

УДК 631.41:631.674.6:634.11

ВЛИЯНИЕ МНОГОЛЕТНЕГО КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ ПЛОДОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ СВОЙСТВ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ

© 2022 г. Т. Г. Фоменко^а, *, В. П. Попова^а, Е. А. Черников^а, А. А. Макарова^а, О. В. Ярошенко^а^аСеверо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, ул. имени 40-летия Победы, 39, Краснодар, 350901 Россия

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

Поступила в редакцию 10.02.2022 г.

После доработки 15.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Приведены результаты оценки влияния многолетнего капельного орошения насаждений яблони слабоминерализованными водами на трансформацию свойств черноземов типичных (Haplic Chernozem) в условиях Прикубанской низменности Западного Предкавказья. Исследования проводили в насаждениях яблони *Malus domestica* сортов зимнего срока созревания на подвое М9 (клон ТЗЗ7). Изучение трансформации свойств орошаемых черноземных почв осуществляли с первого года после закладки сада до вступления в период полного товарного плодоношения (первый–пятый годы вегетации). Установлена выраженная сезонная динамика изменения содержания водорастворимых солей в почве плодовых насаждений: увеличение концентрации в зоне локального увлажнения при регулярном применении капельного орошения и их выщелачивание в более глубокие слои почвы в зимне-весенний период. В молодых насаждениях яблони наибольшая концентрация водорастворимых солей установлена в поверхностном слое почвы на границе контура увлажнения, удельная электропроводность водной вытяжки 1 : 5 (ЕС_{1:5}) в засушливый летний период увеличилась до 0.701–1.211 дСм/м. В плодоносящих насаждениях высокое содержание солей определено в пределах всего контура увлажнения почвы (ЕС_{1:5} 0.371–0.458 дСм/м). После пятилетнего капельного орошения в почве под капельницами установлено уменьшение содержание Са²⁺ до 11.8 смоль(экв)/кг, увеличение содержания Mg²⁺ до 24.8 смоль(экв)/кг и Na⁺ до 2.5 смоль(экв)/кг в слое почвы 0–30 см. Применение регулярного капельного орошения уже в первый год вегетации сада привело к значительному увеличению солонцеватости в ограниченном объеме почвы непосредственно под капельницами, содержание обменного натрия увеличилось до 9.0%. При более продолжительном орошении происходило постепенное увеличение объема почвы, подверженной солонцеватости, однако содержание обменного натрия сохранялось на относительно стабильном уровне (6.1–6.7%). Несмотря на установленные негативные изменения свойств почвы существенного уменьшения роста активной части корневой системы яблони в зоне локального увлажнения не установлено.

Ключевые слова: засоление почв, физико-химические свойства почв, осолонцевание почв, качество поливной воды

DOI: 10.31857/S0032180X22090064

ВВЕДЕНИЕ

Возделывание современных плодовых насаждений основывается на применении интенсивных ресурсосберегающих технологий с использованием высокопродуктивных сортов на слаборослых подвоях. Однако без развития орошаемого земледелия в условиях юга России вследствие дефицита атмосферных осадков невозможно создание высокопродуктивных плодовых насаждений, возделываемых по интенсивной технологии.

Прикубанская низменность в основном расположена в условиях недостаточного и неустойчивого увлажнения Западного Предкавказья. В связи с нехваткой водных ресурсов для успешно-

го сельскохозяйственного производства приходится использовать поливную воду низкого качества. Применение слабоминерализованной воды в системах капельного орошения может положительно повлиять на продуктивность и экономическую эффективность возделывания плодовых насаждений [19, 26]. Однако, наряду с положительным эффектом, продолжительное по времени капельное орошение плодовых насаждений минерализованными водами приводит к прогрессированию деградации орошаемых почв.

Значительные площади современных плодовых насаждений Западного Предкавказья возделываются на черноземах (Haplic Chernozem).

Большое содержание гумуса и глин, обуславливая хорошую буферность по отношению к воздействию минеральных удобрений, определяет чрезвычайно высокую чувствительность черноземов к орошению [3]. Ранее установлено, что в результате орошения поверхностными способами (дождеванием) наблюдается ухудшение физических свойств черноземов, в частности, увеличение содержания илистой фракции в верхней части гумусовых горизонтов, происходит обесструктурирование почв и увеличение глыбистости, уменьшение количества агрономически ценных и водоустойчивых агрегатов [8, 14, 23].

Орошение почв минерализованной водой приводит к развитию негативных почвенных процессов – изменению реакции почвенной среды, засолению, ошелачиванию, осолонцеванию, декарбонизации, нарушению ионного равновесия в почвенном поглощающем комплексе (ППК) [4, 13]. Установлено увеличение содержания обменных ионов натрия и магния по отношению к кальцию; со временем химический состав почвенных растворов становится похожим на состав поливной воды [22, 24, 36]. Длительное орошение почв степной зоны может способствовать увеличению содержания вредных щелочных солей и показателей реакции почвенной среды до сильнощелочной реакции среды почвы [7, 29].

Орошение минерализованной водой вызывает более глубокие негативные изменения микробного ценоза черноземов, которые не всегда можно исправить агромелиоративными мероприятиями. При длительном орошении наблюдается подавление ферментативной активности почв и сокращение численности микроорганизмов основных эколого-функциональных групп [35].

Считается, что основными причинами ухудшения потенциального плодородия черноземов при длительном орошении дождеванием являются неправильно выбранный режим полива, избыточная подача воды на орошаемые земли и главное – плохое качество оросительных вод [11].

В современном сельскохозяйственном производстве вместо поверхностных способов орошения стали широко применять капельный полив. Многолетнее капельное орошение минерализованными водами приводит к деградации черноземов, в первую очередь в местах локализации поливной воды, а не по слоям почвы, что характерно для орошения сплошными способами полива [16]. Локальное увлажнение почвы обуславливает неравномерное распределение водорастворимых солей под капельницами [27, 37, 39]. При капельном орошении распределение солей в почвенном профиле происходит с движением воды, поэтому часто наблюдается накопление солей в поверхностном слое на периферии основной зоны увлажнения почвы [1, 33]. Несмотря на экономное рас-

ходование поливной воды при капельном орошении имеется немало сведений о существенном его влиянии на физические и химические свойства почв, особенно в условиях интенсивного многолетнего орошения [9, 25, 34].

В плодовых насаждениях проблема деградации орошаемых почв более актуальна. В отличие от севооборотов полевых культур, в плодовых насаждениях интенсивного типа в приствольных полосах часто отсутствует рыхление почвы, для подавления сорняков применяют гербициды. При минимальной обработке почвы и отсутствии перемешивания почвенных частиц за продолжительный период вегетации сада локальное увлажнение почвы минерализованными водами приводит к существенной трансформации орошаемых почв [15, 20].

Практика применения систем капельного орошения при возделывании плодовых культур на юге России показала, что прогнозированию влажности почвы и распределению водорастворимых солей в зоне локального увлажнения уделяется недостаточное внимание. Поэтому необходимы исследования, результаты которых позволят лучше понять процессы миграции водорастворимых солей, их выщелачивания из корнеобитаемого слоя почвы и трансформации свойств орошаемых почв при капельном орошении минерализованными водами.

