

УДК 634.11:631.81.095.337:581.192:577.175.1

ВЗАИМОСВЯЗЬ ДИНАМИКИ СОДЕРЖАНИЯ МОЛИБДЕНА В ЛИСТЬЯХ ЯБЛОНИ С ПОГОДНЫМИ УСЛОВИЯМИ И ФИТОГОРМОНАЛЬНОЙ АКТИВНОСТЬЮ РАСТЕНИЙ

Андрей Иванович Кузин^{1, 2, 3}

доктор сельскохозяйственных наук, профессор

andrey.kuzin1967@yandex.ru

Глеб Борисович Свиридов¹

аспирант

sviridoff.gleb2013@yandex.ru

Наталия Сергеевна Арцыбашева¹

аспирант

natalia.artsibasheva@yandex.ru

¹Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина

²Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

³Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина

г. Тамбов, Россия

Аннотация. Мы определяли содержание молибдена (Mo) в листьях 11-12 раз за сезон вегетации в 2020-2023 гг. под влиянием некорневых подкормок с Mo и при их отсутствии. Некорневые подкормки стимулировали значительное увеличение содержания Mo. Наиболее высокие уровни содержания Mo совпадали с периодами интенсивного роста побегов и плодов яблони (синтез ауксина), а также развития и созревания плодов яблони (синтез ауксина и абсцизовой кислоты). Июльская засуха оказывала негативное влияние на

обеспеченность растений яблони молибденом поэтому некорневые подкормки в этот период весьма необходимы для нормального роста и развития растений.

Ключевые слова: яблоня, молибден, динамика содержания молибдена в листьях, погодные условия, ауксин, абсцизовая кислота.

Лист считается индикаторным органом для растений яблони – по содержанию минеральных элементов в листьях проводят оценку обеспеченности растений минеральным питанием и разрабатывают программы по внесению удобрений [1]. Так как растения яблони в течение вегетации проходят различные фенологические фазы, то потребность в элементах питания в течение сезона вегетации различается, поэтому очень важно понимать динамику содержания элементов. В литературе много информации о сезонности основных питательных веществ, но статьи, касающиеся потребности растений яблони в микроэлементах, динамики их содержания, представлены в гораздо меньшей степени.

Недостаток микроэлементов может оказывать весьма негативное воздействие на растения [2]. Однако и среди микроэлементов также можно выделить питательные вещества с разной степенью изученности для яблони. Одним из наименее изученных питательных веществ является молибден (Mo). В то же время функции молибдена в растениях очень важны, известно несколько ферментов, в которых он является кофактором: например, нитратредуктаза, ключевой фермент, регулирующий азотистый обмен [3], а также в ферментах, которые участвуют в метаболизме серы. Синтез ауксина и абсцизовой кислоты происходит при участии фермента с Mo-кофактором альдегидоксидазы [4].

В литературе как в отечественной, так и в зарубежной недостаточно информации о молибдене. При этом имеющиеся сведения о содержании Mo в листьях яблони довольно противоречивы. Так, в некоторых источниках сообщается, что в конце июля - начале августа содержание Mo в листьях яблони находилось на уровне 0,1 мг/кг на 1 день, тогда как под влиянием внекорневых подкормок его содержание в листьях за этот период увеличилось до 0,2 мг/кг [5]. Также есть сообщение Kanguuehi [6], когда при анализе листьев яблони в рамках одного эксперимента содержание Mo в разных повторностях опыта отличалось в 10 раз условиях Южной Африки.

Целью наших исследований было определение периодов с максимально высоким содержанием Мо в листьях яблони в течение вегетации, чтобы уточнить фенологические стадии наибольшей потребности в этом микроэлементе, а также взаимосвязь его содержания с погодными условиями для улучшения программ некорневых подкормок.

