

УДК 634.1:/.7:631.541.1

DOI 10.30679/2219-5335-2023-4-82-12-27

АРХИТЕКТОНИКА КОРНЕВЫХ СИСТЕМ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТЬ ДЕРЕВЬЕВ ЯБЛОНИ, ПРИВИТЫХ НА РАЗЛИЧНЫЕ ПО СИЛЕ РОСТА ПОДВОИ

Потанин Дмитрий Валериевич¹
канд. с.-х. наук
доцент кафедры плодовоовощеводства
и виноградарства
e-mail: potanin.07@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3724-8758>

Иванова Маргарита Игоревна²
канд. с.-х. наук
начальник отдела организации
учета применения средств химизации
и разработки проектно-сметной
документации
e-mail: imi_2712@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3749-9525>

¹Институт
«Агротехнологическая академия»
Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского»,
Симферополь, Крым, Россия

²Федеральное государственное
бюджетное учреждение «Центр
агрохимической службы «Крымский»,
Симферополь, Крым, Россия

Современное интенсивное плодководство предполагает закладку и эксплуатацию насаждений саженцами, привитыми на подвои, ограничивающими рост деревьев с одновременным увеличением продуктивности сада при увеличении плотности посадки. При этом сами подвои должны обеспечивать не только ослабление силы роста деревьев, но и адаптированность к почвенным условиям, которые могут

UDC 634.1:/.7:631.541.1

DOI 10.30679/2219-5335-2023-4-82-12-27

ARCHITECTONICS OF ROOT SYSTEMS AND POTENTIAL DROUGHT RESISTANCE OF APPLE TREES GRAFTED ON THE ROOTSTOCKS OF DIFFERENT GROWTH STRENGTH

Potanin Dmitry Valerievich¹
Cand. Agr. Sci.
Associate Professor of Fruit and Vegetable
Growing and Viticulture Department
e-mail: potanin.07@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3724-8758>

Ivanova Margarita Igorevna²
Cand. Agr. Sci.
Head of the Department
for the Organization of Accounting
for use of Chemicals and Development
of Design and Estimate Documentation
e-mail: imi_2712@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3749-9525>

¹Agrotechnological Academy
of the Federal State-Owned
Autonomous Educational
Establishment
of Higher Education
«V.I. Vernadsky Crimean
Federal University»,
Simferopol', Republic of Crimea, Russia

²Federal State Budgetary Institution
«Center of Agrochemical
Service «Krymsky»,
Simferopol', Republic of Crimea, Russia

Modern intensive fruit growing involves the laying and exploitation of plantings with seedlings grafted on rootstocks, limiting the growth of trees with a simultaneous increase in the productivity of the garden with an increase in planting density. At the same time, the rootstocks themselves should provide not only a weakening of the growth force of trees, but also adaptability to soil conditions,

существенно отличаться в зависимости от типа как самого подвоя, так и почвы. Цель исследования: изучить влияние внешних факторов окружающей среды, экстремальных для многолетних плодовых культур, на особенности роста и развития их корневых систем. Исследования проводились на различных по силе роста подвоях (ММ106, М26, М9 и сеянцы культурных сортов яблони). Изучение корневых систем проводилось методом послойных раскопок с последующей фиксацией результатов наблюдений. Установлено, что различные по силе роста подвои яблони формируют различную по глубине залегания корневую систему. Наблюдается тенденция – увеличение силы роста подвоев с более глубоким развитием корневой системы деревьев яблони. У деревьев яблони, привитых на более рослые подвои, отмечается более продолжительный процесс развития (онтогенеза) корневой системы. Так, на карликовом подвое М9 глубина освоения почвенного профиля не отличается на шестой год от таковой в третьем году, в то время как у деревьев на сильнорослом подвое она увеличилась на 40 см. Заглубляющиеся корневые системы деревьев с более рослыми подвоями, не смотря на увеличение засухоустойчивости растений, могут снижать уровень ответа растений на применяемую фертигацию, что потребует перехода с системы подкормок микроэлементами в течение вегетации на некорневые подкормки. В ходе исследований разработана математическая модель, которая показывает влияние силы роста подвоев, а также суммарной массы корней на водный дефицит растений по формуле:
$$X_{18} = 1 / (0.0010 + 0.0002 * X_1 + 0.0012 * X_{17})$$
с точностью множественной корреляции 0,9671.

Ключевые слова: ПЛОДОВОДСТВО, АДАПТИВНОЕ САДОВОДСТВО, ПОДВОЙ, ПОЧВА, ПРОДУКТИВНОСТЬ, ЯБЛОНЯ

which may differ significantly depending on the type of both the rootstock itself and the soil. The research aim is to study the influence of external environmental factors that are extreme for perennial fruit crops on the growth and development of their root systems. The studies were carried out on rootstocks of different growth strength (ММ106, М26, М9 and seedlings of cultivated apple varieties). The study of root systems was carried out by the method of layer-by-layer excavations with subsequent fixation of the observation results. It has been established that apple rootstocks of different growth strength form a root system of different depth. There is a tendency – an increase in the growth strength of rootstocks with a deeper development of the root system of apple trees. Apple trees grafted on taller rootstocks have a longer process of development (ontogenesis) of the root system. So, on the dwarf rootstock of М9, the depth of development of the soil profile does not differ in the sixth year from that in the third year, while in trees on a strong-growing rootstock it increased by 40 cm. The deepening root systems of trees with taller rootstocks, despite the increase in drought resistance of plants, can reduce the level of response of plants to the applied fertigation, which will require a transition from a system of microelement fertilizing during the growing season to non-root fertilizing. In the course of research, a mathematical model has been developed that shows the effect of the growth force of rootstocks, as well as the total weight of roots on the water deficiency of plants according to the formula:
$$X_{18} = 1 / (0.0010 + 0.0002 * X_1 + 0.0012 * X_{17})$$
with a multiple correlation accuracy of 0.9671.