Цель работы – установить степень трансформации свойств черноземных почв плодовых насаждений Прикубанской низменности Западного Предкавказья при длительном капельном орошении слабоминерализованными водами. Новые знания о происходящих в почве процессах при длительном систематическом применении капельного орошения необходимы для разработки методов повышения устойчивости орошаемых почв к антропогенному воздействию.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в условиях недостаточного увлажнения Прикубанской зоны плодородия Краснодарского края в орошаемых интенсивных насаждениях яблони на базе ООО “Экватор-Агро” (ст. Роговская 45°43’36” N 38°47’18” E). Плодовые насаждения яблони (*Malus domestica*) представлены сортами зимнего срока созревания Голден Рейнджерс, Ренет Симиренко, Гала, Модии и др. на подвое М9 (клон Т337) 2015–2019 г. посадки. Схема размещения деревьев 4.0 × 1.0 м. Для изучения трансформации свойств орошаемых черноземных почв были выбраны типичные участки (кварталы) с первого по пятилетний возраст насаждений. Капельное орошение насаждений яблони проводилось с момента закладки сада.

Почвы опытных насаждений представлены черноземами типичными сверхмощными слабогумус-

Таблица 1. Химический состав поливной воды, используемой для капельного орошения насаждений яблони в период проведения исследований

Дата отбора образца	рН	ЕС, дСм/м	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Сумма солей, г/л	SAR	adj.SAR
			ммоль(экв)/л									
15.05.2019	7.2	2.24	—	8.30	3.40	11.75	4.65	9.60	9.20	1.613	3.4	9.7
15.06.2019	8.0	2.36	—	9.40	4.25	10.60	2.85	10.00	11.40	1.674	4.5	12.6
24.07.2019	8.8	2.59	2.40	7.50	4.00	11.70	1.54	10.66	13.40	1.702	5.4	15.2
15.08.2019	8.7	2.63	2.40	8.85	3.35	11.20	2.10	9.10	14.60	1.757	6.2	17.6

ными легкоглинистыми на лёссовидных глинах по классификации почв СССР [5] или агрочерноземами миграционно-мицелярными сверхмощными легкоглинистыми на лёссовидных глинах по классификации почв России [6] или *Naпlс* Чернозем (Clayic, Agric, Pachic) по международной классификации почв WRB [31]. Содержание частиц размером <0.01 мм составляет 69.2% в верхнем (0–30 см) слое почвы. Почвы плодовых насаждений характеризовались слабощелочной реакцией почвенной среды (рН_{водн} 7.72 ± 0.11), средним уровнем обеспеченности органическим веществом (4.0 ± ± 0.1%), повышенной нитрификационной способностью (N-NO₃ 27.9 ± 4.4 мг/кг), высокой обеспеченностью подвижным фосфором (P₂O₅ 48.5 ± 5.6 мг/кг) и обменным калием (K₂O 413 ± ± 51 мг/кг).

Капельное орошение осуществляли в засушливые периоды года каждые 3–4 дня. Средняя поливная норма составляла 40 м³/га. Поливы назначали по результатам оценки запаса влаги тензиометрическим методом в основном корнеобитаемом слое почвы на расстоянии 20 см от места падения капли. Оптимальную влажность почвы поддерживали на уровне 80% наименьшей влагоемкости (НВ) в пределах контуров увлажнения.

Источником воды для орошения промышленных насаждений яблони являлась р. Кирпили, которая относится к степным рекам Кубано-Приазовской низменности. За вегетационный период 2019 г. было проведено по 38 капельных поливов с периодическим внесением водорастворимых минеральных удобрений. Реакция среды поливной воды изменялась от нейтральной (рН 7.2) в начале оросительного сезона до сильнощелочной (рН 8.7–8.8) в засушливый летний период (табл. 1). Концентрация в поливных водах ионов Na⁺ и (CO₃²⁻ + HCO₃⁻) увеличивалась на протяжении вегетационного периода, то есть происходило ошелачивание поливных вод. Общее содержание солей в воде составляло 1.61–1.76 г/л, при этом концентрация токсичных щелочных и нейтральных солей увеличивалась от 76.6% в начале сезона до 90.3% при окончании оросительного периода. Содержание водорастворимых солей превышало оптимальные значения, рекомендуемые для по-

лива сельскохозяйственных культур. Установлено значительное увеличение показателя натрий-адсорбционного отношения (SAR) поливной воды на протяжении вегетационного периода до 6.2 в засушливый летний период, что указывает на сильную вероятность осолонцевания почв при регулярном орошении. Показатель adjusted SAR значительно больше SAR, поэтому возможно осаждение карбонатов кальция при взаимодействии оросительной воды с почвой и вероятно более активное накопление обменного натрия.

Для изучения динамики изменения физико-химических параметров орошаемых черноземов отборы почвенных проб осуществляли регулярно на протяжении вегетационного периода 2019 г. из слоя 0–30 см ручным почвенным буром непосредственно под капельницами, на расстоянии 20 см и 40 см от точки падения капли, а также в центре междурядий плодовых насаждений. Таким образом, на каждом участке отбирали по 4 смешанных образца почвы для последующего лабораторного анализа. Один смешанный почвенный образец состоял из 24 индивидуальных проб. Проведено 5 отборов почвенных проб по основным фазам вегетации деревьев яблони: раскрытие почек, завязывание плодов, размер плода в диаметре 3–4 см, налив плодов и начало фазы созревания плодов.

Для установления закономерностей трансформации свойств почв в зоне локального увлажнения отборы почвенных образцов проводили в центральной части участка (квартала сада) под типичными деревьями. После оросительного сезона в сентябре 2019 г. раскапывали вертикальный профиль почвы, перпендикулярный ряду деревьев и выделяли сетку 10 × 10 см, начинающуюся от поверхности почвы непосредственно под капельницами с удалением на 40 см по направлению к центру междурядья. Отборы почвенных проб проводили по слоям 0–10, 10–20 см и т. д. на глубину до 90 см с удалением в сторону междурядья.

Определение реакции почвенной среды и удельной электропроводности (ЕС_{1:5}) водной вытяжки из почвы проводили по ГОСТ 26423-85. Определение содержания водорастворимых ионов хлора и ионов натрия осуществляли с помощью ионоселективных электродов в водной суспензии при соотношении почвы и раствора 1 : 5. Содержание обменного

кальция и обменного магния определяли трилонометрическим методом по ГОСТ 26487-85 (экстрагирующий раствор 1.0 М NaCl); содержание обменного натрия по ГОСТ 26950-86.

Лабораторные исследования выполняли в научном центре агрохимии и почвоведения ФГБНУ СКФНЦСВВ на основе приборной базы Центра коллективного пользования “Приборно-аналитический”. Для определения содержания реакции почвенной среды, водорастворимых ионов хлорида и ионов натрия использовали регистрирующий прибор рН-метр – иономер Экотест-120. Определение концентрации ионов натрия в вытяжке после экстракции обменного натрия проводили на пламенном фотометре ПФА-354.

Изучение корневой системы деревьев яблони сорта Голден Рейнджерс на подвое М9 осуществляли в плодоносящих насаждениях методом “профильной стенки”. Раскопку корневой системы и зарисовку распределения корней проводили вдоль ряда деревьев в центре приствольной полосы между двумя типичными деревьями на глубину до 90 см. Подсчет корней проводили по группам с диаметром: <1, 1–2, 2–5 и >5 мм.

Диаграммы динамики изменения физико-химических параметров орошаемых черноземов и двухмерные (расстояние – глубина) графические модели содержания обменных катионов в зоне локального увлажнения почвы выполнены в программе Microsoft Office Excel 2003 с использованием методов корреляционного анализа. Построение 2D-диаграмм трансформации свойств орошаемых почв в зоне локального увлажнения проводили с использованием программного обеспечения Surfer 8 на основе интерполяции экспериментальных данных методом триангуляции согласно учебно-методическому пособию [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При капельном орошении насаждений яблони в зоне локализации поливной воды отмечена тенденция увеличения показателей реакции почвенной среды. Наиболее заметно это проявилось в первые годы орошения сада, рН почвенной среды в слое 0–30 см под капельницами возросла в среднем на 11.3–12.0% за вегетационный период по сравнению с почвой на расстоянии 40 см от капельниц. С трехлетнего возраста сада яблони показатели реакции почвенной среды под капельницами были в среднем на 4.5–7.6% больше по сравнению со слоем почвы за пределами зоны увлажнения. Подщелачивание почвы в большей степени объясняется увеличением содержания обменного магния и натрия в почве в зоне ее локального увлажнения.

