

Научная статья
УДК 630*581.192
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-118-129

Особенности накопления минеральных элементов и азота в ассимиляционном аппарате сосны обыкновенной

П.А. Феклистов^{1✉}, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: AAC-2377-2020*,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>
О.Н. Тюкавина², *д-р с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID: H-2336-2019*,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>
Н.Р. Сунгурова², *д-р с.-х. наук, доц.*;
ResearcherID: H-1847-2019, *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>*
С.С. Макаров³, *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID: AAK-9829-2021*,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>
И.Н. Болотов¹, *д-р биол. наук, директор*; *ResearcherID: P-2892-2015*,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3878-4192>
С.Н. Тарханов¹, *д-р биол. наук, ст. науч. сотр.*; *ResearcherID: ABG-7237-2020*,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; pfeklistov@yandex.ru[✉], dirnauka@fciarctic.ru, tarkse@yandex.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; o.tukavina@narfu.ru, n.sungurova@narfu.ru

³Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127550; s.makarov@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 15.03.22 / Одобрена после рецензирования 09.06.22 / Принята к печати 13.06.22

Аннотация. Исследование проводили в Архангельском лесничестве Архангельской области в осушенном кустарничково-сфагновом сосняке. Были подобраны средние по диаметру и высоте для древостоя учетные деревья, у которых на модельных ветвях отбирались образцы хвои, как живой, так и отмирающей желтой, побегов разного возраста. Также взяты образцы почвы из 3 верхних горизонтов. Установлено, что больше всего азота и минеральных элементов накапливается в живой хвое – в среднем 4,4 %, в отмирающей хвое и побегах их на 37–40 % меньше. Среди всех элементов большую долю составляют азот, калий и кальций, остальных химических элементов в разы меньше. По убыванию доли они располагаются в следующем порядке: магний, сера, фосфор, марганец, кремний, железо и алюминий. Из отмирающей желтой хвои в значительных количествах выводятся наиболее важные минеральные элементы. Содержание серы, магния, фосфора, марганца и железа сокращается в ней соответственно в 3,3; 2,1; 8,0; 1,5 и 1,4 раза по сравнению с живой хвоей. Получены данные по наличию азота и минеральных элементов в почвенных горизонтах A_0 , T_1 и T_2 . Установлено, что некоторые важнейшие для жизни дерева элементы сосредоточены в живой хвое в значительно больших количествах, чем в почве: калия, фосфора, марганца и кальция – соответственно в 12,0; 4,0; 6,0 и 1,9 раза. Желтая (опадающая) хвоя создает биологический круговорот веществ. Количество азота и зольных элементов в этой хвое пропорционально их наличию в почве.

© Феклистов П.А., Тюкавина О.Н., Сунгурова Н.Р., Макаров С.С., Болотов И.Н., Тарханов С.Н., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

В свою очередь, содержание минеральных элементов в побегах близко к их количеству в желтой (оппадающей) хвое, с одной стороны, а с другой, зависит от возраста побегов. Существует устойчивый тренд снижения с возрастом побегов содержания в них азота, калия, фосфора и серы.

Ключевые слова: сосна, минеральные элементы, азот, накопление минеральных элементов, хвоя, побеги

Благодарности: Исследование выполнено в рамках госзадания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, № госрегистрации – 122011400384-2. В рамках исследования применялось оборудование ЦКП НО «Арктика» (САФУ).

Для цитирования: Феклистов П.А., Тюкавина О.Н., Сунгурова Н.Р., Макаров С.С., Болотов И.Н., Тарханов С.Н. Особенности накопления минеральных элементов и азота в ассимиляционном аппарате сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 118–129. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-118-129>

Original article

Peculiarities of the Accumulation of Mineral Elements and Nitrogen in the Assimilation Apparatus of Scots Pine

Pavel A. Feklistov¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

Olga N. Tyukavina², Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

Nataliya R. Sungurova², Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-1847-2019](https://orcid.org/0000-0002-8464-4596), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

Sergey S. Makarov³, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

Ivan N. Bolotov¹, Doctor of Biology, Director; ResearcherID: [P-2892-2015](https://orcid.org/0000-0002-3878-4192), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3878-4192>

Sergey N. Tarkhanov¹, Doctor of Biology, Senior Research Scientist; ResearcherID: [ABG-7237-2020](https://orcid.org/0000-0001-9037-8995), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

¹Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; pfeklistov@yandex.ru[✉], dimnauka@fciarctic.ru, tarkse@yandex.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; o.tukavina@narfu.ru, n.sungurova@narfu.ru

³Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127550, Russian Federation; s.makarov@rgau-msha.ru

