

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева»

На правах рукописи



ГАБЕЧАЯ ВАЛЕРИЯ ВЯЧЕСЛАВОВНА

**Экологическая оценка почв ампелоценозов в условиях юго-
западной части Крымского полуострова**

1.5.15. Экология (биологические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
кандидат биологических наук, доцент
Андреева И.В.

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Задачи исследования.....	7
Глава 1. АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ ВИНОГРАДА К УСЛОВИЯМ ВЫРАЩИВАНИЯ	13
1.1 Экологическое содержание концепции винодельческого терруара. Характеристика терруаров Севастопольской зоны виноделия Крыма.....	13
1.2 Экологическая оценка проявления климатических условий возделывания винограда.....	19
1.3 Экологическое значение эдафических факторов для получения качественной винодельческой продукции	24
1.4 Экологическая оценка орографических особенностей размещения ампелоценозов.....	31
1.5 Экологическая оценка элементов технологий возделывания винограда.....	35
1.6 Анализ лимитирующих экологических факторов выращивания винограда.....	40
1.7 Экологическая оценка накопления и миграции меди в почвах ампелоценозов.....	46
1.8 Особенности проведения экологического мониторинга почв ампелоценозов.....	54
Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	60
2.1 Экологические особенности объектов исследования	60
2.2 Определение агроклиматических показателей.....	65
2.3 Методы почвенных исследований	69
2.4 Эколого-геохимические методы исследований	73
2.5 Статистическая обработка данных экологического мониторинга почв.....	76
Глава 3. АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВЫРАЩИВАНИЯ ВИНОГРАДА В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ	78
Глава 4. АНАЛИЗ ЛИМИТИРУЮЩИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВЫРАЩИВАНИЯ ВИНОГРАДА ПРИ РАЗНОМ УРОВНЕ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	86
4.1 Анализ экологического состояния почв виноградников при разном уровне антропогенного воздействия	87
4.2 Экологическая оценка накопления тяжелых металлов в почвах виноградников с разным уровнем антропогенного воздействия	95
4.3 Анализ экологического состояния почв виноградников с разным уровнем антропогенного воздействия по показателям почвенного дыхания и экофизиологических индексов.....	100
Глава 5. ВЛИЯНИЕ ОРОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА НАКОПЛЕНИЕ	

И МИГРАЦИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ ВИНОГРАДНИКОВ В УСЛОВИЯХ СКЛОНОВОГО ЛАНДШАФТА.....	119
5.1 Анализ экологического состояния почв разновозрастных виноградников в условиях склонового ландшафта	120
5.2 Влияние орографических факторов на накопление и латеральную миграцию тяжелых металлов в агроэкосистемах виноградников.....	126
5.3 Анализ экологического состояния склоновых почв разновозрастных виноградников по показателям почвенного дыхания и экофизиологическим индексам.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	152
ВЫВОДЫ	154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. К наиболее актуальным прикладным задачам современной экологии [45, 68] относится комплексный анализ и экологически обоснованное масштабирование наилучших из применяемых на практике технологий с учетом региональных и локальных особенностей почв, истории их использования, перспективных запросов рынка и лимитирующих экологических факторов повышения интенсивности землепользования в условиях глобальных изменений климата, биоты и технологий.

Крымский полуостров выделяется своими уникальными почвенно-климатическими условиями, позволяющими успешно выращивать виноград и создавать различные виды вин и коньяков. Виноградники в этом регионе были впервые посажены древними греками и римлянами, поэтому виноделие здесь имеет глубокие исторические и культурные корни [156]. В настоящее время акцент делается на производство высококачественных вин с географическим статусом [156], растет спрос на экологически безопасную продукцию виноградарства и виноделия [156, 343].

Экологически обоснованная стратегия развития виноградарства и винодельческой отрасли, утвержденная в рамках второго Винодельческого форума России в ноябре 2023 года и рассчитанная на период до 2050 года, начинает реализовываться в практической плоскости, обретая четкие контуры и конкретные механизмы реализации. В то же время растет спрос на экологически безопасную продукцию, производимую сертифицированными виноделами: около 40 га крымских виноградников уже сертифицированы, и еще примерно 20 га проходят процесс сертификации [16].

В то же время развитие виноделия на полуострове связано с определенными рисками и возникновением проблемных экологических ситуаций. С одной стороны, это региональные климатические изменения, а с другой – обусловленная спецификой выращивания культуры интенсификация производства, включающая использование большого количества пестицидов и механизацию технологических процессов. Это может привести к загрязнению и уплотнению почвы, потере

органического вещества, снижению биологической активности почвы, развитию эрозионных процессов, в особенности, на склонах [20], где в большинстве случаев размещают виноградники для усиления притока солнечной радиации. Почва играет ключевую роль во всех этих процессах, формируя и поддерживая биоразнообразие и выполняя важные экологические функции. Её свойства напрямую влияют на качество и количество производимой продукции, в особенности в виноградарстве и виноделии [352].

Успешное выполнение почвой экологических функций во многом зависит от состояния [156] ее микробиома. Микробиом предоставляет широкий спектр экосистемных услуг, включая питательные, регуляторные и поддерживающие услуги, которые играют ключевую роль в поддержании экологического баланса и функционирования биологических систем [69, 308]. Почвенный микробиоценоз участвует в процессах синтеза и разложения органических веществ, способствует образованию гумуса, круговороту минеральных веществ и азота, фиксации атмосферного азота и его включению в биологический цикл, деструкции различных загрязняющих веществ. Нарушения в функционировании почвенного микробного сообщества могут привести к снижению как количества, так и качества получаемой продукции [156], что особенно важно в отрасли виноградарства и виноделия [233].

Почвенные микробиологические показатели в сочетании с физико-химическими и экогеохимическими используются для оценки эффективности выполнения почвами своих экологических функций [156]. Почвенное микробное сообщество быстро реагирует на факторы дестабилизации, о чем свидетельствует изменение общей численности микроорганизмов [156], видового разнообразия, активности почвенных ферментов [41], параметров почвенного дыхания [20]. Это, в свою очередь, отражается на превращении и перемещении питательных веществ в рамках биологического круговорота.

Ключевым преимуществом определения параметров почвенного дыхания и основанных на них экофизиологических показателей является возможность количественной оценки происходящих под действием антропогенных факторов

изменений в окружающей среде. Функционирование микробного сообщества почвы может быть оценено прямыми (обилие, дыхание) и косвенными (удельное дыхание биомассы, вклад эукариотов и прокариотов, доля углерода микробной биомассы в органическом углероде почвы и т.д.) показателями [39, 79, 267, 272, 273], которые могут служить надежными критериями мониторинга и инструментом управления агроэкосистемами [114, 138]. В ряде исследований предлагается использовать микробиологические показатели для [156] экологической оценки применяемых элементов агротехнологий и систем землепользования, а также анализа изменений, происходящих при переходе от одной системы к другой [163, 255].

Это особенно актуально для винодельческой отрасли Республики Крым, где в настоящее время происходит активное репрофилирование виноградников, выращиваемых по традиционным технологиям, на органическую систему хозяйствования [16], а также вовлечение [156] в сельскохозяйственный оборот залежных земель, которые до антиалкогольной компании 80-х годов и общего спада производства 90-х годов XX века были заняты виноградной лозой, под закладку новых виноградников. Ввиду того, что ключевым элементом органической системы землепользования является поддержание здоровья почвы, значимость оценки биологической активности почвы как одного из важнейших индикаторов ее состояния приобретает особую значимость.

В связи с вышеизложенным представляется актуальной научной задачей сравнительная оценка агроэкологического состояния почв виноградников с различным уровнем антропогенного воздействия с использованием агроэкологических, экотоксикологических и эколого-геохимических подходов, что важно [20] для принятия своевременных и обоснованных решений о внесении изменений в элементы управления виноградниками с целью поддержки экосистемных услуг почвы и получения высококачественной винодельческой продукции [20].

Цель работы – проведение экологической оценки пространственной изменчивости основных диагностических показателей и интегральной

биологической активности почв ампелоценозов при разном уровне антропогенного воздействия в условиях юго-западной части Крымского полуострова.

Задачи исследования

1. Провести системный анализ ведущих экологических факторов выращивания винограда в условиях представительных ампелоценозов юго-западной части Крымского полуострова с выявлением лимитирующих абиотических факторов.

2. Дать сравнительную оценку основных диагностических показателей экологического состояния и интегральной биологической активности почв исследуемых ампелоценозов с различным уровнем и историей антропогенного воздействия.

3. Провести экологическую оценку уровня накопления и характера пространственной дифференциации содержания тяжелых металлов в почвах исследуемых ампелоценозов с различным уровнем пестицидной нагрузки с учетом их экогеохимического положения в ландшафте.

4. Оценить биологическое последствие загрязнения почв разновозрастных ампелоценозов тяжелыми металлами на основе интегральных показателей активности почвенного микробоценоза и его экофизиологического статуса.

Научная новизна

По результатам комплексной сравнительной оценки экологического состояния и пространственной изменчивости почв экосистем виноградников в условиях юго-западной части Крымского полуострова с разным уровнем антропогенного воздействия определены лимитирующие экологические факторы выращивания винограда с учетом региональных и локальных особенностей почв, истории их использования и применяемых технологий выращивания.

На основе сравнительного географического анализа экотоксикологического состояния сопоставимых почв действующих ампелоэкосистем и залежных земель в условиях юго-западной части Крыма выявлено наличие устойчивого экологического последствия длительного применения пестицидов на микробиоту и экологические показатели почв. По результатам исследования почв

геохимически сопряженных элементов склоновых ландшафтов под разновозрастными виноградниками показаны регионально-типологические особенности латеральной миграции и накопления в их верхних горизонтах меди и других микроэлементов (тяжелых металлов).

На основе интегральных показателей активности почвенного микробиома и его экофизиологического статуса установлены разнонаправленные биологические эффекты антропогенного накопления в верхних горизонтах почв разновозрастных ампелоценозов биогенных элементов и тяжелых металлов.

Практическая значимость

Подтвержденные методами непараметрического дисперсионного анализа и главных компонент статистически достоверные различия микробиологических показателей почв ампелоценозов с разной антропогенной нагрузкой в условиях юго-западной части Крыма позволяют рекомендовать апробированные в работе параметры дыхательной активности и рассчитываемые на их основе экофизиологические индексы в качестве биологического индикатора экологического состояния почв, чувствительного к смене типа землепользования.

В условиях намечающихся трендов перехода отдельных винодельческих хозяйств Крыма с традиционных систем земледелия на органические и широкой практики возрождения виноградников на ранее длительно использованных в виноградарстве залежных землях регионально протестированные показатели интегральной микробиологической активности могут рассматриваться в качестве перспективных диагностических параметров экологического состояния почв проектируемых в Крыму ампелоценозов.

Полученные в результате настоящего исследования материалы вошли в научные отчеты по грантам и проектам, статьи, монографии и были включены в ряд учебных пособий кафедры экологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Результаты проведенных исследований легли в основу практических обучающих мероприятий по современным методам экологической оценки почв и применяемых технологий в условиях ампелоэкосистем с разной антропогенной нагрузкой для слушателей Международной летней экологической школы MOSES,

ежегодно проводимой на кафедре экологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация, выполненная Габечей Валерией Вячеславовной, соответствует паспорту специальности 1.5.15. «Экология» (биологические науки), а именно п. 1: «Закономерности влияния абиотических и биотических факторов на организмы. Экофизиология (факториальная экология. Адаптации организмов к различным факторам среды. Жизненные формы и адаптивные типы. Изменение организмами среды обитания» и п. 10 «Антропогенное воздействие на популяции, сообщества и экосистемы. Биологические эффекты загрязнения среды токсичными веществами (экотоксикология). Разработка биологических методов и критериев оценки состояния среды, биоиндикация, биотестирование, биомониторинг. Разработка экологически обоснованных норм воздействия хозяйственной деятельности человека на живую природу».

Методология и методы исследования

Комплексные экологические мониторинговые исследования проводились на виноградниках юго-западной части Крыма с различным уровнем антропогенной нагрузки (включая постагрогенные почвы) и в разных ландшафтных условиях с 2020 по 2024 гг.

Для выявления возможных лимитирующих абиотических факторов для региона исследования были рассчитаны биоклиматические индексы, рекомендованные Резолюцией OIV-VITI 423-2012 (OIV, 2012). Кроме того, в исследуемых ампелозкосистемах определены основные диагностические показатели экологического, экотоксикологического состояния и интегральной биологической активности верхних горизонтов (0–10 и 10–20 см) коричневых типичных и бурых лесных почв с разным уровнем и продолжительностью антропогенного воздействия с использованием общепринятых физико-химических и химических методов исследования, методов определения субстрат-индуцированного (СИД) (Anderson & Domsch, 1978) и базального дыхания (БД) (ISO 16072:2002) почвы. На основе данных дыхательной активности рассчитаны

содержание углерода микробной биомассы и экофизиологические индексы.

Для оценки влияния орографических факторов на накопление и пространственное распределение органического вещества, биогенных элементов и тяжелых металлов в почве разновозрастных виноградников, выращиваемых в условиях склонового ландшафта, изучались его геохимически сопряженные элементы (элювиальный (автономный), трансэлювиальный и трансэлювиально-аккумулятивный) с использованием эколого-геохимических и экотоксикологических подходов.

Защищаемые положения

1. К основным лимитирующим абиотическим факторам выращивания винограда в условиях юго-западной части Крымского полуострова, наряду с выраженным сезонным дефицитом доступной почвенной влаги и низкой обеспеченностью почв отдельных хозяйств подвижным фосфором, относится избыточное содержание в почвах органических хозяйств подвижной серы и повсеместное – подвижной формы меди, биологический эффект загрязнения которой усиливается с возрастом ампелоценозов вследствие многолетнего применения на них разрешенных пестицидов.