Key words: FRUIT GROWING, ADAPTIVE GARDENING, ROOTSTOCK, SOIL, PRODUCTIVITY, APPLE TREE

Введение. Промышленное производство садовой продукции направлено на обеспечение высокой эффективности и технологичности многолетних насаждений, гарантирующих снижение влияния неблагоприятных факторов окружающей среды на урожайность [1-3]. Это на сегодня обеспечивается правильным подбором подвоев как по силе роста, так и устойчивости к дефициту или избытку влаги в почве, а также элементов питания [4]. Другие исследования показали необходимость учитывать адаптивность подвоев к почвенным условиям абиотического, а в некоторых случаях и биотического характера [5-7]. Изучение корневых систем деревьев различных возрастов показало, что есть зависимость между её развитием и надземной частью, причём зачастую коррелятивные связи носят прямой характер [8-10].

Зарубежные и отечественные исследователи установили, что корневые системы отдельных культур и типов подвоев могут корректировать своё развитие в зависимости от определённых условий выращивания [11-14]. К примеру, более адаптированные к засухе растения могут формировать корневую систему с большой площадью распространения для освоения площади водосбора [15, 16]. Другие, в свою очередь, способствуют росту и развитию корней глубокого заложения, которые обеспечивают растение стабильной влагой, накопленной в период его покоя и за счёт гравитации опускающейся ниже слоя основного корнеобитания почвопокровных культур [17, 18]. Для адаптивного садоводства такой естественный процесс является благоприятным, поскольку позволяет учитывать возможность подбора форм, которые отличаются либо более глубоко проникающей корневой системой, либо большей её агрессивностью по отношению к возможности поглощения из почвы влаги и необходимых растению элементов питания [19-22]. Уходящие от зоны максимальной концентрации удобрений в почвенном растворе корни, не всегда дают быстрый ответ на подкормки. Это

зачастую приводит к внедрению такого мероприятия как регулярное подрезание корней с целью возвращения в зону искусственного минерального питания максимального количества всасывающих корней [5, 6, 17].

На основе изложенного, актуально проведение изучения корневых систем различных по силе роста подвоев для определения влияния глубины проникновения корней и влияния этого фактора на адаптивность деревьев яблони к выращиванию в условиях дефицита влаги в период вегетации.

Цель исследования: изучить влияние внешних факторов окружающей среды, экстремальных для выращивания растений яблони, привитых на различные по силе роста подвои, на особенности роста и развития их корневых систем.

Задачи исследования: провести анализ взаимодействия корневых систем различных по силе роста подвоев на дефицит влаги, применяя методы изучения корневых систем с точки зрения их архитектоники, структуры залегания по почвенным слоям и степени освоения почвенного объёма; используя многофакторный дисперсионный анализ, определить влияние силы роста подвоев и возраста деревьев на изменение их водообеспеченности в условиях промышленных насаждений; разработать многофакторную регрессионную модель прогноза влияния факторов окружающей среды, архитектоники корневой системы деревьев яблони, привитых на различные по силе роста подвои, на их общую водообеспеченность.

Объекты и методы исследования. Исследования проводились в опытном яблонево́м саду Института «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» в период с 2007 по 2010 гг. Деревья, привитые на различные по силе роста подвои (сильнорослый сеянцевый подвой, среднерослый – ММ106, полукарликовый – М26, и карликовый – М9), находились в сопоставимых агротехнических условиях (междурядья с залужением при парующих проекциях ряда под гербицидным паром).

Схемы посадки для деревьев на подвое М9 – 4,0х1,0 м, М26 – 4,0х2,0 м, ММ106 – 5,0х2,5 м, на сеянцевом подвое – 6,0х5,0 м. В качестве привойного сорта деревьев яблони взят сорт Голден Делишес.

Изучение корневых систем проводилось методом послойных раскопок с последующей фиксацией результатов наблюдений в профиле деревьев, начиная от центра посадочного места модельных деревьев до центра между посаженными деревьями в ряду, в сторону центра проекции между рядов, начиная от посадочного места до завершения обнаружения корней изучаемых растений [4, 9, 10]. Цифровую обработку данных по весовому послойному методу проводили подобно исследованиям корневых систем Lesmes, Ricardo и др. (2022), Freschet, Grégoire и др. (2021) [14, 23]. Учитывали степень развитости корневой системы растений по слоям почвы с шагом 20 см и её структуру (скелетные корни, проводящая мочка, всасывающие). По достижении деревьями всех вариантов полного промышленного плодоношения при раскопке корней осуществляли сегментное определение веса корней по слоям путем вырезания с последующим взвешиванием в воздушно-сухом состоянии. Почвы под многолетними насаждениями – чернозёмы южные мицелярно-карбонатные среднегумусированные (2,4 %) с гумусовым горизонтом мощностью 60 см. Структура крупнокомковатая, плотная, хорошо микроагрегирована. Гранулометрический состав легкоглинистый. Вскипание от HCl наблюдается с глубины 32-49 см. Горизонт обильной, четкой белоглазки отмечается на глубине 60-100 см. Насыщенность основаниями 92...97 %, в основном представлены ионами кальция и в меньшей степени магния. Реакция почвенного раствора в верхнем горизонте слабощелочная (рН 7,7-7,9), в карбонатно-иллювиальном горизонте – щелочная (рН 8,3-8,4).