Наши исследования проводились в 2020-2023 гг. в промышленном саду яблони сорта Богатырь, привитом на подвое 54-118, 2002 г. по схеме посадки 6 х 4 м в АО "Дубовое" (Тамбовская область, Петровский район). Сад оборудован системой капельного орошения, ленты лежат на земле. Междурядья содержатся под залужением.

Ежегодные программы некорневых подкормок Мо-содержащими агрохимикатами (на фоне комплексной программы некорневого питания) представлены в таблице 1. Обработки удобрениями осуществлялись в баковых смесях с пестицидами. Агрохимикат Ультрамаг Кальций (УСа) с содержанием Мо 0,001% д.в. применялся в норме расхода 3,0 л/га, Ультрамаг Молибден (УМо) 3% д.в., норма расхода – 0,05 л/га

Таблица 1

Программа некорневых подкормок молибденсодержащими агрохимикатами 2020-2023 гг.

Розовый бутон	Осыпание лепестков	Диаметр плода 20 мм	Диаметр плода 40 мм	Диаметр плода 45-50 мм	Диаметр плода 50-55 мм	Диаметр плода 55-60 мм	Диаметр плода 60-65 мм
2020							
			<u>17.06.</u> УСа	<u>27.06.</u> УСа	<u>06.07.</u> УСа	<u>16.07.</u> УСа	<u>27.07.</u> УСа
2021							
			<u>09.06.</u> УСа	<u>18.06.</u> УСа	<u>08.07.</u> УСа	<u>15.07.</u> УСа	<u>30.07.</u> УСа
2022							
<u>03.05.</u> УСа УМо	<u>29.05.</u> УСа УМо	<u>13.06.</u> УСа УМо	<u>24.06.</u> УСа УМо	<u>04.07.</u> УСа УМо	<u>16.07.</u> УСа	<u>24.07.</u> УСа	<u>05.08.</u> УСа
2023							
<u>08.05.</u> УМо	<u>27.05.</u> УСа	<u>07.06.</u> УСа УМо	<u>16.06.</u> УСа	<u>29.06.</u> УСа УМо	<u>06.07.</u> УСа УМо	<u>19.07.</u> УСа	

Повторность опыта - четырехкратная. В каждой учетной делянке – 15 деревьев. Для анализа отбирали образцы листьев с двух вариантов: 1. без некорневых подкормок (Контроль); 2. с некорневыми подкормками (Некорневые подкормки). Образцы листьев были взяты из средней части однолетних побегов с середины кроны деревьев. В течение сезона пробы отбирали 11-12 раз (образец состоял из 60 листьев). Содержание Мо листьев определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (MGA-915 MD, Lumex, Россия) [7, 8]. Статистическую обработку результатов осуществляли по Б.А. Доспехову [9].

В 2020 году общее количество осадков за период наблюдений (апрель-сентябрь) составило 187,6 мм (при среднемноголетней норме 350 мм), а в январе-марте этого года выпало всего 77,6 мм осадков (рисунок 1Б). Апрель также был засушливым - 21 мм, что значительно меньше среднемноголетнего показателя. В мае выпало 77,2 мм, что частично компенсировало апрельскую засуху. Следует отметить, что в целом погодные условия были засушливыми.

На фоне таких погодных условий динамика содержания Мо в листьях в 2020 году под влиянием некорневых подкормок значительно отличалась от контроля (рисунок 1А). В варианте без обработок содержание Мо в листьях резко возросло к середине мая – началу июня, но затем снизилось к середине июня. Существенное увеличение уровня содержания Мо в листьях также было отмечено и при некорневых подкормках. Обращает на себя внимание, что содержание Мо в листьях резко повышалось и без внесения удобрений. При внесении удобрений содержание Мо в листьях значительно увеличилось по сравнению с контролем и было максимальным в период с середины июня до конца июля. Июльский пик увеличения содержания Мо в листьях так же был и в варианте без внесения удобрений, хотя и не столь заметный.