2. Показатели экофизиологического статуса микробного сообщества почв, рассчитанные по результатам анализа почвенного дыхания, содержание микробной биомассы и ее доля в органическом углероде почвы могут рассматриваться в качестве перспективных диагностических биологических методов и критериев оценки экологического состояния почв проектируемых в Крыму ампелоценозов с учетом различных режимов и интенсивности антропогенного воздействия на них.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность полученных результатов обеспечена тщательным анализом современной научной литературы как отечественных, так и зарубежных авторов (367 источников), подтверждена представительным количеством отобранных проб и большим массивом фактических данных, полученных в аналитической лаборатории с использованием современного оборудования и стандартных образцов для внутрилабораторного контроля. Статистический анализ и

интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных компьютерных программ и методов обработки информации. Выводы, сформулированные в диссертации, подкреплены фактическими данными, представленными в приведенных в работе таблицах и рисунках.

Результаты исследования докладывались на международных и всероссийских научных конференциях (г. Симферополь, 2020 г.; г. Москва, 2022, 2023, 2024 гг.; г. Благовещенск, 2023 г.; г. Яхорина (Босния и Герцеговина), 2022, 2023 гг.; г. Адана (Турецкая Республика), 2023 г.; г. Нови Сад (Республика Сербия), 2023 г.).

Публикации результатов исследований

По теме исследования опубликовано 17 работ: 2 статьи Q1 и 1 статья Q4 в журналах, 2 статьи (не входящие в квартили Scopus по состоянию на 2024 год), индексируемых в Scopus и Web of Science, 2 статьи из списка журналов, входящих в базу данных RSCI, 5 статей в журналах из списка ВАК, 5 статей РИНЦ в сборниках, включая международные конференции. Опубликовано 2 монографии в соавторстве. В работах, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, включающих обзор литературы, описание объектов и методов исследований, анализ результатов исследований, заключения и списка использованной литературы. Диссертационная работа изложена на 187 страницах, включая 16 таблиц и 32 рисунка. Список литературы состоит из 367 источников, в том числе 297 – на иностранном языке.

Личный вклад соискателя

Автором проведен отбор почвенных образцов в винодельческих хозяйствах юго-западной части Крымского полуострова, выполнены экологические и экотоксикологические анализы образцов почв, определены параметры почвенного дыхания и микробной биомассы, рассчитаны экофизиологические индексы, с использованием современных методов проведена статистическая обработка и обобщение полученных данных, подготовлен картографический, табличный и

графический материал для их наглядной иллюстрации, проведен анализ отечественных и зарубежных литературных источников.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, к.б.н., доценту И.В. Андреевой, а также к.б.н., доценту Д.В. Мореву и к.б.н., доценту Ярославцеву А.М. за неоценимую помощь в проведении исследований, ценные советы и рекомендации. Особая благодарность д.б.н., профессору И.И. Васенёву за помощь в обсуждении результатов проведенных исследований. Автор также выражает благодарность всем сотрудникам, аспирантам и студентам кафедры экологии РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, а также своим родным и близким.

Глава 1. АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ ВИНОГРАДА К УСЛОВИЯМ ВЫРАЩИВАНИЯ

1.1 Экологическое содержание концепции винодельческого терруара.

Характеристика терруаров Севастопольской зоны виноделия Крыма

География виноделия охватывает все континенты, за исключением Антарктиды. Расположение и перспективы распространения различных сортов винограда определяются экологическими и почвенными условиями районов их возделывания. На культуру винограда на протяжении всего жизненного цикла влияет комплекс разнонаправленных экологических, агрогенных и антропогенных факторов, при этом реакция винограда на эти факторы имеет свои особенности. Так возникла концепция терруара, широко распространенная в виноделии. Особые условия выращивания, определяемые совокупностью локальных факторов и влияющие на конечный продукт, называются терруаром [224]. В понятие терруара входят такие элементы, как рельеф (крутизна, экспозиция склонов), климат (главным образом, температура и инсоляция), количество и соотношение питательных веществ в почве и ее дренажные свойства, методы ведения хозяйства (расстояние между кустами винограда, направление гряд, способы внесения удобрений и уборки урожая, процедура обрезки и т.д.) и даже умения и навыки конкретных виноделов [220]. В последние годы особое внимание уделяется микробному разнообразию, связанному с местоположением виноградников. Считается, что оно играет ключевую роль в процессе выращивания винограда, качестве полученного сырья и производстве вина [167]. На основе терруарных характеристик формируется классификация вин и их стоимость.

С принятием в России Федерального закона от 27.12.2019 г. № 468-ФЗ «О виноградарстве и виноделии», понятие виноградно-винодельческого терруара вошло в комплексную правовую базу, регулирующую эту отрасль. На федеральном уровне теперь признана роль экологических факторов в виноделии, их влияние на подбор сортов и технологии производства, а также на классификацию конечной продукции как вина с защищенным географическим указанием [3]. Этот подход к классификации вина не является новым, он уже много лет используется в странах

Евросоюза, особенно во Франции. Именно французские виноделы первыми признали взаимосвязь между вкусовыми качествами вина и концепцией терруара [350]. Понятие «терруар» было первоначально использовано в Бургундии в 1930-х годах в качестве маркетингового инструмента для дифференциации вин, но сегодня он вышел за пределы винного сектора и используется для обозначения отличительных региональных характеристик других дорогостоящих продуктов, особенно тех, где происходит микробная ферментация, таких как сыр, кофе и какао. Сегодня концепция винного терруара распространилась по всему миру, и страны-производители вина пытаются регулировать ее с помощью законодательного определения наименований мест происхождения. Например, только в Калифорнии (США) было признано 139 американских винодельческих районов [187], а в Испании – 90 [245].

Федеральный закон № 468-ФЗ также регулирует использование технологических средств в виноградарстве для производства российского вина с защищенным наименованием. Это важно по той причине, что сегодня в Западной Европе широко обсуждаются вопросы влияния остатков пестицидов и агрохимикатов в почве на экологическую безопасность продукции виноградарства и виноделия и качество окружающей среды [288, 304, 344, 354]. Продукция виноделия, полученная без использования химических средств защиты и синтетических удобрений, пользуется повышенным спросом и занимает все большую долю мирового рынка вина [16, 248].

Влияние почвенно-климатических условий выращивания винограда отражается на таких важных характеристиках, как кислотность и сахаристость ягодного сока и способность виноградного растения к биогенной аккумуляции микроэлементов. Микроэлементы оказывают прямое влияние на полноту вкуса и органолептические свойства вина [189]. Однако, вместе с полезными микроэлементами виноградное растение также поглощает из почвы тяжелые металлы, что может негативно сказаться на качестве продукции и здоровье потребителей [83, 269].

Как было указано ранее, термин «терруар» относится к совокупности всех

факторов, которые влияют на качество и стиль вина, включающих почву, климат и рельеф. Благодаря обилию солнечного света, на территории Крымского полуострова сложились благоприятные условия для выращивания винограда. В зависимости от почвенных и климатических особенностей, полуостров можно условно разделить на следующие виноградарские районы: *южнобережный, юго-западный, восточный и северный* [307]. Каждый из этих районов имеет свои особенности, и фермеры и садоводы адаптируют свой выбор сортов и практикуют соответствующие агротехнические мероприятия в соответствии с почвенными и климатическими условиями своего региона.

Юго-западная часть Крымского полуострова отличается от остальных районов благоприятными климатическими условиями и особыми типами почв и растительности, характерными для средиземноморского региона. Это связано с умеренным влиянием Черного моря и защитой от северных и северо-восточных ветров. Рельеф этой местности имеет изрезанную волнистую форму, что приводит к оползням и эрозионным процессам, которые могут нарушать распределение почвенных разностей. Тем не менее, благодаря благоприятным климатическим и почвенным условиям, на южном побережье Крыма возможно выращивание винограда без необходимости его укрытия на зимний период.

Горные породы, на которых формируются почвы в юго-западной зоне виноделия Крыма, чрезвычайно разнообразны, но в целом преобладают глинистые сланцы и известняки. Основными типами почв в этом районе являются горнолесные почвы, которые занимают значительную площадь от яйлы (горного хребта) до пологих склонов гор [29, 60].

Горнолесные почвы могут иметь различные генетические характеристики в зависимости от растительного покрова. Некоторые из них являются перегнойно-карбонатными, то есть содержат значительное количество органического вещества и карбонатов. Горнолесные почвы играют важную роль в поддержании растительного покрова и обеспечении питательных веществ для растений.

Зона распространения коричневато-бурых мергелисто-щебенчатых почв является подходящей для выращивания табака и столового винограда. Почти все

участки, выделенные под виноградные насаждения, имеют грубоскелетный состав почвы. Из-за развития склоновых эрозионных процессов почвы в этой зоне характеризуются низким содержанием гумуса, азота и фосфора. Согласно исследованиям Н.И. Дубровского [30], содержание гумуса в этих почвах варьирует от 1 до 2,6%, содержание азота, фосфора и калия находится в диапазонах соответственно 0,2–0,9%, 0,08–0,13% и 1,6–2,3%.

Бурые и коричневые мергелисто-карбонатные почвы, образовавшиеся на известняках, содержат более высокое количество питательных веществ. По данным Н.Н. Клепинина [44], содержание гумуса в таких почвах часто достигает 2–3%, общего азота – 0,32–1,0%, окиси калия – 2,4%, фосфорной кислоты – от 0,08 до 0,2%.

Коричневые почвы, образовавшиеся на кристаллических породах, характеризуются низким содержанием гумуса (до 0,5%) и питательных веществ: азота – 0,07%, окиси калия – 1,27%, фосфорной кислоты – 0,08% [28]. Для достижения высоких урожаев винограда на почвах южного побережья Крыма необходимо применение органо-минеральных удобрений, особенно азотных и фосфорнокислых.

Юго-западный район, согласно А. В. Пенюгалову, имеет умеренно теплый, полувлажный климат средиземноморского типа [55]. Среднегодовая температура колеблется от +12,6 до +13,5°C. Самые холодные месяцы (январь, февраль) характеризуются температурой от –1,4 до –4,3°. Среднегодовое количество осадков варьирует от 300 до 500 мм и равномерно распределено по временам года от востока к западу. Преобладающие ветры дуют северо-западным и юго-восточным направлениями. Горы защищают южное побережье от этих ветров. Самыми теплыми месяцами являются июль и август. В редких случаях минимальные зимние температуры достигают –14°. Безморозный период составляет 249 дней. Первые осенние заморозки появляются во второй – третьей декаде октября, последние весенние прекращаются в середине – конце апреля [4]. Относительная влажность воздуха составляет 62–68%. Исходя из этих данных, климатические условия данного района идеально подходят для выращивания винограда.

Таким образом, юго-западный район Крыма обеспечивает наиболее благоприятные климатические условия среди всех районов полуострова вследствие обилия тепла и света, а зимы являются теплыми без заморозков весной. Почвы на южном склоне гор также благоприятны для выращивания винограда. На более плодородных почвах в долинах выращиваются самые ценные столовые сорта винограда, которые созревают позднее.

В Севастопольской зоне основным типом почв являются коричневые горные карбонатные почвы на элювии и делювии коренных пород, которые полностью соответствуют условиям выращивания винограда с высоким потенциалом вызревания. Урожайи винограда в этой зоне обычно небольшие, но качество производимого вина очень высокое.

Важной климатической особенностью Севастопольской зоны является наличие моря, которое служит естественным аккумулятором тепла. Летом это предотвращает сильную жару, но в то же время делает лозу более сухой. Безморозный период составляет 245 дней, что позволяет собирать виноград максимально поздно. Кроме того, Севастополь не относится к зоне высокого риска наступления морозов, поэтому риск гибели лозы от заморозков здесь достаточно низкий.

Рельеф Севастопольской зоны характеризуется большим количеством холмов, долин и балок. Преобладание склонов южной, юго-восточной и западной экспозиций позволяет получать широкий спектр вин различных стилей.

Отдельные элементы терруара Севастопольской зоны сравнимы с европейскими регионами, известными своими великими винами [366]. Например, почвы аналогичны почвам в Бургундии, климат схож с климатом в Бордо, а рельеф напоминает рельеф Пьемонта. Однако в совокупности почвы, климат и рельеф Севастопольской зоны создают уникальную комбинацию, позволяющую производить вина с неповторимыми свойствами, которые могут стать новым явлением на мировом винном рынке.

Севастопольский регион Крыма отличается от других климатических зон на полуострове благодаря своему мягкому температурному режиму и высокой норме

осадков, которая иногда достигает 600–800 мм в год, что позволяет выращивать виноград без искусственного орошения и производить более минеральные вина. Здесь преобладает средиземноморский климат с теплыми дневными температурами и прохладными ночами. Особенно это характерно для терруаров, расположенных на высоте более 150 метров над уровнем моря или подверженных воздействию морских бризов.

Важно отметить, что значительное количество севастопольских терруаров имеют почвы с известковыми включениями, что влияет на уровень кислотности производимых вин и придает им неповторимую минеральность. Благоприятные природно-климатические условия делают севастопольскую зону идеальным местом для выращивания белых сортов винограда и производства элегантных тихих белых и классических игристых вин, предназначенных для длительного выдерживания. Однако отдельные терруары также производят выдающиеся красные вина, созданные из полностью созревшего винограда лучших международных сортов.

