

УДК 631.816:631.67:634.1

МИГРАЦИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЧЕРНОЗЕМЕ ТИПИЧНОМ ПРИ ФЕРТИГАЦИИ ПЛОДОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ¹

© 2021 г. Т. Г. Фоменко^{1,*}, В. П. Попова¹, Е. А. Черников¹, А. И. Дрыгина¹,
И. А. Лебедевский², Д. В. Узловатый², А. Н. Мязина²

¹ Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия
350901 Краснодар, ул. имени 40-летия Победы, 39, Россия

² Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина
350044 Краснодар, ул. Калинина, 13, Россия

*E-mail: sad-fertigation@mail.ru

Поступила в редакцию 21.05.2020 г.

После доработки 06.10.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

Изучена сезонная динамика изменчивости агрохимических свойств почв плодовых насаждений и миграции питательных веществ в зоне локального внесения удобрений при систематическом применении фертигации. Сравнительное изучение трансформации свойств почв проведено в молодых и плодоносящих насаждениях яблони в динамике в основных фазах развития плодовых растений. Процесс миграции питательных веществ в увлажняемой зоне почвы моделировали, используя программное обеспечение Surfer 8, в начале, середине и при завершении поливного периода. Установлено увеличение содержания нитратного азота в почве в большей степени на расстоянии 20 см от точки внесения раствора минеральных удобрений и их выщелачивание в зимне-весенний период в результате выпадения обильных осадков. В зоне локального внесения удобрений распределение подвижного фосфора в большей степени зафиксировано в вертикальном направлении, особенно непосредственно под капельницами, обменного калия — в горизонтальном направлении. Выявлена статистически достоверная высокая корреляция увеличения содержания подвижного фосфора ($r = 0.95$) и обменного калия ($r = 0.81$) в почве непосредственно под капельницами. Высокое содержание этих элементов питания сохранялось продолжительное время, и, как правило, не ограничивалось одним вегетационным сезоном. Полученные результаты были основанием для усовершенствования методов оценки почвенного плодородия плодовых насаждений, возделываемых по интенсивным технологиям.

Ключевые слова: плодовые насаждения, фертигация, черноземные почвы, миграция биогенных элементов, моделирование почвенных процессов, агрохимические свойства почв.

DOI: 10.31857/S0002188121040050

ВВЕДЕНИЕ

Высокие температуры и низкая влажность воздуха летнего периода в условиях юга России оказывают стрессовые воздействия на ростовые процессы и продуктивность плодовых растений: происходит преждевременное осыпание листьев и плодов, ухудшается закладка генеративных органов, что в итоге приводит к снижению урожайности [1]. Для оптимизации водного и пищевого режимов плодовых растений в этих условиях применяют автоматизированные системы капельного орошения, которые позволяют одновременно с поливной водой вносить минеральные удобрения

(фертигация) [2]. Рациональное применение удобрений при фертигации обеспечивает контролируемое размещение питательных веществ в зоне основного расположения корней растений, сводя к минимуму миграцию питательных веществ за пределы основного корнеобитаемого слоя почвы [3].

Посредством фертигации возможно поддерживать оптимальную влажность почвы и подавать растениям небольшими дозами сбалансированное количество элементов питания на протяжении вегетационного периода в разные фазы развития плодовых растений [4–6]. Оптимизация водного и пищевого режимов при фертигации способствует улучшению микробиологической активности почвы и физиологического состоя-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края в рамках научного проекта № 19-44-233010 и госзадания СКФНЦСВВ.

ния деревьев, увеличению урожайности, повышению качества и экологической безопасности выращиваемой плодовой продукции [7–9].

Вместе с тем регулярное применение азотных удобрений при фертигации может приводить к интенсивной миграции нитратов в глубокие слои почвы и даже попаданию их в грунтовые воды [10, 11]. Для снижения вероятности выщелачивания нитратов в глубокие слои почвы внесение азотных удобрений при фертигации рекомендуют проводить в конце цикла орошения [3, 12]. Отдельными исследованиями установлено, что фертигация может приводить к формированию очагов повышенной концентрации подвижных форм аммония, фосфора и калия непосредственно под капельницами и созданию зон интенсивной удобренности [13–15]. Также есть сведения, что при фертигации наблюдают горизонтальную и нисходящую миграцию отдельных биогенных элементов питания от зоны непосредственно под капельницами в более глубокие слои почвы [16–18]. Эти данные свидетельствуют о том, что свойства почвы оказывают значительное влияние на фильтрацию воды и миграцию биогенных элементов в зоне локального внесения удобрений при фертигации плодовых насаждений [19–21]. Поэтому характер локального увлажнения почвы, процессы миграции питательных веществ и трансформации комплекса свойств орошаемых почв, полученные в разных почвенно-климатических условиях, могут существенно различаться.

В отличие от посевов полевых культур, в плодовых насаждениях в приствольных полосах часто почву обычно не рыхлят, только обрабатывают гербицидами [22]. Систематическое локальное внесение минеральных удобрений при фертигации может приводить к существенному накоплению биогенных элементов в почве под капельницами, что обуславливает высокую вариабельность параметров почв таких насаждений. В итоге корневая система каждого плодового растения одновременно располагается как в зонах локального внесения минеральных удобрений, так и за ее пределами, т.е. в зонах с различной степенью удобренности, наблюдается так называемая “равномерная неравномерность” [23].

Установление особенностей пестроты почвенного плодородия плодовых насаждений при фертигации является основным критерием, определяющим эффективность рационального и дифференцированного внесения минеральных удобрений [24]. Для определения достоверной степени неоднородности почвенного покрова в плодовых насаждениях трудно выбрать оптимальное место отбора представительной пробы почвы [25, 26].

В этих условиях необходимо учитывать миграцию биогенных элементов в зоне локального внесения удобрений, сезонную динамику изменчивости параметров почвенного плодородия, а также трансформацию свойств орошаемых почв плодовых насаждений в условиях интенсивного сельскохозяйственного использования. Невыполнение этих требований приводит к разработке малоэффективных систем применения фертигации в плодовых насаждениях и увеличению вероятности негативного воздействия на окружающую среду.