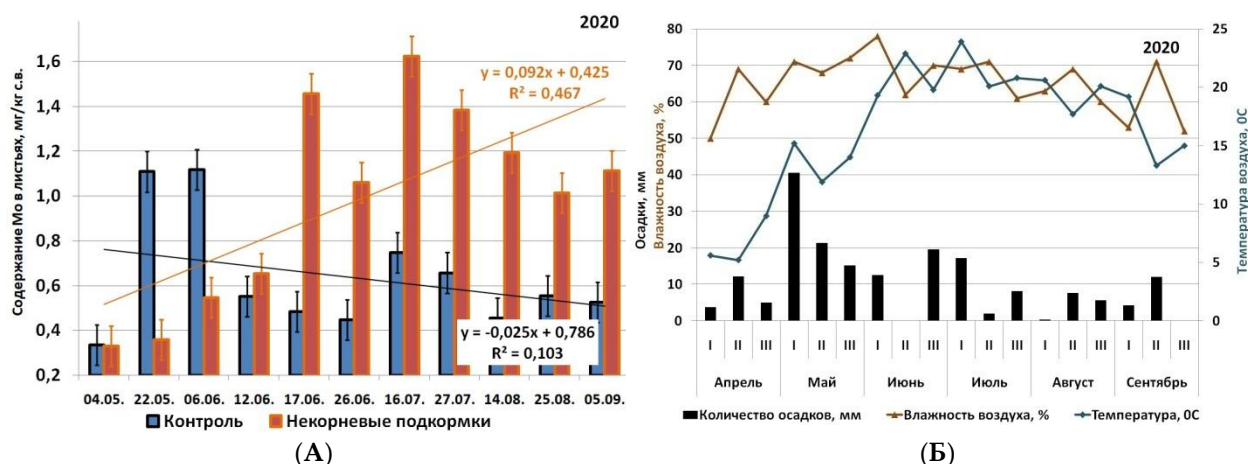


Рисунок 1 - Динамика содержания Мо в листьях яблони (А); среднедекадное количество осадков, температура и влажность воздуха (Б) в сезоне 2020 года

В 2021 году сумма осадков за период наблюдений составила 269,6 мм, а за январь-март 71,4 мм (рисунок 2Б). Март был достаточно сухим (всего 3,2 мм), но в апреле выпало 50,4 мм осадков, что позволяет говорить об относительно удовлетворительной влагообеспеченности в начале вегетации. Трудности могли возникнуть во второй половине периода наблюдений, когда осадков было недостаточно и среднесуточная влажность воздуха не превышала 70%, опускаясь в отдельные дни до 30%.