В Севастополе были проведены успешные эксперименты по выращиванию автохтонных крымских сортов винограда, таких как белые Кокур и Сары пандас, а также красные Кефесия (Эжим кара) и Джеват кара [38]. Эти сорта были изначально районированы в южных и восточных винодельческих зонах Крыма, но результаты их посадки в севастопольской зоне показали многообещающие результаты.

Севастопольская зона имеет специфический тип почвы, который уже вызывал затруднения у первых виноделов древнего Херсонеса. Эта почва, известная как «Малахов», стала известной после Крымской войны 1853–1856 гг. в связи с тем, что солдатам обеих армий было трудно окопаться в земле из-за твердой мергелевой «скалы», которая находилась под тонким слоем почвы. Сейчас эта «скала» является одним из факторов терруара, который необходимо учитывать при выборе места для виноградника и разработке агротехнических мероприятий.

1.2 Экологическая оценка проявления климатических условий возделывания винограда

Климат оказывает значительное влияние на выращивание винограда. От климатических условий зависят географическое размещение виноградников, урожайность и качество виноградных лоз, территориальная ориентация, а также специфика агротехнических и мелиоративных процессов. Разнообразие агроклиматических условий терруаров Севастопольского региона, наряду с сортовыми особенностями, должно учитываться при распределении насаждений даже внутри одного участка.

Виноградная лоза (*Vitis vinifera* L.) – одна из древнейших культур в мире. Её выращивание связано с региональной идентичностью жителей разных географических регионов. Виноград обычно выращивают в районах с благоприятным климатом, где определяющими факторами выступают температура в течение вегетационного периода и уровень инсоляции. Эти параметры определяют содержание активных веществ в ягодах, влияющих на их вкус и пригодность для производства вина. На протяжении веков виноградники формировали вид и структуру культурных ландшафтов тех климатических регионов, которые соответствуют условиям их выращивания. Каждому сорту винограда требуется определённое количество тепла в течение вегетационного периода для правильного созревания.

Общепризнано, что происходящие на планете процессы, связанные с изменением климата, оказывают существенное влияние на сельское хозяйство [46]. Исходя из той огромной роли, которую климат играет в продуктивности, качестве и идентичности продукции виноградарства и виноделия, нет сомнений в том, что методы управления ампелоценозами будут вынуждены адаптироваться к происходящим изменениям климата на региональном и локальном уровнях [162].

При расчете моделей для различных сценариев глобального потепления было установлено, что при повышении температуры на два градуса площадь пригодных для виноградарства регионов в мире сократится на 56%, а при потеплении на

четыре градуса производство качественных вин станет невозможным на 85% площадей [199]. Однако эксперты отрасли считают, что снизить последствия таких негативных сценариев можно путем подбора сортов, адаптированных к новым климатическим условиям. Особо отмечено, что хотя полностью исключить потерю виноградопригодных земель будет невозможно, более холодные регионы мира, например, Новая Зеландия и Тихоокеанский Северо-Запад США [87], а также высокогорные районы [85] смогут частично ее восполнить.

Глобальные климатические изменения, которые проявляются в более частых проливных дождях и длительных засушливых периодах, отражаются на ареалах распространения и плотности популяций уже известных вредных организмов, а также способствуют появлению новых видов [46]. Следствием повышения температуры в период созревания является изменение вкусовых и питательных свойств ягод винограда. Чтобы в этих условиях производить типичные вина высокого качества, виноградарям придется корректировать различные параметры, начиная с подбора сорта, методов обработки почвы и орошения, систем защиты растений и заканчивая энологическими стратегиями, такими как управление кислотностью. Например, увеличение продолжительности засушливых периодов приводит к недостатку воды и, как следствие, дефициту азота в почве в течение вегетационного периода, что ухудшает процесс ферментации и формирование аромата будущего вина. И напротив, если после обильных дождей виноградные лозы получают сразу большое количество азота, это негативно влияет на здоровье виноградного растения.

Виноград выращивают на шести из семи континентов. В Северном полушарии его возделывают между 4° и 51° широты, а в Южном – между 6° и 45° в широком разнообразии климатических поясов (океанический, теплый океанический, переходный умеренный, континентальный, холодный континентальный, средиземноморский, субтропический, ослабленный тропический и засушливый) [333]. Однако в так называемом «винном поясе» мира с умеренно теплым климатом между 40° и 50° и 30° и 40° широты соответственно в Северном и Южном полушарии концентрируются практически все

винодельческие хозяйства мира с устойчивыми традициями виноделия и потребления этого напитка [121]. Широкий охват географических зон и районов выращивания виноградной культуры осложняет определение основных лимитирующих выращивание винограда факторов, которые будут значительно отличаться в зависимости от местоположения региона выращивания, направленности и интенсивности проявления как уже происходящих климатических изменений, так и тех, которые прогнозируются в будущем. Эти изменения уже сказываются на химическом составе ягод винограда, в особенности, на соотношении концентрации сахаров и органических кислот. Это соотношение предлагается принимать в качестве индикаторного показателя при прогнозировании качества винограда, который будет произведён в других местах или в том же регионе с учетом изменений климата, оптимального времени сбора урожая и для других научных и практических целей [54, 198]. Что касается других важных компонентов, таких как полифенолы и ароматические соединения, то их связь с изменениями окружающей среды сложнее оценить количественно. В целом, ожидаемые климатические изменения в период созревания винограда можно разделить на два сценария: более теплый и сухой, и более теплый и влажный. Реакция на эти сценарии со стороны красных и белых сортов винограда будет отличаться. Соответственно, для достижения стратегии устойчивого производства продукции под эти сценарии должны быть адаптированы и производственные задачи.

В прошлом фактор низких зимних температур выступал лимитирующим выращивание винограда в регионах с континентальным климатом в Восточной Европе, Азии и Северной Америке. Низкие температуры в течение вегетационного периода затрудняли расширение виноградарских зон за пределы изотермы 12°C (апрель – октябрь в Северном полушарии и октябрь – апрель в Южном полушарии) [198]. В целом, температурная изотерма 22°C считается пределом для выращивания винограда [175, 314], однако негативное воздействие высоких температур может быть компенсировано достаточным уровнем увлажнения, что наблюдается во многих тропических регионах с жарким климатом [334].

В большинстве существующих на настоящий момент промышленных зонах виноделия водный дефицит является фактором основного экологического риска [355]. Даже в умеренном климате виноградные лозы часто страдают от разной степени недостатка влаги в течение вегетационного периода [309]. В то же время есть регионы, где избыток влаги во время определённых этапов развития виноградной лозы, например, на этапе созревания, может представлять серьёзную угрозу фитосанитарному состоянию насаждений, количеству и качеству урожая.

Чтобы полностью оценить воздействие наблюдаемых изменений климата на виноградарство, используются биоклиматические индексы, определённые Международной организацией винограда и вина в резолюции OIV от 2012 года.

Индекс прохладности ночей (Cool Night Index, CI) позволяет оценить влияние низких ночных температур в период созревания винограда. Исследования показывают, что значительная разница между дневными и ночными температурами (так называемый «диурнальный диапазон») положительно влияет на качество винограда при созревании. Показатель характеризует условия накопления красящих и ароматических веществ при созревании винограда [59].

Средние температуры вегетационного периода (Average Growing Season Temperatures, GST) позволяют определить оптимальные сроки проведения агротехнических мероприятий и сбора кондиционного урожая. Период вегетации у виноградного растения условно разделен на 6 фаз, продолжительность которых меняется в зависимости от сорта, почвенно-климатических особенностей местности и метеорологических условий текущего года. В разные годы у одного и того же сорта винограда продолжительность фаз вегетации может сдвигаться, однако их последовательность всегда сохраняется [20]. В связи с этим показатель средней температуры вегетационного периода помогает виноградарям принимать обоснованные решения при выборе выращиваемого сорта винограда на основе анализа тепловых условий конкретной территории и является инструментом управления виноградником в условиях изменчивости внешних факторов.

Сумма активных температур (Biologically Effective Growing Degree Days, BEDD или CAT) – это минимальная температура, при которой начинается

вегетация конкретного вида растений. Зная этот важный параметр, можно примерно определить, будет ли расти тот или иной вид в данной местности, и как повлияет микроклимат участка на его рост и развитие. Пробуждение виноградного куста после зимы начинается при температуре почвы в зоне корней не ниже 8–10 °С. Стадия полного зимнего покоя наступает при снижении температуры до 10–12 °С. Эти значения практически одинаковы для всех сортов. Разным сортам в период вегетации требуется разное количество тепла.

Гелиотермический индекс Хуглина (Huglin Heliothermal Index, HI) – показатель, используемый в виноградарстве для оценки теплообеспеченности. Он был разработан французским исследователем Пьером Хуглином и учитывает как температуру, так и продолжительность инсоляции в течение вегетационного периода. Гелиотермический индекс Хуглина помогает определить, насколько конкретный регион подходит для выращивания винограда, и классифицировать винодельческие зоны по их тепловому потенциалу. Чем выше индекс, тем более теплолюбивые сорта винограда можно выращивать в данном регионе.

Тепловой индекс Уинклера (Winkler Thermal Index, WI или Growing Degree Days, GDD) – это один из ключевых показателей, используемых в виноградарстве для оценки тепловых условий, необходимых для успешного выращивания винограда. Он был разработан американскими учёными А. Дж. Уинклером и М.А. Амером в Калифорнийском университете (США) и широко применяется для классификации винодельческих регионов по их климатическим характеристикам. Тепловой индекс Уинклера помогает виноградарям и виноделам определять, какие сорта винограда лучше всего подходят для конкретного региона, оценивать потенциал новых территорий для виноградарства, планировать агротехнические мероприятия с учётом климатических условий. Этот индекс является важным инструментом для понимания влияния климата на качество и стиль вин, производимых в разных регионах.

Гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) был предложен советским климатологом Г.Т. Селяниновым и широко применяется для анализа условий увлажнения в различных регионах. В виноградарстве ГТК используется

для оценки агроклиматических условий выращивания отдельных сортов винограда на определенной территории, планирования орошения и других мелиоративных мероприятий.

Индекс сухости почвы (Soil Dryness Index, SDI) рассчитывается по количеству ежедневных осадков и максимальной температуре для определения степени сухости почвы на расстоянии нескольких десятков километров. Этот показатель позволяет оценить количество миллиметров осадков, необходимых для насыщения почвы влагой.

Коэффициент увлажнения (КУ) – отношение годового количества осадков к годовой величине испаряемости для данного ландшафта [20], является показателем соотношения тепла и влаги.

В силу своей климатической зависимости будущее виноградарства и виноделия тесно связано с прогнозируемыми изменениями климатических факторов (температуры, осадков, концентрации углекислого газа и т.д.), которые могут существенно изменить многие аспекты культивирования винограда от географии выращивания до энологических характеристик [148, 182, 216, 222].

1.3 Экологическое значение эдафических факторов для получения качественной винодельческой продукции

Почва, являясь ключевым компонентом экосистем, играет важную роль в поддержании жизни на Земле. Она тесно взаимодействует с атмосферой, гидросферой и биосферой и выполняет функции, необходимые для поддержания стабильности последней. Почва также является незаменимым источником пищевых ресурсов, биоразнообразия и имеет важное значение для сохранения окружающей среды. Выделяют пять основных функций почвы: 1) участие в круговороте вещества и энергии; 2) обеспечение фильтрации, накопления и трансформации загрязняющих веществ атмосферы и гидросферы, предотвращение загрязнения окружающей среды; 3) производство биомассы (питание человека, корм скота, источник возобновляемой энергии); 4) банк генетической информации (местообитание организмов, семян); 5) физический базис технических,

промышленных и социально-экономических структур, источник строительных материалов, культурное наследие: роль в формировании ландшафта, сохранение палеонтологических и археологических ценностей, жизненное пространство человека [39, 104, 105]. Ряд отечественных исследователей предлагают дополнить указанные функции, подчеркивая тем самым существенную роль почв в протекании различных биосферных процессов [26, 27].

Почва является базисом продовольственных систем и основой обеспечения продовольственной безопасности. Плодородие как интегральная экологическая функция почвы, а также сохранение биоразнообразия крайне важны для существования и устойчивого развития биосферы в целом и агросферы в частности.

Почвы виноградников обеспечивают широкий спектр экосистемных услуг. Сохранение и улучшение качества почвы, а значит, и поддержание ее экологических функций, является приоритетной целью устойчивого производства продукции виноградарства и виноделия. Поскольку управление почвой влияет на ее функции множеством способов, крайне важно оценить характерные эффекты применяемых агротехнологий, чтобы продемонстрировать сильные и слабые стороны элементов систем управления виноградниками [258].

Поддержание почвы в хорошем физическом (структура почвы), химическом (достаточное количество питательных веществ и отсутствие токсикантов) и биологическом (накопление органического вещества и биоразнообразие) состоянии важно для долголетия виноградных насаждений и получения стабильных урожаев высокого качества. Виноградное растение предъявляет к почве специфические требования, от которых зависит не только его обеспеченность необходимыми питательными веществами, но и адаптационные возможности подвоев в районах привитой культуры винограда, в том числе к происходящим климатическим изменениям. Важно отметить, что в сопоставимых условиях разные почвы могут определять целые направления и методы производства вина, что подчеркивает особую роль почвенного фактора в отрасли виноградарства и виноделия.

Оценку производительности почв виноградников целесообразно проводить

на разных системных уровнях путем установления связи продуктивности винограда с отдельными почвенными показателями или комплексом показателей, локальными типами и подтипами почв и, наконец, на ландшафтном уровне, где почва рассматривается в совокупности с другими региональными природными факторами – климатическими, химическими, орографическими. Важность ландшафтного подхода к почвенно-экологическим исследованиям в ампелоценозах обусловлена тем, что позволяет объективно установить качественные и количественные характеристики происходящих в плантационно-садовых агроэкосистемах процессов и выявить связанные с ними экологические риски [10] для устойчивого производства [10] продукции и качества окружающей среды.