Received on March 15, 2022 / Approved after reviewing on June 9, 2022 / Accepted on June 13, 2022

Abstract. The research has been carried out in the Arkhangelsk forestry of the Arkhangelsk Region in a drained shrub-sphagnum pine forest. Census trees of medium diameter and height for the stand have been selected, from which samples of needles, both living and dying yellow



ones, and shoots of different ages have been taken on model branches. Soil samples have also been taken from the 3 upper horizons. It has been established that most of all nitrogen and mineral elements accumulate in the living needles – 4.4 % on average, in the dying needles and shoots there are 37–40 % less. Among all the elements, nitrogen, potassium and calcium make up the largest proportion; while the rest of the chemical elements are several times less. In descending order of the share, they are arranged in the following sequence: magnesium, sulfur, phosphorus, manganese, silicon, iron and aluminum. The most important mineral elements are derived in significant quantities from the dying yellow needles. The content of sulfur, magnesium, phosphorus, manganese and iron decreases in them by 3.3, 2.1, 8.0, 1.5 and 1.4 times, respectively, compared to the living needles. Data on the presence of nitrogen and mineral elements in the soil horizons A₀, T₁ and T₂ have been obtained. It has been established that some of the essential elements for the life of a tree are concentrated in the living needles in much larger quantities than in the soil: potassium, phosphorus, manganese and calcium – by 12.0, 4.0, 6.0 and 1.9, respectively. The yellow falling needles create a biological cycle of substances. The amount of nitrogen and ash constituents in these needles is proportional to their presence in the soil. In turn, the content of mineral elements in the shoots is close to their amount in the yellow falling needles, on the one hand, and on the other, depends on the age of the shoots. There is a steady trend of decreasing the content of nitrogen, potassium, phosphorus and sulfur with the age of the shoots.

Keywords: pine, mineral elements, nitrogen, accumulation of mineral elements, needles, shoots

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, state registration no. 122011400384-2. The equipment of the Center for Collective Use of Scientific Equipment “Arktika” (NArFU) was used in the research.

For citation: Feklistov P.A., Tyukavina O.N., Sungurova N.R., Makarov S.S., Bolotov I.N., Tarkhanov S.N. Peculiarities of the Accumulation of Mineral Elements and Nitrogen in the Assimilation Apparatus of Scots Pine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 118–129. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-118-129>

Введение

Наиболее важным для жизнедеятельности растений является ассимиляционный аппарат. Именно здесь образуются первые и многие последующие органические вещества [4, 7–9]. Для процессов фотосинтеза и дыхания, а также для образования хлорофилла, белков нужны минеральные элементы и азот. Большое значение минеральные элементы имеют для формирования микро- и макростробилов, при образовании шишек и семян [1, 5]. Репродуктивная активность растений во многом определяется наличием минеральных элементов [14, 16, 17, 20]. Накопление, перераспределение и отток азота и минеральных элементов в разных структурах ассимиляционного аппарата значимы для существования сосны. В то же время данный вопрос остается рассмотренным недостаточно с точки зрения и разных регионов [15, 18, 19, 21, 22], и условий местопроизрастания или типов леса [2, 3, 6, 10–13].

Цель исследования – изучение накопления минеральных элементов и азота у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в живой, желтой (оппадающей) хвое и побегах в сравнении с их содержанием в почве.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования был осушенный кустарничково-сфагновый сосняк. Осушение проведено в 1966 г. системой каналов глубиной около 1 м с расстоянием между ними около 60 м. Дреvestой чистый по составу, 3-го класса возраста, V класса бонитета (табл. 1). Почва – верховая торфяная осушенная на средних торфах на тяжелом глеевом суглинке.

Таблица 1

Таксационная характеристика исследованного древостоя
The taxation characteristics of the studied stand

ПП	Состав	Средние		Класс		Относительная полнота	Густота, шт./га	Запас, м ³ /га
		<i>D</i> , см	<i>H</i> , м	возраста	бонитета			
1	10С+Б	6,8	6,2	3	V	1,4	6575	105,5
4	10С+Б	6,3	7,1			0,8	3750	110,0

Примечание: ПП – пробная площадь; *D* – диаметр; *H* – высота.

Для изучения ассимиляционного аппарата были подобраны 10 средних по диаметру и высоте (табл. 1) учетных деревьев сосны обыкновенной, у которых в июле 2015 г. на средней ветви обрывалась хвоя и отделялись побеги (хвоя удалена). Образцы желтой хвои отбирали в сентябре этого же года, когда массово появилась желтая хвоя последних лет жизни. Для этого использовали 20 учетных деревьев. Увеличение количества учетных деревьев во втором случае связано с тем, что была неясна вариабельность содержания в желтой хвое минеральных элементов. Обзор научной литературы также не дал точных сведений на этот счет. Кроме того, отбирали образцы почвы массой не менее 20 г из 3 горизонтов – A_0 , T_1 и T_2 .

