



DOI: 10.22363/2312-797X-2025-20-4-606-617

EDN CDGCKT

УДК 691.278:631.84

Научная статья / Research article

Агрохимическая оценка влияния вермикулита на снижение подвижности ионов аммония

И.П. Кременецкая¹ , М.В. Слуковская^{1, 2, 3}  ,Л.А. Иванова^{2, 4} , М.А. Ярцева⁴ , Т.К. Иванова^{1, 2} 

¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева — обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки ФИЦ Кольский научный центр РАН, г. Апатиты, Российская Федерация

²ФИЦ Кольский научный центр РАН, г. Апатиты, Российская Федерация

³Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация

⁴Полярно-альпийский ботанический сад-институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Российская Федерация

 slukovskaya.mv@gmail.com

Аннотация. Методами фитотестирования почвосмесей с определением форм азота выполнена агрохимическая оценка влияния вспученного вермикулита на снижение подвижности ионов аммония. В исследовании применена мочевины, которую вносили в гранулированном или растворенном виде в широком диапазоне величины дозы азота, в т. ч. с превышением предельно допустимой концентрации. Использовали два вида грунта, отличающихся по содержанию органического компонента. Показано, что вермикулит эффективно снижает содержание обменной формы аммония, фиксированный аммоний превращается в нитратную форму медленнее по сравнению с обменным аммонием.

Ключевые слова: агрохимические исследования, азотные удобрения, аммонийный азот, нитратный азот, фиксированный аммоний, фитотестирование

Вклад авторов: Кременецкая И.П. — концепция исследования, написание текста; Слуковская М.В. — дизайн исследования; Иванова Л.А. — дизайн исследования; Ярцева М.А. — сбор и обработка материалов; Иванова Т.К. — анализ данных. Все авторы одобрили окончательную версию рукописи.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-77-10055). Получение исходных материалов для проведения исследования выполнено в рамках государственного задания № FMEZ-2025–0059 Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья КНЦ РАН.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Кременецкая И.П., Слуковская М.В., Иванова Л.А., Ярцева М.А., Иванова Т.К., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

История статьи: поступила в редакцию 7 мая 2025 г., принята к публикации 8 октября 2025 г.

Для цитирования: Кременецкая И.П., Слуковская М.В., Иванова Л.А., Ярцева М.А., Иванова Т.К. Агрохимическая оценка влияния вермикулита на снижение подвижности ионов аммония // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агронимия и животноводство. 2025. Т. 20. № 4. С. 606–617. doi: 10.22363/2312-797X-2025-20-4-606-617 EDN: CDGCKT

Agrochemical assessment of the effect of vermiculite on reducing ammonium ion mobility

Irina P. Kremenetskaya¹ , Marina V. Slukovskaya^{1,2,3}  ,
Liubov A. Ivanova^{2,4} , Maria A. Yartseva⁴ ,
Tatiana K. Ivanova^{1,2} 

¹I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials — Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”,
Apatity, Russian Federation

²Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, *Apatity, Russian Federation*

³RUDN University, *Moscow, Russian Federation*

⁴N.A. Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute, Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, *Apatity, Russian Federation*

 slukovskaya.mv@gmail.com

Abstract. An agrochemical assessment of the effect of expanded vermiculite on reducing ammonium ions mobility was carried out using methods of phytotesting soil mixtures with determination of nitrogen forms. The studies were conducted using urea, which was added in granular or dissolved form in a wide range of nitrogen dose values, including those exceeding the maximum permissible concentration. We used two types of soil, which differ in the content of the organic component. It has been shown that expanded vermiculite effectively reduces the content of the exchangeable form of ammonium; fixed ammonium turns into the nitrate form more slowly compared to exchangeable ammonium.

Keywords: agrochemical research, nitrogen fertilizers, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, fixed ammonium, phytotesting

Author contributions: I.P. Kremenetskaya — research concept, text writing; M.V. Slukovskaya — research design; L.A. Ivanova — research design; M.A. Yartseva — collection and processing of materials; T.K. Ivanova — data analysis. All authors approved the final version of the manuscript.