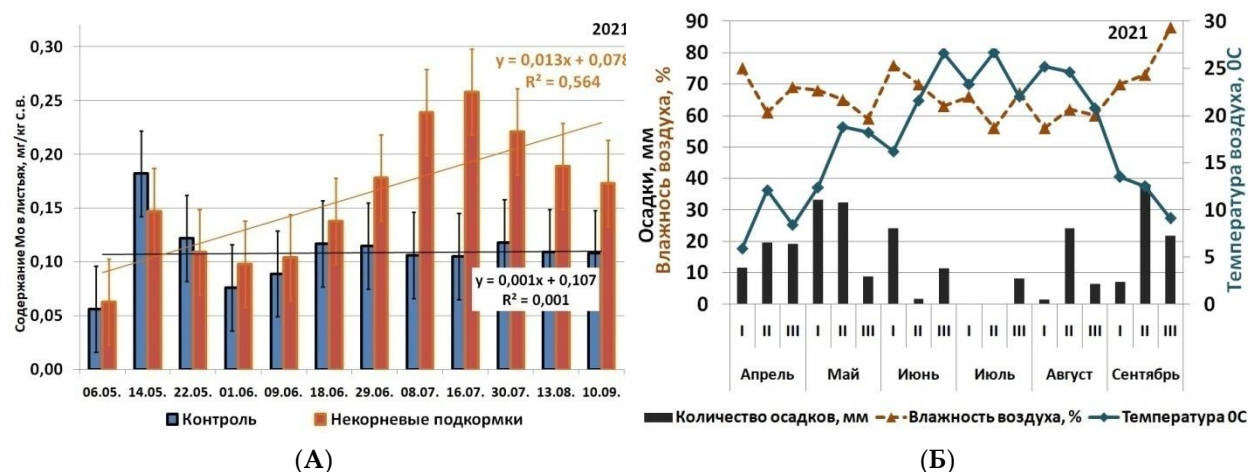


Рисунок 2- Динамика содержания Мо в листьях яблони (А); среднедекадное количество осадков, температура и влажность воздуха (Б) в сезоне 2021 года

В 2021 году в листьях яблони в целом Мо было значительно меньше, чем в 2020 году (в среднем $\approx$ в 6) (рисунок 2А). Причем это снижение было отмечено в обоих вариантах опыта. Однако общий характер динамики Мо в листьях был схожим на протяжении двух лет исследований. Динамика Мо в листьях в контроле в целом была такой же как и в прошлом году, за

исключением того, что в середине мая был отмечен весьма заметный пик увеличения концентрации Мо. Интересно также, что в контроле без внесения удобрений в 2021 году не было второго пика увеличения содержания Мо в листьях, но при внесении удобрений он был отмечен в середине июля, что является очевидным результатом применения агрохимикатов с молибденом.

Общее количество осадков за период наблюдений в сезоне 2022 года в 339,7 мм соответствовало среднемноголетним данным (рисунок 3Б). В то время как в марте 2022 года (как и в предыдущем году) выпало всего 8,8 мм осадков, 52,4 мм в апреле обеспечили достаточный запас влаги для начала вегетационного периода. В 2022 году основная часть осадков выпала во второй половине вегетационного периода. Но при этом количество осадков в июле (40 мм во второй и третьей декадах) и сентябре (121,0 мм) резко контрастировало с засушливостью августа (только 23 мм во 2-й декаде). При таком неравномерном распределении осадков в течение вегетационного периода в мае, июне и августе были периоды, когда среднесуточная влажность воздуха опускалась до 30%, что можно охарактеризовать как воздушную засуху.