Для подготовки к химическому анализу каждый пакетик с хвоей и побегами помещали в сушильный шкаф на 24 ч при температуре 105 °С. Всего для исследования использовали 1100 образцов хвои и 150 побегов.

Рентгенофлуоресцентный анализ образцов проводили на волнодисперсионном спектрометре LabCenterXRF-1800. Предварительно высушенные пробы хвои измельчали с помощью шаровой мельницы до фракции <70 мкм и прессовали в таблетки диаметром 2,5 см. Сначала записывали спектр образца и определяли, какие элементы присутствуют в пробе. Затем методом фундаментальных параметров оценивали содержание каждого из обнаруженных элементов. Условия проведения измерения: рентгеновская трубка с родиевым анодом, напряжение – 40 кВ, сила тока – 95 мА, экспозиция – 40 и 20 с для фоновых точек. Анализ проводили в атмосфере вакуума. Использовали следующие кристаллы-анализаторы: для определения Fe, Mn, Ca, K, S, P, Mg, Na. В целях регистрирования излучения применяли сцинтилляционный и пропорциональный детекторы.

Результаты исследования и их обсуждение

Наибольшее суммарное содержание минеральных элементов и азота наблюдается в живой хвое – 4,36 % от сухой массы (рис. 1). В литературе по этому поводу существуют разные мнения [3, 4, 6]. Например,

у А.В. Веретенникова [4] приводятся данные по сосне – 2,57 % и по ели в ельнике черничном (только для азота, фосфора, калия и кальция) – 2,64 %. Ближе данные по сосне для Карелии – до 2,7 % [6].

Сравнение количества накопленных элементов в зеленой, желтой хвое и побегах показывает заметную разницу. В живой хвое минеральных элементов и азота примерно в 1,5 раза больше, чем в желтой хвое и побегах. В то же время накопление их в желтой хвое и побегах близко: различия минимальны и составляют 0,07 %, незначимы (рис. 1).

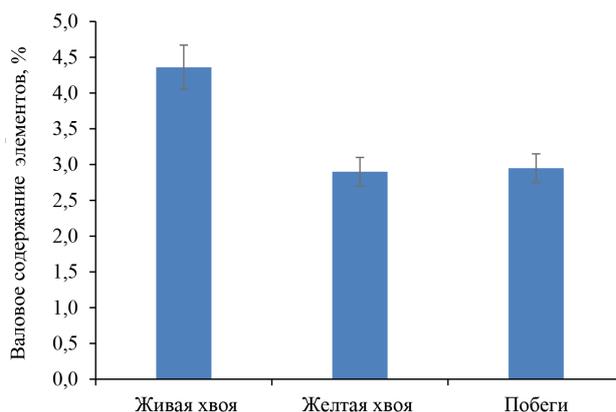


Рис. 1. Содержание химических элементов в хвое разного физиологического состояния и побегах сосны обыкновенной

Fig. 1. The content of chemical elements in the needles of different physiological conditions and in the shoots of Scots pine

По-видимому, перед отмиранием хвои заметная часть минеральных элементов и азота, содержащихся в ней, перераспределяется в живую хвою и, возможно, в побеги, а 66 % минеральных элементов и азота от содержания в живой хвое возвращается в почву с опадом.

При рассмотрении накопления каждого химического элемента видно, что они распадаются на 2 группы (рис. 2): 1-я группа – преобладающие по доле азот, кальций и калий; 2-я – остальные элементы. В живой хвое больше кальция, меньше азота и еще меньше калия. В желтой хвое и побегах превалирует азот.

Из рис. 2 следует, что элементов 2-й группы больше в живой хвое, а в желтой отмирающей и побегах их заметно меньше, за исключением натрия. Особенно крупные отличия характерны для калия, серы, магния и фосфора. Их больше в живой хвое соответственно в 5,5; 2,9; 2,1; 8,0 раза; как видим, особенно это касается фосфора и калия.

В побегах почти всех элементов меньше, чем в отмирающей хвое. Это относится к калию, кальцию, сере, магнию, железу, марганцу и натрию. Кремния содержится почти одинаково и в побегах, и в желтой хвое, количество алюминия равно в живой, желтой хвое и побегах. Исключением являются азот и фосфор – их больше в побегах. Можно предположить, что эти 2 элемента выводятся из отмирающей хвои в побеги для последующего использования. Физиологическая роль этих элементов в жизни деревьев: фотосинтез, дыхание, образование хлорофилла и структур клеток (например, фосфолипиды участвуют в образовании мембран) – очень важна.