В релевантной зарубежной научной литературе стали широко использоваться понятия «качество» и «здоровье» почвы [96, 204, 210, 251]. Первый термин исторически описывал состояние почвы, связанное с сельскохозяйственной продуктивностью или плодородием. Второй термин был введен в середине 1990-х годов в связи с растущим вниманием к биотическому компоненту почв в рамках развития органического и биодинамического направлений в земледелии. Под «здоровьем» почвы понимается ее способность как важнейшего компонента наземных экосистем функционировать в течение длительного времени и устойчиво выполнять экосистемные функции, обеспечивать биопродуктивность, а также качество воды, воздуха и здоровье растений, животных и человека. В этом контексте понятие «здоровье» почвы имеет более широкое значение, чем «качество» [39, 138, 324]. Например, в программе по оценке и мониторингу здоровья почвы в Канаде термины «качество» и «здоровье» использовались как синонимы для описания способности почвы поддерживать рост и развитие культур без негативных последствий для окружающей среды [174]. Основная концепция заключается в том, что здоровье почвы является интегральным выражением химических, физических и биологических свойств почвы, которые определяют, насколько хорошо почва обеспечивает различные функции экосистемы. По мнению Lehmann et al. [156, 225], химические и биологические свойства почвы, такие как содержание органического углерода и микробная биомасса [20], имеют

приоритетное значение с точки зрения отражения здоровья и качества почвы [156].

Эволюция научных взглядов на почву и становление ампелопедологии как самостоятельной отрасли агрономического почвоведения тесно связаны с развитием практического виноградарства и естественных наук в целом [67].

Почвенный фактор играет ключевую роль в определении основных органолептических свойств вина, включая полноту его вкуса, букет, цвет, тело и структуру [331]. Это подтверждает историческая литература, например, труд древнеримского автора Колумеллы, который подчеркивал значимость почвы для виноделия [63]. В законодательстве главных винодельческих стран Западной Европы также признается значение почвенного фактора. Так, в ранних классификациях вин Франции, Германии, Италии и Португалии почвенные характеристики использовались в качестве базовых для разграничения зон производства вин высшего качества [103].

В виноградарстве хорошо известно, что климат в основном определяет кислотность и сахаристость виноградного сока, в то время как почва влияет на более широкий спектр характеристик вина, включая его вкус, аромат и букет [223]. Прежде всего, урожай и качество винограда и, следовательно, вина в значительной степени зависят от типа почвы. В пределах одного региона при идентичных климатических условиях, но на разных типах почв, вина могут иметь разное качество. По этой причине при выборе сортов винограда учитываются и почвенные условия. Виноград можно выращивать на различных типах почв, включая те, которые непригодны для других сельскохозяйственных культур [338]. В исторических регионах, где зародилось виноградарство, включая Римскую империю, виноградные лозы часто сажали на менее плодородных почвах, например, крутых склонах. Более плодородные земли отводились под выращивание зерновых и других культур. Несмотря на пластичность виноградной лозы и ее способность расти на большинстве типов почв, влияние почвенных условий значительно и определяется различными факторами, среди которых чаще всего называют гранулометрический состав, плодородие и структуру, определяющие в совокупности воздушный, тепловой и водный режимы почвы

[218]. Немаловажными являются физико-химические свойства почвы, активность микроорганизмов и другие факторы.

Физические свойства почвы имеют большое значение для виноградарства. Они влияют на тепловой, водный и воздушный режимы почвы. Тепловой режим в основном определяется способностью почвы нагреваться, отдавать тепло, а также ее теплоемкостью и теплопроводностью. Темный цвет почвы способствует ее быстрому и сильному нагреванию, что особенно важно для насаждений в более северных зонах промышленного выращивания *Vitis vinifera*. Светлый цвет, отражая солнечные лучи, предотвращает ее нагрев, что важно для более южных винодельческих регионов. Теплопроводность почвы определяется скоростью перемещения и проникновения тепла и зависит, в основном, от плотности, структуры и влажности почвы. Песчаные почвы быстро поглощают тепло, но так же быстро его отдают. Глинистые почвы обладают меньшей теплопроводностью и лучше удерживают тепло. Водный режим почвы зависит от поступления воды из атмосферных осадков и грунтовых вод, а также от проведения мелиоративных мероприятий. Просачивание воды в нижележащие слои почвы, ее задержка в почве и испарение с ее поверхности также зависят от физических свойств почвы.

При агроэкологической оценке основных почвенных характеристик для виноградарства необходимо учитывать гранулометрический состав, плотность (объемную массу), мощность гумусового горизонта, запасы гумуса, наличие карбонатов и химический состав почвы. Содержание и запасы гумуса оказывают особое влияние на продуктивность винограда, особенно на столовые сорта, произрастающие на эродированных почвах.

При оценке химического состава почвы особое внимание следует уделить содержанию карбонатов. Высокое содержание карбонатов в корнеобитаемом слое благоприятно для формирования насыщенных букетов вина. Лучшие сорта французского винодельческого рынка, такие как Каберне и Мерло, возделываются на почвах с высоким содержанием карбонатов. Солонцеватые почвы с содержанием натрия и магния более 8–10 % в поглощающем комплексе, а также оползневые и заболоченные почвы непригодны для возделывания винограда [141].

Принято считать, что на каменистых почвах получают вина высокого качества с высоким содержанием спирта, на песчаных – вина высокого качества с низким содержанием экстрактов и белков, на почвах суглинистого гранулометрического состава получают вина, богатые экстрактами, окрашенные и мягкие, с хорошей кислотностью, пригодные для длительной выдержки, на почвах тяжелого гранулометрического состава получают вина, богатые ароматическими веществами, сильно окрашенные. На влажных почвах получают вина с низким содержанием спирта, очень кислые и богатые белками. На известковых почвах производят вина с высоким содержанием спирта, с низкой кислотностью и насыщенным ароматом [331].

Лучшие испанские вина – Херес и Риас – производятся на известковых почвах. То же относится к Марсале на Сицилии, Кьянти в Тоскане, Каберне и Мерло. На слабокислых почвах получают тонкие вина, с небольшим количеством красящих веществ и невысокой плотностью. На черноземных почвах производят обычные вина низкого качества, не выдерживающие длительного хранения, богатые белками. Виноградники, выращиваемые на песчаных почвах по гранулометрическому составу, дают урожай, продуктивный в винодельческом аспекте. На таких почвах наблюдается хороший рост и долговечность кустов, а также раннее созревание и отсутствие филлоксеры [97, 290].

Макроэлементы (азот, фосфор, калий), мезоэлементы (кальций, магний, сера) и микроэлементы (бор, марганец, цинк, молибден, кобальт, железо, медь, кремний) играют разную физиологическую роль, по-разному накапливаются и выносятся виноградом [58].

Азот повышает продуктивность кустов и качество ягодного сока, но его избыток может привести к снижению урожая и ухудшению транспортабельности и лёжкости столовых сортов винограда. Фосфор улучшает оплодотворение цветков, увеличивает содержание сахара в ягодах и сокращает вегетационный период. При его недостатке рост побегов и листьев замедляется, угнетается цветение. Калий повышает устойчивость винограда к заболеваниям и улучшает лёжкость плодов. Его достаточное количество способствует развитию лозы, помогает накапливать

сахар в соке ягод и ускоряет их созревание. Достаточное количество серы в почве улучшает усвоение минеральных веществ растениями, а нехватка кальция делает их более уязвимыми к негативным факторам среды. Магний помогает лучшему поглощению фосфора и железа, предотвращая хлороз растений. Бор при его недостатке или избытке замедляет рост и провоцирует заболевания, кобальт влияет на массу ягод и содержание сахара в них, марганец увеличивает количество завязавшихся ягод, повышает урожайность и улучшает качество плодов, медь играет важную роль в фотосинтезе, молибден важен для азотного питания растений, цинк помогает растениям стать устойчивее к холоду, жаре и засухе.

Вопрос о биологической активности почвы для выращивания винограда в контексте виноделия заслуживает отдельного внимания. Микробиом почвы играет ключевую роль в регуляции множества важных экологических процессов, например таких, как минерализация органического вещества, обеспечение растений питательными веществами, связывание углерода.

Состояние микробиома почвы имеет прямое влияние на ее здоровье и плодородие [272]. Каждый сорт винограда имеет свои особенности в составе микробиома ризосферной зоны корней [90]. Недавние исследования показали, что почва может служить источником определенных видов микроорганизмов для виноградного растения, которые при попадании на ягоды в процессе сбора урожая или во время ферментации во многом определяют качество вина [295]. Также отмечена роль дрожжей и их видового разнообразия на вкусовые характеристики вина [300, 320, 363].

Поскольку состав микробиома почв значительно варьирует в зависимости от их типа и свойств, эксперты предложили концепцию “микробного терруара”, которая учитывает эти особенности и может быть использована для оптимизации процессов виноделия и повышения качества вина [165]. Особое значение микробиоты в ампелоценозах для круговорота питательных веществ, здоровья растений и на всех этапах процесса производства вина предопределяет потенциальное использование микробного терруара в качестве инструмента управления виноградниками и моделирования качества получаемой продукции.

Разработанные на этой основе биотехнологические приемы могут быть полезны в специализированных региональных программах борьбы с патогенами или повышения устойчивости к болезням, а также при определении биомаркеров для мониторинга и защиты биологических характеристик винодельческих регионов [94, 165]. Для достижения этих целей требуются дополнительные знания о глобальном микробиоме почв виноградников на таксономическом и функциональном уровнях, его взаимодействии с биотическими, абиотическими факторами и возможных реакциях на агрогенное и антропогенное воздействие. В данном контексте биоразнообразие почв остается одним из ключевых параметров, связанных с понятием устойчивого сельского хозяйства и, в особенности, винодельческой отрасли. Поскольку культура винограда подвержена сильному влиянию глобальных климатических изменений, понимание закономерностей функционирования микробного сообщества почв виноградников в регионах с контрастными почвенно-климатическими условиями может способствовать выработке адаптивных стратегий устойчивого развития виноградарства.

1.4 Экологическая оценка орографических особенностей размещения ампелоценозов

Среди множества экологических аспектов продуктивности и устойчивости ампелоценозов особое воздействие на урожайность виноградных растений и качество продукции имеют орографические условия. Хотя климат и почва обычно считаются основными факторами терруара на региональном уровне, многие исследования подчеркивают влияние топографических особенностей, таких как высота, уклон и экспозиция, на конкретные характеристики вина в локальном масштабе [202, 221, 231, 249]. Эти топографические особенности оказывают значительное влияние на температурные профили в пределах конкретного виноградника и имеют важное значение при переходе от макроклимата крупного региона к мезоклимату конкретных виноградников и к микроклимату отдельных клеток или рядов лоз в пределах виноградника.

Установлено, что при одинаковом уровне агротехнических мероприятий и

выращивании одного сорта винограда на участках, которые различаются по высоте над уровнем моря, положение относительно сторон света, углу наклона к горизонту, протяжённости и изрезанности склонов, получают урожай с разными показателями продуктивности и сроками созревания. Одно из свойств винограда как биологического вида – способность приспосабливаться к изменениям в окружающей среде, таким как тип почвы, температура, освещённость, количество влаги, крутизна и экспозиция склонов. Это позволяет отнести его к группе растений [37] с широким спектром форм [37].

Виноградники часто размещаются на склонах, которые могут иметь разную крутизну, протяженность и форму, с выраженным или сглаженным микрорельефом. Такие условия создают пространственную неоднородность почв ампелоценозов по содержанию макро- и микроэлементов, а также загрязняющих веществ. Особенности ландшафта тесно связаны с влиянием других факторов, в первую очередь местных климатических и агрогенных условий. Используемые агротехнологические методы выращивания винограда [80], которые варьируются в зависимости от региона и хозяйства, могут либо усиливать, либо смягчать проявление ландшафтных особенностей.

Крутизна склона оказывает воздействие на развитие виноградной лозы, влияя на сроки наступления различных этапов вегетационного периода, интенсивность роста, а также на урожайность и качество сырья. Для [37] закладки виноградных насаждений наиболее приемлемыми считаются участки с уклоном не более 5°, если же виноградник расположен на крутом склоне, нужно провести ряд дополнительных планировочных и мелиоративных работ, а также использовать особые агротехнические приёмы. При планировании виноградников на таких участках рекомендуется располагать ряды вдоль склонов, чтобы предотвратить оголение корней кустов. При работе с крутыми склонами важно тщательно продумать расходы на создание террас, затраты на обслуживание виноградных насаждений и необходимость получения качественного сырья [37], даже если это может привести к снижению урожайности.

Один из [37] топографических факторов, влияющих на рост и развитие

растений, – это экспозиция склона. От того, куда направлен склон, зависит уровень радиации, зимнее распределение снега и сила ветра [62].

Из-за разного угла падения солнечных лучей на склоны северной и южной ориентации количество поступающей солнечной радиации существенно различается. Это влияет на весь комплекс микроклиматических условий. Разница [37] между склонами сопоставима с зональными различиями территорий, расположенных на расстоянии в несколько градусов по широте. В ясную погоду днём у поверхности земли разница температур на южных и северных склонах может достигать нескольких градусов. При пасмурной погоде различия в температуре на склонах становятся менее заметными [62].

Рельеф с холмами и грядами подходит для посадки виноградников, особенно если они расположены с севера на юг или с востока на запад. Такое размещение способствует успешному выращиванию культуры и влияет на количество и качество урожая.