Несмотря на широкое применение систем капельного орошения в садоводстве в современных условиях недостаточно результатов системных исследований о происходящих процессах в почве орошаемых насаждений. Цель работы – установить закономерности миграции биогенных элементов в черноземе типичном при систематическом использовании фертигации в плодовых насаждениях. Понимание процесса миграции элементов питания и трансформации комплекса свойств почв необходимо для разработки методов объективной оценки почвенного плодородия и разработки оптимальных схем применения минеральных удобрений при фертигации плодовых насаждений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в условиях недостаточного увлажнения Прикубанской зоны плодородства Краснодарского края в орошаемых интенсивных насаждениях яблони на базе ООО “Экватор-Агро” (ст. Роговская 45°43'36"N 38°47'18.00"E). Плодовые насаждения яблони *Malus domestica* представлены сортами зимнего срока созревания Голден Рейнджерс, Ренет Симиренко, Гала, Модии и др. на подвое М9 (клон Т337) различного возраста, 2015–2019 гг. посадки. Основная схема размещения деревьев 4.0 × 1.0 м. Почвенный покров опытного участка представлен черноземами типичными сверхмощными слабогумусными легкоглинистыми на лессовидных глинах (классификация 1977 г.).

Доза внесения удобрений при фертигации молодых насаждений яблони составляла N46P32K41 (1-й и 2-й год вегетации сада), в плодоносящих насаждениях с 3-го года вегетации – N69P46K62 (табл. 1). Фертигацию осуществляли в засушливые периоды каждые 3–4 сут, за вегетационный период было проведено 38 фертигаций с использованием преимущественно комплексных водорастворимых минеральных удобрений марок

Таблица 1. Дозы внесения минеральных удобрений при фертигации опытных насаждений яблони, кг д.в./га

Сроки применения удобрений	Количество фертигаций	Дозы внесения в молодых насаждениях яблони			Дозы внесения в плодоносящих насаждениях яблони		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Май	10	15.0	6.7	5.9	22.4	10	8.8
Июнь	10	15.1	4.2	10.4	22.5	6.3	15.5
Июль	10	10.8	11.1	12.5	16.1	16.6	18.6
Август	6	3.9	4.6	9.5	5.8	6.9	14.2
Сентябрь	2	1.3	1.5	3.1	1.9	2.3	4.7
Промывка системы (июль и сентябрь)	—	—	4.2	—	—	4.2	—
Всего	38	46.1	32.3	41.4	68.7	46.3	61.8

OLIGOMAX, AQUA DROP и SOLAR в сочетании с простыми водорастворимыми удобрениями.

Внесение минеральных удобрений при фертигации проводили в середине цикла капельного полива продолжительностью ≈ 30 мин. Затем продолжали капельный полив без внесения удобрений длительностью минимум 40 мин, при котором происходила промывка капельных линий поливной водой и доведение влажности почвы до оптимального уровня. Средняя поливная норма составляла 40 м³/га. Поливы назначали по результатам оценки запаса влаги в корнеобитаемом слое почвы на расстоянии 20 см от места падения капли при достижении предполивной влажности, соответствующей 60–70% НВ (наименьшей влагоемкости). Оптимальную влажность почвы поддерживали на уровне 80% НВ в пределах контуров увлажнения. Расчет поливной нормы при капельном орошении основан на доведении влажности почвы до оптимального значения в увлажняемом объеме [5].

Для изучения динамики изменения свойств почвы в зоне локального внесения удобрений отборы почвенных проб осуществляли регулярно на протяжении вегетационного периода в слое 0–30 см почвы непосредственно под капельницами, на расстоянии 20 см и 40 см от точки падения раствора питательных веществ, а также в центре междурядий плодовых насаждений. За вегетационный период 2019 г. проведено 5 отборов почвенных проб в основных фазах вегетации деревьев яблони: “мышинное ушко”, завязывание плодов, размер плода в диаметре 3–4 см “грецкий орех”, налив плодов и начало фазы созревания плодов. Применение этого подхода позволило установить влияние фертигации на временную изменчивость почвы, определить зоны интенсивного агрогенного воздействия и установить кор-

реляцию трансформации свойств почвы садовых ценозов в зависимости от продолжительности применения фертигации.

Для установления закономерностей миграции элементов питания при фертигации отборы образцов почвы проводили в слоях 0–10, 10–30, 30–50, 50–70, 70–90 см непосредственно под капельницами и через каждые 10 см по направлению к центру междурядья от точки падения капли раствора питательных веществ в плодоносящих 5-летних насаждениях яблони в начале вегетационного периода до внесения минеральных удобрений (апрель), в середине вегетационного периода (июль) и в конце сезона после окончания применения удобрений (сентябрь). Образцы почвы отбирали с помощью малогабаритного почвенного бура Неговелова.

Оценку миграции элементов питания в зоне локального внесения минеральных удобрений производили путем сравнения коэффициентов эффективности их распределения ($K_{эф}$). Коэффициент показывает равномерность горизонтального распределения элемента питания в почве относительно вертикального. Данный коэффициент определяли по формуле:

$$K_{эф} = H/L, \quad (1)$$

где H – максимальная глубина миграции элемента питания, см, L – максимальная ширина миграции элемента питания, см.

Лабораторно-аналитические исследования почвенных образцов проводили по следующим параметрам: содержание нитратов ионометрическим методом – по ГОСТу 26951-86, содержание обменного аммония – по ГОСТу 26489-85, содержание подвижных соединений фосфора и калия – по методу Мачигина в модификации ЦИНАО по ГОСТу 26205-91. Лабораторные анализы почвы проводили на современном приборном оборудо-

вании. Для определения содержания нитратного азота использовали комплект “Микон-2” с иономером “ЭКСПЕРТ-001”, подвижного фосфора – фотометр фотоэлектрический КФК-3-01, обменного калия – пламенный фотометр ПФА-354.

Оценку полученных экспериментальных данных осуществляли с использованием методов математической статистики с применением дисперсионного анализа в программе Microsoft Office Excel 2003 согласно [27]. Построение 2D-диаграмм миграции элементов питания в зоне локального внесения минеральных удобрений проводили с использованием программного обеспечения Surfer 8 согласно [28].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Регулярное проведение фертигации в насаждениях яблони способствовало увеличению содержания нитратного азота в почве в большей степени на расстоянии 20 см от точки внесения раствора минеральных удобрений. Миграция нитратов обусловлена их постепенным выщелачиванием на периферию основной зоны увлажнения почвы при регулярном капельном орошении. Максимальное содержание нитратов в слое 0–30 см почвы в молодых насаждениях яблони установлено в фазе налива плодов яблони (123–191 мг/кг), в плодоносящих насаждениях – в фазе размер плода диаметром 3–4 см “греческий орех” (118–146 мг/кг), когда была внесена основная часть дозы азота за вегетационный период (рис. 1). В период созревания плодов яблони наблюдали снижение содержания нитратного азота в зоне локального внесения минеральных удобрений.

Содержание нитратного азота в почве сада на расстоянии 40 см от точки падения капли раствора питательных веществ существенно варьировало в течение вегетационного периода. В молодых насаждениях яблони содержание изменялось от 5.5 до 32.7 мг/кг почвы, что было существенно меньше, чем на периферии основной зоны увлажнения почвы. В плодоносящих насаждениях яблони наблюдали небольшие отличия миграции нитратов в зоне локального увлажнения почвы. Зоны локального увлажнения почвы в этом случае были практически закрыты листовым пологом деревьев яблони, в результате не происходило быстрого иссушения почвы в межполивной период, как это наблюдали в молодых садах. Поэтому на расстоянии 40 см от капельниц содержание нитратов иногда могло быть больше, чем на периферии основной зоны увлажнения почвы (12.8–80.6 мг/кг). Таким образом, в зоне локального увлажнения почвы плодоносящих насажде-

ниях яблони отмечено более равномерное распределение нитратного азота.

В условиях Краснодарского края в зимне-весенний период при выпадении осадков происходит выщелачивание нитратов за пределы основного корнеобитаемого слоя в более глубокие слои почвы. Поэтому в весенний период перед началом активной вегетации деревьев яблони отмечено существенное снижение содержания нитратного азота в основной зоне увлажнения почвы. Таким образом, достоверной связи между обеспеченностью почвы нитратным азотом и продолжительностью применения фертигации в плодовых насаждениях не установлено. В содержании нитратного азота отмечена сезонная динамика, т.е. увеличение концентрации в зоне локального внесения минеральных удобрений на протяжении вегетационного периода при регулярном капельном орошении и их выщелачивание в зимне-весенний период в более глубокие слои почвы.

Закономерностей изменения обеспеченности почвы обменным аммонием в зависимости от места отбора почвенных проб не установлено. Содержание аммонийного азота в почве в течение вегетационного периода было довольно динамичным, показатели изменялись от 6.7 до 16.0 мг/кг почвы. Относительно невысокое содержание аммонийного азота по сравнению с нитратным, вероятно, объясняется тем, что при оптимальной влажности почвы и температуре 25–32°C внесенный при фертигации аммонийный азот довольно быстро окисляется до нитратов (нитрификация) [30], которые мигрируют в почве с последующими циклами полива.

Применение минеральных удобрений при капельном поливе насаждений яблони способствовало постепенному повышению содержания подвижного фосфора и обменного калия в зоне локального внесения удобрений уже в первый год после посадки растений. Содержание подвижного фосфора в почве под капельницами к окончанию вегетационного периода уже соответствовало очень высокому уровню обеспеченности – 141 мг/кг почвы, что в 5 раз было больше показателей за пределами зоны внесения минеральных удобрений. В плодоносящих насаждениях яблони содержание подвижного фосфора в почве под капельницами изменялось незначительно и составляло 222–277 мг/кг почвы. Как показывают данные, при систематическом применении фертигации в садах происходило так называемое локальное зафосфачивание почвы. В то же время на расстоянии 20 см от капельниц количество подвижного фосфора в почве было значительно меньше и варьировало от 43.6 до 67.8 мг/кг почвы в связи со

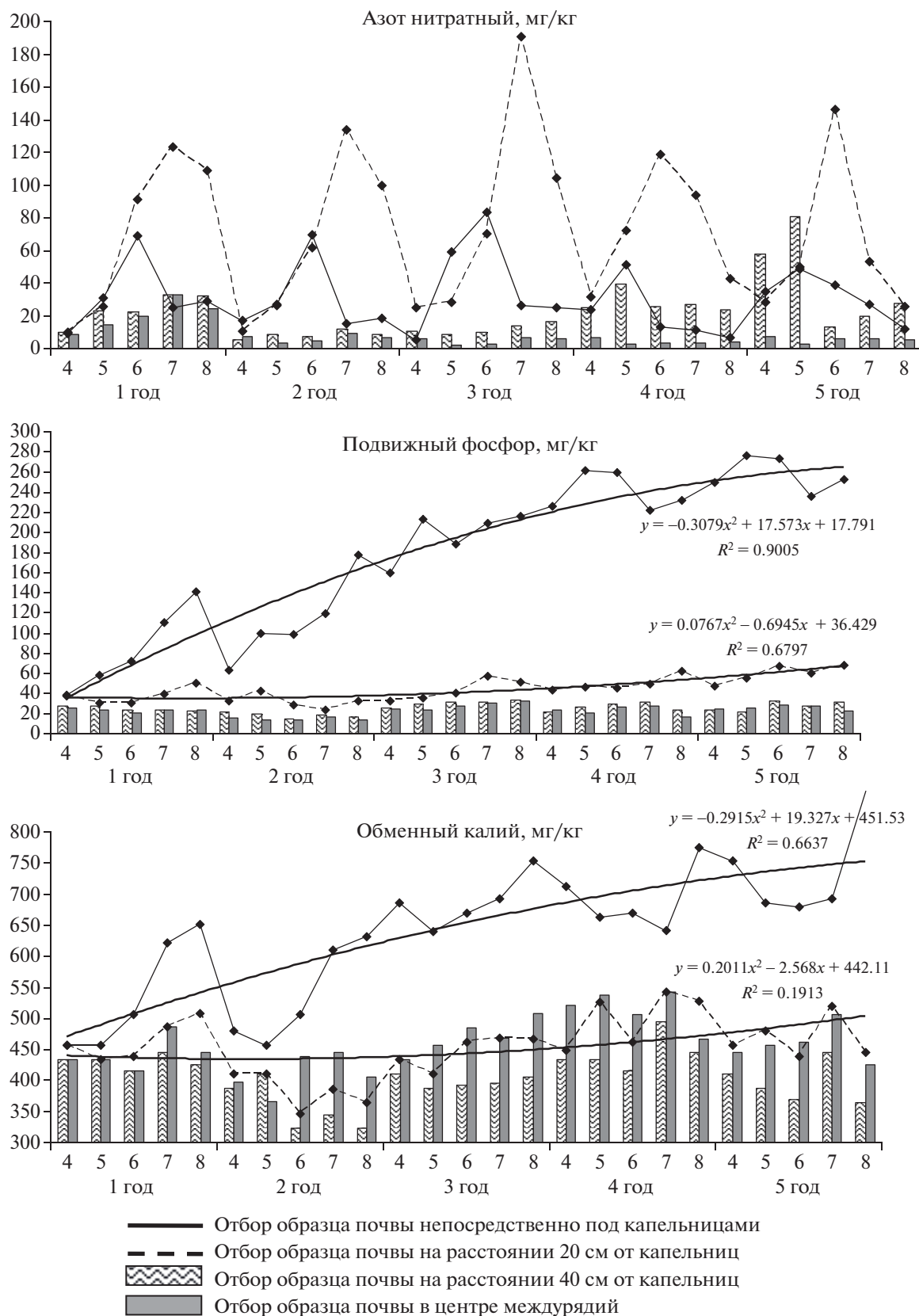


Рис. 1. Динамика изменения агрохимических свойств почв плодовых насаждений при длительном применении фертигации (слой 0–30 см почвы).

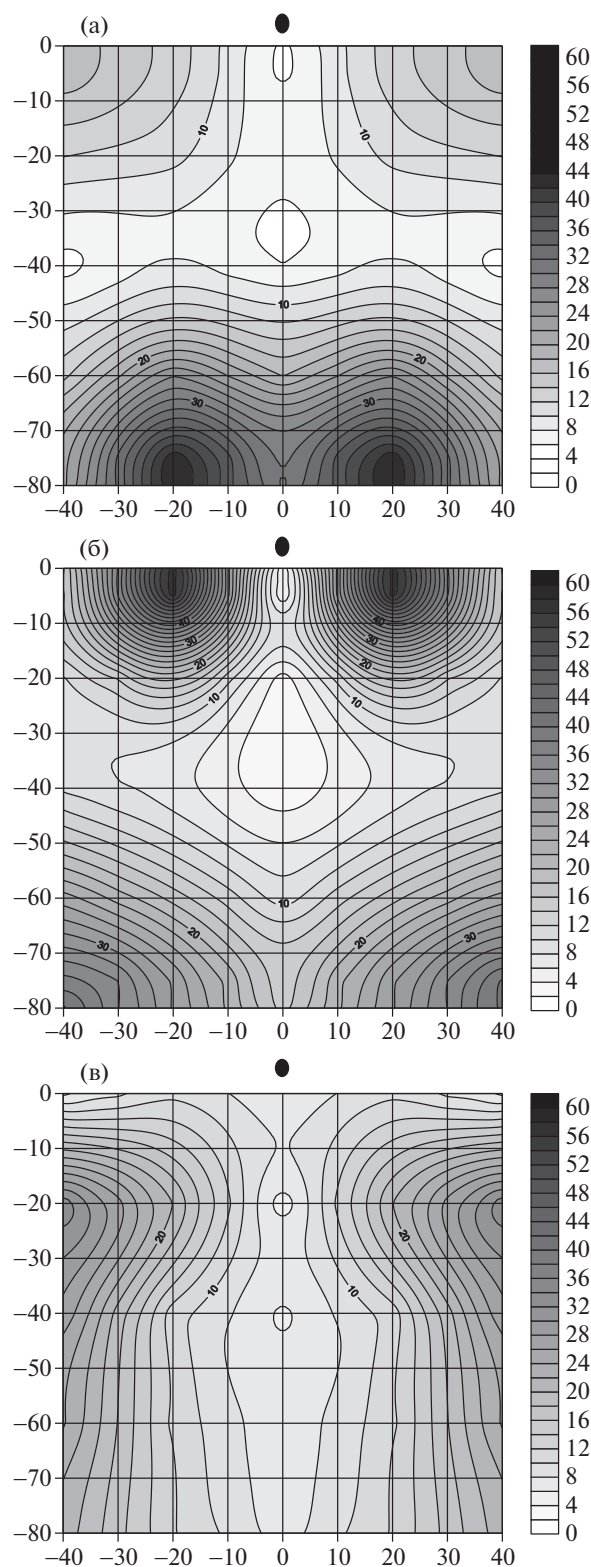


Рис. 2. Миграция нитратов в зоне локального внесения удобрений при фертигации плодоносящих насаждений яблони (мг/кг почвы): (а) – в начале, (б) – в середине, (в) – в конце вегетационного периода; ● – точка падения капли раствора (по горизонтали – расстояние от точки падения в сторону междурядий, по вертикали – в глубину почвы). То же на рис. 3.

слабой миграцией этого элемента в черноземных почвах. Установлена статистически достоверная сильная корреляция увеличения содержания подвижного фосфора в почве непосредственно под капельницами ($r = 0.95$, $t_{\text{набл}} 9.0 > t_{\text{крит}} 2.4$), а также на расстоянии 20 см от капельниц ($r = 0.82$, $t_{\text{набл}} 5.5 > t_{\text{крит}} 2.4$) в зависимости от продолжительности применения фертигации в плодовых насаждениях, возделываемых по интенсивной технологии.

Применение фертигации в однолетних насаждениях яблони способствовало увеличению содержания обменного калия непосредственно под капельницами до очень высокого уровня обеспеченности – 651 мг/кг почвы, что на 46% больше его содержания в образцах почвы, отобранных за пределами зоны локализации удобрений. В плодоносящих насаждениях яблони содержание обменного калия под капельницами соответствовало очень высокому уровню обеспеченности на протяжении всего вегетационного периода. Установлена статистически достоверная сильная корреляция увеличения содержания обменного калия при фертигации в почве непосредственно под капельницами ($r = 0.81$, $t_{\text{набл}} 6.4 > t_{\text{крит}} 2.4$) и слабая корреляционная связь его изменения при удалении на расстоянии 20 см от точки падения капель раствора питательных веществ ($r = 0.44$, $t_{\text{набл}} 2.0 < t_{\text{крит}} 2.4$).

Изучение миграции биогенных элементов в зоне локального внесения удобрений показало, что нитраты по сравнению с другими питательными веществами более равномерно распределялись вниз по профилю почвы под капельницами и в боковом направлении от точки падения раствора питательных веществ. Внесенные на протяжении вегетационного периода азотные удобрения довольно часто полностью не усваиваются плодовыми растениями, поэтому в зимне-весенний период происходило промывание нитратов в глубокие слои почвы (ниже 60 см). В 5-летних насаждениях яблони в весенний период максимальное содержание нитратного азота установлено в слое почвы 70–90 см, что составляло 32.5–43.5 мг/кг, в то же время в верхних слоях почвы его содержание изменялось от 5.6 до 17.2 мг/кг (рис. 2). Расчетным путем установлено, что в условиях Краснодарского края на черноземе типичном за пределы основного корнеобитаемого слоя почвы могло поступать в среднем ≈ 23 –27% азота, внесенного за вегетационный период.

При частых поливах в засушливый летний период наблюдали увеличение содержания нитратного азота на границе контуров основного увлажнения почвы за счет постоянного увеличения

концентрации удобрений. В период налива плодов яблони содержание нитратов на расстоянии 20–30 см в верхнем плодородном слое почвы составляло 36.3–56.7 мг/кг почвы. При этом за пределами основного корнеобитаемого слоя почвы сохранялось повышенное содержание нитратов (34.0–43.0 мг/кг почвы).

Во время уборки плодов отмечено выщелачивание нитратов из поверхностного слоя почвы на глубину 10–30 см, которое определяли выпавшие атмосферные осадки. В этом слое почвы на расстоянии 30–40 см от точки падения купель раствора питательных веществ установлено увеличение концентрации нитратов до 27.4–33.3 мг/кг почвы.

Локальное систематическое применение минеральных удобрений при фертигации плодовых насаждений приводило к формированию очагов повышенной концентрации фосфорно-калийных удобрений в черноземе типичном. В плодоносящих насаждениях основная часть подвижного фосфора была сконцентрирована в слое почвы до 35 см глубиной и на расстоянии до 25 см от точки падения капли раствора питательных веществ (рис. 3). Содержание подвижного фосфора в почве под капельницами на протяжении вегетационного периода составляло 245–271 мг/кг, что существенно больше по сравнению с его количеством за пределами очага внесения минеральных удобрений (от 18.6 до 25.4 мг/кг). Содержание обменного калия зафиксировано в зоне внесения раствора питательных веществ преимущественно в радиусе до 35 см и на глубину до 30 см. Содержание обменного калия непосредственно в точке внесения минеральных удобрений составило 732–813 мг/кг, что на 86–93% превышало показатели за пределами очага локального внесения минеральных удобрений. В плодоносящих насаждениях яблони существенных изменений основных границ контуров распределения подвижного фосфора и обменного калия в зоне локализации питательных веществ в течение вегетационного периода не отмечено. Основные изменения концентрации питательных веществ были установлены в ограниченном объеме почвы непосредственно под капельницами.

Выявленные особенности миграции биогенных элементов при фертигации плодовых насаждений показали, что выщелачивания фосфора и калия за пределы основной зоны увлажнения на черноземе типичном не происходит. Эти соединения в основном фиксируются в местах падения капель раствора питательных веществ, создавая очаги повышенной концентрации. Высокая обеспеченность почвы подвижным фосфором и об-

менным калием в зоне локализации удобрений на протяжении вегетационного периода снижала эффективность применения минеральных удобрений в фазах развития с учетом потребности плодовых растений в элементах питания.

Установлены особенности миграции питательных веществ в зоне локального внесения минеральных удобрений. Распределение подвижного фосфора больше зафиксировано в вертикальном направлении, при этом установлено существенное изменение $K_{эф}$ миграции в зависимости от удаленности от точки падения капель раствора питательных веществ. На границе контура увлажнения коэффициент миграции фосфора (концентрация 40 мг/кг почвы) составлял 1.1, непосредственно под капельницами (концентрация 260 мг/кг почвы) увеличивался до 3.0. Распределение обменного калия происходило больше в горизонтальном направлении. Средний коэффициент миграции калия в пределах контура распределения составил 0.77 (табл. 2).

Для контуров распределения подвижного фосфора (40 мг/кг почвы) и обменного калия (420 мг/кг почвы) рассчитан объем удобряемой почвы, который составил 0.192 и 0.157 м³/погонный м соответственно. Принимая в расчет основную глубину корнеобитаемого слоя почвы (0.6 м) и ширину приствольной полосы (1.2 м), расчетным путем установлено, что доля удобряемого объема почвы в плодоносящих насаждениях яблони составляла 26.7% — для подвижного фосфора и 21.9% — для обменного калия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены особенности миграции питательных веществ в условиях локального систематического применения минеральных удобрений при фертигации плодовых насаждений на черноземных почвах. Регулярное проведение фертигации в плодовых насаждениях способствует увеличению содержания нитратного азота в большей степени на расстоянии 20 см от точки внесения раствора минеральных удобрений. В содержании нитратного азота отмечена выраженная сезонная динамика, т.е. увеличение концентрации в зоне локального внесения минеральных удобрений на протяжении вегетационного периода при регулярном капельном орошении и их выщелачивание в зимне-весенний период при выпадении обильных осадков.

Установлены закономерности накопления подвижного фосфора и обменного калия в зоне локального внесения удобрений. Определена статистически достоверная высокая корреляция увеличения

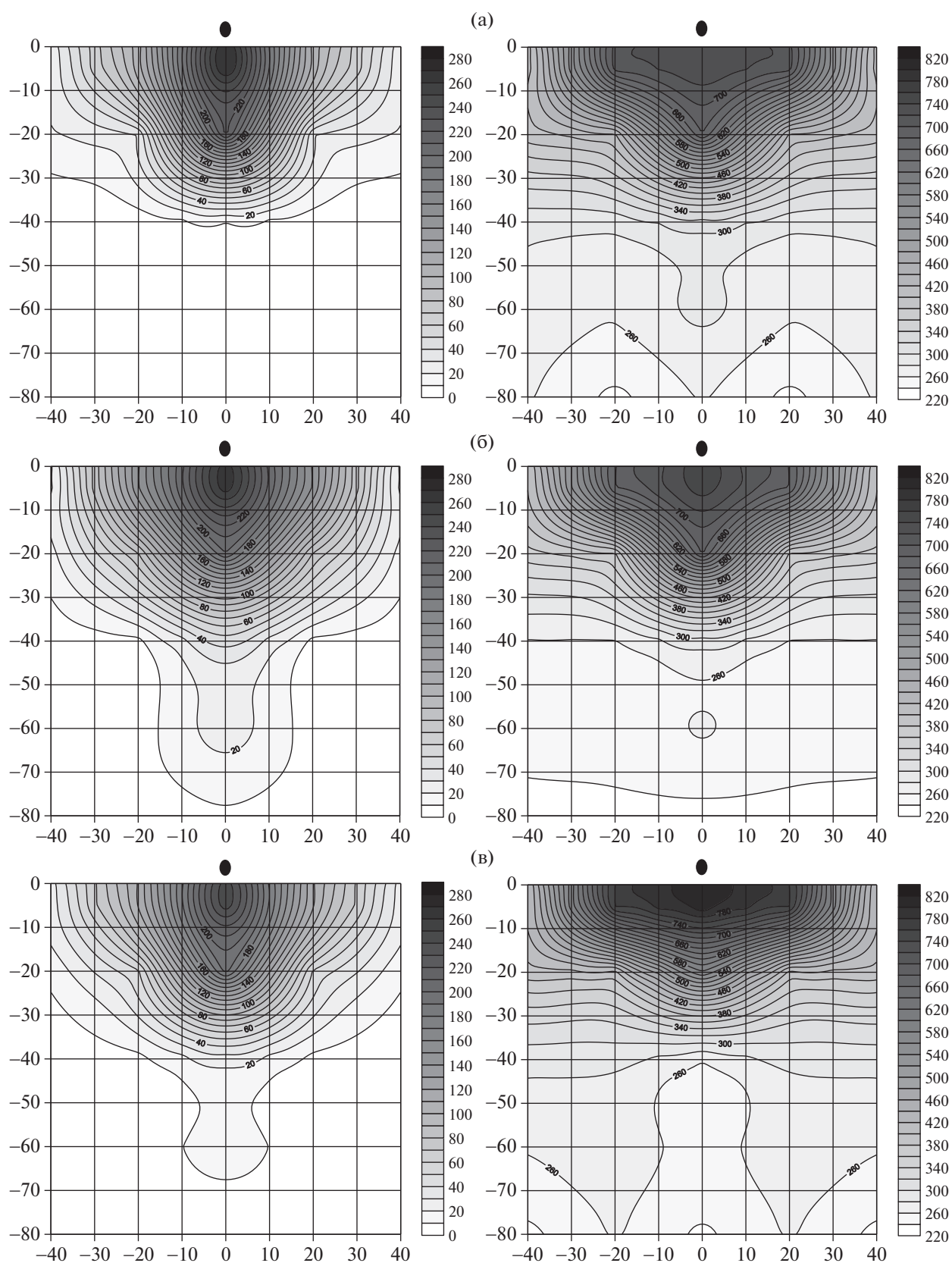


Рис. 3. Миграция подвижного фосфора (слева) и обменного калия (справа) в зоне локального внесения удобрений при фертигации плодоносящих насаждений яблони, мг/кг почвы.

Таблица 2. Параметры контуров миграции элементов питания в зоне локального внесения минеральных удобрений при фертигации плодоносящих насаждений яблони (средние 3-х отборов)

Содержание элемента питания, мг/кг почвы	Максимальная глубина контура (H), см	Максимальная ширина контура (L), см	$K_{\text{эф}}$ миграции элемента питания ($H : L$)
Подвижный фосфор (P_2O_5)			
40	38.0 ± 2.2	36.4 ± 0.3	1.0
60	34.0 ± 1.9	32.3 ± 1.0	1.1
80	31.7 ± 1.0	28.2 ± 1.9	1.1
100	29.4 ± 0.6	23.9 ± 2.7	1.2
120	27.4 ± 0.6	19.8 ± 2.0	1.4
140	25.4 ± 0.6	17.7 ± 2.7	1.4
160	23.5 ± 0.6	14.8 ± 2.4	1.6
180	21.9 ± 0.7	12.0 ± 2.1	1.8
200	18.5 ± 2.5	9.3 ± 1.6	2.0
220	14.3 ± 4.0	6.7 ± 1.4	2.1
240	9.1 ± 0.9	4.0 ± 1.5	2.3
260	6.3 ± 0.4	2.1 ± 0.2	3.0
Обменный калий (K_2O)			
400	31.4 ± 2.0	40.8 ± 0.7	0.8
420	30.2 ± 2.0	39.0 ± 1.0	0.8
440	29.1 ± 2.0	37.6 ± 0.9	0.8
460	28.0 ± 2.0	36.5 ± 0.9	0.8
480	27.0 ± 2.0	35.1 ± 1.0	0.8
500	26.1 ± 2.0	33.7 ± 1.0	0.8
520	25.1 ± 1.9	32.5 ± 1.1	0.8
540	24.2 ± 1.9	31.2 ± 1.3	0.8
560	23.4 ± 1.9	30.0 ± 1.3	0.8
580	22.5 ± 2.0	28.8 ± 1.4	0.8
600	21.4 ± 2.3	27.6 ± 1.4	0.8
620	20.5 ± 2.5	26.3 ± 1.5	0.8
640	19.5 ± 2.6	25.1 ± 1.7	0.8
660	18.6 ± 3.0	23.8 ± 1.9	0.8
680	17.2 ± 2.8	22.4 ± 2.2	0.8
700	13.1 ± 0.8	20.1 ± 3.4	0.7
720	9.9 ± 1.0	16.1 ± 5.6	0.6
740	8.3 ± 1.3	13.0 ± 6.9	0.6

содержания подвижного фосфора ($r = 0.95$) и обменного калия ($r = 0.81$) в почве непосредственно под капельницами в результате систематического применения фертигации. Высокий уровень содержания этих элементов питания сохранялся продолжительное время, и, как правило, не ограничивался одним вегетационным сезоном.

Установлена различная степень миграции биогенных элементов в зоне локального внесения минеральных удобрений при фертигации плодовых насаждений яблони. Показана миграция

нитратного азота в летний период при регулярном применении фертигации на границы контуров основного увлажнения почвы, а в зимне-весенний период – выщелачивание нитратов в глубокие слои почвы (ниже 60 см). Установлено распределение подвижного фосфора в большей степени в вертикальном направлении, особенно непосредственно под капельницами, обменного калия – в горизонтальном направлении.

Таким образом, в условиях интенсивного применения минеральных удобрений при фертига-

ции для объективной оценки параметров почвенного плодородия плодовых насаждений важное значение приобретает место отбора почвенных проб. Для определения обеспеченности почвы плодовых насаждений элементами питания отборы почвенных проб рекомендуется проводить отдельно как в местах локального внесения удобрений (под капельницами), так и за пределами очага концентрации питательных веществ (на расстоянии 40 см от капельниц). Изменение обеспеченности почвы питательными веществами необходимо учитывать при планировании системы применения удобрений в плодовых насаждениях, возделываемых по интенсивной технологии. Оценка обеспеченности почвы питательными веществами под капельницами позволит избежать чрезмерной удобренности, рационально использовать удобрения и снизить нагрузку на окружающую среду в результате экономного применения удобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ненько Н.И., Киселева Г.К., Ульяновская Е.В., Яблонская Е.К., Караваева А.В. Физиолого-биохимические критерии устойчивости яблони к абиотическим стрессам летнего периода // Сел.-хоз. биол. 2019. Т. 54. № 1. С. 158–168.
2. Система земледелия в садоводстве и виноградарстве Краснодарского края (метод. рекоменд.). Краснодар: ФГБНУ СКЗНИИСиВ, 2015. 241 с.
3. Gärdenäs A.I., Hopmans J.W., Hanson B.R., Šimůnek J. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation // *Agricult. Water Manag.* 2005. V. 74. Iss 3. P. 219–242. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.11.011>
4. Kafkafi U., Tarchitzky J. Fertigation: A Tool for efficient fertilizer and water management. Paris: France and IPI, Horgen, Switzerland, 2011. 138 p.
5. Фоменко Т.Г., Попова В.П. Фертигация плодовых насаждений. Метод. рекоменд. Краснодар: ФГБНУ СКФНЦСВВ, 2018. 51 с.
6. Куликов И.М., Коновалов С.Н., Бобкова В.В., Петрова В.И., Помякшева Л.В. Эффективность технологий прецизионной агрохимии в промышленном садоводстве и ягодоводстве // Плодородие. 2016. № 5(92). С. 13–16.
7. Neilsen G.H., Neilsen D., Herbert L. Nitrogen fertigation concentration and timing of application affect nitrogen nutrition, yield, firmness, and color of apples grown at high density // *HortScience*. 2009. V. 44. Iss 5. P. 1425–1431.
8. Falk Kühn B., Bertelsen M., Sørensen L. Optimising quality-parameters of apple cv. 'Pigeon' by adjustment of nitrogen // *Sci. Horticult.* 2011. V. 129. Iss 3. P. 369–375. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.033>
9. Кузин А.И., Трунов Ю.В., Соловьев А.В. Оптимизация азотного питания яблони (*Malus domestica* Borkh) при фертигации и внесении бактериальных удобрений // Сел.-хоз. биол. 2018. Т. 53. № 5. С. 1013–1024. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.5.1013rus>
10. Hardie M., Ridges J., Swarts N., Close D. Drip irrigation wetting patterns and nitrate distribution: comparison between electrical resistivity (ERI), dye tracer, and 2D soil–water modelling approaches // *Irrigat. Sci.* 2018. V. 36. Iss. 2. P. 97–110. <https://doi.org/10.1007/s00271-017-0567-3>
11. Помякшева Л.В. Распределение в дерново-подзолистой почве нитратного азота при фертигации с капельным поливом // Плодоводство и ягодоводство России. 2015. Т. 43. С. 337–341.
12. Li J., Chen P., Sun X.H., Liu P. Effects of fertigation strategies on water and nitrogen distribution under water storage pit irrigation for orchards // *Inter. J. Agri-cult. Biol. Engin.* 2018. V. 11(1). P. 165–171. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3282>
13. Li J., Zhang J., Ren L. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source // *Irrigat. Sci.* 2003. V. 22. Iss. 1. P. 19–30. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0064-8>
14. Фоменко Т.Г., Попова В.П., Пестова Н.Г. Изменение параметров почв садовых ценозов при локальном применении удобрений и водных мелиораций // Рос. сел.-хоз. наука. 2015. № 3. С. 39–43.
15. Eltarabily M.G., Bali K.M., Negm A.M., Yoshimura C. Evaluation of root water uptake and urea fertigation distribution under subsurface drip irrigation // *Water*. 2019. V.11. P. 1487. <https://doi.org/10.3390/w11071487>
16. Кузин А.И., Трунов Ю.В. Распределение доступного фосфора в корнеобитаемом слое почвы под влиянием капельного орошения и фертигации в интенсивном яблоневом саду // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2015. № 34(4). С. 72–85.
17. Беседина Т.Д., Тумберидзе Ц.В., Бойко А.П., Тория Г.Б. Влияние режимов капельного орошения на свойства почв под насаждениями *Actinidia deliciosa* // Новые технологии. 2018. № 3. С. 159–165.
18. Elashbah R., Selim T., Mirdan A., Berndtsson R. Modeling of fertilizer transport for various fertigation scenarios under drip irrigation // *Water*. 2019. V. 11(5). P. 893. <https://doi.org/10.3390/w11050893>
19. Cote C.M., Bristow K.L., Charlesworth P.B., Cook F.J., Thorburn P.J. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation // *Irrigat. Sci.* 2003. V. 22. P. 143–156. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0080-8>
20. Zeng C., Wang Q., Zhang F., Zhang J. Temporal changes in soil hydraulic conductivity with different soil types and irrigation methods // *Geoderma*. 2013. V. P. 193–194. P. 290–299. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.013>
21. Naglič B., Kechavarzi C., Coulon F., Pintar M. Numerical investigation of the influence of texture, surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size // *Irrigat. Sci.* 2014. V. 32. Iss 6. P. 421–436. <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0439-z>

22. Алиев Т.Г.Г., Картечина Н.В., Кривошеков Л.И., Шелковников В.В. Агроэколого-биологическое обоснование системы содержания почвы в интенсивном саду // Вестн. МичуринсГАУ. 2016. № 4. С. 6–12.
23. Трапезников В.К., Иванов И.И., Тальвинская Н.Г. Локальное питание растений. Уфа, 1999. 260 с.
24. Aggelopoulou K.D., Pateras D., Fountas S., Gemtos T.A. Soil spatial variability and site-specific fertilization maps in an apple orchard // *Precis. Agricult.* 2011. V. 12. Iss. 1. P. 118–129.
<https://doi.org/10.1007/s11119-010-9161-x>
25. Фоменко Т.Г., Попова В.П., Пестова Н.Г., Черников Е.А. К методике агрохимического обследования плодовых насаждений интенсивного типа и расчета дифференцированных доз применения минеральных удобрений // *Агрохимия*. 2017. № 3. С. 79–91.
26. Kaori Matsuoka. Methods for nutrient diagnosis of fruit trees early in the growing season by using simultaneous multielement analysis // *Horticult. J.* 2020. V. 89(3). P. 197–207.
<https://doi.org/10.2503/hortj.UTD-R006>
27. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
28. Силкин К.Ю. Геоинформационная система Golden Software Surfer 8: Учеб.-метод. пособ. для вузов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2008. 66 с.
29. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ВНИИА, 2003. 196 с.
30. Ягодин Б.А., Смирнов П.М., Петербургский А.В. Агрохимия. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1989. 639 с.

Migration of Biogenic Elements in Chernozem Typical of Fruit Orchards Fertigation

T. G. Fomenko^{a, #}, V. P. Popova^a, E. A. Chernikov^a, A. I. Drigina^a,
I. A. Lebedovsky^b, D. V. Uzlovaty^b, and A. N. Myazina^b

^aNorth Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture
Winemaking ul. 40-letiya pobedy 39, Krasnodar 350901, Russia

^bI. T. Trubilin Kuban State Agrarian University
Krasnodar ul. Kalinina 13, Krasnodar 350044, Russia

[#]E-mail: sad-fertigation@mail.ru

Seasonal dynamics of variability of agrochemical properties of soils of fruit plantations and migration of nutrients in the zone of local fertilization with systematic application of fertigation were studied. A comparative study of the transformation of soil properties was carried out in young and fruit-bearing apple plantations in dynamics in the main phases of fruit plant development. The process of nutrient migration in the wetted soil zone was simulated using Surfer 8 software at the beginning, middle and end of the irrigation period. An increase in the content of nitrate nitrogen in the soil was found to a greater extent at a distance of 20 cm from the point of application of the mineral fertilizer solution and their leaching in the winter-spring period as a result of heavy precipitation. In the area of local fertilization, the distribution of mobile phosphorus is more fixed in the vertical direction, especially directly under the droppers, and the exchange of potassium in the horizontal direction. A statistically significant high correlation was found between the increase in the content of mobile phosphorus ($r = 0.95$) and exchange potassium ($r = 0.81$) in the soil directly under the droppers. The high content of these nutrients was maintained for a long time, and, as a rule, was not limited to one growing season. The results obtained were the basis for improving methods for assessing the soil fertility of fruit plantations cultivated using intensive technologies.

Key words: fruit plantations, fertigation, chernozem soils, migration of biogenic elements, modeling of soil processes, agrochemical properties of soils.