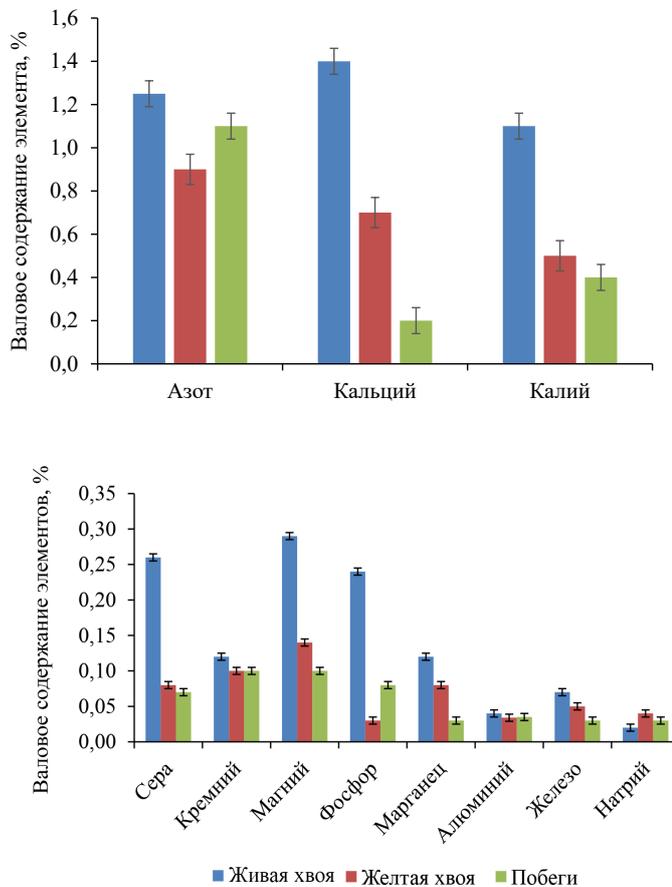


Рис. 2. Накопление химических элементов в разных частях ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной

Fig. 2. The accumulation of chemical elements in different parts of the assimilation apparatus

Желтая хвоя, однако, сохраняет определенный запас всех химических элементов и при падении обогащает почву всем спектром макро- и микроэлементов, необходимых для жизнедеятельности деревьев и для ассимиляционного аппарата.

Источником минеральных элементов для деревьев является почва, в связи с этим важно знать, какое их количество содержится в разных почвенных горизонтах на исследованном участке. Здесь также можно констатировать существенные различия в содержании минеральных элементов и азота (рис. 3) и условно выделить 2 группы элементов по их содержанию. Больше всего в разных горизонтах азота, кремния и кальция. Если азот играет в физиологии сосны чрезвычайно важную роль, то кремний, скорее, крайне низкую. Содержание азота составляет 2,0–2,1 % в разных горизонтах. Количество кремния существенно уменьшается с глубиной почвы. Кальция, наоборот, по мере углубления в почву становится больше. Этот тренд весьма отчетливый. Если в горизонте A_0 содержится 0,45 % кальция, то в горизонте T_2 – 0,72 %, т. е. в 1,6 раза больше.