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24–77–10055). The acquisition of source materials for the study was carried out within the framework of the state assignment No. FMEZ-2025-0059 of the Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences.

Conflict of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Article history: received 7 May 2025; accepted 8 October 2025.

For citation: Kremenetskaya IP, Slukovskaya MV, Ivanova LA, Yartseva MA, Ivanova TK. Agrochemical assessment of the effect of vermiculite on reducing ammonium ion mobility. *Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2025;20(4):606–617. doi: 10.22363/2312-797X-2025-20-4-606-617 EDN: CDGCKT

Введение

Интенсивное применение минеральных азотных удобрений на современном этапе развития агротехнологий привело к ряду негативных последствий, таких как нарушение природного биогеохимического цикла азота, деградация свойств почв и угнетение процессов их функционирования [1, 2]. Эвтрофикация водоемов в результате избыточного поступления нитратов, эмиссия соединений азота из почвы в атмосферу, загрязнение нитратами растительной продукции являются следствием положительного баланса азота в агросистемах из-за нерационального применения удобрений [3]. Для достижения максимальной продуктивности сельскохозяйственных культур применяется дозировка удобрений, часто превышающая экономически обоснованные нормы, при которых прирост урожайности окупает затраты на удобрения [4].

С увеличением стоимости средств химизации из-за повышения цен на энергоносители на протяжении 1990-х гг. активное использование минеральных удобрений стало экономически менее выгодным. Кроме того, в этот же период установлено, что активное применение удобрений сопряжено с экологическими рисками. В развитых странах акцент сместился на достижение устойчивых урожаев при соблюдении экологически и экономически оптимальных доз удобрений, а не на получение максимальной урожайности [1].

Современные стратегии устойчивого и экологически безопасного сельского хозяйства сосредоточены на оптимизации азотного режима почвы с целью увеличения эффективности производства растений. Один из ключевых подходов состоит в разработке технологий внесения минеральных и органических удобрений, позволяющих синхронизировать период доступности азота с фазами активного его потребления растениями. Дополнительно разрабатываются биологические методы ингибирования нитрификации, предлагающие альтернативу химическим ингибиторам.

Доступные формы азота — аммонийная и нитратная — в теоретических подходах к питанию растений считаются равноценными [5]. Тем не менее, исследования показывают, что аммоний активно удерживается почвенным комплексом в почвах с высокой емкостью катионного обмена, и в жидкую фазу почвы попадает лишь незначительная его часть. Аммоний, попавший в жидкую фазу, подвергается нитрификации, вследствие чего основным источником азота для растений становятся нитраты [5]. Например, на примере овса показано, что удобрения, такие как НРК и органические, оказывают значительное влияние на урожайность растений благодаря запасам нитратов ($N-NO_3$), которые накапливаются до начала всходов в слое почвы 0–40 см. Между содержанием нитратов в почве и урожайностью овса обнаружена высокая корреляция [5].

При анализе азотного режима почвы важно учитывать не только общее содержание азота в различных формах, но и продолжительность их существования в почве, а также скорость их образования и потребления [1]. Самые короткие жизненные циклы (от 1 до 10 часов) имеют растворимые органические соединения [6]. При достаточном уровне доступного углерода продолжительность

существования для NH_4^+ и NO_3^- составляет менее суток, а для микробной биомассы — до 11 суток. В условиях недостатка углерода этот период увеличивает-ся до трех суток для NH_4^+ , до 25...136 суток для NO_3^- и до 360...425 суток для микробной биомассы.

Различные биотические и абиотические процессы оказывают влияние на подвижность азота в почве. Абиотическая мобилизация азота происходит за счет десорбции обменно-поглощенного и освобождения фиксированного N-NH_4^+ при увеличении влажности почвы и концентрации катионов, а также в условиях, способствующих диспергированию глинистых частиц и органоминеральных коллоидов. В то же время адсорбция N-NH_4^+ , аминокислот и амидов органическими и минеральными частицами, фиксация N-NH_4^+ глинистыми минералами, удержание нитратов в микропорах и консервация простых органических соединений азота в микроагрегатах способствуют стабилизации азота на абиотическом уровне [7].

