

УДК 582.475:630*160.22:630*181.34

НАКОПЛЕНИЕ L-АРГИНИНА В ХВОЕ ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ПРИ РЕГУЛЯЦИИ АЗОТНОГО И БОРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Н. П. Чернобровкина, Е. В. Робонен, А. К. Морозов, Т. Н. Макарова

Институт леса Карельского научного центра РАН

Изучены показатели роста, содержания азота, бора и свободных аминокислот в хвое 5-летней ели европейской (*Picea abies* L.) в связи с различным обеспечением растений азотом и бором в условиях оптимума других элементов минерального питания. Оптимальным для роста растений было содержание в хвое азота 1,8 % и бора 280 мкг·г⁻¹ сухого вещества. Содержание L-аргинина в хвое увеличивалось в десятки раз при внесении десятикратной, по сравнению с оптимальной, дозы азота. Установлено многократное повышение количества этой аминокислоты в хвое при использовании высокой дозы бора и низкой – азота.

Ключевые слова: *Picea abies* (L.), азот, бор, аминокислоты, L-аргинин.

N. P. Chernobrovkina, E. V. Robonen, A. K. Morozov, T. N. Makarova. ACCUMULATION OF L-ARGININE IN NEEDLES OF NORWAY SPRUCE WITH REGULATED NITROGEN AND BORON AVAILABILITY

The parameters of growth, nitrogen, boron and free amino acid content in the needles of 5-year-old Norway spruce (*Picea abies* L.) were studied in relation with nitrogen and boron availability to the plants, the supply of other nutrients being optimal. Growth of the plants was optimized by a nitrogen content of 1.8 % and a boron content of 280 µg·g⁻¹ dry weight in the needles. L-arginine content in the needles increased tens of times upon application of a ten-fold, compared with the optimum, nitrogen dose. The amount of this amino acid in the needles multiplied when the plants were treated with a high dose of boron combined with a low dose of nitrogen.

Key words: *Picea abies* (L.), nitrogen, boron, amino acids, L-arginine.

Введение

Древесная зелень является источником большого числа органических соединений, до 30 % их составляют водорастворимые фракции, включающие свободные аминокислоты, которые применяются для лечения многих заболеваний человека и животных. Повышение в растительном сырье уровня доступных для усвоения аминокислот, обладающих высокой биологической активностью, и изменение их количественного соотношения в соответствии с кон-

кретными задачами можно осуществлять путем регуляции минерального питания растений. Разбалансированность минерального питания хвойных растений приводит к изменению состава свободных аминокислот в их тканях [Nasholm, Ericsson, 1990; Gezelius, Nasholm, 1993; Huhn, Schulz, 1996; Engvild, 2005]. При избытке азота, а также при дефиците фосфора у хвойных происходит накопление аминокислот с высоким содержанием азота – аргинина, лизина и орнитина. Влияние микроэлементов, в частности бора, на метаболизм растений интенсивно

исследуется [Ferrol, Donaire, 1992; Cakmak et al., 1995; Kobayashi et al., 1996; Camacho-Cristobal et al., 2008]. Ранее нами было показано стимулирующее влияние бора на накопление L-аргинина у сосны обыкновенной на фоне высокого обеспечения азотом и дефицита других элементов питания [Чернобровкина и др., 2010]. Разработка технологии повышения уровня L-аргинина у хвойных растений открывает возможности использовать хвою в фармацевтической промышленности в качестве сырья для получения этой аминокислоты и в ветеринарии в качестве кормовых добавок животным. Следует отметить, что данная аминокислота имеет большое значение для функциональной активности органов и тканей человека и животных [Западнюк и др., 1982; Дахно, 2000; Ульянов и др., 2010; Cengiz, Kucukersan, 2010]. Установлено значение L-аргинина как гипогликемического и антитромботического средства [Ульянов и др., 2010]. L-аргинин используется как иммуностимулятор при лечении фасциоза коров, инфекционных заболеваний бройлеров [Дахно, 2000; Cengiz, Kucukersan, 2010]. Получение L-аргинина, как и других аминокислот, осуществляют несколькими путями: с использованием биотехнологических процессов, путем химического синтеза, гидролизом природного белкового сырья [Волова, 1999]. Для производства лекарственных средств и пищевых добавок L-аргинин получают культивированием бактерии рода *Escherichia* [Рыбак и др., 2005]. Химический синтез дает рацемат – продукт, содержащий как L-, так и D-формы аминокислот, однако D-изомеры обладают токсичностью, что ограничивает возможности применения аминокислот, полученных таким способом. Производство оптически активных L-изомеров аминокислот из гидролизатов природных материалов растительного и животного происхождения связано с многоступенчатой и дорогостоящей очисткой [Волова, 1999]. Метод экстрагирования водорастворимых свободных аминокислот из растительного материала несложен и экологически безопасен.