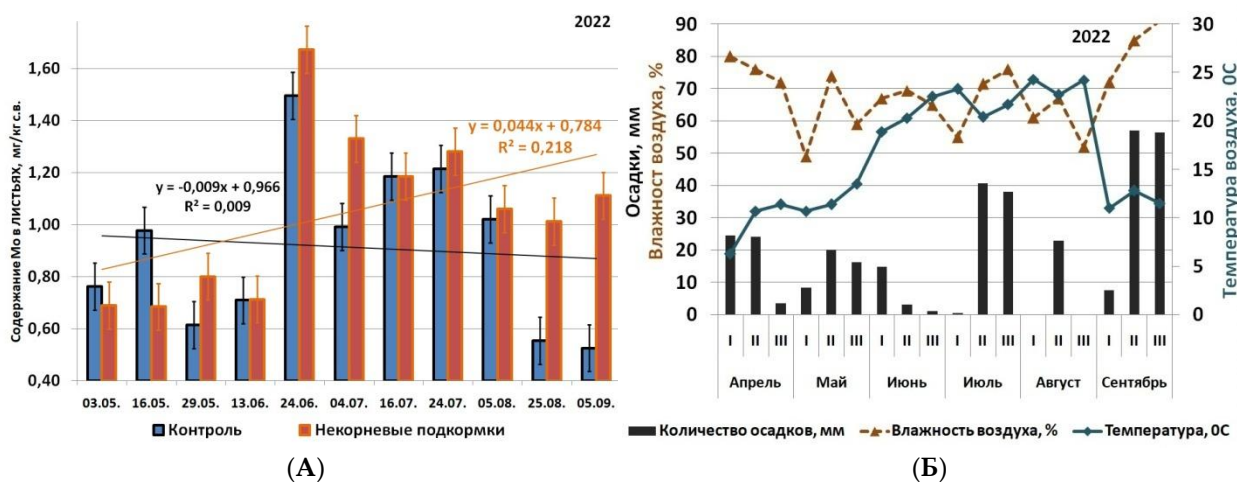


Рисунок 3 - Динамика содержания Мо в листьях яблони (А); среднедекадное количество осадков, температура и влажность воздуха (Б) в сезоне 2022 года

Характер динамики Мо в листьях в 2022 году был сходным как в контроле, так и при внесении удобрений, при некоторых вариациях в мае (рисунок 3А). В контроле мы наблюдали пик содержания Мо 16.05.22, чего не было при некорневых подкормках. Однако до начала августа изменения в содержании Мо оставались в основном схожими по характеру, несмотря на

значительные количественные различия. Например, с середины июня наблюдалось резкое увеличение содержания Мо с пиком в конце июня. Содержание Мо в обоих вариантах увеличилось в 2-3 раза к 24.06.22 в обоих вариантах. Важно, что при внесении удобрений было отмечено значительно более высокое содержание Мо в листьях и после 5 августа, когда в контроле произошло значительное снижение его концентрации. Несмотря на некоторые различия в характере динамики содержания Мо в листьях яблони по сравнению с предыдущими годами, общая тенденция в течение сезона была такой же: в контроле содержание Мо в листьях медленно снижалось в течение периода наблюдений, в то время как под влиянием некорневых подкормок оно увеличивалось.

Общее количество осадков за период наблюдений в 2023 году составило всего 151,8 мм, что более чем в 2,5 раза меньше среднегодовой нормы. В апреле, выпало всего 19,2 мм осадков, что позволяет говорить о значительном недостатке влаги в начале вегетационного периода (рисунок 4Б). Засушливый период был с начала мая по конец июня, когда за 50 дней выпало всего 22,8 мм осадков. После короткого «периода дождей» (3-я декада июня и 1-я декада июля – 79,2 мм) мы снова наблюдали сухую погоду (за весь оставшийся период до конца сентября выпало 30,6 мм). В апреле, мае и августе 2023 года были периоды, когда среднесуточная влажность воздуха опускалась ниже 50%, что можно охарактеризовать как воздушную засуху.