Регулярное капельное орошение плодовых насаждений слабоминерализованной водой спо-

собствовало накоплению водорастворимых солей в зоне локального увлажнения почвы. Распределение солей в профиле происходило с движением воды, поэтому часто наблюдается тенденция накопления солей на периферии основной зоны увлажнения почвы. В молодых насаждениях яблони основная концентрация солей установлена на расстоянии 20 см от точки падения капли поливной воды. Здесь отмечено постепенное увеличение содержания водорастворимых солей на протяжении вегетационного периода. Высокие показатели удельной электропроводности почвы ($EC_{1.5}$) установлены в засушливый летний период (июль–август) на расстоянии 20 см от капельниц и составляли 0.701 дСм/м в однолетних насаждениях яблони, 1.140 дСм/м – двулетних, 1.211 дСм/м – трехлетних (рис. 1). Установленные показатели были в 5.7–16.3 раза больше параметров почвы за пределами зоны увлажнения. Накопление солей на границе контура увлажнения появлялось на поверхности почвы характерными круговыми отложениями солей. Следует отметить, что значительное увеличение концентрации преимущественно вредных нейтральных солей способствовало небольшому уменьшению показателей реакции почвенной среды на расстоянии 20 см от капельниц по сравнению с почвой за пределами зоны локального увлажнения.

В плодоносящих насаждениях яблони отмечены особенности миграции водорастворимых солей в почве при капельном орошении. Зоны локального увлажнения здесь были практически закрыты листовым пологом деревьев, поэтому не происходило быстрого иссушения почвы в межполивной период, как это наблюдалось в молодых садах. Возможно, по этой причине в плодоносящих насаждениях яблони не установлено существенного различия показателей удельной электропроводности между образцами почвы, отобранными под капельницами ($EC_{1.5} = 0.343–0.458$ дСм/м), и на расстоянии 20 см от капельниц ($EC_{1.5} = 0.329–0.455$ дСм/м).

За пределами зоны основного увлажнения почвы удельная электропроводность на протяжении вегетационного периода существенно не изменялась. Средние показатели на расстоянии 40 см от капельниц составляли $EC_{1.5} = 0.106$ дСм/м, в центре междурядий – $EC_{1.5} = 0.069$ дСм/м, что характерно для незасоленных почв. Существенных различий по содержанию водорастворимых солей в почве молодых и плодоносящих садов за пределами зоны увлажнения не установлено.

На накопление водорастворимых солей при капельном орошении указывает увеличение концентрации в водном растворе ионов хлора и натрия. В молодых насаждениях яблони содержание ионов хлора в 0–30 см слое почвы на границе контура увлажнения увеличилось до 0.705–

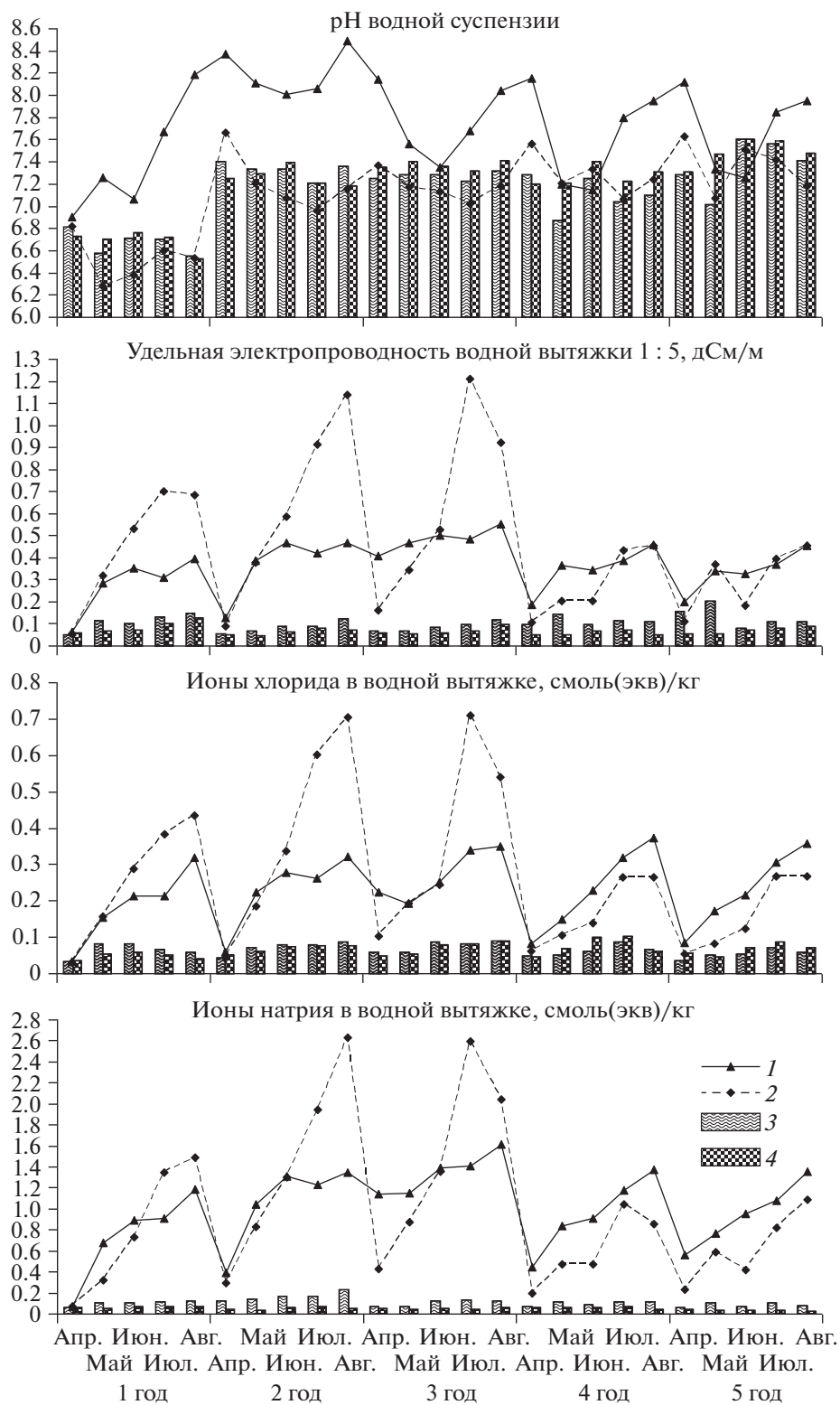


Рис. 1. Изменение свойств чернозема типичного в результате многолетнего капельного орошения насаждений яблони, слой почвы 0–30 см. Обозначения: 1 год, 2 год и т. д. — возраст орошаемых насаждений яблони, 1–4 — отборы почвы непосредственно под капельницами, на расстоянии 20, 40 см от капельниц и в центре междурядий соответственно.

0.711 смоль(экв)/кг. Необходимо отметить, что предельно допустимое количество хлоридов для растений яблони составляет 0.8–1.0 смоль(экв)/кг почвы при их преобладании в сумме вредных нейтральных солей [12]. В местах наибольшей концентрации водорастворимых солей максимальное содержание водорастворимых ионов натрия составило 2.043–2.630 смоль(экв)/кг. Напротив, в плодоносящих насаждениях яблони наибольшее содержание водорастворимых ионов хлора и натрия установлено в почве непосредственно под капельницами.