В контрольные периоды проведения изучения корневых систем – в трёхлетнем возрасте (2007 год) и шестилетнем возрасте (2010 год) сложи-

лись благоприятные погодные условия для роста и развития деревьев яблони. Суммы температур выше 10 °С составили в 2007 году – 3839 °С, а в 2010 году – 4067 °С. Среднегодовая относительная влажность воздуха – 71 % и 74 %, а ГТК (по Селянинову) – 0,59 и 1,1 соответственно, что находится в пределах климатических норм и колебаний в условиях исследуемого участка.

Обсуждение результатов. При закладке многолетних насаждений корневая система растений приблизительно одинаковая по степени развития, а также по мощности залегания. Это связано с технологическими особенностями производства посадочного материала, при котором выкопка саженцев осуществляется выкопочными плугами, рабочие органы которых обеспечивают подрезание корней в слое почвы 45...50 см вне зависимости от типа подвоя, возраста саженцев и развития корней глубже этого слоя.

С возрастом насаждений проявляются особенности развития подвоев в зависимости от силы его роста (рис. 1). Так, по завершении третьей вегетации в саду было произведено первое определение развития корневых систем деревьев без их повреждения. Это делалось для того, чтобы исследованные корневые системы в дальнейшем можно было изучать в ходе онтогенеза растений и в последующие возрастные периоды.

Установлено, что на момент проведения раскопок общий объём корневой системы у клоновых подвоев в большей части залегает в слое 0...40 см. Так, у подвоя М 9 в этом слое накопилось 85 % объёма корней, у полукарликового М26 – 75 %, а у среднерослого ММ106 – 60 %. Наблюдается тенденция снижения удельного объёма корневой системы в верхних слоях почвы и постепенное их проникновение на большие глубины, чем изначальная толщина корнеобитаемого слоя у деревьев при посадке сада, при этом подвой с большей силой роста проявляют большую активность в пространстве своих корневых систем в более глубокие слои почвы. Так,

уже в конце третьей вегетации деревья яблони сорта Голден Делишес, привитые на сеянцы культурных сортов, формируют корневую систему, растущую значительно глубже (на 40 % своего объёма) окультуренного плантажной обработкой почвы слоя.

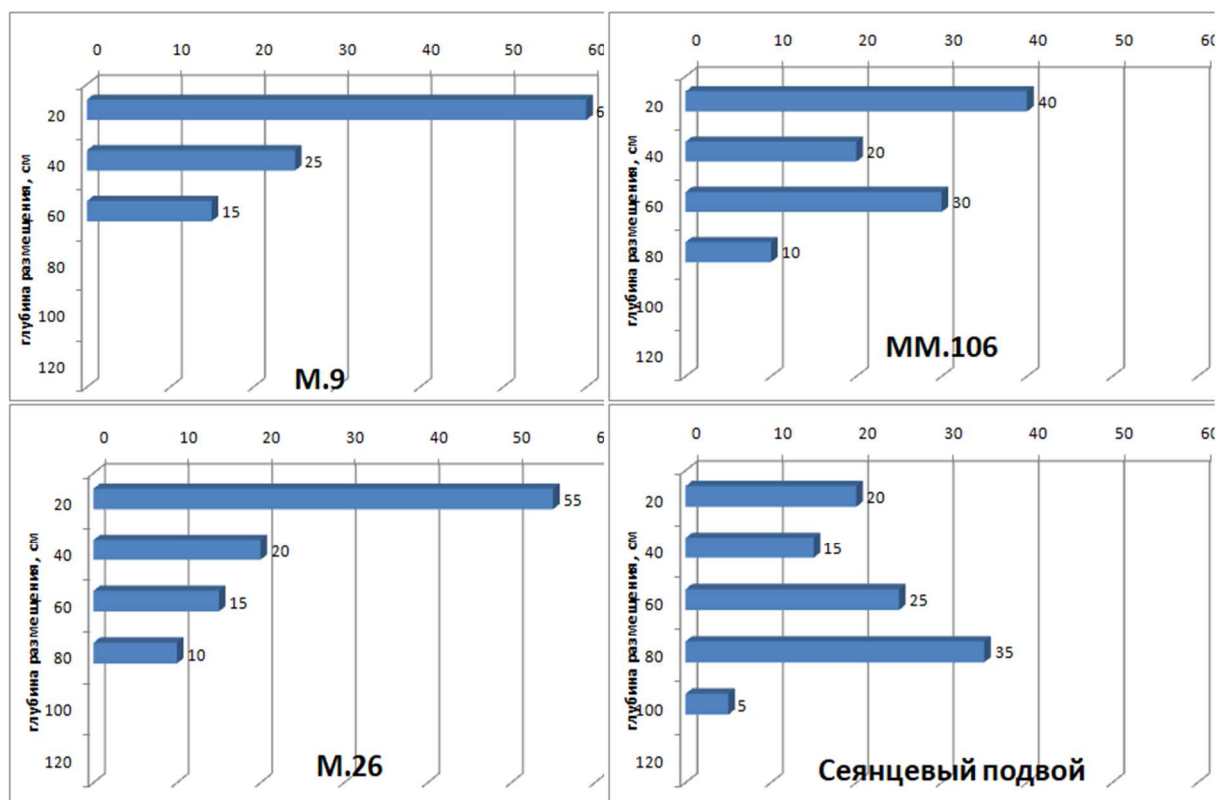


Рис. 1. Структура корневой системы (в %) деревьев яблони сорта Голден Делишес, привитых на различных подвоях. Деревья трёхлетнего возраста. Результаты 2007 года.