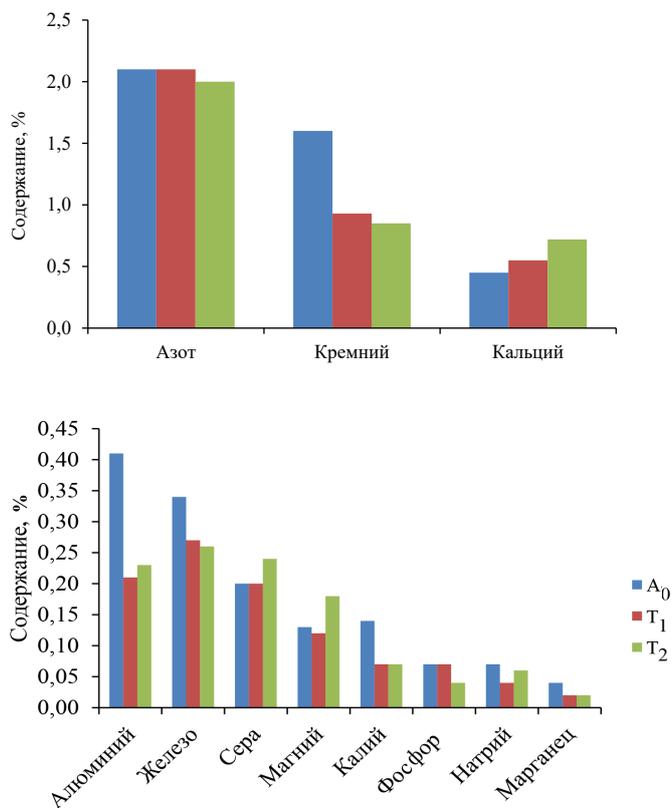


Рис. 3. Запасы химических элементов в почве

Fig. 3. The reserves of chemical elements in the soil

Из 2-й группы элементов снижение содержания по мере углубления в почву отчетливо прослеживается у алюминия, железа, фосфора, калия и марганца. Уменьшение от горизонта A₀ к T₂ происходит соответственно в 1,9; 1,3; 2,0; 1,7; 2,0 раза. Количество серы и магния наибольшее в самых глубоких почвенных горизонтах. Стабильно низким и примерно равным на разных глубинах содержанием характеризуется натрий.

Наряду с рассмотрением содержания элементов питания по профилю почвы является важной оценка соотношения их количества в почве и растении. Количество азота, значимого для обеспечения жизнедеятельности, почти в 1,7 раза меньше в ассимиляционном аппарате сосны по сравнению с содержанием в почве, т. е. для получения этого элемента есть резервы и он не лимитирует существование сосны (табл. 2). Однако обращает на себя внимание тот факт, что содержание кальция, калия, серы, магния, фосфора и марганца в живой хвое в разы больше, чем в почве. Например, калия больше в 12, фосфора – в 4, марганца – в 6 раз. Интересно, что соотношение элементов в почве и желтой хвое иное. Серы, магния и фосфора в ней меньше, чем в живой хвое и почве, но зато чуть больше алюминия по сравнению с почвой. В побегах наблюдаем еще один вариант соотношения. Здесь больше только фосфора, марганца и железа. Таким образом, видно, что для ассимиляционного аппарата в целом накопление минеральных элементов выше, чем для почвы и особенно много их запасает живая хвоя.

Таблица 2

**Содержание (%) химических элементов в почве
и в ассимиляционном аппарате сосны обыкновенной**
**The content (%) of chemical elements in the soil
and in the assimilation apparatus of Scots pine**

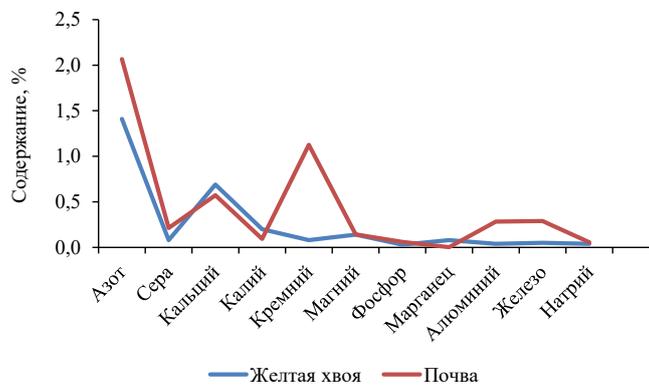
Химический элемент	Почва	Хвоя		Побеги
		живая	желтая	
Азот	2,07	1,25	1,40	1,10
Кальций	0,57	0,90	0,70	0,50
Калий	0,09	1,10	0,20	0,40
Сера	0,21	0,26	0,08	0,07
Кремний	1,13	0,12	0,10	0,10
Магний	0,14	0,29	0,14	0,10
Фосфор	0,06	0,24	0,03	0,08
Марганец	0,02	0,12	0,08	0,03
Алюминий	0,28	0,04	0,03	0,04
Железо	0,29	0,07	0,05	0,03
Натрий	0,06	0,02	0,04	0,03

Примечание: Полу жирным шрифтом выделены значения, превышающие содержание элементов в почве.

Содержание минеральных элементов и азота в почве и их наличие в хвойном опаде тесно связаны между собой. Отчетливо проявляется круговорот элементов почвенного питания сосны (рис. 4).

Рис. 4. Содержание химических элементов в желтой (опадающей) хвое сосны обыкновенной и почве (среднее по всем горизонтам)

Fig. 4. The content of chemical elements in the yellow (falling) needles of Scots pine and in the soil (average for all horizons)



Содержание элементов в желтой хвое и почве одинаково, за исключением алюминия и железа – их в почве больше. Совершенно не совпадает с содержанием остальных элементов содержание кремния: его количество в почве значительно выше.