Отмечена выраженная сезонная динамика содержания водорастворимых солей в почве плодовых насаждений. Установлено увеличение концентрации солей в зоне локального увлажнения при орошении в засушливый летний период и их выщелачивание в более глубокие слои почвы в зимне-весенний период. В целом результаты изучения сезонных колебаний степени засоления орошаемых черноземных почв и миграции водорастворимых солей при капельном орошении многолетних насаждений согласуются с данными, полученными в других почвенно-климатических условиях [26, 28, 30, 32].

Регулярное применение капельного орошения слабоминерализованными водами насаждений яблони привело к существенному изменению содержания обменных катионов в почвенном поглощающем комплексе (ППК) почв. Установлено вымывание ионов кальция в зоне локального увлажнения почвы. Содержание обменного кальция в почве непосредственно под капельницами уже в первый год проведения орошения уменьшилось с 27.46 до 15.03 смоль(экв)/кг почвы в верхнем 0–30 см слое почвы, доля обменного кальция снизилась соответственно с 82.69 до 38.09% от суммы обменных оснований (рис. 2). В дальнейшем также наблюдалось уменьшение содержания обменного кальция в почве непосредственно под капельницами, однако наиболее существенные изменения произошли в первые 2 года с начала капельного орошения сада. Здесь содержание обменного кальция уменьшилось до 12.95 смоль(экв)/кг почвы, а после пятилетнего орошения до 11.80 смоль(экв)/кг почвы. На расстоянии 20 см от капельниц количество обменного кальция после пяти лет орошения уменьшилось в среднем на 3.17 смоль(экв)/кг почвы или 10.1% по сравнению с почвой, не подверженной влиянию капельного орошения – отбор в центре междурядий сада.

Отмечено накопление обменного магния в зоне локального увлажнения почвы в зависимости от продолжительности капельного полива. Содержание обменного магния непосредственно под капельницами после первого оросительного сезона увеличилось до 21.30 смоль(экв)/кг почвы,

то есть в 3 раза больше количества в почве за пределами зоны локального увлажнения. В результате доля магния в ППК возросла от 16.7% с начала применения капельного орошения до 54.0% от суммы обменных оснований к окончанию первого оросительного сезона. В дальнейшем наблюдалось постепенное увеличение содержания обменного магния в почве под капельницами, доля которого после пяти лет регулярного капельного орошения в среднем составила 59.7% в ППК. В то же время среднее содержание обменного магния в верхнем 0–30 см слое почвы на расстоянии 20 см от точки падения капли поливной воды составило 22.0%, на расстоянии 40 см – 14.2%, в центре междурядий сада – 13.1% от суммы обменных оснований.

Известно, что повышенное содержание в поливной воде магния является одной из основных причин плохого качества воды. Увеличение количества обменного магния ведет к повышению уровня щелочности, ухудшению водно-физических свойств почв и нарушению поступления влаги в растение. Магний очень прочно закрепляется в поглощающем комплексе и плохо поддается удалению [10].

Повышенное содержание натрия в поливной воде также привело к существенному увеличению его концентрации в зоне локального увлажнения почвы. В первый год орошения содержание обменного натрия в верхнем слое почвы под капельницей увеличилось с 0.20 до 3.13 смоль(экв)/кг почвы. По окончании оросительного сезона доля обменного натрия в почве непосредственно под капельницами увеличилась до 7.9% в ППК, что совершенно не характерно для черноземных почв. В последующий период содержание обменного натрия увеличилось с 1.32 до 2.78 смоль(экв)/кг почвы. После зимне-весеннего периода в зоне локального увлажнения почвы установлено снижение содержания обменного натрия на 24.8–50.8% по сравнению с его содержанием в засушливый летний период в августе.

В отличие от других обменных катионов, установлено значительное изменение содержания обменного натрия в пределах всего контура увлажнения почвы. На расстоянии 20 см от капельниц содержание натрия после первого года вегетации увеличилось до 1.35 смоль(экв)/кг почвы и составило 3.6% от суммы поглощенных оснований. На расстоянии 40 см от капельниц за исследуемый период содержание обменного натрия составило 0.76% от ППК, в то время как в почве междурядий 0.58% от ППК.

Установлена статистически достоверная сильная (полиномиальная) корреляция снижения содержания обменного кальция ($r = 0.89$) и увеличения обменного магния ($r = 0.92$) в почве непосредственно под капельницами в результате

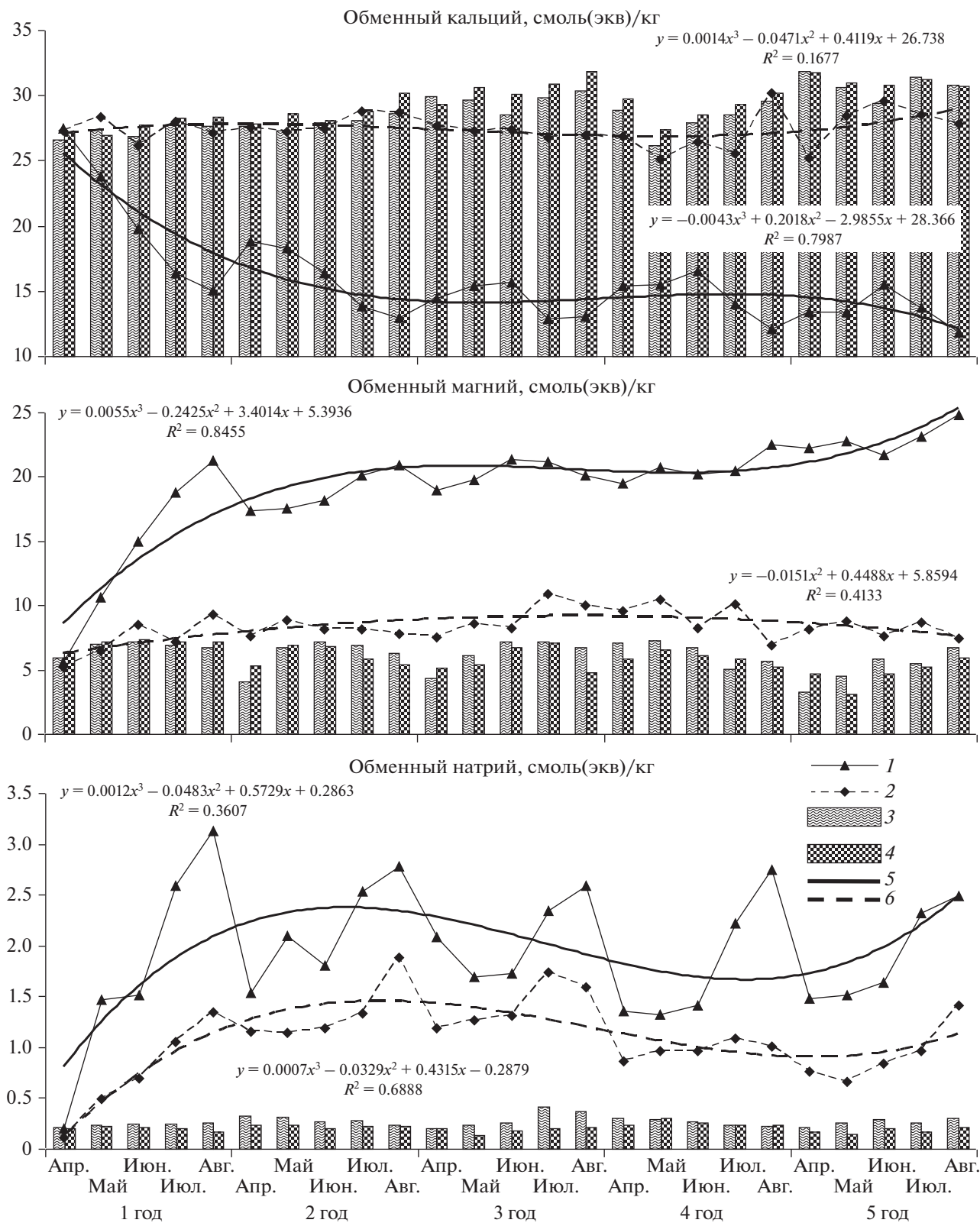


Рис. 2. Изменение физико-химических свойств чернозема типичного в результате многолетнего капельного орошения плодовых насаждений, слой почвы 0–30 см. Обозначения: 1 год, 2 год и т. д. — возраст орошаемых насаждений яблони, значения по оси X заданы количеством месяцев в течение которых проводилось орошение, 1–4 — отборы почвы непосредственно под капельницами, на расстоянии 20, 40 см от капельниц и в центре междурядий соответственно; 5, 6 — полиномиальная регрессия изменения свойств почвы непосредственно под капельницами и на расстоянии 20 см от капельниц соответственно.