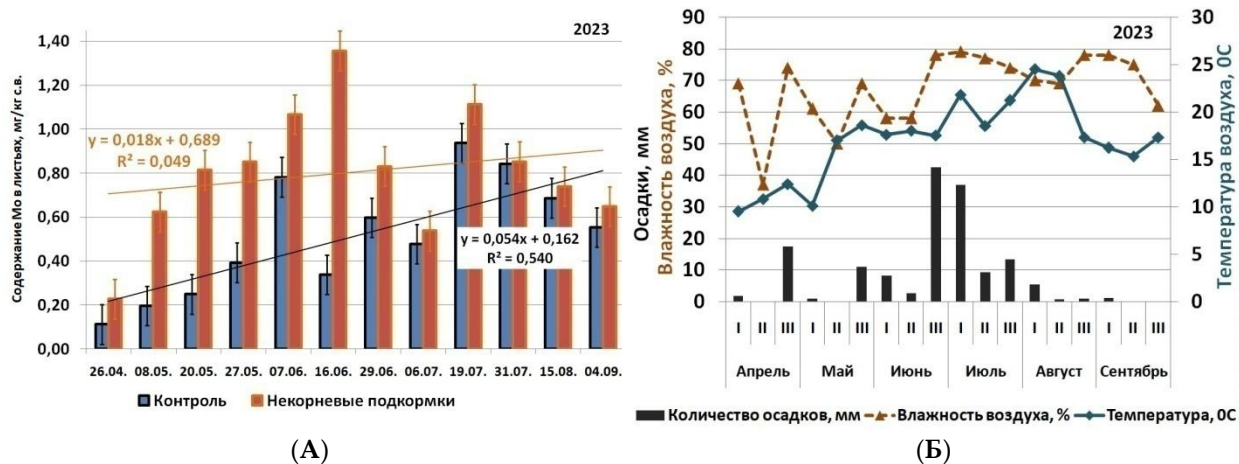


Рисунок 4 - Динамика содержания Мо в листьях яблони (А); среднедекадное количество осадков, температура и влажность воздуха (Б) в сезоне 2023 года

В 2023 году динамика Мо в листьях при внесении удобрений в целом была аналогична предыдущему году (рисунок 4А). Содержание Мо в листьях увеличилось, достигнув пика к середине июня, затем несколько снизилось, и снова достигло пика в конце июля в обоих вариантах. Некорневые подкормки стимулировали значительное увеличение содержания Мо в начале вегетационного периода. Хотя количество обработок Мо в 2023 году практически соответствовало прошлогоднему, содержание Мо в листьях было в 1,3 раза ниже. В 2023 году содержание Мо в листьях имело четкую тенденцию к увеличению (рис. 4А) в течение периода наблюдения в обоих вариантах, в том числе и в контроле (в отличие от сезонов 2020-2022 годов (рис. 1-3)).

Содержание Мо в листьях, как правило, увеличивалось с повышением температуры (таблица 2).

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции между содержанием Мо в листьях яблони и погодными условиями*

Варианты опыта	2020	2021	2022	2023
Среднедекадная температура воздуха				
Контроль	-0.211	0.330	0.480	0.622
Некорневые подкормки	0.521	0.758	0.474	0.310
Среднедекадная влажность воздуха				
Контроль	0.430	-0.365	0.335	0.363
Некорневые подкормки	-0.270	-0.522	0.136	-0.375
Количество осадков за декаду				
Контроль	-0.248	-0.083	0.249	0.091
Некорневые подкормки	-0.445	-0.661	-0.065	-0.257

* Жирным шрифтом выделены значения коэффициентов корреляции, которые представляют собой более или менее четкую тенденцию за период исследований.

Сила этой зависимости изменялась по вариантам опыта и варьировала в разные годы исследований. Некорневое внесение удобрений усиливало эту тенденцию, в отличие от контроля, где в 2020 и 2021 годах эта взаимосвязь была незначительной. Интересно, что самая высокая корреляция между

температурой и содержанием Мо в листьях (при некорневых подкормках) была в 2020-2021 годах (максимальная корреляция), в отличие от минимальной взаимосвязи в контроле. Корреляция между изучаемыми факторами в контроле возрастала, но при внесении удобрений, наоборот, снижалась в 2022 и 2023 годах. Максимальное значение коэффициента корреляции между этими параметрами в контроле было отмечено в самый засушливый сезон 2023 года в наиболее засушливом сезоне.

На протяжении всего периода исследований не наблюдалось устойчивой корреляции между влажностью воздуха и содержанием Мо в листьях. По сравнению с контролем, некорневое внесение удобрений в отдельные годы (2020 и 2023 гг. – таблица 2) оказывало противоречивые влияние. Более высокая влажность привела к снижению содержания Мо в варианте с некорневыми подкормками, в то время как в контроле наблюдалось небольшое увеличение содержания питательных веществ.