Целью работы было исследование влияния азота и бора на накопление L-аргинина в хвое ели европейской.

Материалы и методы

Объектом исследования была 5-летняя ель европейская (*Picea abies* L.), произрастающая в условиях южной части Карелии. Супесчаные почвы характеризовались оптимальной для роста хвойных растений кислотностью (рН водн. 5,1), недостаточностью азота (0,14 % от сухой почвы) и бора (0,001 %). Сбалансированное содержа-

ние остальных элементов минерального питания (ЭМП) обеспечивали путем внесения комплексного удобрения, составленного без включения азота и бора.

В мае 2009 г. было заложено 35 вариантов опыта, которые различались обеспеченностью растений азотом и бором. В первой половине вегетационного периода трижды вносили в почву аммиачную селитру в дозах 0; 3; 10; 30; 100 г·м⁻² д. в. (N0–N100) и борную кислоту в дозах 0; 0,1; 0,3; 1; 3; 10; 30 г·м⁻² (B0–B30). За контроль был принят вариант (N0B0), в котором азот и бор в почву не вносили. По окончании вегетационного периода, в октябре, определяли воздушно-сухую массу хвои и всего растения, включая корни, проводили анализ содержания азота, бора и аминокислот в хвое в расчете на абсолютно-сухой вес. Анализ свободных аминокислот в хвое проводили во всех вариантах азотного (N0–N100) при трех уровнях борного (B0, B1, B10) обеспечения. Фиксировали растительный материал методом лиофилизации. В работе использовано оборудование Института леса КарНЦ РАН. Химические элементы растений и почвы определяли на спектрофотолориметре КФК-3 (Загорский оптико-механический завод, Россия) и на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-6800 (Shimadzu, Япония). Извлечение свободных аминокислот из тканей осуществляли по методу Калинкиной и соавторов [1990], анализ содержания аминокислот в хвое проводили на автоматическом аминокислотном анализаторе AAA-339, L-аргинина – методом Сакагучи [Jesse, 1961].

Результаты и обсуждение

Внесение борной кислоты в почву в дозе 1 г·м⁻² максимально стимулировало рост растений 5-летней ели европейской при дозах азота в 10 и 30 г·м⁻² на фоне оптимального уровня других ЭМП (рис. 1: а, б). Максимум роста растений сохранялся также при дозе азота в 10 г·м⁻² и дозах борной кислоты в 3 и 10 г·м⁻², однако в этих вариантах отмечались признаки избытка бора в растениях. Максимальное увеличение сухой массы всего растения и хвои по сравнению с контролем (без внесения азота и бора) было соответственно в 3,8 и 4,0 раза. Увеличение сухой массы растений и хвои за счет оптимального внесения борной кислоты в варианте оптимума азота (N10B1) составило соответственно 44 % и 50 %. Более высокие дозы борной кислоты при всех уровнях азота оказались равнозначными или менее эффективными по сравнению с дозой в 1 г·м⁻², а доза в 30 г·м⁻²

ингибировала рост растений по сравнению с контролем при соответствующих уровнях азотного питания. Первые признаки избытка бора у растений – пожелтение кончиков хвои – отмечались при дозе борной кислоты в $3 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$, при более высоких дозах хвоя приобретала желто-бурую окраску. Данные показали, что ель европейская испытывала дефицит в борном обеспечении, и эффект от внесения борной кислоты под растения зависел от обеспеченности их азотом.