многолетнего применения капельного орошения (фертигации) в плодовых насаждениях. Отмечена слабая зависимость содержания обменного натрия от продолжительности применения орошения, коэффициент корреляции под капельницами составил 0.60.

Неравномерность распределения поливной воды при капельном орошении в зоне локального увлажнения почвы обуславливает высокую неоднородность трансформации параметров черноземных почв. Значительные изменения содержания обменных катионов в зоне локального увлажнения почвы выявлено уже с первого года капельного орошения плодовых насаждений. Установлено значительное уменьшение содержания обменного кальция и накопление обменного магния в почве непосредственно под капельницами в слое на глубину до 0–30 см, при этом на расстоянии 20 см от точки падения капли воды содержание этих катионов изменилось незначительно (рис. 3). После двухлетнего регулярного капельного орошения изменение содержания обменного кальция и магния в почве непосредственно под капельницами отмечено в слое на глубину до 0–50 см. В дальнейшем при регулярном орошении увеличения глубины трансформации соотношения обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} не наблюдалось. При этом зарегистрировано сильное изменение содержания этих катионов на границе контуров увлажнения почвы.

Увеличение содержания обменного натрия в почве под капельницами установлено даже на глубине 90 см уже после первого года орошения. При этом наибольшее накопление натрия отмечено в слое почвы 0–50 см как под капельницами, так и на расстоянии 20 см. При многолетнем орошении накопление обменного натрия происходило в пределах всего контура увлажнения почвы.

Имеются данные, что черноземы, содержащие до орошения менее 1% обменного натрия, теряют природную устойчивость к внешним воздействиям при накоплении обменного натрия до 2–3% [3]. В нашем опыте доля обменного натрия в ППК в слое 0–30 см непосредственно под капельницами в среднем составляла 9.0, 8.2, 6.1, 6.7, 6.2% от суммы поглощенных оснований в конце оросительного сезона первого–пятого годов вегетации соответственно. Установленные значения содержания обменного натрия лежат в пределах градации слабосолонцеватых для почв черноземного типа почвообразования [2]. Таким образом, капельное орошение слабоминерализованными водами за относительно короткий период времени привело к существенному увеличению солонцеватости почвы, что можно оценить как сильное и очень сильное антропогенное воздействие.

Полевые исследования не всегда позволяют однозначно заключить, до какой степени может развиваться солонцеватость в черноземах и какова

позаэтапная скорость этого процесса. Предыдущими исследованиями, например, установлено, что в первые годы орошения поверхностными способами заметно меняется состав ППК, особенно сильно возрастает содержание обменного натрия. После 10 лет орошения доля обменного натрия в почве практически не изменялась, соответствуя уровню слабосолонцеватой для черноземных почв [17]. В наших исследованиях применение регулярного капельного орошения уже в первый год вегетации сада привело к значительному увеличению солонцеватости почвы непосредственно под капельницами. После трех лет орошения даже было отмечено снижение содержания обменного натрия и стабилизация на уровне 6.1–6.7% от суммы обменных оснований. Возможные причины изменения содержания обменного натрия могут быть обусловлены рядом факторов. Во-первых, изменение водного режима почвы плодоносящих насаждений яблони, в которых не происходило быстрого иссушения почвы в межполивной период, как это отмечалось в молодых садах. Во-вторых, в плодоносящих насаждениях вносили при фертигации в больших дозах калийные удобрения, что способствовало существенному увеличению содержания обменного калия в почве непосредственно под капельницами [21].

Построенные 2D-диаграммы изменения содержания обменного натрия в зоне локального увлажнения почвы демонстрируют пространственную трансформацию свойств орошаемых черноземных почв в результате длительного капельного орошения минерализованными водами (рис. 4). При основной глубине корнеобитаемого слоя почвы (0.6 м) и ширине пристволенной полосы (1.2 м) расчетным путем установлено, что объем почвы с содержанием обменного натрия более 3% составил 17.8% в насаждениях яблони при окончании однолетнего цикла полива, 26.0% после трехлетнего и 38.5% после пятилетнего орошения. Таким образом, длительное капельное орошение минерализованными водами приводило в первую очередь к постепенному увеличению контуров почвы с повышенным содержанием обменного натрия, нежели увеличению степени солонцеватости почвы.

Содержание токсичных солей и солонцеватость почвы напрямую влияют на функционирование корневой системы растений, а также подавляют микробиологическую активность почвы [38]. Исследование пространственного распределения корней плодоносящих деревьев яблонь в условиях интенсивного капельного орошения минерализованными водами показало, что основная концентрация корней была обнаружена в поверхностном (0–30 см) слое почвы. При этом более плотного расположения корней рядом с источником воды не установлено (рис. 5), что подтверждается исследованиями других авторов [40].