Эта взаимосвязь между содержанием Мо в листьях и осадками была достаточно заметна только в 2020 и 2021 годах. В 2022 году, несмотря на общую тенденцию, уровень Мо в листьях растений, получавших удобрения, не был связан с количеством осадков. В 2023 году наблюдалась слабая корреляция между количеством осадков и состоянием Мо в листьях, однако следует отметить, что с увеличением количества осадков содержание Мо в листьях уменьшалось в варианте с подкормками. В 2023 году наблюдалась небольшая обратная зависимость между содержанием Мо в листьях и количеством осадков; по мере увеличения количества осадков уровень Мо в листьях снижался. За весь период исследований в контроле мы не наблюдали сильной взаимосвязи между количеством осадков и содержанием Мо в листьях. В то же время природа слабых взаимосвязей в отдельные годы исследований была противоречивой – как положительной, так и отрицательной. Имеющиеся данные свидетельствуют об отсутствии четкой связи между количеством осадков и подвижностью листьев в контроле без удобрений. Когда мы

применяли некорневые подкормки, то было видно, что существует отрицательная зависимость между количеством осадков и содержанием Мо в листьях. Эта взаимосвязь была отрицательной почти на протяжении всех лет исследований, но более или менее значимую корреляцию мы наблюдали только в 2020, 2021 и 2023 годах.

Мо принимает участие в биосинтезе различных фитогормонов и таким образом участвует в прохождении гормонального цикла растения, что обеспечивает рост и продуктивность растений, в том числе яблони. Так, Мо в составе молибденового кофактора (Мосо) играет важную роль в синтезе ауксина [10]. В исследовании Чжана и соавторов [11] хорошо показано (на примере сои), как хорошее снабжение Мо усиливает рост растений за счет стимуляции синтеза ауксина. В то же время молибденовый кофактор также входит в состав альдегидоксидазы, которая катализирует последнюю стадию биосинтеза абсцизовой кислоты [Tromp, 1975]. Таким образом, Мо участвует в гормональном цикле растений на двух разных стадиях. Первая стадия – синтез ауксинов (группа фитогормонов, контролирующих рост); пик вегетативной активности роста у яблонь приходится на период после цветения (конец мая – июнь). Вторая стадия – на период созревания плодов, когда наблюдается пик активности абсцизовой кислоты (август-сентябрь, может различаться у разных сортов).

В нашем исследовании пики содержания Мо в листьях в эти периоды наблюдались в 2020, 2021 и 2023 годах, хотя и с некоторой сезонной вариацией. В 2022 году июньский пик содержания Мо в листьях был наиболее выражен, однако к концу июля – началу августа обеспеченность листьев элементами питания также была относительно высокой. Содержание Мо в листьях в дальнейшем сохранялось на этом уровне под влиянием некорневых подкормок, тогда как в контроле оно резко снижалось, возможно, под воздействием засушливой погоды. Мы не считаем, что первый и второй пики содержания Мо вызваны только влиянием внесения Мо. Мы предполагаем, что пики являются

результатом возросших потребностей растений в синтезе и движении фитогормонов во время сезонного развития (ауксин для начального роста побегов и плодов, затем абсцизовая кислота и ауксин для роста и созревания плодов).

Таким образом, основываясь на результатах наших исследований, можно сделать вывод, что в эти периоды потребность в Мо у яблонь возрастает; наилучшим способом обеспечения растений Мо в момент максимальной потребности является некорневое внесение удобрений. Некорневые подкормки комплексом микроэлементов, включающим агрохимикаты, содержащие Мо, значительно увеличили содержание Мо в листьях, изменив сезонную тенденцию его содержания в листьях яблони в 2020, 2021, 2022 годах.

Мы наблюдали заметную стабильную корреляцию между температурой воздуха и содержанием Мо в листьях. Сила взаимодействия варьировала ежегодно как в контроле, так и при некорневых подкормках. Чтобы избежать негативных эффектов, некорневые подкормки Мо в засушливые периоды, совпадающие с потребностью растений могут иметь решающее значение на этапах роста побегов, роста, развития и созревания плодов.