Важно, что на накопление минеральных элементов и азота оказывает влияние возраст побегов. Чем старше побег, тем меньше в нем содержится минеральных элементов и азота. Это справедливо для всех изученных элементов, кроме магния, что подтверждает дисперсионный анализ (табл. 3). Все расчетные критерии Фишера больше табличного для уровня значимости 0,05.

Таблица 3

Влияние возраста побегов сосны обыкновенной на накопление минеральных элементов и азота (результаты дисперсионного анализа)
The influence of the age of the shoots of Scots pine on the accumulation of mineral elements and nitrogen (the results of dispersion analysis)

Химический элемент	Расчетный критерий Фишера	Уровень значимости	Влияние возраста побегов
Азот	7,30	0,0005	Есть
Калий	29,39	0,00002	Есть
Фосфор	9,60	0,002	Есть
Магний	0,60	0,671	Нет
Сера	12,00	0,0008	Есть
Кальций	0,61	0,663	Нет

Примечание: Критическое значение критерия Фишера для приведенных уровней значимости – 3,48.

Наиболее резкое падение содержания характерно для калия, серы и фосфора (рис. 5). С возрастом побегов количество минеральных элементов, содержащихся в них, уменьшается в 1,6–1,8 раза.

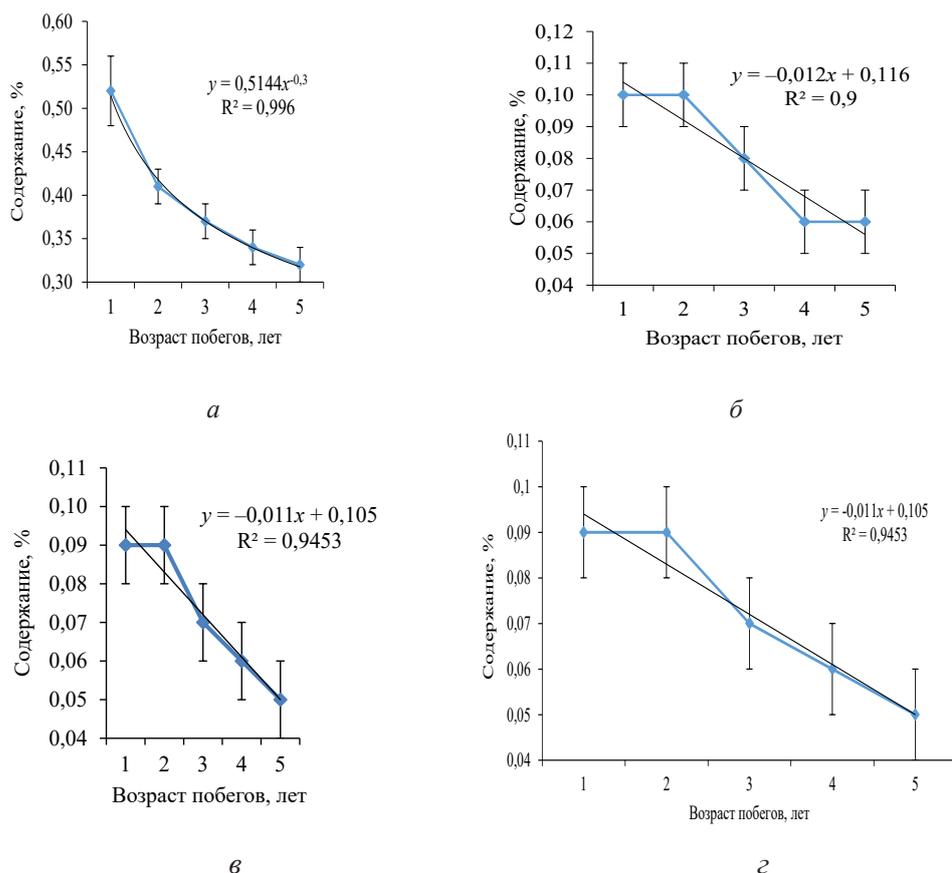


Рис. 5. Содержание макроэлементов в побегах сосны обыкновенной разного возраста: а – калий; б – сера; в – азот; г – фосфор

Fig. 5. The content of macroelements in the shoots of Scots pine of different ages: а – potassium; б – sulfur; в – nitrogen; г – phosphorus

Следует, однако, заметить, что в возрасте 4–5 лет ошибки средних значений накладываются (перекрываются), поэтому нельзя говорить с уверенностью про существенные различия для этих возрастов. Тем не менее существующий тренд имеет место и, однозначно, 1–2-летние побеги отличаются от 4–5-летних по накоплению минеральных элементов. То же самое можно сказать про азот, хотя тренд не так хорошо выражен, как для названных выше элементов. Снижение содержания минеральных элементов с возрастом побегов, по-видимому, связано с их направлением в более молодые побеги, где идут новообразования клеток и тканей, а такие элементы, как фосфор, калий, азот и сера, крайне необходимы для важнейших физиологических процессов.