Содержание азота в хвое ели было низким в контроле (N0B0) – $0,6 \%$ от сухой массы (рис. 2: а). Внесение аммиачной селитры при всех дозах борной кислоты увеличивало накопление азота в хвое, максимально до $3,5 \%$ от сухой массы (N100B1). При оптимизации борного питания ели отмечалось повышение (N0B1, N3B1) или тенденция к повышению (N100B1) содержания азота в хвое в $\%$ от сухой массы, за исключением вариантов с дозами азота в 10 и $30 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$, что можно объяснить эффектом разбавления в результате значительного увеличения массы растений, поскольку в расчете на целое растение содержание азота в хвое увеличивалось и в этих двух вариантах (с 20 мг в контроле до 220 и 290 мг в вариантах N10B1 и N30B1 соответственно).

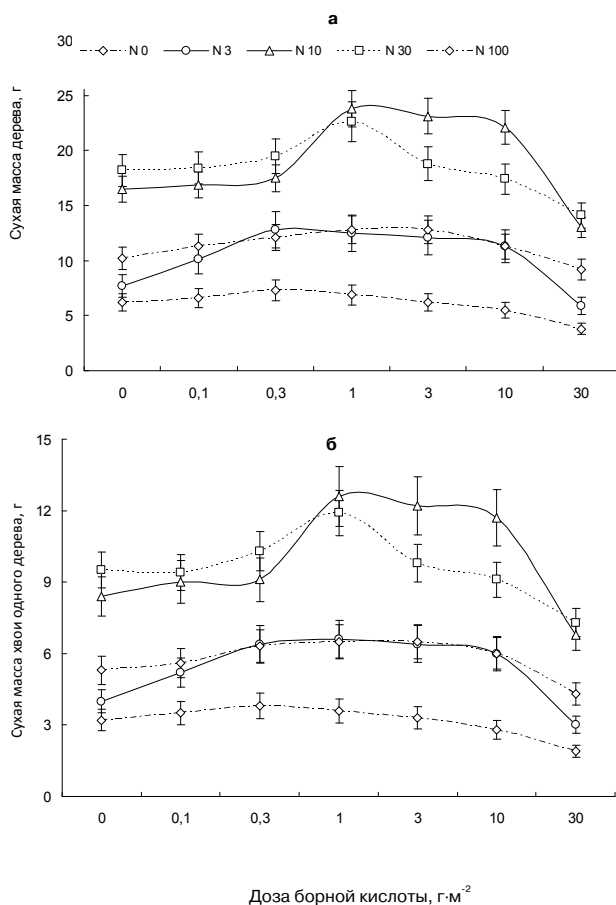


Рис. 1. Влияние обеспечения азотом и бором 5-летней ели европейской на сухую массу дерева (а) и хвои (б)

При содержании азота в хвое, равном $1,8 \%$ от сухой массы, отмечался максимум роста ели (N10B1). Ранее было показано стимулирующее влияние бора на накопление азота и у сосны обыкновенной [Чернобровкина, 2001].

Содержание бора в хвое ели в контроле составляло $110 \text{ мкг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухого вещества (N0B0) (рис. 2: б). Уровень бора в хвое повышался с увеличением дозы внесения в почву борной кислоты при соответствующих уровнях обеспеченности растений азотом, максимально до $875 \text{ мкг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухого вещества (N0B10). Исключением была доза борной кислоты в $1 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$ в условиях токсичного влияния азота в дозе $100 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$ – при ее внесении не отмечалось повышения уровня бора в хвое. При повышении доз аммиачной селитры содержание бора в хвое в расчете на сухую массу преимущественно понижалось или имело тенденцию к снижению – минимально до $44 \text{ мкг}\cdot\text{г}^{-1}$ в варианте N100B0. Внесение в почву азота и других макро- и микроэлементов под сосну обыкновенную также способствовало снижению поступ-

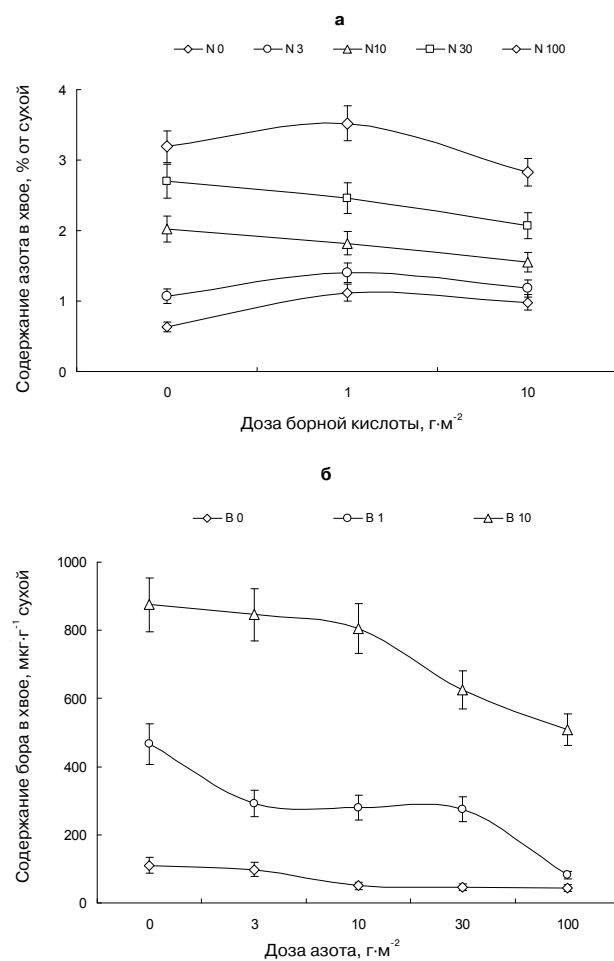


Рис. 2. Влияние обеспечения азотом и бором 5-летней ели европейской на содержание азота (а) и бора (б) в сухой хвое

ления бора в хвою [Чернобровкина и др., 2007]. В литературе отмечается, что в обеспечении бором древесных растений большое значение имеют почвенные условия – повышенное содержание в почве ионов NH_4^+ , Fe^{3+} , Al^{3+} и повышение pH почвы при известковании способствуют закреплению бора почвенными частицами [Wikner, 1983]. По нашим данным, для молодых растений ели европейской содержание бора в хвое на уровне $280 \text{ мкг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухого вещества (N10B1) оказалось оптимальным для их роста в условиях достаточного обеспечения другими ЭМП. При содержании бора в хвое свыше $500 \text{ мкг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухой массы отмечались признаки токсичности бора – желто-бурое окрашивание хвои.

В контроле в хвое ели европейской в осенний период содержалось 16 свободных аминокислот. Их сумма составила $1,5 \text{ мг}\cdot\text{г}^{-1}$ абсолютно сухой хвои. 57 % их массы составлял L-аргинин, который является подвижной формой азота, позволяющей регулировать содержание его минеральных форм, выполняет запасную функцию азота в хвойных растениях [Новицкая, Чикина, 1980; Gezelius, Nasholm, 1993; Huhn, Schulz, 1996]. Запасание L-аргинина в органах хвойных растений обеспечивает азотом процессы их раннего весеннего роста и сезонного развития.

Повышение доз внесения азота на всех фонах борного питания вызывало увеличение суммы свободных аминокислот в хвое, максимально в 26 раз – от $5,5 \text{ мг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухой массы в контроле (N0B0) до $38,6 \text{ мг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухой массы в варианте с самой высокой дозой азота и оптимальной дозой бора (N100B1) (рис. 3: а). При дозе бора, максимально стимулирующей рост ели, сумма аминокислот в хвое снижалась в 4 раза на оптимальном фоне азотного питания (N10B1). Снижение уровня свободных аминокислот в хвое происходило, предположительно, как за счет «эффекта разбавления», так и в результате включения их в состав белковых соединений.

При внесении высоких доз азота влияние бора на накопление суммы аминокислот в хвое практически не наблюдалось (N30B0; N30B1; N30B10) или было слабо отрицательным (N100B0; N100B1; N100B10). В контрольном по азоту варианте накопления аминокислот, естественно, не происходило независимо от обеспеченности бором. Интересная ситуация сложилась в варианте с первой, небольшой, дозой азота (N3B10), где сумма аминокислот в хвое под воздействием максимальной дозы бора возросла в 5 раз. Даже небольшое дополнительное обеспечение азотом ели способствовало накоплению в хвое свободных аминокис-

лот, которые не использовались в метаболических процессах, поскольку избыток бора ингибировал рост растения.

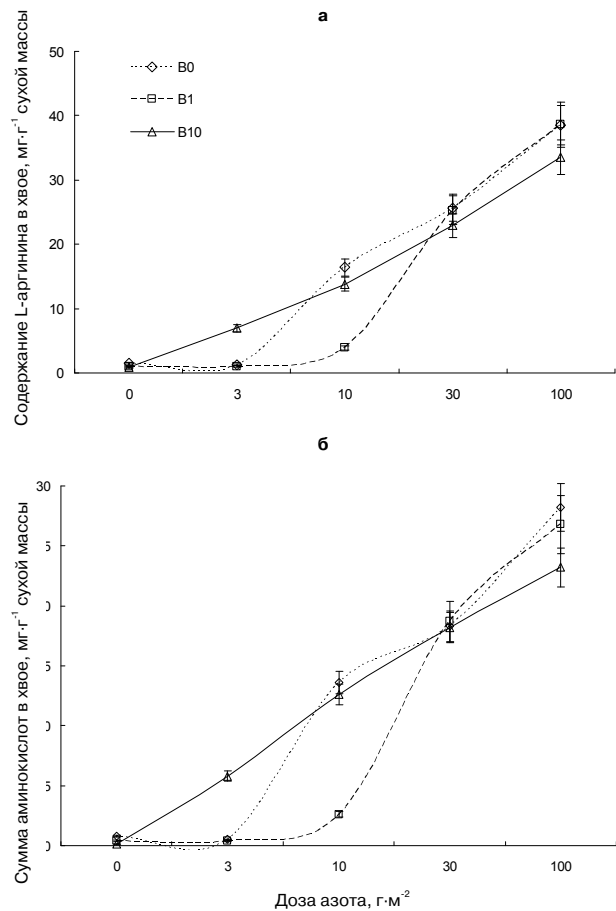


Рис. 3. Влияние обеспечения азотом и бором 5-летней ели европейской на содержание суммы аминокислот (а) и L-аргинина (б) в сухой хвое

L-аргинин составлял основную массу от суммы свободных аминокислот хвои ели не только в контроле, как было отмечено выше, но и во всех вариантах азотного и борного питания (рис. 3: б). Изменение содержания этой аминокислоты в хвое под воздействием азотного и борного обеспечения ели обуславливало динамику суммы аминокислот в различных вариантах. Максимально (в 33 раза по сравнению с контролем) уровень L-аргинина в хвое повышался в вариантах с самой высокой дозой азота без внесения бора и с дозой борной кислоты в $1 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$ (N100B0 и N100B1). При избыточной дозе борной кислоты и первой дозе азота (N3B10) содержание L-аргинина повысилось в 7 раз. Под воздействием оптимальной дозы борной кислоты в условиях оптимального для роста ели уровня азота (N10B1) содержание аминокислоты в единице сухой массы хвои снижалось в 5 раз.

Данные показали, что максимальное накопление свободных аминокислот в хвое, включая L-аргинин, произошло под воздействием самой высокой дозы азота. Оптимизация борного питания ели не вызывала накопления L-аргинина в хвое в условиях достаточного обеспечения ЭМП. Как было показано нами ранее, в условиях высокого уровня азотного питания на низком фоне других ЭМП оптимизация борного обеспечения сосны обыкновенной в 20 раз повышала содержание L-аргинина в хвое [Чернобровкина и др., 2010].

Распределение азота между растворимыми фракциями в значительной степени зависит от обеспеченности растений азотом, фосфором и другими ЭМП. Рибулозо-1,5-бисфосфат-карбоксилаза/оксигеназа (Рубиско), аминокислоты и аммоний могут рассматриваться как соединения, в которых преимущественно накапливается азот, но аккумулируются они в органах и тканях при различных условиях [Warren, Adams, 2002]. С увеличением обеспеченности растений фосфором содержание Рубиско увеличивается, а при высоких дозах азота и низкой обеспеченности фосфором избыточный азот накапливается в форме азота аминокислот и аммония. При дефиците фосфора у сосны обыкновенной повышалось содержание L-аргинина в хвое [Nasholm, Ericsson, 1990]. В случае незначительного или краткосрочного воздействия азотом растения реагируют увеличением интенсивности синтеза белка, если другие элементы питания доступны в достаточном количестве [Huhn, Schulz, 1996]. Высокие дозы азота или долгосрочные воздействия азотом в сосновых древостоях приводят к изменениям в механизме детоксификации избытка азотных соединений. Чтобы избежать накопления токсичного аммиака в растительных клетках, ассимилируемые соединения азота детоксифицируются путем включения в состав свободных аминокислот, преимущественно в состав L-аргинина, имеющего наиболее низкое по сравнению с другими аминокислотами отношение C/N (1,5) [Huhn, Schulz, 1996]. В литературе показано, что сеянцы сосны обыкновенной накапливали и запасали до 80 % азота в форме L-аргинина в случае, если синтез белка был ограничен факторами, отличными от доступности азота [Gezelius, Nasholm, 1993]. Увеличение содержания L-аргинина и глутамина в хвое сосны обыкновенной в 25-летнем, а также 60–80-летнем древостоях указывало на поступление избыточного количества азота в хвойное растение [Huhn, Schulz, 1996]. Уровень этих аминокислот рассматривается как биохимический индикатор загрязнения азотом сосновых древостоев. Необходимо учитывать, однако, что состав и содер-

жание свободных аминокислот в хвое может варьировать в пределах кроны, имеет сезонную, суточную динамику, зависит от внешних воздействий [Новицкая, Чикина, 1980; Nasholm, Ericsson, 1990; Gezelius, Nasholm, 1993; Чернобровкина, 2001]. При внесении в течение 17 лет избыточного количества азота под деревья сосны обыкновенной в условиях Северной Швеции отмечалось значительное повышение уровня L-аргинина в хвое [Nasholm, Ericsson, 1990]. Максимальное количество аминокислоты в хвое в сезонной динамике было отмечено в феврале. При выращивании ели норвежской (*Picea abies* L.) в течение двух сезонов в вегетационных сосудах в условиях фона азотного питания, повышенного в 4 раза по сравнению с оптимальным, содержание свободного L-аргинина в хвое увеличивалось и составляло до 2 % сырого веса [Engvild, 2005]. Отмечалось увеличение содержания и других аминокислот с высоким содержанием азота – орнитина и лизина.

Наши и литературные данные позволяют заключить, что высокий уровень L-аргинина и других аминокислот в органах хвойных растений можно рассматривать как чувствительный биохимический индикатор разбалансированности их минерального питания. При высоком по сравнению с другими ЭМП поступлении азота в хвойное растение часть его органы и ткани не способны использовать для синтеза белков и запасают в форме аминокислот с высоким содержанием азота, прежде всего в форме L-аргинина. Дополнительное оптимальное обеспечение бором хвойного растения ускоряет процессы роста и вместе с тем усиливает дефицит других ЭМП, что приводит к повышению накопления в хвое L-аргинина. В условиях оптимального фона минерального питания многократное накопление аминокислоты в хвое происходит при избыточной дозе борной кислоты и невысокой дозе азота. Последнее обстоятельство представляет интерес с экономической точки зрения – при небольших затратах на азотные удобрения можно достигать значительного повышения уровня L-аргинина в хвое. Древесная зелень используется для производства биологически активных препаратов лечебно-профилактического и кормового назначения [Ягодин, 1981; Левин, Репях, 1984]. Повышение содержания L-аргинина в древесной зелени путем регуляции минерального питания хвойных растений открывает новые возможности использования ее в фармакологии. Предлагается испытание хвои, обогащенной L-аргинином, в качестве сырья для получения этой аминокислоты, а также в качестве иммуностимулятора для ветеринарии.

В заключение следует отметить, что содержание азота и бора в хвое, равное соответственно 1,8 % и 280 мкг·г⁻¹ сухого вещества, обеспечивает оптимальный рост 5-летней ели европейской в условиях оптимального фона других ЭМП. Уровень бора в хвое выше 500 мкг·г⁻¹ сухой массы является избыточным для ели и вызывает желто-бурое окрашивание хвои. Оптимизация борного питания ели способствует накоплению азота в хвое при его невысоком уровне – менее 1 % от сухой массы. При внесении азотных удобрений под растения ели отмечается преимущественно снижение уровня бора в хвое. Содержание L-аргинина в хвое ели увеличивалось максимально в 33 раза в условиях десятикратной по сравнению с оптимальной дозой азота. Установлено многократное повышение количества этой аминокислоты в хвое в варианте с использованием высокой дозы борной кислоты и низкой – азота.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы ФИ ОБН РАН «Биологические ресурсы России: динамика в условиях глобальных климатических и антропогенных воздействий» в рамках проекта № 01201257867.

Литература

- Волова Т. Г. Биотехнология. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 252 с.
- Дахно И. С. Влияние иммуностимуляторов L-аргинина и РНК на иммунный статус коров при фасциозе // Вісник Полтавського державного сільського сподарського інституту. 2000. № 5. С. 32–34.
- Западнюк В. И., Купраш Л. П., Заика М. И. и др. Аминокислоты в медицине. Киев: Здоровье, 1982. 200 с.
- Калинкина Л. Х., Назаренко Л. В., Гордеева Е. Е. Модифицированный метод выделения свободных аминокислот для определения на аминокислотном анализаторе // Физиология растений. 1990. Т. 37. Вып. 3. С. 617–621.
- Левин Э. Д., Репях С. М. Переработка древесной зелени. М: Лесн. пром-сть, 1984. 120 с.
- Новицкая Ю. Е., Чикина П. Ф. Азотный обмен у сосны на Севере. Л.: Наука, 1980. 166 с.
- Рыбак К. В., Сливинская Е. А., Саврасова Е. А. и др. Способ получения L-аминокислот с использованием бактерий, принадлежащих к роду Escherichia. Патент на изобретение № 2304615, РФ. 2005.
- Ульянов А. М., Оберган Т. Ю., Шубина Т. А. и др. Исследование протектирующего действия комплекса аргинина с гепарином при экспериментальном развитии инсулинзависимого диабета // Известия РАН. Сер. биол. 2010. № 1. С. 109–114.
- Чернобровкина Н. П. Экофизиологическая характеристика использования азота сосной обыкновенной. СПб.: Наука, 2001. 175 с.
- Чернобровкина Н. П., Робонен Е. В., Иготти С. А., Дорофеева О. С., Шенгелиа И. Д. Влияние обеспеченности бором на рост сеянцев сосны обыкновенной // Лесоведение. 2007. № 5. С. 69–76.
- Чернобровкина Н. П., Робонен Е. В., Зайцева М. И. Накопление L-аргинина в хвое сосны обыкновенной при регуляции азотного и борного обеспечения // Химия растительного сырья. 2010. № 3. С. 71–75.
- Ягодин В. И. Основы химии и технологии переработки древесной зелени. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 224 с.
- Cakmak I., Kurz H., Marschner H. Short-term effects of boron, germanium and high light intensity on membrane permeability in boron deficient leaves of sunflower // *Physiol. Plant.* 1995. Vol. 95. P. 11–18.
- Camacho-Cristóbal J. J., Rexach J., González-Fontes A. Boron in Plants: Deficiency and Toxicity // *Journal of Integrative Plant Biology.* 2008. Vol. 50. N 10. P. 1247–1255.
- Cengiz Ö., Kucukersan S. Effects of graded contents of arginin supplementation on growth performance, haematological parameters and immune system in broilers // *Revue Med. Vet.*, 2010. Vol. 161. P. 409–417.
- Engvild K. C. The «Red» Decline of Norway Spruce or «Røde Rødgraner» – Is it Ammonium Overload or Top-Dying? // *Risø National Laboratory.* April, 2005. 16 p.
- Ferrol N., Donaire J. P. Effect of boron on plasma membrane proton extrusion and redox activity in sunflower cells // *Plant Sci.* 1992. Vol. 86. P. 41–47.
- Gezelius K., Nasholm T. Free amino acids and protein in Scots pine seedlings cultivated at different nutrient availabilities // *Tree Physiology.* 1993. Vol. 13, N 1. P. 71–86.
- Huhn B.G., Schulz H. Contents of free amino acids in Scots pine needles from field sites with different levels of nitrogen deposition // *New Phytol.* 1996. Vol. 134. P. 95–101.
- Jesse P. Greenstein and Milton Winitz. *Chemistry of Amino Acids.* New York. London. John Veley and Sons, IV. 1961. P. 1847–1848.
- Kobayashi M., Matoh T., Junichi A. Two chains of ramnogalacturonan-2 are cross – linked by borate – diol ester bonds in higher plant cell wall // *Plant Physiol.* 1996. Vol. 110. P. 1017–1020.
- Nasholm T., Ericsson A. Seasonal changes in amino acids, protein and total nitrogen in needles of fertilized Scots pine trees // *Tree Physiology.* 1990. Vol. 6. P. 267–281.
- Warren C. R., Adams M. A. Phosphorus affects growth and partitioning of nitrogen to Rubisco in *Pinus pinaster* // *Tree Physiology.* 2002. Vol. 22. P. 11–19.
- Wikner B. Distribution and mobility of boron in forest ecosystems // *Communications Institution Forestalis Fenniae.* 1983. N 116. P. 131–141.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Чернобровкина Надежда Петровна

ведущий научный сотрудник, д. б. н.
Институт леса Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: chernobr@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 768160

Робонен Елена Вильямовна

ведущий физик
Институт леса Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: er51@bk.ru
тел.: (8142) 768160

Морозов Александр Константинович

зав. аналитической лабораторией
Институт леса Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: amorozov@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 768160

Макарова Тамара Николаевна

ведущий химик
Институт леса Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: chernobr@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 768160

Chernobrovkina, Nadezhda

Forest Research Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: chernobr@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 768160

Robonen, Elena

Forest Research Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: er51@bk.ru
tel.: (8142) 768160

Morozov, Alexandr

Forest Research Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: amorozov@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 768160

Makarova, Tamara

Forest Research Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: chernobr@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 768160