Низины могут создавать опасность заморозков по утрам, а вершины холмов и возвышенностей — опасность сильных морозов и ветров. Склоны южной экспозиции меньше подвержены грибковым заболеваниям растений. Благодаря большому количеству тепла на этих склонах ягоды созревают быстрее, побеги лучше вызревают, а сахаристость ягод увеличивается.

Весной южные склоны прогреваются раньше, а осенью охлаждаются позже, поэтому вегетационный период здесь более длительный, по сравнению с северными склонами. Хотя сила роста кустов и урожайность на южных склонах обычно ниже из-за бедности почвы питательными веществами, низкой влажности и мощности гумусового горизонта, качество урожая здесь выше – в ягодах накапливается больше сахаров, экстрактивных и ароматических веществ.

Западные склоны менее тёплые, чем южные, но их почва более плодородная и влажная. Однолетний прирост хороший, однако в районах с высоким атмосферным увлажнением растения сильно страдают от грибковых заболеваний.

Восточные склоны суше западных и северных. Если местность открыта для восточных ветров, растения могут серьёзно пострадать от суховея. Из-за резких

перепадов температуры в утреннее и дневное время побеги сильнее повреждаются весенними заморозками, поэтому восточные склоны не рекомендуется использовать под виноградники.

Северные склоны малопригодны для выращивания винограда, так как они наиболее подвержены морозам [37].

С увеличением высоты над уровнем моря меняются климатические условия. При подъёме на каждые 170 метров средняя температура воздуха снижается примерно на 1 градус, из-за чего в ягодах накапливается меньше сахара [37]. На Южном берегу Крыма при возрастании высоты южного склона на 50 м сахаронакопление [37] в плодах уменьшается на 1% [40]. Земельные участки, находящиеся на высоте более 500 метров над уровнем моря, не подходят для промышленного выращивания винограда. Поэтому виноградники лучше всего размещать на сельскохозяйственных угодьях, расположенных на высоте от 0 до 400 метров над уровнем моря [37]. Это позволит обеспечить научно обоснованный процесс выращивания и созревания сортов винограда — от сверхранних до среднепоздних.

Многолетнее возделывание винограда на склонах с разной крутизной, экспозицией, формой и протяжённостью, а также использование механизированных методов обработки почвы и ухода за растениями, многочисленные применения пестицидов и агрохимикатов влияют на процессы перемещения и накопления веществ в разных частях агроландшафта, особенно в почве. Поэтому применение ландшафтного подхода к исследованиям взаимодействия окружающей среды и химических веществ в виноградниках позволяет точно определить характеристики перемещения загрязняющих веществ и их концентрацию в почве. Это, в свою очередь, помогает оценить экологические риски для сопряженных сред и обеспечить производство экологически безопасной продукции виноградарства и виноделия [10, 125].

1.5 Экологическая оценка элементов технологий возделывания винограда

Виноградные лозы не так требовательны к воде и питательным веществам по сравнению с другими культурами, однако их выращивание сопряжено с интенсивной агротехникой, включающей механическую обработку почвы и использование гербицидов и фунгицидов для борьбы с сорными растениями и возбудителями заболеваний соответственно.

Практика управления почвой виноградников, направленная на достижение целей устойчивого развития, может рассматриваться в качестве основной стратегии улучшения продуктивности и качества винограда, а также снижения последствий изменения климата. Для обеспечения здоровья виноградной лозы, ее роста и достижения желаемых характеристик вина необходимо поддерживать оптимальные характеристики почвы, контролировать численность вредных организмов, поддерживать биоразнообразие и регулировать доступность воды и питательных веществ [70, 271, 317, 328, 335].

Уход за виноградными растениями включает в себя ряд стандартных процедур, таких как удаление листьев и обрезка кустов. Первая процедура улучшает микроклимат вокруг гроздей, способствует более качественному созреванию плодов и снижает заболеваемость лоз. Вторая процедура снижает испарение, способствует затвердеванию лоз, поддерживает баланс в росте ветвей.

Междурядную растительность на виноградниках контролируют с помощью посева трав, использования зеленых удобрений, мульчирования, культивации и/или использования гербицидов сплошного действия [71, 228, 243, 280, 310, 361]. Исследования показали, что управление почвенными условиями в междурядье виноградников, например, нехимические методы уничтожения сорняков (боронование, мульчирование), обработка почвы и внесение питательных веществ, в различной степени влияют на рост и развитие растений винограда [195, 286, 351]. Так, интенсивность фотосинтеза и устьичная проводимость виноградных лоз зависят от методов обработки почвы [200, 244], а на поглощение питательных веществ виноградом влияют температура, влажность и плотность почвы. Например, установлена положительная корреляция между высокой температурой

почвы и поглощением азота, калия, кальция и магния [244].

Неблагоприятные почвенные условия, такие как низкое содержание влаги, могут вызвать стресс [124] у растений, что негативно сказывается как на росте, так и на урожайности [106, 200, 261, 283, 319]. Дефицит воды также снижает фотосинтетическую активность [142, 234], негативно влияет на дифференциацию и число цветков, плодоношение и размеры ягод винограда [250, 252]. Содержание междурядий под покровной культурой в регионах с небольшим количеством летних [124] осадков и высоким испарением может оказаться губительным, так как конкуренция за воду вызывает сильный водный стресс у виноградной лозы и, следовательно [124], негативно влияет на качество, количество урожая и размер ягод [356]. Проблема усугубляется в случае, если виноградная лоза растет в условиях дополнительного теплового стресса, так как интенсивность фотосинтеза снижается из-за закрытия устьиц [265]. При интенсивном росте управление напочвенным растительным покровом может улучшить состояние лоз, потому что увеличение потребления воды способствует сокращению вегетативного роста виноградной лозы и, вследствие этого, улучшению микроклимата зоны плодоношения и качества винограда [143, 150, 260]. Проводилось множество научных исследований и экспериментов для более точного определения влияния разных видов покровной культуры на вегетативный рост виноградной лозы, количество урожая, качество ягод и вина, которые показали неоднозначные результаты [178, 260, 268, 294], сильно зависящие от климатических условий местности.

Покровная культура на виноградниках была распространенной практикой в Европе [289]. В настоящее время залужение широко используется в районах с частыми летними дождями для удаления избытка воды и азота, но преимущества использования [124] покровных культур также включают контроль эрозии почвы [100, 179], управление содержанием азота и органического вещества. Например, снижение содержания нитратов в почве улучшает ее структуру, увеличивает проникновение и удержание воды [123], уменьшает прямые потери почвенной влаги через испарение, снижает вегетативную активность виноградной лозы,

способствует низкому уровню содержания азота в сусле [168, 240], что улучшает качество ягод винограда и сусла [193, 264].

Мульчирование как прием обработки почвы в междурядьях также имеет давнюю историю применения. Обычно для мульчирования используются такие материалы, как солома, камыш, навоз, мякина, торф и опилки. В последнее время также применяются различные полимерные пленки. Исследования показали, что мульчирование способствует уменьшению испарения и увеличению содержания влаги в почве. Мульча подавляет рост сорных растений, ускоряет впитывание дождевой воды и уменьшает поверхностное испарение и сток. Использование мульчирующих материалов улучшает структуру почвы, стимулирует деятельность микроорганизмов, обеспечивает более полное использование питательных веществ, улучшает развитие корневой системы и снижает риск повреждения корней во время обработки, что в итоге приводит к улучшению роста и плодоношения виноградных растений. По некоторым данным, мульчирование увеличивает показатели Brix, общее количество фенольных соединений, флавонолов и антоцианов в ягодах винограда [130].

Во всем мире наиболее распространенными являются следующие системы землепользования: традиционная, интегрированная, органическая и биодинамическая. В мировом масштабе 90 % из 8 миллионов гектаров виноградников обрабатываются традиционным способом, 9 % – по органической системе и только 1 % – с применением биодинамического подхода.

В основе *традиционных систем земледелия*, которые также называют конвенциональными, интенсивными или индустриальными, лежит активное использование химически синтезированных удобрений и средств защиты растений от вредителей и болезней. Кроме того, в этих системах широко применяется сельскохозяйственная техника, что часто приводит к уменьшению содержания почвенного органического вещества и ухудшению биологического состояния почв.

Интегрированная система защиты винограда базируется на принципах фитосанитарного мониторинга, начиная с посадочного материала,

прогнозировании численности вредных и полезных организмов в биоценозе, понимании биологических особенностей вредителей, болезней, устойчивости сортов винограда к вредным организмам в конкретных микро- и макроразонах, а также спектре действия применяемых средств защиты.

Органическое земледелие представляет собой системный подход, обеспечивающий здоровье агроэкосистемы и предусматривающий активное использование биологических методов, способствующих сохранению биологической активности почвы. В отличие от интенсивных, экологически ориентированных систем земледелия направлены на усиление использования биологических факторов. Так, по сравнению с традиционными хозяйствами, почвы органических хозяйств имеют более активное, разнообразное и стабильное микробное сообщество [154, 180, 227, 276, 277], большую величину базального дыхания почвы и углерода микробной биомассы [109, 151], в то время как микробный метаболический коэффициент в них, как правило, ниже [155, 238, 276, 291]. Основным принципом органической системы землепользования заключается в сокращении или полном отказе от применения минеральных удобрений и пестицидов, увеличении количества органического вещества, включая послеуборочные остатки, и снижении механической нагрузки на почву. Цель органического виноградарства – не достижение рекордных урожаев, а установление и поддержание оптимального уровня продуктивности виноградных насаждений.

В настоящее время органическое виноградарство в Крыму активно развивается и имеет большое социальное и экономическое значение. Оно способствует развитию сельских территорий и экотуризма, формированию премиального сегмента в сельскохозяйственном производстве, созданию новых рабочих мест и улучшению здравоохранения и рекреации. Сельскохозяйственные угодья на Южном берегу Крыма занимают 11,5% территории, и большая ее часть отведена под виноградные насаждения (около 4000 гектаров) [64]. Большинство виноградников расположено рядом с рекреационными зонами, поэтому органическое виноградарство может стать перспективным направлением для всех

регионов Крыма. Органическое виноградарство для Крыма имеет особое значение и в контексте сохранения биоразнообразия и улучшения состояния ландшафтов, поскольку Крымский полуостров – один из мировых центров биоразнообразия флоры и фауны [23, 36]. Производство органического винограда регулируется рядом параметров, которые могут варьироваться в зависимости от сертификационной системы. Однако основными принципами органического земледелия являются использование природных ресурсов для защиты и питания растений (минеральные продукты и продукты растительного происхождения) и [156] отказ от пестицидов и синтетических удобрений [156]. Современные тенденции экологических исследований, обусловленные проблемами климатических изменений и антропогенного воздействия, предполагают формирование новой системы взглядов с акцентом на популяризацию альтернативных методов земледелия, биологизацию и максимальное использование природных процессов саморегулирования в агроэкосистемах.

Биодинамическая система ведения сельского хозяйства также ориентирована на поддержание здоровья агроэкосистемы за счёт использования специфических методов и подходов, обеспечивающих гармоничное взаимодействие всех живых организмов в хозяйстве. Биодинамическое сельское хозяйство должно следовать тем же правилам, что и органическое; оно основано на сельскохозяйственном курсе Рудольфа Штайнера, проведенном в Кобервице (ныне Кобержице, Польша) в 1924 году, и признано одним из первых органических сельскохозяйственных движений [281]. Биодинамические стандарты схожи с нормами органического сельского хозяйства, но отличаются применением специальных биодинамических препаратов на растениях (роговой кремнезем, препарат 501), в почве (роговой навоз, препарат 500) и компосте (травяные препараты 502-507, 56). Сохранение плодородия почвы путем поддержки почвенных микроорганизмов лежит в основе движений органического и биодинамического сельского хозяйства с момента их зарождения и, соответственно, находится в центре внимания многих исследований, сравнивающих системы управления сельским хозяйством.

1.6 Анализ лимитирующих экологических факторов выращивания винограда

Следствием глобальных, региональных и локальных проблемных экологических ситуаций является снижение почвенно-продукционного потенциала, что особенно негативно отражается на сельскохозяйственной отрасли, хотя и она сама нередко провоцирует развитие деграционных процессов в почвах. Так, промышленное выращивание винограда сопровождается такими экологическими рисками, как развитие эрозии и усиление пространственной неоднородности почвы, снижение биоразнообразия, переуплотнение, снижение содержания органического вещества и биологической активности почв [101, 164, 177, 239, 292, 297, 298, 342]. В XXI веке потеря сельскохозяйственных земель из-за эрозии почвы и снижения ее плодородия стала одной из главных проблем для мировой сельскохозяйственной отрасли [118, 153, 266]. Для ее решения активно разрабатываются стратегии устойчивого управления почвенными ресурсами в сельскохозяйственном секторе, направленные на сохранение и улучшение качества почв, так как от этого зависит их функциональность и производительность [161, 353].

Почвы садово-плантационных агроэкосистем, к которым относятся виноградники, в процессе длительной эксплуатации претерпевают ряд серьезных изменений, обусловленных их плантажированием, содержанием междурядий под черным паром, внесением удобрений и применением средств защиты растений, многолетней монокультурой. Традиционно высокая нагрузка пестицидами и агрохимикатами, их накопление в трофических цепях нарушают биологическое равновесие в агроценозах, став дополнительным стресс-фактором для растений. Особенно сильно от техногенных воздействий страдают биотические компоненты – микробиологическая, акарологическая и энтомологическая системы почв и наземных систем.