Цель исследования — агрохимическая оценка применения вермикулита для оптимизации питания растений азотом. Можно ожидать, что снижение подвижности аммонийного азота вермикулитом [8, 9] будет способствовать ингибированию процесса его нитрификации.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования выполнены с использованием гранулированной мочевины и двух типов грунта. Первый представляет собой образцовую (референсную) смесь для определения хронической токсичности с низким содержанием органического вещества¹. Смесь рекомендуется составлять из песка, глины и торфа при соотношении, мас. %: 70:20:10. Второй грунт — огородная почва — характеризуется высоким содержанием органического вещества. Свойства исходных грунтов приведены при описании результатов исследования.

Термовермикулит фракции 1–2 мм получен из вермикулитового концентрата Ковдорского месторождения путем обжига на электрической модульно-спусковой печи конструкции Нижегородова при температуре 550 °С [10, 11]. Материал имеет следующие характеристики: насыпная плотность 500 г/дм³, влагоудерживающая способность 100 мас. %, рН(H_2O) 9.2, рН(KCl) 7.4, обменная емкость 80...150 мг-экв/100 г.

В первой серии экспериментов (маркировка МП) часть песка заменяли вермикулитом в количестве 5 и 10 мас. % от общей массы почвосмеси (табл. 1). Мочевину вводили в виде гранул, распределяя в верхней части вегетационного сосуда на глубину 10 см. Почвосмеси в количестве 2 кг помещали в вегетационный сосуд объемом 5 л, на дно которого укладывали дренажный слой из керамзита. Условия опыта соответствуют избыточному содержанию азота, дополнительное количество которого по сравнению с содержанием в исходном грунте составило 450–1350 мг/кг при ПДК 300 мг/кг. В качестве контроля поставлен опыт без вермикулита и без добавления мочевины (МП10). Все опыты выполнены в трех повторностях.

¹ ИСО 22030:2005. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая токсичность высших растений.

Почвосмеси проанализированы на острую и хроническую токсичность с применением горчицы сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern) и овса посевного (*Avena sativa* L.) соответственно, продолжительность экспозиции 7 и 30 суток.

Таблица 1

Состав почвосмесей в опыте с низким содержанием органического вещества

Маркировка опытов	Количество компонентов почвосмеси, мас. %				Дозировка мочевины, г/кг
	Песок	Вермикулит	Глина	Торф	
МП10 контроль	70	0	20	10	0
МП1	70	0	20	10	1
МП2	70	0	20	10	2
МП3	70	0	20	10	3
МП4	65	5	20	10	1
МП5	65	5	20	10	2
МП6	65	5	20	10	3
МП7	60	10	20	10	1
МП8	60	10	20	10	2
МП9	60	10	20	10	3

Источник: выполнено И.П. Кременецкой, М.В. Слуковской.

Во второй серии экспериментов (маркировка МО) в качестве тест-культуры использовали огурец обыкновенный (*Cucumis sativus* L.), семена которого предварительно проращивали. Перед внесением в грунт вермикулит обогащали минеральным азотом путем внесения раствора мочевины с разной концентрацией (3, 6 и 9 г N/л) для достижения количества внесенного в почву азота 200, 400 и 600 мг N/кг. Затем вермикулит перемешивали с почвой. Такой способ облегчает процесс равномерного распределения удобрения в объеме почвосмеси. В контрольных опытах (без вермикулита) раствор мочевины вносили в почву и также тщательно перемешивали. Опыт выполнен в трех повторностях (опыт без вермикулита и с содержанием добавленного азота 200 мг N/кг — в девяти повторностях).

По окончании опытов в почвосмесях определяли содержание водорастворимых нитратов и обменного аммония (раствор KCl с концентрацией 1 моль/л²) при соотношении материала и воды 1:5, в солевой вытяжке при 1:2,5. Раствор от материала отделяли методом центрифугирования при скоростном режиме 4000 об/мин в течение 30 минут. Метод определения является визуально-калориметрическим, аналогичным методу по ГОСТ 26488–85³. Биохимические показатели растений овса определены с помощью листового спектрометра CI-710s (SpectraVue).