Список литературы:

1. Церлинг В.В. Диагностика питания сельскохозяйственных культур. М.: Агропромиздат. 1990. 235 с.
2. Schansker G., Ohnishi M., Furutani R., Miyake C. Identification of Twelve Different Mineral Deficiencies in Hydroponically Grown Sunflower Plants on the Basis of Short Measurements of the Fluorescence and P700 Oxidation/Reduction Kinetics. *Frontier in Plant Science*. 2022. № 13. Art. № 894607.
3. Спицина С.Ф., Томаровский А.А., Оствальд Г.В. Поведение молибдена в системе почва-растения на территории Алтайского края // Вестник Алтайского ГАУ. 2014. № 2(112). С. 53-57.

4. Schwarz G., Mendel R.R. Molybdenum Cofactor Biosynthesis and Molybdenum Enzymes. Annual Review of Plant Biology. 2006. № 57. P. 623–647.
5. Wójcik P. Effects of molybdenum sprays on the growth, yield and fruit quality of ‘Red Jonaprince’ apple trees. Scientia Horticulturae. 2020. № 271. Art. № 109422.
6. Kangueehi G. N. Nutrient Requirement and Distribution of Intensively Grown ‘Brookfield Gala’ Apple Trees. Master if Science. University of Stellenbosch, South Africa, March 2008.
7. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Амелянчик О.А., Большева Т.Н., Гомонова Н.Ф., Дурынина Е.П., Егоров В.С., Егорова Е.В., Едемская Н.Л., Карпова Е.А., Прижукова В.Г. Практикум по агрохимии - 2-е изд.: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ. 2001. 689 с.
8. Пупышев А.А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ. М.: Техносфера. 2009. 784 с.
9. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат. 1985. 351 с.
10. Schwartz S.H., Leon-Kloosterziel K.M., Koornneef M., Zeevaart J.A.D. Biochemical Characterization of the Aba2 and Aba3 Mutants in *Arabidopsis thaliana*. Plant Physiology. 1997. 114(1). P. 161–166.
11. Zhang J., Liu S., Liu C.-B., Zhang M., Fu X.-Q., Wang Y.-L., Song T., Chao Z.-F., Han M.-L., Tian Z., Chao D.-Y. Natural Variants of Molybdate Transporters Contribute to Yield Traits of Soybean by Affecting Auxin Synthesis. Current Biology. 2023. № 33(24). Art. № 5355-5367.e5.
12. Tromp J. The Effect of Temperature on Growth and Mineral Nutrition of Fruits of Apple, with Special Reference to Calcium. Physiologia Plantarum. 1975. № 33(1). P. 87–93.

UDC 634.11:631.81.095.337:581.192:577.175.1

**THE RELATIONSHIP OF THE SEASONAL DYNAMICS OF
MOLYBDENUM CONTENT IN APPLE LEAVES WITH WEATHER
CONDITIONS AND PHYTOHORMONAL ACTIVITY OF PLANTS**

Andrey Iv. Kuzin^{1,2,3}

doctor of agricultural sciences, professor

andrey.kuzin1967@yandex.ru

Gleb B. Sviridov¹

postgraduate student

sviridoff.gleb2013@yandex.ru

Natalia S. Artsybasheva¹

postgraduate student

natalia.artsibasheva@yandex.ru

¹I.V. Michurin Federal Scientific Center

²Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

³Tambov State University named after G.R. Derzhavin

Tambov, Russia

Abstract. Leaf Mo content was assessed 11-12 times per growing season (2020-2023) following foliar Mo application. Foliar fertilizing stimulated a significant increase in Mo content. Peak Mo levels matched periods of rapid apple shoot and fruit growth (auxin synthesis), and fruit development and ripening (auxin and abscisic acid synthesis). The July drought negatively affected molybdenum uptake in apple trees, thus requiring foliar fertilization for healthy plant development.

Keywords: apple tree, molybdenum, dynamics of molybdenum content in leaves, weather conditions, auxin, abscisic acid.

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.

The article was submitted 30.04.2025; approved after reviewing 20.06.2025; accepted for publication 30.06.2025.