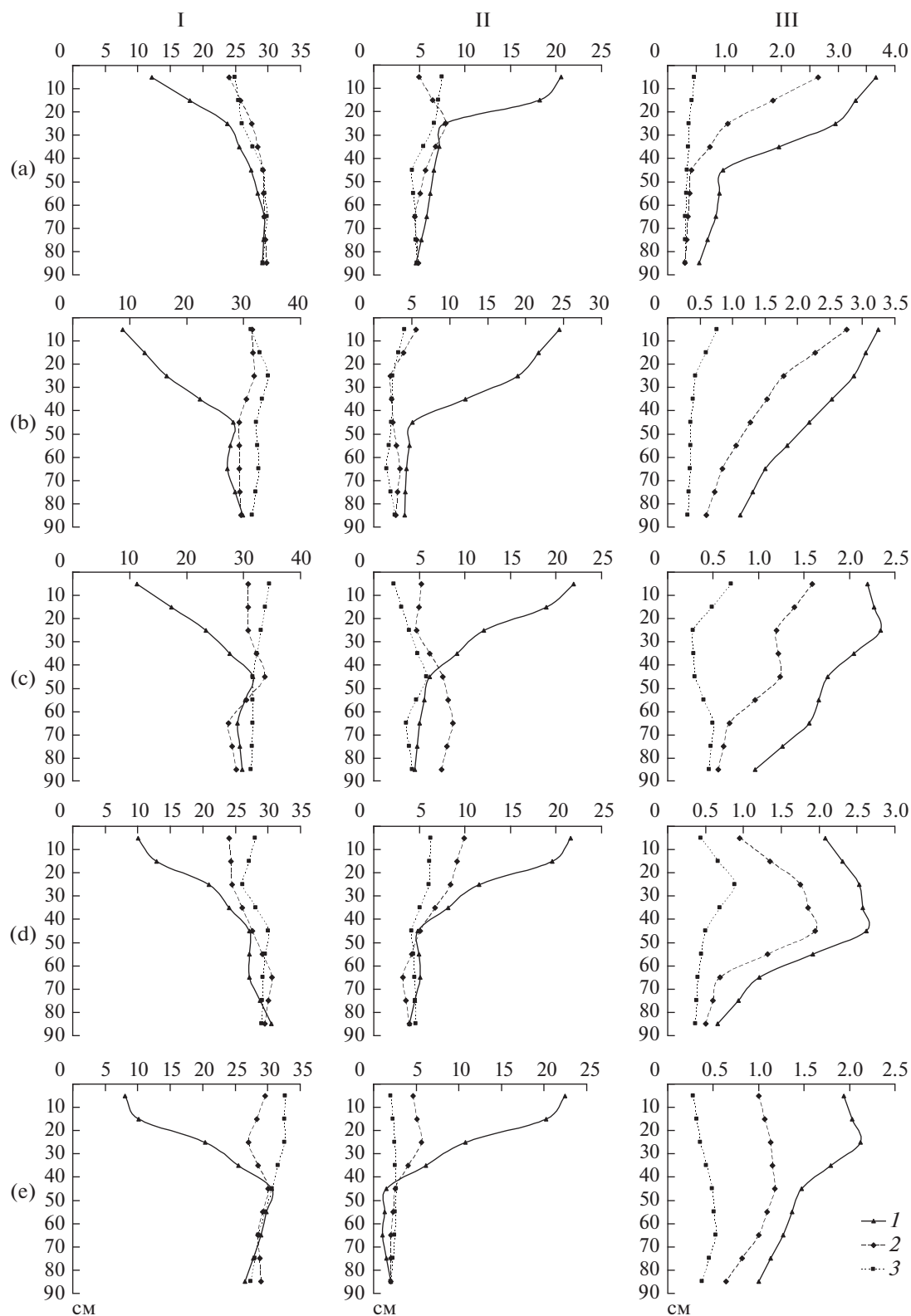


Рис. 3. Вертикальное распределение обменных катионов (кальция – I, магния – II и натрия – III, смоль(экв)/кг) в зоне локального увлажнения почвы. Обозначения: a, b, c, d, e – конец оросительного сезона первого–пятого годов вегетации сада соответственно, 1–3 – отборы почвы непосредственно под капельницами, на расстоянии 20 и 40 см от капельниц соответственно.

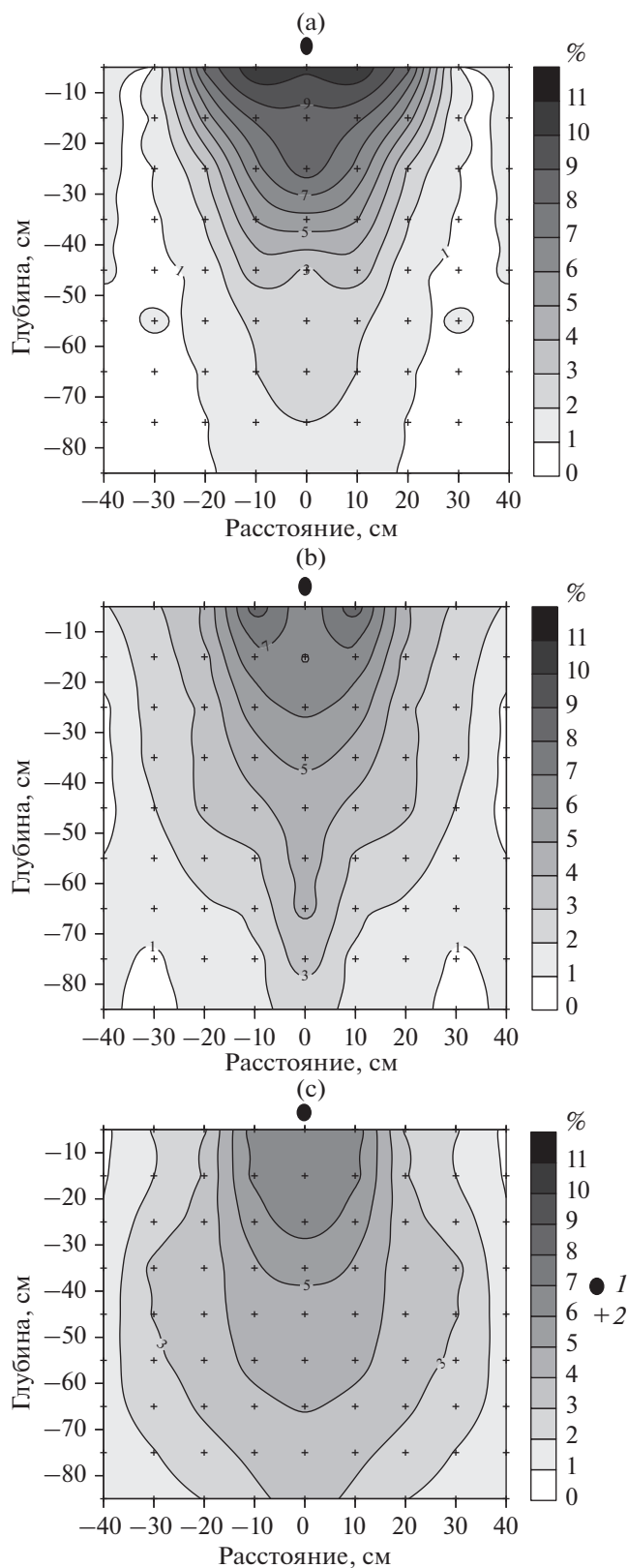


Рис. 4. Изменение содержания обменного натрия в зоне локального увлажнения почвы в результате многолетнего капельного орошения плодовых насаждений, % от суммы обменных оснований. Обозначения: а, б, с – насаждения яблони первого, третьего, пятого года вегетации сада соответственно; черный овал – капельница; 1 – точка падения капель поливной воды (по горизонтали – расстояние от точки падения в сторону междурядий, по вертикали – в глубину почвы); 2 – точки отбора почвенных образцов.

Количество активных корней (диаметром менее 2 мм) в поверхностном слое почвы непосредственно под капельницами составляло от 24 до 78 шт. на 100 см², на границе контура увлажнения почвы вблизи штамбов деревьев от 41 до 68 шт. на 100 см². Несмотря на установленные негативные изменения свойств почвы в зоне локального увлажнения, существенного подавления роста активной части корневой системы яблони не установлено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение капельного орошения плодовых насаждений слабоминерализованной водой на черноземе типичном в условиях Прикубанской низменности Западного Предкавказья способствовало увеличению щелочности почвы, значительному накоплению водорастворимых солей и появлению солонцеватости почвы в зоне локального увлажнения почвы.

Наибольшая концентрация водорастворимых солей в молодых насаждениях яблони установлена в поверхностном слое почвы на границе контура увлажнения почвы, в плодоносящих насаждениях яблони высокое содержание солей наблюдалось в пределах всего контура увлажнения почвы. В зимне-весенний период при выпадении осадков происходило вымывание солей в более глубокие слои почвы.

Значительные изменения содержания обменных катионов в зоне локального увлажнения почвы установлены уже после первого года регулярного капельного орошения, поскольку почвенные растворы приобретали химизм поливной воды. Установлена статистически достоверная сильная (полиномиальная) корреляция уменьшения содержания обменного кальция ($r = 0.89$) и увеличения содержания обменного магния ($r = 0.92$) в почве непосредственно под капельницами в зависимости от продолжительности применения орошения. Повышенное содержание натрия в поливной воде привело к существенному увеличению его концентрации в зоне локального увлажнения почвы, как в почве непосредственно под капельницами ($r = 0.60$), так и на расстоянии 20 см от капельниц ($r = 0.83$).