² ГОСТ 26483–85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО.

³ ГОСТ 26488–85. Почвы. Определение нитратов по методу ЦИНАО.

Результаты исследования и обсуждение

В первой серии МП исследовано влияние вермикулита на распределение азота по формам нахождения в почвогрунте с низким содержанием органической части (10 мас.%). Контрольная почвосмесь характеризуется крайне низким содержанием подвижных форм азота, нитратный азот отсутствует, а содержание $N(NH_4^+)$ составляет 2 мг N/кг (табл. 2). В опытных вариантах содержание обменного NH_4^+ увеличивается по мере увеличения дозы мочевины, в то время как содержание NO_3^- изменяется в узком диапазоне от 35 до 40 мг N/кг (табл. 2). Добавление вермикулита кардинально, в несколько раз, снижает содержание обменного аммония в почвосмесях.

Таблица 2

Содержание азота и показатели токсичности почвосмесей

Маркировка опытов	Содержание азота N, мг/кг			Всхожесть горчицы	Длина (овес), см	
	Внесено с мочевиной	$N(NH_4^+)$	$N(NO_3^-)$		Растение	Корень
МП10 контроль	0	2	0	100	28,5	7,6
МП1	450	10	35	50	33,9	4,9
МП2	900	20–60	35	2	32,7	4,2
МП3	1350	200	35	0	34,3	3,6
МП4	450	5	35	70	37,1	5,9
МП5	900	15	35	5	35,2	6,1
МП6	1350	50	35	2	26,2	4,0
МП7	450	3	35	100	35,9	6,6
МП8	900	5	40	20	34,5	6,5
МП9	1350	10	40	10	25,1	4,6

Источник: выполнено И.А. Мосендз, Т.К. Ивановой.

Острая токсичность почвосмесей тем больше, чем больше в них обменного аммония. Синхронно со снижением обменного аммония снижается острая токсичность почвосмесей (табл. 2, рис. 1). Данное наблюдение свидетельствует о токсическом воздействии обменной формы аммония.

Овес (тест-культура для определения хронической токсичности) характеризуется высокой пластичностью, т.е. способен адаптироваться к неблагоприятным условиям в широком диапазоне воздействия стрессового фактора [12].

Одним из ранних признаков повреждающего действия неблагоприятных факторов на растения является торможение ростовых процессов, что наблюдалось в первые несколько дней прорастания семян (рис. 2).

По окончании опыта продолжительностью 30 суток биометрические показатели растений выровнялись и статистически значимо не отличались по вариантам эксперимента (средние значения длины растения и корня показано в табл. 2).

Можно лишь отметить тот факт, что в контрольном опыте длина корня заметно больше по сравнению с экспериментальными вариантами. В экспериментальных вариантах корни располагались преимущественно на поверхности субстрата, проникая вглубь на незначительную глубину. Данное наблюдение подтверждает токсичность субстратов, наиболее выраженную, судя по длине корней, в вариантах с наибольшей дозой мочевины (МП 3, 6, 9).

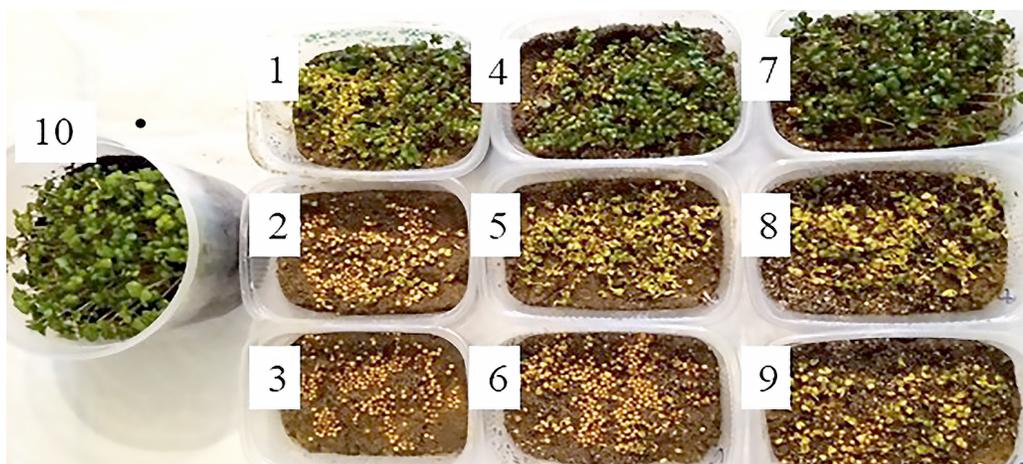


Рис. 1. Внешний вид проростков горчицы: цифрами обозначены номера вариантов
Источник: выполнено И.А. Мосендз, Т.К. Ивановой.

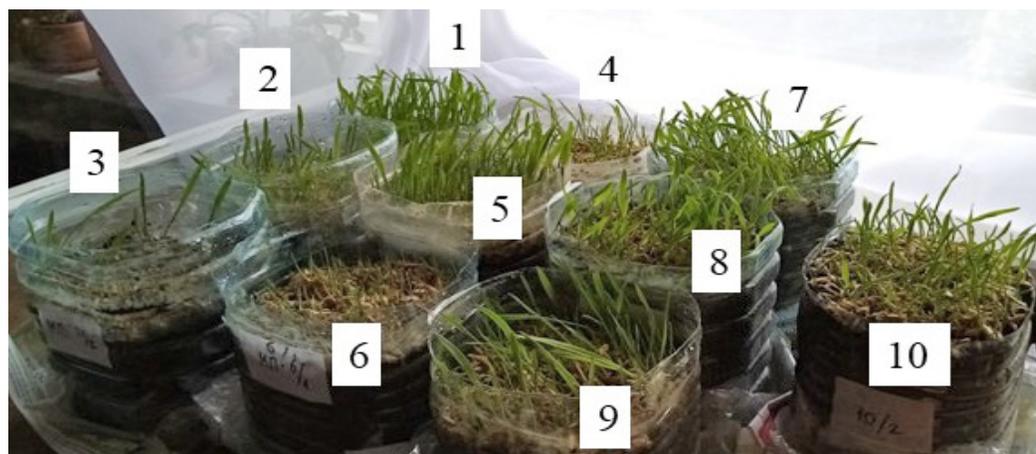


Рис. 2. Внешний вид проростков овса: цифрами обозначены номера вариантов
Источник: выполнено И.А. Мосендз, Т.К. Ивановой.

По биохимическим показателям растений статистически значимых различий между вариантами опыта не обнаружено (табл. 3). Значения индекса SPAD (показатель концентрации листового хлорофилла) в опытах МП 4–6 несколько выше по сравнению с контролем и другими экспериментальными вариантами. У рас-

тений в тех же опытах более высокие значения показателя SIPI — структурного индекса интенсивности пигментов, который хорошо согласуется с эффективностью усвоения углерода и активностью роста, а также тесно связан с поглощением фотосинтетически активной радиации.

Каротиноиды (CRI1) выполняют функции поглощения света растениями, а также указывают на наличие ослабленных растений (содержат большее количество каротиноидов). Данный показатель не изменяется по вариантам эксперимента, что подтверждает высокую адаптивность использованной тест-культуры (овес посевной). Универсальный индикатор наличия зеленой здоровой растительности (CNDVI) — показатель количества фотосинтетически активной биомассы, чем больше зеленая фитомасса, тем выше индекс. Для данного индекса (как и для SPAD) наблюдаются более высокие значения в опытах МП 4–6. На основании биохимических показателей можно предположить, что содержание вермикулита 5 мас.% соответствует наиболее благоприятным условиям произрастания растений.

Таблица 3

Биохимические показатели растений (*Cucumis sativus* L.)

Маркировка опыта	Биохимические показатели растений							
	SPAD		SIPI		CRI1		CNDVI	
	сред.*	дов. инт.	сред.	дов. инт.	сред.	дов. инт.	сред.	дов. инт.
МП10	14,6	7,9	0,65	0,12	0,036	0,019	0,26	0,15
МП1	15,2	2,9	0,60	0,06	0,030	0,008	0,25	0,05
МП2	16,8	7,2	0,63	0,08	0,034	0,012	0,27	0,11
МП3	22,2	9,2	0,63	0,05	0,032	0,009	0,28	0,06
МП4	25,2	10,9	0,65	0,03	0,034	0,007	0,27	0,05
МП5	23,0	4,4	0,69	0,03	0,043	0,009	0,33	0,03
МП6	22,7	6,6	0,99	0,01	0,047	0,014	0,34	0,05
МП7	16,9	2,5	0,64	0,02	0,037	0,007	0,27	0,04
МП8	25,6	33,5	0,67	0,12	0,039	0,007	0,32	0,13
МП9	19,9	8,6	0,69	0,16	0,043	0,051	0,27	0,09

Примечание. *сред. — среднее значение, дов. инт. — доверительный интервал.

Источник: выполнено И.А. Мосендз, М.В. Слукowsкой.

Во второй серии эксперимента исследовано влияние вермикулита на содержание форм азота при высоком содержании органического компонента в почвосмеси (табл. 4). В опыте без добавления вермикулита избыток минерального азота

оказывает токсическое действие на тест-культуру (огурец), количество погибших растений составляет 1–2 экземпляра в опытах с трехкратной повторностью. В вариантах с вермикулитом при тех же количествах добавленного в составе мочевины азота наблюдается 100% выживаемость растений. По количеству листьев более высокие показатели зафиксированы в серии с добавлением 10 % вермикулита, а по количеству плодов — в серии с 5 % вермикулита. В этой же серии больше бутонов и цветов.

Таблица 4

Схема и результаты эксперимента с высоким содержанием азота

Маркировка	Содержание вермикулита, мас. %	Количество добавл. азота, мг N/кг	Содержание N, мг/кг			Растения, выжившие / всего	Количество на одно растение			
			NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Сумма N		Листья	Бутоны	Цветы	Плоды
ПО 1	0	0	20	55	75	2/3	10	6	3	0,5
ПО 2	0	200	20	55	75	3/9	9	6	3	1,3
ПО 3	0	400	40	45	85	1/3	11	11	1	0
ПО 4	0	600	30	50	80	2/3	7	0,5	1,5	0,5
ПО 7	5	0	20	55	75	3/3	10	5	3	1,3
ПО 8	5	200	10	55	65	3/3	11	4	3,3	1
ПО 9	5	400	15	45	60	3/3	11,3	5,6	2,3	2,3
ПО 10	5	600	30	45	75	3/3	11	7	2	1,6
ПО 11	10	0	40	45	85	3/3	8,6	2,6	1,6	0
ПО 12	10	200	30	45	75	3/3	8,6	3,3	1,3	0
ПО 13	10	400	30	45	75	3/3	13,3	7,3	3,3	1,3

Источник: выполнено М.А. Ярцевой, Л.А. Ивановой.

В вариантах с 5 % вермикулита наблюдается тенденция снижения содержания обменного азота относительно первой и третьей серий (без вермикулита и с 10 % вермикулита), снижается и токсичность почвосмесей. Содержание нитратного азота изменяется в узком интервале 45...55 мг N/кг, его концентрация в этом диапазоне не оказывает негативного влияния на растительные организмы. По суммарному содержанию подвижных форм азота отличие вариантов наиболее выражено: в опытах с 5% содержанием вермикулита N составляет не более 75 мг N/кг, а в двух других вариантах значение этого показателя не менее 75 мг N/кг.

Мочевина (NH₂)₂CO является наиболее концентрированным по азоту удобрением. В водной среде происходит гидролиз мочевины с образованием аммония, который на следующей стадии окисляется до нитрат-иона. Обе формы азота (аммонийный и нитратный) могут использоваться растениями в качестве источников питания. Вермикулит способен оказать влияние на скорость протекания процесса нитрификации аммония в результате проявления ионообменных свойств.