С увеличением возраста насаждений изменяется глубина проникновения корневых систем растений, а также удельный объём размещения корневой системы деревьев на различных по силе роста подвоях (рис. 2). Проведённые в конце шестой вегетации жизни сада, после получения первого промышленного урожая раскопки корневых систем показали (для всех без исключения сорто-подвойных комбинаций), что у деревьев с карликовым подвоем корни не проникали глубже окультуренного плантажированного слоя (0...60 см), а также приблизительно равномерно размещены по почвенному профилю.

В отличие от карликового подвоя М9, остальные продолжают формировать более глубоко проникающую корневую систему и постепенно переносить всасывающие корни в нижние горизонты. Так, в подплантажном горизонте у полукарликового подвоя М26 к концу шестой вегетации находятся уже 45 % объёма корней, у среднерослого ММ106 – 65 %. При этом ММ106 продолжает развитие корней не только освоением занятых к третьей вегетации почвенных горизонтов, но и продолжает заглубляться. За три года корневая система освоила дополнительно 20 см глубины, опустившись своей всасывающей системой. При этом корни деревьев, привитых на сеянцевом подвое, имеют большую глубину заложения корней, а также формируют всасывающие корни (46 % объёма корней) в слое почвы 100...140 см.

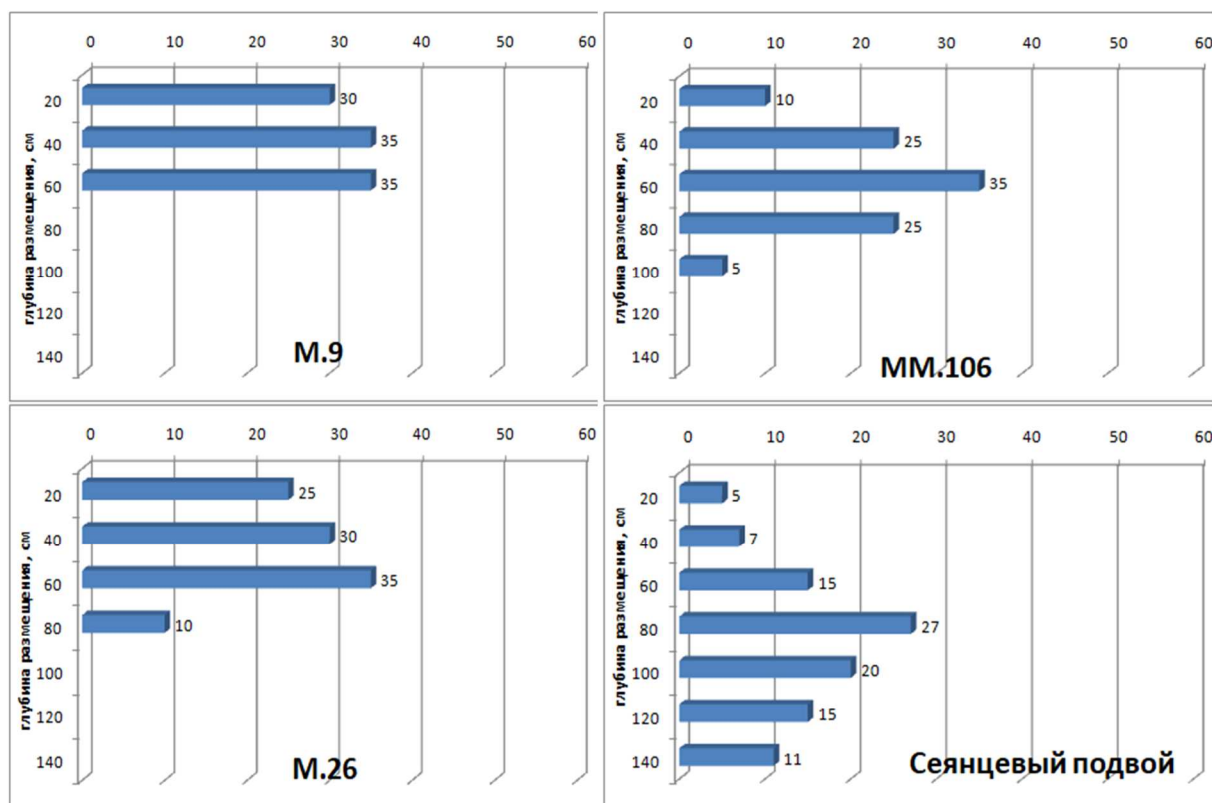


Рис. 2. Структура корневой системы (в %) деревьев яблони сорта Голден Делишес, привитых на различных подвоях. Деревья шестилетнего возраста. Результаты 2010 года

Естественно, относительные единицы не в полной мере отображают все особенности корневой системы, поскольку помимо удельного процента их размещения в почвенных слоях важным является и общая масса корней,

сформированных деревьями на различных подвойных формах (табл. 1). Поскольку послойное взвешивание корневых систем деревьев в полном объёме носит ликвидационный характер для исследуемых деревьев, а также связано с трудностью исполнения, в ходе расчёта был проведён учёт сегмента (1/4 профиля) развития корней послойным их вырезанием с последующим перемножением учётного профиля на всю корневую систему деревьев. Такое проведение учёта, хотя и существенно ослабляет дерево в дальнейшем его жизненном цикле, не приводит к гибели и позволяет достаточно быстро восстановиться растению.