Установлены закономерности трансформации свойств черноземов в зоне локального увлажнения

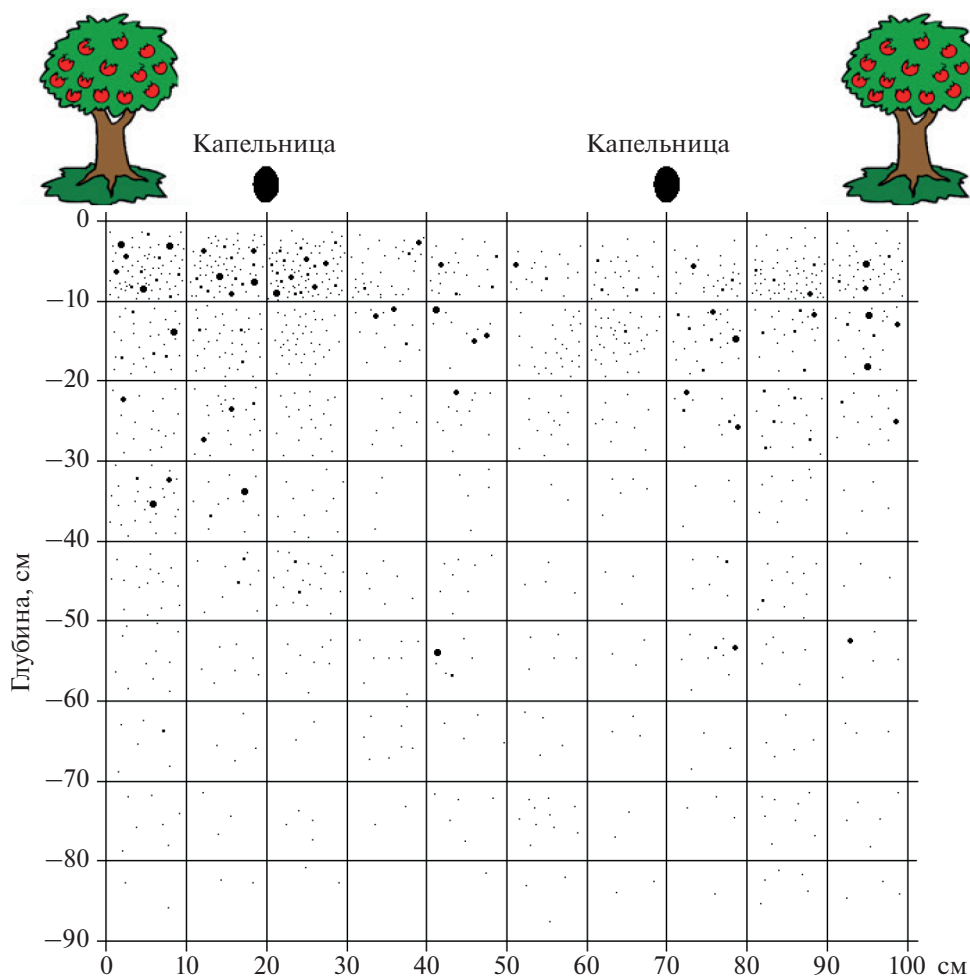


Рис. 5. Пространственное распределение корней вдоль ряда пятилетних деревьев яблони сорта Голден Рейнджерс на подвое М9 при регулярном капельном орошении. Точками с увеличивающимся диаметром показаны корни диаметром <1, 1–2; 2–5; >5 мм соответственно.

почвы. При длительном капельном орошении изменение ионного равновесия Ca^{2+} и Mg^{2+} наблюдалось на глубину до 50 см. В молодых насаждениях яблони наблюдалась тенденция интенсивного накопления обменного натрия в ограниченном объеме почвы непосредственно под капельницами, содержание которого увеличилось до 9.0% от суммы обменных оснований, что соответствует слабой степени солонцеватости для почв черноземного типа почвообразования и свидетельствует о сильном и очень сильном антропогенном воздействии. При более продолжительном орошении происходило постепенное увеличение объема почвы, подверженной солонцеватости, однако содержание обменного натрия непосредственно в точки падения капли сохранялось на относительно стабильном уровне – 6.1–6.7%.

Несмотря на установленные негативные изменения свойств почвы в зоне локального увлажнения, существенного подавления роста активной

части корневой системы яблони в этой зоне не установлено, как и отрицательного влияния на ростовые процессы и продуктивность деревьев яблони. Связано это с выщелачиванием солей за пределы основного корнеобитаемого слоя почвы в период межсезонья (с октября по май). Проблема деградации черноземных почв в многолетних плодовых насаждениях, возделываемых по интенсивным технологиям, особенно при поливах минерализованными водами, остается актуальной. В современных садах требуется применение способов мелиорации почв для сохранения плодородия орошаемых черноземных почв, улучшения экологического состояния агроценоза, предохранения почв от засоления, улучшения температурного режима и, как следствие, создания благоприятных условий для формирования почвенно-биотического комплекса. Определяющим в этом направлении должны быть мелиоративные приемы с элементами биологизации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-44-233010 г_mol_a и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воеводина Л.А., Снипич Ю.Ф., Черкунов А.Н.* Влияние капельного орошения на засоление почв // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного ун-та. 2010. № 64. С. 198–203.
2. Засоленные почвы России / Отв. редакторы Л.Л. Шишов, Е.И. Панкова. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2006. 854 с.
3. *Зимовец Б.А., Хитров Н.Б., Кочеткова Г.Н., Чижикова Н.П.* Оценка деградации орошаемых почв // Почвоведение. 1998. № 9. С. 1119–1126.
4. *Зинченко Е.В., Горохова И.Н., Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б.* Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. № 104. С. 68–109. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-68-109>
5. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
6. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
7. *Клименко О.Е.* Ощелачивание орошаемых садопригодных почв степного Крыма и перспективы их использования // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1251–1260. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16100087>
8. *Королев В.А.* Изменение основных физических свойств черноземов обыкновенных под влиянием орошения // Почвоведение. 2008. № 10. С. 1234–1240.
9. *Кузин А.И., Пугачев Г.Н., Захаров В.Л., Трунов Ю.В., Соловьев А. В., Тарова З.Н.* Влияние капельного орошения на изменение физических и химических свойств почвы // Политематический сетевой электронный научный журн. Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 129. С. 1183–1193. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-129-085>
10. *Минашина Н.Г.* Оросительные воды с повышенным содержанием магния и их роль в деградации черноземов на Юго-Востоке Европы // Почвоведение. 2011. № 5. С. 564–571.
11. *Минашина Н.Г.* Проблемы орошения почв степей юга России и возможности их решения (на основе анализа производственного опыта 1950–1990 гг.) // Почвоведение. 2009. № 7. С. 867–876.
12. *Неговелов С.Ф., Вальков В.Ф.* Почвы и сады. Ростов: Изд-во Ростовского ун-та, 1985. 192 с.
13. *Новикова А.Ф.* Мелиоративное состояние орошаемых земель Ростовской области // Почвоведение. 2008. №. 5. С. 599–613.
14. *Осинов А.В., Слюсарев В.Н.* Мелиоративное почвоведение. Уч. пособие. Краснодар: КубГАУ, 2019. 134 с.
15. *Орёл Т.И., Новицкий М.Л.* Влияние длительного капельного орошения на физические свойства луговых аллювиальных почв Крыма // Бюл. Государственного Никитского ботанического сада. 2018. № 126. С. 116–121. <https://doi.org/10.25684/NBG.boolt.126.2018.18>
16. *Попова В.П., Фоменко Т.Г.* Изменение свойств черноземов Северного Кавказа при капельном орошении плодовых насаждений // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. № 3. С. 37–40.
17. Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв / Под ред. Д.С. Орлова, В.Д. Васильевской. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 272 с.
18. *Силкин К.Ю.* Геоинформационная система Golden Software Surfer 8. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2008. 66 с.
19. *Фоменко Т.Г., Попова В.П., Белоусова К.В.* Эффективность применения новых отечественных удобрений при фертигации в плодоносящих насаждениях яблони // Садоводство и виноградарство. 2019. № 2. С. 10–17. <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2019-2-10-17>
20. *Фоменко Т.Г., Попова В.П., Пестова Н.Г.* Трансформация агрохимических свойств почв плодовых насаждений, возделываемых по интенсивным технологиям // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2018. № 54(6). С. 59–71. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2018-6-54-59-71>
21. *Фоменко Т.Г., Попова В.П., Черников Е.А., Дрыгина А.И., Лебедевский И.А., Узловатый Д.В., Мязина А.Н.* Миграция биогенных элементов в черноземе типичном при фертигации плодовых насаждений // Агрохимия. 2021. № 3. С. 60–70. <https://doi.org/10.31857/S0002188121040050>
22. *Хитров Н.Б., Клименко О.Е., Роговнева Л.В., Дунаева Е.А., Попович В.Ф.* Долговременные последствия орошения почв водами Северо-Крымского канала в садах // Таврический вестник аграрной науки. 2017. № 1(9). С. 87–98.
23. *Чижикова Н.П., Барановская В.А., Хитров Н.Б.* Влияние длительного орошения на степень агрегированности и минералогический состав илистой фракции темно-каштановых почв Заволжья // Почвоведение. 2011. № 8. С. 978–994.
24. *Щедрин В.Н.* Влияние регулярного и циклического видов орошения на почвенное плодородие и продуктивность чернозема обыкновенного Азовской оросительной системы // Почвоведение. 2016. № 2. С. 249–256. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16020118>
25. *Ahmed C.B., Magdich S., Rouina B.B., Boukhris M., Abdullh F.B.* Saline water irrigation effects on soil salinity distribution and some physiological responses of field grown Chemlali olive // J. environmental management. 2012. V. 113. P. 538–544. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.016>
26. *Aragüés R., Medina E.T., Martínez-Cob A., Faci J.* Effects of deficit irrigation strategies on soil salinization and sodification in a semiarid drip-irrigated peach orchard // Agricultural Water Management. 2014. V. 142. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.004>