Выводы

1. В живой хвое сосны в осушенном кустарничково-сфагновом сосняке общее содержание минеральных элементов и азота составляет 4,36 %. В побегах и отмирающей хвое их на 37–40 % меньше.

2. Больше всего в ассимиляционном аппарате сосны азота, калия и кальция. Заметно меньше магния, серы, фосфора, марганца, кремния, железа и алюминия (перечислены по убыванию). В отмирающей желтой хвое существенно ниже количество минеральных элементов и азота, чем в живой хвое, а в побегах еще ниже, чем в желтой хвое, за немногим исключением.

3. В отмирающей хвое сосны уменьшается содержание серы, магния, фосфора, марганца и железа соответственно в 3,3; 2,1; 8,0; 1,5 и 1,4 раза.

4. В исследованной почве больше всего азота, кремния и кальция – 0,45–2,10 %. Других элементов – от 0,01 до 0,41 %. По убыванию их можно расположить в следующем порядке: алюминий, железо, сера, магний, калий, фосфор, натрий и марганец. На их содержание оказывает влияние глубина горизонта.

5. В живой хвое сосны калия в 12,0; фосфора – в 4,0; марганца – в 6,0; кальция – в 1,9 раза больше, чем в почве.

6. Накопление химических элементов в побегах сосны зависит от их возраста. Отмечен тренд снижения содержания минеральных элементов с возрастом побегов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бессчетнова Н.Н. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Репродуктивный потенциал плюсовых деревьев. Н. Новгород: НГСА, 2015. 586 с.

Besschetnova N.N. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). Reproductive Potential of Plus Trees. Nizhniy Novgorod, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy Publ., 2015. 586 p. (In Russ.).

2. Бобкова К.С. Экологические основы продуктивности хвойных лесов Европейского Северо-Востока: автореф. ... д-ра биол. наук. Красноярск, 1990. 35 с.

Bobkova K.S. Ecological Basis of Coniferous Forests Productivity of the European North-East: Doct. Biol. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 1990. 35 p. (In Russ.).

3. Бобкова К.С., Тужилкина В.В., Сенькина С.Н., Галенко Э.П., Загирова С.В. Эколого-физиологические основы продуктивности сосновых лесов Европейского Северо-Востока. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1993. 176 с.

Bobkova K.S., Tuzhilina V.V., Sen'kina S.N., Galenko E.P., Zagirova S.V. *Ecological and Physiological Basis of Productivity of Pine Forests of the European Northeast*. Syktyvkar: Komi Scientific Center of Ural Branch of the RAS, 1993. 176 p. (In Russ.).

4. Веретенников А.В. Физиология растений с основами биохимии. Воронеж: ВГУ, 1987. 254 с.

Veretennikov A.V. *Plant Physiology with the Basics of Biochemistry*. Voronezh, Voronezh State University Publ., 1987. 254 p. (In Russ.).

5. Ивонис И.Ю. Регуляторы роста в микростробиллах хвойных пород Карелии // Совещание по лесной генетике, селекции и семеноводству: тез. докл. Петрозаводск, 1967. С. 57–59.

Ivonis I.Yu. Growth Regulators in Microstrobilli of Coniferous Species of Karelia. *Meeting on Forest Genetics, Breeding and Seed Production: Abstracts*. Petrozavodsk, 1967, pp. 57–59. (In Russ.).

6. Казимиров Н.И., Волков А.Д., Зябченко С.С., Иванчиков А.А., Морозова Р.М. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1977. 304 с.

Kazimirov N.I., Volkov A.D., Zyabchenko S.S., Ivanchikov A.A., Morozova R.M. *Metabolism and Energy Change in Pine Forests of the European North*. Leningrad, Nauka Publ. (Leningrad Branch), 1977. 304 p. (In Russ.).

7. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 464 с.

Kramer P.D., Kozlovskiy T.T. *Physiology of Woody Plants*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 464 p. (In Russ.).

8. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Абрис, 2011. 783 с.

Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A. *Plant Physiology*. Moscow, Abris Publ., 2011. 783 p. (In Russ.).

9. Либберт Э. Физиология растений. М.: Мир, 1976. 582 с.

Libbert E. *Plant Physiology*. Moscow, Mir Publ., 1976. 582 p. (In Russ.).