Выполненные эксперименты с высокой дозой внесения мочевины показали, что вермикулит снижает содержание обменного аммония в почвосмесях. Как показали результаты опыта с образцовой почвосмесью, снижение содержания обменного азота является результатом увеличения доли фиксированного (необменного) азота, а не следствием выноса азота с биомассой, поскольку биометрические показатели растений по вариантам эксперимента отличались незначительно.

Согласно [13], фиксация азота происходит при достижении порога концентрации аммония в растворе, выше которой часть ионов аммония закрепляется в решетке минерала. В серии с содержанием вермикулита 5 % при одинаковой концентрации аммония в растворе вероятность достижения такого порога увеличивается по сравнению с вариантами с 10 % вермикулита.

Обеспеченность почв азотом определяется преимущественно содержанием нитратного азота в доступной форме [14]. Узкий диапазон изменения содержания подвижного NO_3^- в почве как в первой серии экспериментов при низком содержании органического компонента (35...40 мг N/кг), так и во второй серии с высоким содержанием органики (45...55 мг N/кг) свидетельствует о том, что аммоний, фиксированный вермикулитом, обладает способностью постепенно окисляться с образованием нитратов, которые поступают в почвенный раствор и являются источником питания растений. По обеспеченности азотом почвосмеси с вермикулитом относятся к среднему уровню (30...50 мг N/кг [15]). Фиксированный аммоний медленнее по сравнению с обменной формой высвобождается в почвенный раствор, способствуя синхронизации процессов потребления азота растениями с наличием элементов питания в почве.

Заключение

Положительное влияние добавления вермикулита в состав почвосмесей выявлено в экспериментах, которые отличаются концентрацией азота, способом внесения удобрения, содержанием органического компонента в исходной почве. Показано, что высокое содержание обменного аммонийного азота оказывает токсическое действие на растения. Содержание нитратного азота во всех экспериментах изменялось в узком интервале значений, не влияя на токсичность почвы. Наиболее благоприятные почвенные условия создаются при внесении вермикулита в количестве 5 мас.% благодаря увеличению доли фиксированного аммония, который превращается в нитратную форму медленнее по сравнению с обменным аммонием.

Список литературы

1. Семенов В.М. Современные проблемы и перспективы агрохимии азота // Проблемы агрохимии и экологии. 2008. № 1. С. 55–63. EDN: JXDATP
2. Башкин В.Н. Экологические риски применения азотных удобрений // Проблемы анализа риска. 2022. Т. 19. № 2. С. 40–53. doi: 10.32686/1812-5220-2022-19-2-40-53 EDN: JNDAFM
3. Бузетти К.Д., Иванов М.В. Воздействие минеральных и органических удобрений на экосистему, качество сельскохозяйственной продукции и здоровье человека // Аграрная наука. 2020. № 5. С. 80–84. doi: 10.32634/0869-8155-2020-338-5-80-84 EDN: DQLGFZ

4. *Sharma L.K., Bali S.K.* A Review of Methods to Improve Nitrogen Use Efficiency in Agriculture // Sustainability. 2018. Vol. 10. № 1. P. 51. <https://doi.org/10.3390/su10010051>
5. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Шукина В.И.* Формирование урожая овса в зависимости от режима азотного питания растений на серых лесных почвах Владимирского ополья // Проблемы агрохимии и экологии. 2023. № 3. С. 4–16. doi: 10.26178/AE.2023.76.40.002 EDN: AYRCYI
6. *van Hees P.A.W., Jones D.L., Finlay R., Godbold D.L., Lundström U.S.* The carbon we do not see — the impact of low molecular weight compounds on carbon dynamics and respiration in forest soils: a review // Soil Biology and Biochemistry. 2005. Vol. 37. № 1. P. 1–13. doi: 10.1016/j.soilbio.2004.06.010
7. *Liao J.D., Boutton T.W., Jastrow J.D.* Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland // Soil Biology and Biochemistry. 2006. Vol. 38. № 11. P. 3184–3196. doi: 10.1016/j.soilbio.2006.04.003
8. *Mazloomi F., Jalali M.* Effects of vermiculite, nanoclay and zeolite on ammonium transport through saturated sandy loam soil: column experiments and modeling approaches // Catena. 2019. Vol. 176. P. 170–180. doi: 10.1016/j.catena.2019.01.014 EDN: XZOOPI
9. *Иванова Т.К., Мосендз И.А., Кременецкая И.П., Слуковская М.В., Максимова В.В., Красавцева Е.А.* Получение азотсодержащих удобрений на основе серпентиновых минералов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2023. № 20. С. 563–569. doi: 10.31241/FNS.2023.20.070 EDN: BNAUGR
10. *Нижегородов А.И.* Электрические модульно-спусковые печи с системой рекуперации энергии для обжига вермикулитовых концентратов // Новые огнеупоры. 2015. № 10. С. 22–27. doi: 10.17073/1683-4518-2015-10-22-27
11. *Звездин А.В., Нижегородов А.И.* Оценка энергоэффективности подвесной нагревательной системы электрической печи для тепловой обработки сыпучих материалов // Вестник ИрГТУ. 2019. Т. 23. № 1. С. 41–53. doi: 10.21285/1814-3520-2019-1-41-53 EDN: VVBEDE
12. *Солдатова В.Ю., Шадрин Е.Г., Карпова С.Д.* Биотестирование фитотоксичности почвогрунтов г. Якутска с использованием тест-объекта овса посевного *Avena sativa* L. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 24. № 2. С. 76–86. doi: 10.31242/2618-9712-2018-24-2-76-86 EDN: PREGEK
13. *Тырина Н.С.* Исследование механизма и параметров сорбции аммония на юрских глинистых породах Московского региона // Геоэкология. Инженерия геология. Гидрогеология. Геокриология. 2009. № 2. С. 136–142. EDN: JWNQBN
14. *Гамзиков Г.П.* Прогноз обеспеченности почв азотом и потребности полевых культур в азотных удобрениях // Инновации и продовольственная безопасность. 2015. № 3 (9). С. 11–20. EDN: VVCCXF
15. *Гамзиков Г.П.* Принципы почвенной диагностики азотного питания полевых культур и применения азотных удобрений // Совершенствование методов почвенно-растительной диагностики азотного питания растений и технологий применения удобрений на их основе. М. : ВНИПТИХИМ, 2000. С. 33–55.

Об авторах:

Кременецкая Ирина Петровна — старший научный сотрудник, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева — обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр» Российской академии наук, Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, мкрн. Академгородок, д. 26 а; e-mail: i.kremenetskaia@ksc.ru

ORCID: 0000-0003-3531-8273 SPIN-код: 7227-0180

Слуковская Марина Вячеславовна — старший научный сотрудник, лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, ФИЦ Кольский научный центр РАН, Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева — обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр» Российской академии наук, Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, мкрн. Академгородок, д. 26 а; e-mail: m.slukovskaya@ksc.ru

ORCID: 0000-0002-5406-5569 SPIN-код: 8540-8055

Иванова Любовь Андреевна — главный научный сотрудник, лаборатория декоративного цветоводства и озеленения, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Российская

Федерация, 184209, г. Апатиты, мкрн. Академгородок, д. 18 а; ведущий научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера, Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, мкрн. Академгородок, д. 18 а; e-mail: ivanova_la@inbox.ru

ORCID: 0000-0002-7994-5431 SPIN-код: 5752-3648

Ярцева Мария Александровна — аспирант, ведущий инженер, лаборатория интродукции и акклиматизации растений, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина — обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр» Российской академии наук, Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, мкрн. Академгородок, д. 18 а; e-mail: 468975@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7560-6339 SPIN-код: 9820-0196

Иванова Татьяна Константиновна — младший научный сотрудник, лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, ФИЦ Кольский научный центр РАН, Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева — обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр» Российской академии наук, Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, мкрн. Академгородок, д. 26 а; e-mail: tk.ivanova@ksc.ru

ORCID: 0000-0002-8103-2279 SPIN-код: 8752-2850