27. *Friedman S.P., Gamliel A.* A modelling approach and module for salinity management in drip irrigation // *Biosystems Engineering*. 2021. V. 207. P. 141–161. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.03.019>
28. *Ghrab M., Gargouri K., Bentaher H. et al.* Water relations and yield of olive tree (cv. Chemlali) in response to partial root-zone drying (PRD) irrigation technique and salinity under arid climate // *Agricultural Water Management*. 2013. V. 123. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.03.007>
29. *Hannam K.D., Kehila D., Millard P. et al.* Bicarbonates in irrigation water contribute to carbonate formation and CO₂ production in orchard soils under drip irrigation // *Geoderma*. 2016. V. 266. P. 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.12.015>
30. *Intrigliolo D.S., Castel J.R.* Long-term effects of deficit irrigation and subse-quent recovery of young japanese plum trees // *Acta Horticulturae*. 2011. V. 889. P. 241–248. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.889.28>
31. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification-system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. FAO, Rome. 2014. № 106. 181 p.
32. *Melgar J.C., Mohamed Y., Serrano N. et al.* Long term responses of olive trees to salinity // *Agricultural Water Management*. 2009. V. 96. Iss. 7. P. 1105–1113. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.02.009>
33. *Mmolawa K., Or D.* Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review // *Plant and Soil*. 2000. V. 222. P. 163–190. <https://doi.org/10.1023/A:1004756832038>
34. *Mounzer O., Pedrero-Salcedo F., Nortes P.A., Bayona J.M., Nicolás-Nicolás E., Alarcón J.J.* Transient soil salinity under the combined effect of reclaimed water and regulated deficit drip irrigation of Mandarin trees // *Agricultural Water Management*. 2013. V. 120. P. 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.014>
35. *Naydyonova O., Baliuk S.* Biological degradation of chernozems under irrigation // *Eurasian Journal of Soil Science*. 2014. V. 3. P. 267–273. <https://doi.org/10.18393/ejss.87170>
36. *Phogat V., Mahadevan M., Skewes M., Cox J.W.* Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design // *Irrigation Science*. 2012. V. 30. P. 315–333. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0284-2>
37. *Phogat V., Mallants D., Cox J.W., Šimůnek J., Oliver D.P., Pitt T., Petrie P.R.* Impact of long-term recycled water irrigation on crop yield and soil chemical properties // *Agricultural Water Management*. 2020. V. 237. P. 106167. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106167>
38. *Rengasamy P., Chittleborough D., Helyar K.* Root-zone constraints and plant-based solutions for dryland salinity // *Plant and Soil*. 2003. V. 257. P. 249–260. <https://doi.org/10.1023/A:1027326424022>
39. *Selim T., Berndtsson R., Persson M.* Simulation of soil water and salinity distribution under surface drip irrigation // *Irrigation and Drainage*. 2013. V. 62. P. 352–362. <https://doi.org/10.1002/ird.1739>
40. *Sokalska D.I., Haman D.Z., Szewczuk A., Sobota J., Dereń D.* Spatial root distribution of mature apple trees under drip irrigation system // *Agricultural Water Management*. 2009. V. 96. P. 917–924. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.12.003>

Influence of Long-Term Drip Irrigation of Fruit Orchard on Transformation of the Chernozem Soil Properties

T. G. Fomenko^{1, *}, V. P. Popova¹, E. A. Chernikov¹, A. A. Makarova¹, and O. V. Yaroshenko¹

¹ North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-Making, Krasnodar, 350901 Russia

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

The results of assessing the impact of apple plantations with low-mineralized waters long-term drip irrigation on the typical chernozems (Haplic Chernozem) properties transformation in the Kuban lowland conditions of the Western Ciscaucasia are presented. The studies were carried out in winter ripening apple trees (*Malus domestica*) varieties plantations on rootstock M9 (clone T337). The study of the irrigated chernozem soils properties transformation was carried out from the first year after the orchard laying out until the period of full marketable fruiting (1st to 5th year of vegetation). An explicit seasonal changes dynamics in the water-soluble salts content in the fruit plantations soil has been established: an increase in the concentration in the local moisture zone with regular use of drip irrigation and their leaching into deeper soil layers in the winter-spring period. In young apple plantations, the highest water-soluble salts concentration was found in the surface soil layer at the moistening contour boundary; In fruit-bearing plantations, a high salt content was determined within the entire contour of soil moisture ($EC_{1.5} = 0.371–0.458$ dS/m). After five years of drip irrigation in the soil under droppers, a decrease in Ca²⁺ content to 11.8 cmol(eq)/kg, an increase in Mg²⁺ to 24.8 cmol(eq)/kg and Na⁺ to 2.5 cmol(eq)/kg in 0–30 cm soil layer was found. The use of regular drip irrigation already in the first year of the garden vegetation led to a significant increase in salinity in a limited amount of soil directly under the droppers, the content of exchangeable sodium increased to 9.0%. With longer irrigation, there was a gradual increase in the soil volume subjected to solonetzization, however, the content of exchangeable sodium remained at a relatively stable level of 6.1–6.7%. Despite the established negative changes in soil properties, a significant decrease in the growth of the apple root system active part in the local moisture zone has not been established.

Keywords: soil salinization, physical and chemical properties of soils, soil alkalization, water quality