10. Лиханова Н.В. Влияние сплошнолесосечной рубки на круговорот азота и зольных элементов в ельниках средней тайги: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2015. 22 с.

Likhanova N.V. *The Effect of Continuous Logging on the Circulation of Nitrogen and Ash Constituents in the Spruce Forests of the Middle Taiga*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Syktyvkar, 2015. 22 p. (In Russ.).

11. Пристова Т.А. Биологический круговорот азота и зольных элементов в лиственно-хвойном насаждении подзоны средней тайги: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2003. 19 с.

Pristova T.A. *Biological Cycle of Nitrogen and Ash Constituents in Deciduous-Coniferous Plantations of the Middle Taiga Subzone*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Syktyvkar, 2003. 19 p. (In Russ.).

12. Тарханов С.Н. Содержание серы и тяжелых металлов в хвойных насаждениях бассейна Северной Двины при аэротехногенном загрязнении // Лесоведение. 2011. № 3. С. 26–33.

Tarkhanov S.N. The Content of Sulfur and Heavy Metals in Soils and Needles of Coniferous Stands under Aerotechnogenic Pollution in the Severnaya Dvina River Basin. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2011, no. 3, pp. 26–33. (In Russ.).

13. Феклистов П.А., Хабарова Е.П. Ассимиляционный аппарат деревьев сосны на осушенных и избыточно увлажненных почвах. Архангельск: САФУ, 2017. 141 с.

Feklistov P.A., Khabarova E.P. *Assimilation Apparatus of Pine Trees on Drained and Overly Moistened Soils*. Arkhangelsk, Northern Arctic Federal University Publ., 2017. 141 p. (In Russ.).

14. Codesido V., Fernandes-Lopes J. Using SYNCHRO SAS, a Program to Facilitate Phenological Data Processing in a Radiate Pine Seed Orchard in Northern Spain. *Seed Orchards: Proceedings from a Conference at Umea, Sweden*. Sweden, Uppsala, SLU/Publikationsanst Publ., 2008, pp. 43–49. <https://doi.org/10.13140/2.1.4524.6088>
15. Conn S., Gilliam M. Comparative Physiology of Elemental Distributions in Plants. *Annals of Botany*, 2010, vol. 105, iss. 7, pp. 1081–1102. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq027>
16. Kurm M., Kängsepp L., Kiviste A., Sims A., Maaten T., Kaljurand H. Hariliku Männi (*Pinus sylvestris* L.) Plusspuud Eestis = Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Plus Trees in Estonias. *Forestry studies. Metsanduslicud Uurimused*, 2007, vol. 46, pp. 57–76. (In Est.).
17. Kurt Y., Bilgen B.B., Kaya N., Isik K. Genetic Comparison of *Pinus brutia* Ten. Populations from Different Elevations by RAPD Markers. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2011, vol. 39, no. 2, pp. 299–304. <https://doi.org/10.15835/nbha3926276>
18. Pongrac P., Baltrenaite E., Vavpetič P., Kelemen M., Kladnik A., Budič B., Vogel-Mikuš K., Regvar M., Baltrenas P., Pelicon P. Tissue-Specific Element Profiles in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Needles. *Trees*, 2019, vol. 33, pp. 91–101. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1761-5>
19. Rautio P., Huttunen S. Total vs. Internal Element Concentrations in Scots Pine Needles along a Sulphur and Metal Pollution Gradient. *Environmental Pollution*, 2003, vol. 122, pp. 273–289. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00289-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00289-0)
20. Silva da J.M., Aguiar A.V., Mori E.S., Moraes de M.L.T. Variação Genética e Ganho Esperado na Seleção de Progenies de *Pinus caribaea* var. *caribaea* em Selvíria, MS = Genetic Variation and Expected Gain in Selection of *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Progenies in Selvíria, MS. *Scientia Forestalis, Piracicaba*, 2011, vol. 39, no. 90, pp. 241–252. (In Port.).
21. Tian X., Minunno F., Schiestl-Aalto P., Chi J., Zhao P., Peichl M., Marshall J., Näsholm T., Lim H., Peltoniemi M., Linder S., Mäkelä A. Disaggregating the Effects of Nitrogen Addition on Gross Primary Production in a Boreal Scots Pine Forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, vol. 301–302, art. no. 108337. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108337>
22. Zeiner M., Kuhar A., Juranović Cindrić I. Geographic Differences in Element Accumulation in Needles of Aleppo Pines (*Pinus halepensis* Mill.) Grown in Mediterranean Region. *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 10, art. no. 1877. <https://doi.org/10.3390/molecules24101877>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest