestnik SAFU im. M.V. Lomonosova. – 2014. – № 2. – S. 52–59.
28. Konovalov, V.N. Vliyanie dozy azota pri podkormkah na ottok 14S-assimilyatov u sosny v sosnyakh lishajnikovyh / V.N. Konovalov, L.V. Zarubina // IVUZ. Lesnoj zhurnal. – 2012. – № 1. – S. 7–13.
29. Veretennikov, A.V. Transport, raspredelenie i potrebleniye 14S-assimilyatov u sosny obyknovnoy pri razlichnom vodnom rezhime torfyanoj pochvy / A.V. Veretennikov, Yu.I. Kuz'min // Lesovedenie. – 1977. – № 3. – S. 34–41.