Таблица 1 – Масса корней (в кг) у деревьев яблони сорта Голден Делишес, привитых на различных подвоях. Деревья шестилетнего возраста.
Результаты 2010 года

Глубина почвенного горизонта, см	Подвой			
	М9	М26	ММ106	Сеянцевый подвой
0...20	7,5	9,0	5,2	8,7
21...40	8,8	10,8	13,0	12,2
41...60	8,8	12,6	18,2	26,1
61...80	-	3,6	13,0	47,0
81...100	-	-	-	34,8
101...120	-	-	-	26,1
121...140	-	-	-	19,1
Всего масса корней	25	36	52	174

В ходе исследования было установлено, что наименьшая масса корней отмечена у деревьев на карликовом подвое М9, а наибольшая, превышая карликовые деревья в 7 раз, – у сеянцевых подвоев. В верхнем слое 0...20 см у карликового подвоя размещаются практически все типы корней – от скелетных до всасывающих. У среднерослого ММ106 и сильнорослого сеянцевого подвоя в этом слое, а также до 40 см отмечается формирование исключительно скелетных корней первого порядка ветвления. Полукарликовый подвой М26 имел в верхнем слое скелетные корни различных порядков ветвления (до третьего), а с глубины 20 см отмечено развитие всех типов корней (скелетных, проводящих и всасывающих).

Заглубление всасывающих корней деревьев является важным фактором для насаждений в тех регионах, где наблюдается дефицит влаги в течение вегетации. Более глубоко проникающая корневая система, а также большая площадь водосбора растений позволяет использовать влагу, накопленную в течении зимнего покоя растений и опустившуюся в нижние горизонты, которые недоступны для корней других растений (сорной травянистой растительности, а также карликовым деревьям). С другой стороны, деревья с более глубоко расположенной всасывающей корневой системой требуют больших объемов воды для орошения. В противном случае, вода не достигнет всасывающих корней и останется недоступной дереву. Точно так же и с минеральным питанием растений с поливной водой (фертигацией). Часть удобрений, проходя через почвенный профиль и контактируя с содержащимися в почве растворимыми соединениями, а также почвенно-поглощающим комплексом, может деградировать, связываться и переходить в неподвижную или недоступную для корней растений форму. Это создает затруднения для контроля питания с помощью фертигации и ориентирования подкормок на большую долю некорневого воздействия на растения.

Для определения влияния степени развития корневой системы деревьев яблони на водообеспеченность тканей растений нами проводилось определение водного дефицита зелёных частей растений в первой декаде сентября контрольных лет исследований – в 2007 и 2010 гг. (табл. 2). Было установлено, что наблюдается статистически доказуемая тенденция увеличения водного дефицита в зависимости от ослабления роста деревьев под влиянием выбранного подвоя. При этом при увеличении степени развития корневой системы, как было установлено в ранее представленном материале, существенно снижается и дефицит водопотребления, причём наименьший дефицит отмечен у деревьев, привитых на сильнорослый сеянцевый подвой, а наибольший – на карликовом подвое М9. Отличия превышают двойной коэффициент. Деревья, привитые на полукарликовые и среднерос-

лые подвои, в целом, сохраняют данную тенденцию, что может быть связано как с изменением глубины освоения почвенного профиля, так и изменением площади питания, а, следовательно, и водосбора.

Таблица 2 – Водный дефицит (в %) зелёных частей растений яблони сорта Голден Делишес, привитых на различные подвои в зависимости от возраста деревьев

Подвой (сила роста)	Возраст деревьев, лет		Среднее по подвою
	3 (2007 год)	6 (2010 год)	
М9 (карликовый)	30,33	45,00	37,67
М26 (полукарликовый)	27,67	34,67	31,17
ММ106 (среднерослый)	28,33	17,40	22,87
Сеянцевый (сильнорослый)	29,67	4,00	16,83
Среднее по возрасту	29,00	25,27	27,13
НСР ₀₅ (по подвою)=4,56; НСР ₀₅ (по возрасту деревьев)= 3,23; НСР ₀₅ (взаимодействие факторов)=2,23; НСР ₀₅ (для частных различий)=6,45			

Рассматривая результаты дисперсионного анализа водного дефицита в зависимости от силы роста подвоев и возраста деревьев, видно, что из учтённых в исследовании факторов, большую значимость (по НСР₀₅) имеет сила роста подвоев (26 %), а возраст деревьев яблони и взаимодействие изучаемых факторов имеют равное влияние, которое существенно ниже. Неконтролируемые опытом факторы оказали влияние на 37 %.

Это позволяет выдвинуть промежуточную рабочую гипотезу о более рациональном использовании накопленной в почве влаги за весь календарный год у растений, имеющих более глубокую корневую систему, поскольку растения с более мощными корнями способны собирать гравитационную влагу, накопленную в осенне-зимне-ранневесенний период и опустившуюся в нижние горизонты почвы, менее доступные для менее рослых деревьев.

Для подтверждения выдвинутой нами рабочей гипотезы, проведён многомерный кросскорреляционный анализ полученных данных, при расчёте которого включен 21 параметр с последующим выделением наиболее значимых в регрессионной матрице. При исследовании включено 9 регрессионных моделей по ранее проводимому нами алгоритму множественных итераций [24].

Первичная математическая модель включала 21 параметр. В качестве функции нами был взят показатель водного дефицита (X_{18}), по отношению к которому и проводился выбор оптимальной математической модели и расчёт корреляционных матриц.

Введение всех приведённых параметров в программу подбора оптимальной модели (по коэффициенту R^2) показало, что финальная математическая модель имеет вид обратной регрессии:

$$X_{18} = 1 / (0.0010 + 0.0002 * X_1 + 0.0012 * X_{17}),$$

где: X_1 – сила роста подвоев (выбрано для сеянцевого подвоя – 100 %; среднерослого – 75 %, полукарликового – 50 %; карликового – 25 %), а X_{17} – суммарная масса корней (в кг), с множественным коэффициентом регрессии 0,9671 (при $F_{\text{факт}} = 36473$, а $F_{\text{расч}} = 5,79$).

То есть, существенное влияние на водный дефицит деревьев яблони оказывает сила роста подвоев, а также суммарная масса корней. Глубина освоения корнями почвенного профиля не показала свою достоверность с точки зрения математического расчёта. Однако, биомасса корневой системы развивается в почвенном профиле относительно равномерно вдоль и поперёк ряда только до зоны корнеобитания другого дерева, а, следовательно, для увеличения своей биомассы будет продолжать развиваться вглубь.

На основе данного утверждения появляется возможность улучшать водное питание растений за счёт стимулирования формирования биомассы корней в почвенном профиле. То есть, следует искать способы подбора таких подвоев, которые формируют массивную корневую систему при одновременном контроле роста и развития надземной части растения. Также на основе модели можно предположить, что вне зависимости от силы роста подвоев, применение мероприятий, способных стимулировать развитие корневой системы, может в перспективе улучшать водное питание, а, следовательно, снижать водный дефицит.

Выводы. Различные по силе роста подвои яблони формируют различную по глубине залегания корневую систему. Наблюдается следующая тенденция: при увеличении силы роста подвоев – более глубокое развитие корневой системы деревьев яблони. У деревьев яблони, привитых на более рослые подвои, отмечается более продолжительный процесс развития (онтогенеза) корневой системы. Так, на карликовом подвое М9 глубина освоения почвенного профиля не отличается на шестой год от таковой в третьем году, в то время как у деревьев на сильнорослом подвое она увеличилась на 40 см.

Заглубляющиеся корневые системы деревьев с более рослыми подвоями, не смотря на увеличение засухоустойчивости растений, могут снижать уровень ответа растений на применяемую фертигацию, что потребует переноса системы подкормок микроэлементов в течение вегетации на некорневые подкормки.

В ходе исследований разработана математическая модель, которая показывает влияние силы роста подвоев, а также суммарной массы корней на водный дефицит растений по формуле: $X_{18}=1/(0.0010+0.0002 \cdot X_1+0.0012 \cdot X_{17})$, с точностью множественной корреляции 0,9671.

Литература

1. Ruiz S., Fletcher D.M., Williams K., Roose T. Plant–Soil Modelling // Annual Plant Reviews online. 2021. Vol. 4(1). P. 127-198. DOI: 10.1002/9781119312994.apr0755.
2. Luo H., Xu H., Chu C., He F., Fang S. High Temperature can Change Root System Architecture and Intensify Root Interactions of Plant Seedlings // Frontiers in Plant Science. 2020, Vol. 11. 160. DOI:10.3389/fpls.2020.00160.
3. Tanner S. Peach tree root demography and soil microbial characteristics in peach replant soils. All Theses. 2007. 195. 127 p. https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1195&context=all_theses
4. Танкевич В.В. Влияние архитектоники корневой системы яблони на рост и развитие деревьев на разных подвоях в Крыму [Электронный ресурс] // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2021. № 71(5). С. 23-32. Режим доступа: <http://journalkubansad.ru/pdf/21/05/02.pdf>. EDN: BYWQTM. DOI: 10.30679/2219-5335-2021-5-71-23-32 (дата обращения: 07.06.2023).
5. Ruiz S., Fletcher D.M. Williams K., Roose T. Review of plant-soil modelling: root growth, nutrient and water transport/uptake, and mechanics // Annual Plant Reviews online. 2020. <https://www.researchgate.net/publication/343205315>
6. Li P., Tan H., Wang J., Cao X., Yang P. Evaluation of Water Uptake and Root Distribution of Cherry Trees Under Different Irrigation Methods // Water. 2019. Vol. 11. 495. DOI: 10.3390/w11030495.

7. Nabil E.J., Abouabdillah A., Bouabid R., Bouriou M., Aleya L., Chaoui M. Assessment of sustainable deficit irrigation in a Moroccan apple orchard as a climate change adaptation strategy // *The Science of the total environment*. 2018. Vol. 642. P. 574-581. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.108.
8. Ephrath J., Klein T., Sharp R., Lazarovitch N. Exposing the hidden half: root research at the forefront of science // *Plant and Soil*. 2020. Vol. 447. P. 1-5. DOI: 10.1007/s11104-019-04417-y.
9. Jupa R., Mészáros M., Plavcova L. Linking wood anatomy with growth vigour and susceptibility to alternate bearing in composite apple and pear trees // *Plant biology* (Stuttgart, Germany). 2020. Vol. 23(1). P. 172-183. DOI: 10.1111/plb.13182
10. Zhang Z., Li M., Yao J., Zhou Y., Wang Y., Zhang X., Li W., Wu T., Han C.L., Xu X., Qiu C. Root architecture characteristics of differing size-controlling rootstocks and the influence on the growth of 'Red Fuji' apple trees // *Scientia Horticulturae*. 2021. Vol. 281. 109959. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.109959.
11. Thomaj F., Domi H., Sallaku G., Balliu A. The Spatial Distribution of Root System in M9 Rootstock Is Affected by Apple Cultivar and Tree Age // *Journal of Agricultural Studies*. 2019. Vol. 7. P. 160-175. DOI: 10.5296/jas.v7i4.15482.
12. Gjamovski V., Kiprijanovski M., Arsov T. Distribution of root system at apple cv. granny smith grafted on different dwarfing rootstocks // *Contributions, Section of Natural, Mathematical and Biotechnical Sciences*. 2018. Vol. 39. 69. DOI: 10.20903/csnmbs.masa.2018.39.1.120.
13. An H. Dong H., Wu T., Wang Y., Xu X., Zhang X., Han Z. Root growth angle: An important trait that influences the deep rooting of apple rootstocks // *Scientia Horticulturae*. 2017. Vol. 216. 256-263. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.01.019.
14. Lesmes R., Cano L., Ritenour M., Sarkhosh A., Chaparro J., Rossi L. Rhizoboxes as Rapid Tools for the Study of Root Systems of Prunus Seedlings // *Plants*. 2022. Vol. 11. 2081. DOI: 10.3390/plants11162081.
15. Żelazny W., Licznar-Malanczuk M. Soil quality and tree status in a twelve-year-old apple orchard under three mulch-based floor management systems // *Soil and Tillage Research*. 2018. Vol. 180. P. 250-258. DOI: 10.1016/j.still.2018.03.010.
16. Du S., Tong L., Kang S., Li F., TS D., Li S., Ding R. Alternate partial root-zone irrigation with high irrigation frequency improves root growth and reduces unproductive water loss by apple trees in arid north-west China // *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 2018. Vol. 5(2). P. 188-196. DOI: 10.15302/J-FASE-2017176.
17. Гурин А.Г., Резвякова С.В. Архитектоника корневой системы яблони в зависимости от систем содержания почвы в междурядьях сада // *Плодоводство и ягодоводство России*. 2018. Т. 54. С. 229-232. DOI 10.31676/2073-4948-2018-54-229-232. EDN: XYUSTJ.
18. Кременской В.И., Вислобокова Т.О. Развитие корневой системы яблони на подвое М9 при локальном увлажнении // *Инновационные технологии в сельском хозяйстве: материалы I Междунар. науч. конф. (г. Москва, июнь 2015 г.)*. Москва: Буки-Веди, 2015. С. 15-19. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23673196>. EDN: TYBBFJ (дата обращения: 17.10.2022).
19. Lötze E., Zyl F.J., Taylor NWhite root tip dynamics of bearing apple trees in a Mediterranean climate, South Africa // *Acta Horticulturae*. 2020. Vol. 1281. P. 347-354. DOI: 10.17660/ActaHortic.2020.1281.46
20. Niinemets Ü., Ostonen I. Plant organ senescence above- and belowground in trees: how to best salvage resources for new growth? // *Tree physiology*. 2020. Vol. 40(8). P. 981-986. DOI: 10.1093/treephys/tpaa060
21. Narandžić T., Ljubojević M. Size-Controlling Cherry Rootstock Selection Based on Root Anatomical Characteristics // *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. 615. DOI: 10.3390/horticulturae8070615

22. Zheng C., Shen F., Wang Y., Wu T., Xu X., Zhang X., Han C.L. Intricate genetic variation networks control the adventitious root growth angle in apple // BMC Genomics. 2020. Vol. 21. 852. DOI: 10.1186/s12864-020-07257-8.

23. Freschet G., Pagès L., Iversen C., Comas L., Rewald B., Roumet C., Klimešová J., Zadworny M., Poorter H., Postma J., Adams T., Bagniewska-Zadworna A., Bengough A., Blancaflor E., Brunner I., Cornelissen J., Garnier E., Gessler A., Hobbie S., McCormack M. A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardizing root classification, sampling, processing and trait measurements // New Phytologist. 2021. Vol. 232. P. 973-1123. DOI: 10.1111/nph.17572.

24. Иванченко В.И., Иванова М.И., Потанин Д.В., Замета О.Г. Влияние биометрических показателей подвойных и привойных сортов на совместимость сорто-подвойных комбинаций винограда // Магараç. Виноградарство и виноделие. 2022. Т. 24. № 2(120). С. 112-118. DOI: 10.35547/IM.2022.74.26.002. EDN: GBWGTC.

References

1. Ruiz S., Fletcher D.M., Williams K., Roose T. Plant–Soil Modelling // Annual Plant Reviews online. 2021. Vol. 4(1). P. 127-198. DOI: 10.1002/9781119312994.apr0755.

2. Luo H., Xu H., Chu C., He F., Fang S. High Temperature can Change Root System Architecture and Intensify Root Interactions of Plant Seedlings // Frontiers in Plant Science. 2020, Vol. 11. 160. DOI:10.3389/fpls.2020.00160.

3. Tanner S. Peach tree root demography and soil microbial characteristics in peach replant soils. All Theses. 2007. 195. 127 p. https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1195&context=all_theses

4. Tankevich V.V. The impact of apple tree root system architectonics on the growth and development of trees on various rootstocks in the Crimea [Electronic resource] // Fruit growing and viticulture of South Russia. 2021. № 71(5). P. 23-32. Available at: <http://journal.kubansad.ru/pdf/21/05/02.pdf>. EDN: BYWQTM. DOI: 10.30679/2219-5335-2021-5-71-23-32 (accessed date: 07.06.2023) (*in Russian*)

5. Ruiz S., Fletcher D.M., Williams K., Roose T. Review of plant-soil modelling: root growth, nutrient and water transport/uptake, and mechanics // Annual Plant Reviews online. 2020. <https://www.researchgate.net/publication/343205315>

6. Li P., Tan H., Wang J., Cao X., Yang P. Evaluation of Water Uptake and Root Distribution of Cherry Trees Under Different Irrigation Methods // Water. 2019. Vol. 11. 495. DOI: 10.3390/w11030495.

7. Nabil E.J., Abouabdillah A., Bouabid R., Bouriou M., Aleya L., Chaoui M. Assessment of sustainable deficit irrigation in a Moroccan apple orchard as a climate change adaptation strategy // The Science of the total environment. 2018. Vol. 642. P. 574-581. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.108.

8. Ephrath J., Klein T., Sharp R., Lazarovitch N. Exposing the hidden half: root research at the forefront of science // Plant and Soil. 2020. Vol. 447. P. 1-5. DOI: 10.1007/s11104-019-04417-y.

9. Jupa R., Mészáros M., Plavcova L. Linking wood anatomy with growth vigour and susceptibility to alternate bearing in composite apple and pear trees // Plant biology (Stuttgart, Germany). 2020. Vol. 23(1). P. 172-183. DOI: 10.1111/plb.13182

10. Zhang Z., Li M., Yao J., Zhou Y., Wang Y., Zhang X., Li W., Wu T., Han C.L., Xu X., Qiu C. Root architecture characteristics of differing size-controlling rootstocks and the influence on the growth of ‘Red Fuji’ apple trees // Scientia Horticulturae. 2021. Vol. 281. 109959. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.109959.

11. Thomaj F., Domi H., Sallaku G., Balliu A. The Spatial Distribution of Root System in M9 Rootstock Is Affected by Apple Cultivar and Tree Age // Journal of Agricultural Studies. 2019. Vol. 7. P. 160-175. DOI: 10.5296/jas.v7i4.15482.

12. Gjamovski V., Kiprijanovski M., Arsov T. Distribution of root system at apple cv. granny smith grafted on different dwarfing rootstocks // Contributions, Section of Natural, Mathematical and Biotechnical Sciences. 2018. Vol. 39. 69. DOI: 10.20903/csnmbs.masa.2018.39.1.120.
13. An H. Dong H., Wu T., Wang Y., Xu X., Zhang X., Han Z. Root growth angle: An important trait that influences the deep rooting of apple rootstocks // Scientia Horticulturae. 2017. Vol. 216. 256-263. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.01.019.
14. Lesmes R., Cano L., Ritenour M., Sarkhosh A., Chaparro J., Rossi L. Rhizoboxes as Rapid Tools for the Study of Root Systems of Prunus Seedlings // Plants. 2022. Vol. 11. 2081. DOI: 10.3390/plants11162081.
15. Żelazny W., Licznar-Malanczuk M. Soil quality and tree status in a twelve-year-old apple orchard under three mulch-based floor management systems // Soil and Tillage Research. 2018. Vol. 180. P. 250-258. DOI: 10.1016/j.still.2018.03.010.
16. Du S., Tong L., Kang S., Li F., TS D., Li S., Ding R. Alternate partial root-zone irrigation with high irrigation frequency improves root growth and reduces unproductive water loss by apple trees in arid north-west China // Frontiers of Agricultural Science and Engineering. 2018. Vol. 5(2). P. 188-196. DOI: 10.15302/J-FASE-2017176.
17. Gurin A.G., Rezvyakova S.V. Architectonics of the root system of apple trees depending on the systems of maintenance of soil between rows of garden // Pomiculture and small fruits culture in Russia. 2018. Vol. 54. P. 229-232. DOI: 10.31676/2073-4948-2018-54-229-232. EDN: XYUSTJ. (in Russian)
18. Kremenskoy V.I., Vislobokova T.O. Development of the root system of apple trees on the M9 rootstock with local moistening. // Innovative technologies in agriculture : materials of the I International Scientific Conference (Moscow, June 2015). Moscow : Buki-Vedi, 2015. P. 15-19. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23673196>. EDN: TYBBFJ (accessed date: 17.10.2022). (in Russian)
19. Lötze E., Zyl F.J., Taylor NWhite root tip dynamics of bearing apple trees in a Mediterranean climate, South Africa // Acta Horticulturae. 2020. Vol. 1281. P. 347-354. DOI: 10.17660/ActaHortic.2020.1281.46
20. Niinemets Ü., Ostonen I. Plant organ senescence above- and belowground in trees: how to best salvage resources for new growth? // Tree physiology. 2020. Vol. 40(8). P. 981-986. DOI: 10.1093/treephys/tpaa060
21. Narandžić T., Ljubojević M. Size-Controlling Cherry Rootstock Selection Based on Root Anatomical Characteristics // Horticulturae. 2022. Vol. 8. 615. DOI: 10.3390/horticulturae8070615
22. Zheng C., Shen F., Wang Y., Wu T., Xu X., Zhang X., Han C.L. Intricate genetic variation networks control the adventitious root growth angle in apple // BMC Genomics. 2020. Vol. 21. 852. DOI: 10.1186/s12864-020-07257-8.
23. Freschet G., Pagès L., Iversen C., Comas L., Rewald B., Roumet C., Klimešová J., Zadworny M., Poorter H., Postma J., Adams T., Bagniewska-Zadworna A., Bengough A., Blancaflor E., Brunner I., Cornelissen J., Garnier E., Gessler A., Hobbie S., McCormack M. A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardizing root classification, sampling, processing and trait measurements // New Phytologist. 2021. Vol. 232. P. 973-1123. DOI: 10.1111/nph.17572.
24. Ivanchenko V.I., Ivanova M.I., Potanin D.V., Zameta O.G. The effect of biometric indicators of rootstock and graft varieties on compatibility of varietal-rootstock combinations of grapes // Magarach. Viticulture and vinemaking. 2022. Vol. 24. № 2(120). P. 112-118. DOI: 10.35547/IM.2022.74.26.002. EDN: GBWGTC. (in Russian)