Ввиду того, что основные районы российского виноградарства находятся в зонах с недостаточным и неустойчивым увлажнением, согласно фундаментальному экологическому закону минимума Либиха, влага выступает

одним из ключевых лимитирующих факторов, от которого зависит объем и качество производимого винограда. В связи с этим методы обработки почвы на виноградных плантациях в течение долгого времени были направлены на устранение данного ограничивающего фактора – создание благоприятных условий увлажнения, а также обеспечение питательного, воздушного и теплового режимов. Это привело к разработке и широкому применению технологии обработки почвы на виноградниках по типу черного пара [50]. Этот метод предполагает очистку почвы от сорных растений и формирование рыхлого мульчирующего слоя из отдельных почвенных частиц, что позволяет сократить непродуктивное испарение влаги из почвы и ее транспирацию растениями. Для достижения такого результата на виноградниках необходимо провести от 6 до 10 механизированных операций по обработке почвы в течение вегетационного периода, а также выполнить работы по уходу за насаждениями. В целом за сезон на виноградниках выполняется от 15 до 20 механизированных агротехнических операций с использованием энергонасыщенных тракторов и сельскохозяйственных машин. Следствием проведения интенсивных механизированных работ является физическая деградация почвы – ее уплотнение в междурядьях, нарушение агрономически ценной структуры, снижение плодородия, развитие эрозионных процессов [256]. Исследование физико-химических свойств и структуры почвы на виноградниках разного возраста показало, что уплотнение происходит на всю глубину плантажного слоя, и чем старше насаждения, тем сильнее уплотнение [31, 32]. Наиболее интенсивное уплотнение плантажируемой почвы происходит в первый год после посадки под воздействием естественной осадки и механического воздействия тракторов и сельскохозяйственной техники, особенно в местах колес. Из-за увеличивающейся механической нагрузки на почву, доля агрономически ценных агрегатов уменьшается, и основную долю составляют структурные агрегаты размером >10 и $<0,25$ мм.

Отрицательные изменения физических характеристик почвы на виноградниках с применением черного пара усугубляются снижением её плодородия [13, 42, 50, 326]. Плодородие почвы формируется, прежде всего,

благодаря приходу органики и её включению в малый биологический круговорот. Современная агротехника содержания почвы на виноградниках приносит в почву значительно меньше органической массы, чем выносится из нее. Весь вегетативный прирост удаляется с урожаем и убираемой лозой после чеканки и обрезки, и лишь небольшая ее часть в виде опавших листьев и отмерших корней поступает в почву. Эта доля восполняет органические компоненты почвообразовательного процесса лишь частично и не поддерживает естественный процесс воспроизводства почвенного плодородия. Чтобы сохранить высокие показатели продуктивности насаждений и качество продукции, хозяйствующим субъектам приходится увеличивать затраты ресурсов на поддержание плодородия путем внесения органических и минеральных удобрений, применения мер по снижению водной и ветровой эрозии, разуплотнения и восстановления физических свойств почвы, проведения других агротехнических мероприятий.

Использование химических удобрений, часто практикуемое в виноградниках и садовых угодьях, может служить причиной химической деградации почв ампелоценозов, в частности, накопления тяжелых металлов. Прежде всего, это относится к фосфорным удобрениям, которые часто содержат примеси тяжелых металлов, таких как кадмий, ртуть и свинец [269]. Уровень загрязнения зависит от ряда факторов, включая дозу и частоту применения удобрений, а также способности растений накапливать данные поллютанты в урожае. С другой стороны, накопление тяжелых металлов в почвах виноградников и садов происходит ввиду регулярного применения побочных продуктов животноводства (навоз) в том случае, если корма животных были обогащены тяжелыми металлами [172], или когда металлосодержащие соединения [8, 357], например, соединения меди, использовались на фермах для санитарных обработок помещений. С учетом данного источника, загрязнение почв ампелоценозов тяжелыми металлами может произойти как в хозяйствах, практикующих традиционную систему землепользования, так и органическую. Однако исторически главным источником загрязнения почв ампелоценозов является применение фунгицидов, особенно содержащих медь, цинк и другие тяжелые

металлы [75]. Поступившие в почву тяжелые металлы не подвергаются биодegradации и поэтому могут накапливаться и мигрировать, попадая в другие базовые компоненты экосистем и в соседние ландшафты [166, 329], ухудшая тем самым качество окружающей среды.

Известно, что виноград содержит большое количество углеводов, что делает его очень уязвимым перед поражением патогенными грибами и насекомыми-вредителями [169]. Высокая восприимчивость винограда к биотическому стрессу может привести к значительным экономическим потерям, снижению качества вина и нежелательным вкусовым характеристикам [253]. Лозы и ягоды могут быть поражены большим количеством болезней, таких как ложная мучнистая роса (*Plasmopara viticola*), настоящая мучнистая роса (*Uncinula necator*), черная гниль (*Guignardia bidwellii*), серая гниль (*Botrytis cinerea*), эутипиоз (*Eutypa lata*), пятнистость древесины и листьев (*Phomopsis viticola*), кислая гниль (*Aspergillus niger*, *Alternaria tenuis*, *Botrytis cinerea*, *Cladosporium herbarum*, *Rhizopus arrhizus*, *Penicillium* spp.) и многие другие [72, 93, 99, 113, 149, 184, 197, 206]. Для получения стабильных урожаев в условиях высокого уровня заболеваемости и отсутствия генетически устойчивых сортов виноградарям приходится прибегать к многократным обработкам лозы химическими средствами защиты растений в течение вегетационного сезона [176].

Использование медьсодержащих фунгицидов для защиты растений от болезней имеет давнюю историю, начиная с открытия в 1885 году Пьером-Мари Алексисом Мильярде эффективности нейтрализованного медного купороса в борьбе с мучнистой росой на виноградной лозе [8, 15]. Одним из ключевых преимуществ меди является ее широкая спектральная активность против различных видов бактерий, оомицетов, аскомицетов и базидиомицетов, в том числе и таких заболеваний глобального масштаба, как мучнистая роса на винограде [15]. Кроме того, медьсодержащие соединения малотоксичны для теплокровных животных и человека, широко доступны и имеют низкую стоимость, отличаются химической стабильностью, хорошо прилипают и удерживаются на поверхности растений. Всё это способствовало их широкой коммерциализации.

Сегодня в Государственном каталоге пестицидов и агрохимикатов, которые разрешено использовать на территории Российской Федерации, представлено 27 медьсодержащих фунгицидов на основе 6 препаративных форм. Из них 8 — это смесевые препараты с органическими пестицидами цимоксанилом, манкоцебом, мефеноксамом, оксадиксилем и цинебом [82]. Несмотря на все бесспорные достоинства, за долгие годы применения медьсодержащих препаратов проявилась их негативная сторона: содержание меди в почве и других элементах ландшафта существенно выросло, причем наибольшие количества элемента наблюдаются в самом верхнем слое, так как медь в составе фунгицидов попадает в почву при прямом осаждении, смывании с листьев или с листовым опадом [82]. Наиболее высокие валовые концентрации меди в Европе были обнаружены в почвах виноградников во Франции (до 1500 мг/кг), Австралии (320 мг/кг), Индии (131 мг/кг), Италии и других странах [133, 134, 287]. В типичных винодельческих регионах Австрии самые высокие концентрации меди были зарегистрированы [82] в Вайнвиртеле и Ваграме и составили 831 и 888 мг/кг, соответственно [89, 95]. Для сравнения, почвы незагрязненных районов обычно содержат менее 20 мг меди на килограмм, однако ее концентрация может возрасти до 100 мг/кг в случае обогащения элементом материнских пород.

Применение фунгицидов на основе меди – единственного эффективного средства борьбы с ложной мучнистой росой и оидиумом в органическом виноградарстве послужило причиной того, что почвы органических хозяйств, как и традиционных, находятся в зоне риска избыточного накопления меди, что может вызвать различные токсические эффекты для почвенной микробиоты и растений [235, 354]. Так, Moolenaar и Beltrami (1998) [262] подсчитали, что использование исключительно бордоской смеси для защиты органических виноградников может привести к увеличению концентрации меди в почве до 600 мг/кг через 100 лет.

На других континентах рекордное количество меди обнаружено в Бразилии. Эта страна – один из самых больших и быстрорастущих рынков пестицидов, около 25 % которых составляют фунгициды. Хотя в Бразилии допускается [82] содержание меди в почве на уровне 200 мг/кг, в почве виноградников её уровень

превысил 3000 мг/кг, а в субтропической зоне на юге Бразилии в почве 120-летних виноградников достиг величины 4500 мг/кг по валовому содержанию и 1400 мг/кг [82] по содержанию подвижных форм.

Исследования почв российских виноградников показали, что длительное использование фунгицидов на основе меди также приводит к её накоплению в почве и превышению допустимых уровней. Например, ещё 15 лет назад повышенное содержание меди в почвах таманской и черноморской зон виноградарства с превышением нормативных показателей содержания её подвижных форм [82] наблюдалось [82] на 70% обследованных площадей [17].

Обработка пестицидами напрямую влияет на химический состав ягод и безопасность конечной продукции [140]. Содержание остатков пестицидов в продукции зависит от состава пестицидов, используемых на винограднике, метода опрыскивания, времени опрыскивания, количества обработок и срока ожидания перед сбором урожая и последним применением. Также значительную роль в кинетическом и динамическом поведении пестицидов играют условия окружающей среды во время обработок, прежде всего солнечный свет, температура и влажность.

К моменту сбора урожая количество остатков пестицидов в ягодах нередко превышает максимально допустимый уровень, установленный национальными и международными нормами [91], что может спровоцировать проблемы со здоровьем у потребителей. Поэтому очень важно нормировать содержание пестицидов и контролировать наличие их остатков в продукции. В ягодах винограда максимально допустимые уровни остаточных количеств пестицидов в основном находятся в диапазоне от 0,01 мг/кг до 5 мг/кг в зависимости от вида пестицида, но в некоторых случаях допускаются более высокие пределы.

Возможность попадания пестицидов в вино существует на всех этапах его производства – дробления, прессования, брожения, фильтрации и стабилизации. При производстве красного вина контакт с виноградной кожицей на стадиях мацерации и брожения может увеличить количество остатков пестицидов в вине [120, 282], которые не всегда удаляются при последующих технологических

операциях. Однако в целом вина содержат более низкие концентрации пестицидов, чем сусло и ягоды винограда [270].

Наличие остаточных количеств пестицидов в урожае также является потенциальным источником энтологических проблем. Так, вследствие присутствия активных компонентов пестицидов в сусле может быть нарушен процесс ферментации, что негативно отразится на качестве и структуре вина. Кроме того, остатки пестицидов могут подавлять активность дрожжей на уровне ферментов и блокировать их клеточные метаболические процессы, что также приводит к проблемным ситуациям на этапе ферментации.

В Европейском союзе нет единого стандарта, который устанавливает допустимые уровни меди в почве, поскольку почвы могут сильно различаться по своим свойствам. Но при проведении региональных исследований за основу берут пороговое значение содержания меди в почве на уровне 100 мг/кг. Считается, что такая величина может быть токсичной для почвенных организмов и растений. Аналогичный предел [82] валового содержания меди в почве установлен Национальным советом по охране окружающей среды Австралии [82].

В России при установлении показателя ориентировочно-допустимой концентрации меди в почве ориентируются на её гранулометрический состав и уровень рН. Для песчаных и супесчаных почв он [82] составляет 33 мг/кг, для кислых суглинистых и глинистых – 66 мг/кг, а для близких к нейтральным и нейтральных суглинистых и глинистых почв – 132 мг/кг [82].

1.7 Экологическая оценка накопления и миграции меди в почвах ампелоценозов

Медь в почве может быть как микроэлементом питания, так и токсичным элементом. Она попадает в верхние горизонты почвы после обработки пестицидами – при прямом внесении, с аэрозолями или опадом, где накапливается из-за ограниченной подвижности [82, 127, 201, 346]. Есть и другие причины появления меди в почвах ампелоэкосистем. Использование загрязнённой воды для орошения, а также внесение органических и минеральных удобрений могут

привести к накоплению в почве не только меди, но и других потенциально токсичных элементов. Сами медьсодержащие фунгициды способны выступить источниками загрязнения не только медью, но и другими тяжелыми металлами. Например, в состав сульфата меди, используемого для приготовления бордоской смеси, могут входить значительные количества цинка, свинца и кадмия [75, 327, 358].

В составе различных почвенных соединений медь довольно стабильна и активно участвует в круговороте веществ, перемещаясь из почвы в воды, растения и другие организмы и негативно влияя на биоразнообразие. Избыток меди в почве из-за производимого фунгицидного и бактерицидного эффекта нарушает разложение органических веществ [82], в результате чего может наблюдаться накопление органического углерода [126].

На биодоступность меди влияют физико-химические свойства почвы, в особенности кислотность (рН), содержание органического вещества, оксидов железа, марганца и алюминия, глинистых минералов [82], содержание влаги и аэрация почвы. Так, выявлена отрицательная корреляция между содержанием меди и рН [337], общим содержанием кальция [183]. Отмечено, что биодоступность уменьшается с увеличением емкости катионного обмена и содержания органического вещества в почве. Биодоступность меди в почве контролируется процессами осаждения, растворения, адсорбции, десорбции, окислительно-восстановительными условиями, в результате чего происходит обратимый обмен катионом меди между почвенным раствором и твердой фазой почвы. В последней медь больше всего связана с гидроксидами марганца, органическим веществом, гидроксидами железа и глинистыми минералами [82, 110].

Растворимость соединений меди, в том числе в почвах виноградников, зависит от уровня рН. В кислых почвах, сформированных на магматических породах, медь перемещается по профилю почвы и может загрязнять грунтовые воды. Из-за сильных сорбционных и комплексообразующих свойств медь малоподвижна в нейтральных и щелочных почвах, на которых, как правило [82, 156], размещают виноградники. Поэтому нередко при проведении экологического

мониторинга ампелоценозов признаки токсичности меди ни для растений, ни для микроорганизмов и беспозвоночных не выявляются [305]. Однако есть сведения, что при рН больше 7,5 подвижность меди может вновь возрасти из-за растворения органических веществ почвы [82], в состав комплексов с которыми входила медь. Например, исследования почв виноградников Пиренейского полуострова показали, что в диапазоне рН от 7,62 до 8,42 происходило одновременное высвобождение меди и растворимого органического вещества во время [82] дождей [170]. Установлено, что медь попадала в донные отложения водотока рядом с виноградником только при высоком содержании растворённого органического вещества [82] и железа в почве, а применяемые агротехнические методы почти не влияли на этот процесс.

В различных литературных источниках сведения об уровне биодоступности меди довольно противоречивы, что, скорее всего, связано с очень контрастными почвенными условиями, а именно разным содержанием в них [82] связывающих агентов (органическое вещество, оксиды и гидроксиды железа, алюминия и марганца, карбонаты, рН, ёмкость катионного обмена [82] и т.д.). Например, в почвах 170 виноградников Испании, которые обрабатывали МСС, с уровнем рН от 4,9 до 6,6, около 48 % меди оказалось связано с органическим веществом, а на [82] виноградниках в земле Рейнланд-Пфальц в Германии от 42 до 82 % меди обнаружили в составе органического вещества. Исследования почв с нейтральной и щелочной реакцией показали, что в них преобладает остаточная фракция меди: например, в почве с уровнем рН от 6,8 до 7,9 в Западном Иране около 56 % меди выявили в составе остаточной фракции, примерно 20 % металла было связано с органическим веществом [82].

Фитотоксичность меди и её накопление в почве зависят от гранулометрического состава. Так, при рН меньше 6,0 на супесчаной и суглинистой почве токсичность меди проявлялась при её содержании, соответственно, 25 мг/кг и более 100 мг/кг [340]. В лёгкой по гранулометрическому составу почве медь интенсивнее перемещалась в нижние горизонты. В почвах с более тяжёлым составом больше меди накапливается из-за высокой ёмкости катионного обмена.

Климатические условия региона косвенно влияют на накопление меди в почве посредством изменения частоты обработок медьсодержащими препаратами [82, 115, 134]. Исследования винодельческих регионов средиземноморской Европы показали [82], что в условиях засушливого климата обработки содержащими медь фунгицидами проводятся реже, так как возбудители болезней растений менее активны. Например, в Греции содержание меди в почвах виноградников было ниже, чем на севере Франции [82], в связи с чем авторы пришли к выводу об относительно безопасном применении медьсодержащих препаратов в данном регионе даже на органических виноградниках [82, 339]. Во влажных районах центрального Тайваня за 40 лет экологические риски виноградарства, связанные с накоплением меди в почве [82], существенно возросли вследствие необходимости более частых противогрибковых обработок лоз [217].

Очевидно, что глобальные климатические изменения повлияют на эффективность традиционных методов защиты виноградных растений, которые в текущих условиях не всегда работают эффективно. Так, модель распространения ложной мучнистой росы, созданная с учётом прогнозов климатических изменений и требований возбудителя этого заболевания к температуре и влажности, предполагает увеличение случаев заражения на 5–20% по всей Европе к 2030 году [111].

Изменение количества и интенсивности осадков в винодельческих регионах может привести к вынужденному усилению мер по борьбе с эпифитотиями. В Венгрии [242] и сербском регионе Фрушка гора [82, 88] уже наблюдается тенденция к уменьшению годового объёма осадков, но увеличению их интенсивности. Предполагается, что ливневый характер осадков станет причиной эрозии почвы на склонах виноградников, неравномерного распределения почв, смыва органических веществ и перемещения питательных элементов и тяжёлых металлов, включая медь. Это может привести к загрязнению прилегающих территорий [8].

Содержание меди в почве связано с возрастом виноградника, так как определяется продолжительностью использования препаратов с медью в составе и

особенностями агротехнологий. Например, накопление меди и цинка в верхнем слое почвы фруктовых садов Канады объяснялось высокой и длительной фунгицидной нагрузкой соединений, содержащих эти металлы [119]. Аналогичный вывод был сделан при сравнении накопления меди в почве 15-летних и 4-летних виноградников в бразильском штате Санта-Катарина. В старых виноградниках большая часть меди находилась в формах, которые более всего доступны для растений. При этом доля элемента в остаточной, недоступной для растений фракции на глубине от 0 до 20 см [82] уменьшалась. Следовательно [82], постоянный экотоксикологический контроль необходим в винодельческих хозяйствах, существующих более 40 лет, а также там, где виноградники были разбиты на месте бывших фруктовых садов [82, 263].

Исследования старых ампелоценозов довольно редки и представляют большой научный интерес. Так, на примере лоз возрастом более 100 лет были выявлены признаки фитотоксичности меди, которые заключались в морфологических изменениях корней (уменьшении корневого чехлика, образовании боковых корней рядом с верхушкой корня, уменьшении длины и диаметра корня, разрывах эпидермиса) [214]. Корни молодых растений удерживали большую часть поглощённой меди, не давая ей попасть в надземную часть [192, 330], но у старых виноградников эффективность этого механизма [82] может быть снижена, что подтверждают данные о накоплении избытка меди в листьях и ягодах винограда, вине и особенно виноградном соке [82, 192].

Физико-химические характеристики меди, попадающей в почву при использовании разных типов медьсодержащих средств, различаются. Например, оксихлорид меди делает медь более доступной для растений, чем бордоская жидкость [212, 347].

В научных работах по виноградарству активно обсуждается необходимость механической обработки междурядий. Сторонники системы чёрного пара считают, что она уменьшает конкуренцию культурных и сорных растений за воду [82], улучшает проникновение и сохранение влаги в почве, упрощает контроль над распространением возбудителей болезней и вредителей [82]. Противники этой

системы ссылаются на исследования, подтверждающие негативное влияние вспашки и культивации на почвенную фауну [318], микробиологическую активность [256] и уровень плодородия почвы [144, 194], что снижает устойчивость ампелозкоосистем, необходимую для длительного выращивания винограда.

Влияние растительности в междурядьях виноградников на концентрацию, изменение и перемещение пестицидов в почве ампелоценозов происходит напрямую и опосредованно. Корни растений укрепляют почву, предотвращая сток по склону. Хотя медь имеет ограниченную подвижность в почве и склонность к накоплению в верхних слоях, усиление эрозионных процессов может привести к её перемещению в поверхностные и подземные воды, оказывая воздействие на экологическое состояние соседних водных экосистем. В исследовании [82, 194] выяснили, что с участков под виноградниками во время поверхностного стока вместе с частицами почвы выносилось более 95% общего количества меди и цинка, особенно в годы с обильными осадками [82]. Уплотнение почвы в междурядьях из-за движения тракторов усиливало поверхностный сток и эрозию почвы [98].

Вследствие объективных ограничений на применение химических средств для питания и защиты растений в органическом виноградарстве логично было бы предположить, что избыточное накопление меди в почве не представляет проблемы для органических [82] хозяйств. И действительно, есть свидетельства того, что почвы органических виноградников более экологически благополучны по сравнению с традиционными [82, 139, 257]. Однако необходимо отметить, что медь- и серосодержащие фунгициды являются практически единственными разрешёнными и пока незаменимыми в большинстве стран мира и России средствами защиты растений в органическом сельском хозяйстве, в том числе виноградарстве. Как следствие, только в 12 европейских странах используют примерно 3258 т в пересчете на металлическую медь в год в сфере органического сельского хозяйства, из них около 30 % (990 т) приходится на систему защиты виноградной лозы [82]. Таким образом, почвы органических хозяйств не должны выпадать из системы экологического мониторинга, и для них проблема избытка меди в почве не менее актуальна, чем для традиционных винодельческих хозяйств.

Долговременное использование медьсодержащих средств в почве виноградников может привести к накоплению меди не только в компонентах агроэкосистем, но и её распространению на прилегающие территории. На это влияют специфические почвенно-климатические условия территорий виноградников и системы управления ими. Вероятность и сезонное распределение ливневых осадков, особенности рельефа, длительность выращивания винограда, структура почв, содержание органического вещества, ориентация рядов лоз относительно склона, наличие растений в междурядьях и интенсивность обработки почвы – все эти факторы существенно влияют на развитие эрозионных процессов [82]. А поскольку виноградники часто располагаются на склонах, такие негативные явления в ампелоценозах происходят чаще, чем в других экосистемах [82].

Миграцию меди вниз и в стороны по склону ограничивает её связывание с органическими и неорганическими компонентами почвы. Однако учёные считают этот процесс обезвреживания меди временным, а потому потенциально опасным для окружающей среды. Изменение химизма среды и внешних факторов может спровоцировать высвобождение меди из состава органических веществ и глинистых минералов почвы, что увеличит количество её доступных для растений форм. Это важно учитывать при оценке экологической ситуации на геохимически подчиненных элементах ландшафта, особенно если там располагаются водные экосистемы [82]. Даже если медь прочно связана в почве в составе неподвижных и малоподвижных соединений, она способна аккумулироваться у подножия склонов и в донных отложениях рек, перемещаясь по склону с поверхностным стоком в составе твёрдых частиц почвы в форме устойчивых химических соединений [194, 332].

В научной литературе приведены довольно противоречивые данные о влиянии избытка меди на биологическую активность почв виноградников и развитие лозы. Одни авторы не обнаруживают негативных эффектов для почвенных микроорганизмов [306], а другие указывают на снижение микробиологической активности почвы из-за длительного применения медьсодержащих фунгицидов [82, 156]. В то же время борьба с грибковыми

заболеваниями растений может негативно сказаться на жизнедеятельности полезных почвенных микроорганизмов, например, сапротрофных бактерий [296]. Исследования показали [213, 354], что в условиях избыточного количества меди в почве снижалось содержание углерода микробной биомассы [226], базальное дыхание [301] и изменялся метаболический коэффициент [254], подавлялась активность микроорганизмов, изменялась структура сообществ эдафона [348]. Ухудшение состояния почвенного микробиома под воздействием фунгицидов может снизить биоразнообразие почв и дать преимущество фитопатогенам.

С другой стороны, микроорганизмы выработали механизмы защиты от стресса, вызванного тяжёлыми металлами [341, 360]. Некоторые грибы устойчивы к меди и способны расти при токсичных для других видов уровнях ее концентрации [158]. Это может быть связано со способностью грибов мобилизовать, изолировать или преобразовывать ионы металлов [157, 159], влияя на их биогеохимическую активность.

В органических и биодинамических хозяйствах ферментативная активность почвы выше, чем в традиционных хозяйствах с интегрированной системой защиты растений [237]. Применение органических удобрений и использование покровных культур в междурядьях [145] способствуют увеличению активности почвенных ферментов.

Избыток меди в почве может оказать фитотоксическое действие и на растения винограда, что проявляется в утолщении верхушки корня, увеличении количества боковых корней, снижении плотности корневых волосков [84] и плазмолиз в эпидермисе некоторых клеток. Избыточное количество меди в побегах растения может снизить концентрацию фотосинтетических пигментов, скорость фиксации углерода и усилить окислительный стресс на клеточном уровне [116], что ведёт к замедлению фотосинтеза, изменению оптимального соотношения питательных веществ вследствие ограничения их поглощения лозами и уменьшению темпов роста [73], особенно молодых насаждений, высаженных в почву с высоким содержанием меди [117, 127].

1.8 Особенности проведения экологического мониторинга почв ампелоценозов

Виноградники являются специфическим объектом экологических исследований. Сложность их изучения определяется многокомпонентной геохимической структурой агроландшафтов под виноградниками, повышенной неоднородностью их почвенного покрова, разнонаправленным влиянием комплекса внешних региональных и локальных факторов на процессы в базовых компонентах данного типа агроэкосистем.

Существенно усложняют сравнительный анализ экологического состояния ампелоценозов и различные организационно-правовые формы виноградарских хозяйств. С одной стороны, это могут быть небольшие, принадлежащие частным винодельням участки различной конфигурации, соседствующие друг с другом или разделенные зелеными изгородями, плодовыми насаждениями или луговыми фитоценозами, в целом придающие ландшафту специфический мозаичный рисунок. С другой стороны, так называемые промышленные виноградники, которыми владеют крупные винодельческие предприятия, как правило, имеют правильную форму и могут занимать обширные территории.

Экономическая и организационно-правовая форма винодельческого предприятия в контексте проведения экологического мониторинга почв влияет прежде всего на интенсивность применяемых в хозяйстве агротехнологий выращивания винограда и их системность. Под последней подразумевается следование при закладке и эксплуатации виноградников региональным технологическим картам, разработанным для богарных, орошаемых, равнинных участков и склонов определенного региона возделывания.

С экологических позиций виноградники выделяются из всех других культур повышенной интенсивностью использования сельскохозяйственной техники и агрохимикатов. Вся сельскохозяйственная деятельность связана с экологическими рисками и истощением природных ресурсов, но в плантационно-садовых агроэкосистемах, к которым относятся виноградники, их проявление максимально [232, 291].

К факторам формирования экологических рисков в ампелоценозах можно отнести следующие: многолетняя бессменная монокультура, расположение на склоновых элементах рельефа, подверженность культуры атакам со стороны патогенов и насекомых-вредителей, применение интенсивных агротехнических приемов с использованием механизации, глобальные изменения климата. Каждый из этих факторов имеет негативные последствия для ампелоэкосистем и сопредельных ландшафтов, которые в целом сводятся к физической, химической и биологической деградации почвенного покрова, развитию интенсивных эрозионных процессов и снижению запасов продуктивной влаги, загрязнению компонентов ампелоэкосистем и сопредельных сред остаточными количествами пестицидов, их метаболитами и тяжелыми металлами, снижению биоразнообразия.

Правильно спланированный и организованный экологический мониторинг почв ампелоценозов должен обеспечить выявление различных видов неблагоприятных изменений состояния почв в результате агрогенной и антропогенной деятельности с учетом специфических природных условий, усиливающих негативные последствия данных воздействий. Агротехнические приемы приводят к повышенной минерализации органического вещества в почвах виноградников, снижению почвенного плодородия, развитию эрозионных процессов, особенно на склоновых формах рельефа, уплотнению почвы [20] и снижению ее биологической активности. В связи с этим обязательными индикаторами почвенно-экологического мониторинга в ампелоценозах являются показатели почвенного плодородия. Много полезной информации с целью раннего выявления факторов риска для ампелоэкосистем можно получить и при анализе состояния микробного сообщества почвы [137].

Почвенная микробиота более восприимчива к металлам, чем растения [209]. Биологическая активность сосредоточена в верхнем слое почвы глубиной от нескольких до 30 см. Несмотря на свой небольшой объём, деятельность микроорганизмов играет ключевую роль в круговороте углерода и питательных веществ [279], улучшают структуру почвы и способствуют «цементированию» агрономически ценных почвенных агрегатов, улучшают водоудерживающую

способность почв и т.д. [349].

Тесная связь биологической активности почвы с её физико-химическими свойствами и плодородием обуславливает использование данного критерия при проведении экологического мониторинга почв. Микроорганизмы быстро реагируют на изменения в окружающей среде благодаря высокому соотношению поверхности к объёму, что делает их хорошим индикатором экологического состояния почв [207]. Иногда изменения в количестве микроорганизмов или их активности происходят до того, как становятся заметными физические и химические изменения почв. Это делает микроорганизмы ценным инструментом для диагностики ранних признаков деградации почв [278]. Исследования Голландской программы мониторинга почв показали, что микробные индикаторы чувствительны даже к разным видам обработки почвы [312]. Это также было продемонстрировано для показателей микробной биомассы и базального дыхания в региональном масштабе на территории США [112]. Однако биологические и микробные показатели мало представлены в государственных системах мониторинга почв. Хотя исследования в этом направлении ведутся, до сих пор в Европе измерения, связанные с ранними изменениями содержания органического вещества, биологических и микробных признаков, хуже всего отслеживаются на национальном уровне [191]. Цель проекта учёных ЕС COST Action 831 – использовать микроорганизмы как индикатор воздействия на окружающую среду при мониторинге почв.

Микробная биомасса – ключевой параметр мониторинга, отвечающий за круговорот энергии и питательных веществ, а также регулирующий трансформацию органического вещества в почве [173, 336]. Она тесно связана со скоростью разложения и минерализацией азота [122, 196, 323]. Увеличение уровня микробной биомассы способствует улучшению структуры почвы и повышению её устойчивости [152, 323]. Её рекомендуют использовать как показатель содержания в почве органического углерода [122].

Для оценки микробной биомассы в почве применяют прямые (микроскопия, анализ PLFA) и косвенные (CFE/CFI, SIR) методы. Прямые методы дают точные

результаты, но требуют больше времени [284, 362]. Косвенные методы оценки микробной биомассы менее затратны, быстрее и проще в применении, чем прямые. При этом их надёжность документально подтверждена [122].

Оценка дыхания почвы – один из старейших и наиболее широко используемых методов определения микробной активности [74, 364]. На интенсивность дыхания влияют температура, влажность, структура почвы, доступность питательных веществ [74]. Чтобы минимизировать влияние этих факторов на результат измерений, важно предварительно подготовить почву и стандартизировать её. Полевые измерения интенсивности дыхания проводятся реже из-за чувствительности к внешним условиям, но они позволяют диагностировать тип землепользования [278]. Также измерения дыхания почвы применялись для определения степени токсичности пестицидов и тяжёлых металлов [114].

Микробное дыхание (дыхание почвы) – это поглощение кислорода или выделение углекислого газа в результате жизнедеятельности бактерий, грибов, водорослей и простейших. Оно включает газообмен при аэробном и анаэробном метаболизме. Происходит в процессе разложения органического вещества, например, минерализации пожнивных остатков [102]. В этих процессах участвуют микроорганизмы и корни растений [188]. Базальное дыхание (БД) – это дыхание почвы, определяемое только микробной активностью. Увеличение скорости базального дыхания говорит о благоприятном состоянии почвенного микробиома [74, 364]. Но есть данные, что загрязнение почвы может увеличивать скорость её дыхания по сравнению с оптимальными значениями [74]. Метод субстрат-индуцированного дыхания (СИД) сейчас считается стандартным подходом для определения микробного углерода [122]. Он предполагает измерение дыхания в течение 3–5 часов после внесения легко окисляемого субстрата [77]. Но метод имеет объективные ограничения, например, он не применим к чрезвычайно кислым или сильнощелочным почвам [92] из-за растворения микробного CO_2 в почвенном растворе, что приводит к его недооценке [247, 325].

Микробиом компонентов экосистем в виноградарстве имеет особое

значение. Исследования методом высокопроизводительного секвенирования в винодельческой сфере выявили микробные биогеографические связи в зонах виноградарства. Они помогают оценить влияние методов управления виноградниками и свойств почвы на процесс виноделия и качество получаемой продукции. Микробиом виноградника – уникальный биомаркер, который влияет на качество вина как косвенно (через воздействие на здоровье и функционирование растений винограда), так и прямо, являясь источником автохтонных ферментирующих микроорганизмов. Учитывая вклад микробиоты почв виноградников в круговорот питательных элементов, здоровье растений и производство вина, в исследовании [165] предложен термин «микробный терруар». Предполагается, что микробный терруар может стать основой для будущих биотехнологических разработок, направленных на борьбу с патогенами и повышение устойчивости лоз к заболеваниям. Он также поможет создать биомаркеры для контроля и защиты ключевых факторов винодельческих зон.

Таким образом, в случае, когда объектом экологического мониторинга почв выступает виноградник, залогом успеха становится всесторонний комплексный анализ потенциальных проблемных экологических ситуаций, характерных для ампелоценозов. Он должен включать в себя не только общепринятые агрохимические исследования динамики содержания и запасов гумуса и элементов питания растений и экотоксикологические исследования с выявлением лимитирующих показателей загрязнения почв ампелоценозов различными токсикантами. Методология мониторинга должна быть дополнена:

- элементами эколого-геохимических исследований для оценки рисков миграции загрязняющих веществ в системе «Почва – виноградная лоза – продукция виноградарства и виноделия» [18, 49, 229] в условиях склонового ландшафта, которая подразумевает сопряженный анализ основных компонентов элементарных и каскадных ландшафтно-геохимических систем, изучение миграции в них химических элементов с учетом роли локальных геохимических барьеров;

- показателями биологической активности почвы, которые выступают ранними индикаторами происходящих негативных изменений в ампелоэкоосистеме.

В качестве информативного и полезного инструмента системного анализа проблемных экологических ситуаций выступают экофизиологические индексы, демонстрирующие актуальный статус почвенного микробиома.

Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Экологические особенности объектов исследования

Сравнительная оценка агроэкологического состояния почв виноградников проводилась в четырнадцати винодельческих хозяйствах, расположенных в Севастопольском районе Республики Крым на виноградниках, возделываемых с использованием органических и традиционных систем земледелия, а также на залежи [19] под бывшими виноградниками (рис. 2.1).

Крымский полуостров расположен на крайнем юге Восточно-Европейской равнины в пределах $44^{\circ} 23'$ (мыс Сарыч) и $46^{\circ} 15'$ (Перекопский ров) северной широты и $32^{\circ} 30'$ (мыс Кара-мрун) и $36^{\circ} 40'$ (мыс Фонарь) восточной долготы. Площадь Республики Крым составляет 26 081 кв. км, население – 1 909 499 человек (по состоянию на 2024 год) [27]. Территория полуострова омывается Черным и Азовским морями, протяженность береговой линии составляет 980 км.

В зависимости от рельефа полуостров Крым условно можно разделить на три части, которые значительно отличаются друг от друга: Северо-Крымскую равнину с Тарханкутской возвышенностью (занимает около 70% всей территории), холмистую равнину Керченского полуострова с проявлением грязевого вулканизма и горный Крым с тремя основными грядами – Главной (на юге), Внутренней и Внешней (на севере), разделенных продольными равнинами [21].

Город Севастополь находится на юго-западе Крымского полуострова, на побережье Чёрного моря. Этот город – регион делится на четыре административных района – Балаклавский, Гагаринский, Ленинский и Нахимовский. На территории этих районов располагаются три города – Севастополь, Балаклава и Инкерман, а также один посёлок городского типа – Кача [21].

Общая протяженность границ Севастополя составляет 258 км, из которых 152 км – сухопутные границы и 106 км – морские. Город граничит с Бахчисарайским районом на северо-востоке и с Ялтинским городским советом на юго-востоке. С запада и юга город омывается водами Черного моря [21].

Севастопольский регион расположен на территории горного Крыма, который

тянется вдоль южного побережья полуострова на 180 км с востока на запад и на 50 км с севера на юг [18]. Здесь начинаются Внешняя, Внутренняя и Главная гряды Крымских гор. Внешняя гряда берет свое начало у мыса Фиолент (средняя высота около 300 м) и тянется хребтом Кара-Агач, через Сапун-гору, Федюхины высоты до Мекензиевых гор и Инкерманской возвышенности. Здесь она прерывается долиной реки Бельбек, затем снова появляется на правом берегу реки у села Верхнесадового. Внутренняя гряда тянется от Мекензиевых гор возле поселка Любимовка (высота – 400-500 м) до горы Агармыш [22,27].

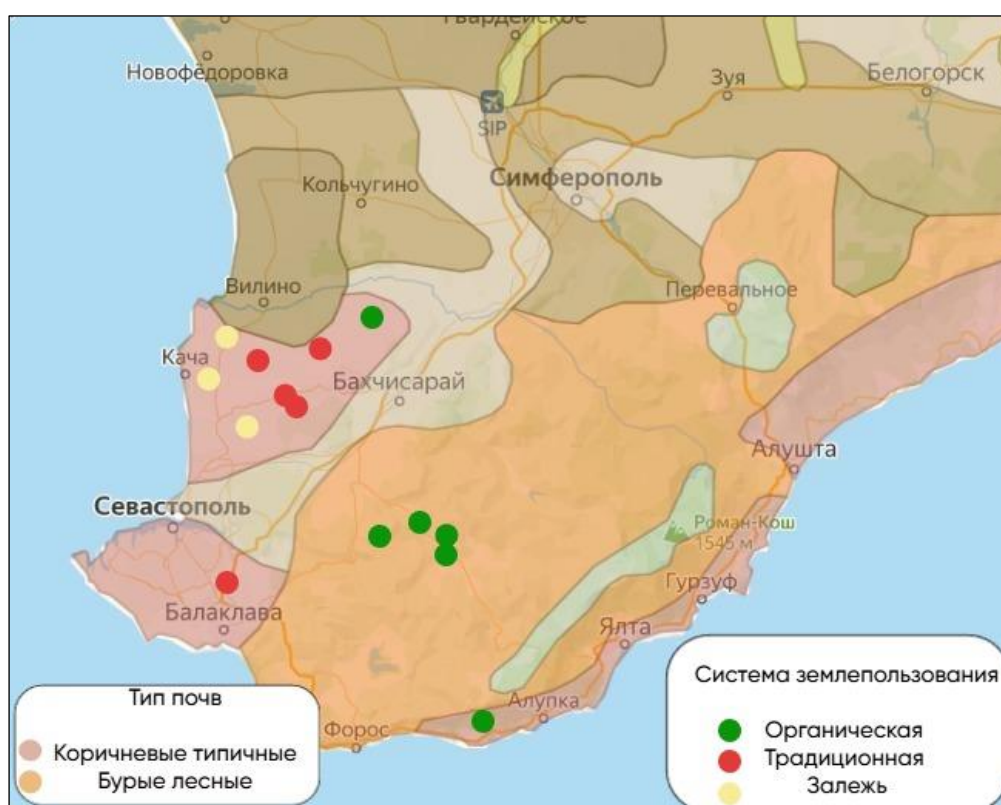


Рис. 2.1 – Расположение изучаемых винодельческих хозяйств на Почвенной карте Крыма в масштабе 1:2 500 000 (Урусевская и др., 2019) (*Информационная система «Почвенно-географическая база данных России» <https://soil-db.ru/map/fridland>*).

Для юго-западного берега Крыма характерен грядово-эрозионный рельеф с его крутыми склонами и эрозионными долинами, в которых накапливаются рыхлые осадочные породы.

Рельеф Крыма играет важную роль в формировании климата региона.

Крымские горы препятствуют проникновению холодных арктических воздушных масс на побережье, что делает его климат более мягким [28]. С другой стороны, теплые и влажные воздушные массы, идущие с юга, легко проникают через горы, обеспечивая теплый и сухой климат внутренних районов. В результате такого географического расположения количество осадков в регионе сильно варьируется – от менее 300 мм в год на западном побережье до более 700 мм на Ай-Петри и до более 800 мм в области Главной гряды. В предгорьях выпадает около 450 мм осадков в год. Самый влажный месяц – декабрь со средним количеством осадков около 42 мм, самый засушливый месяц – июль (около 26 мм осадков) [15].

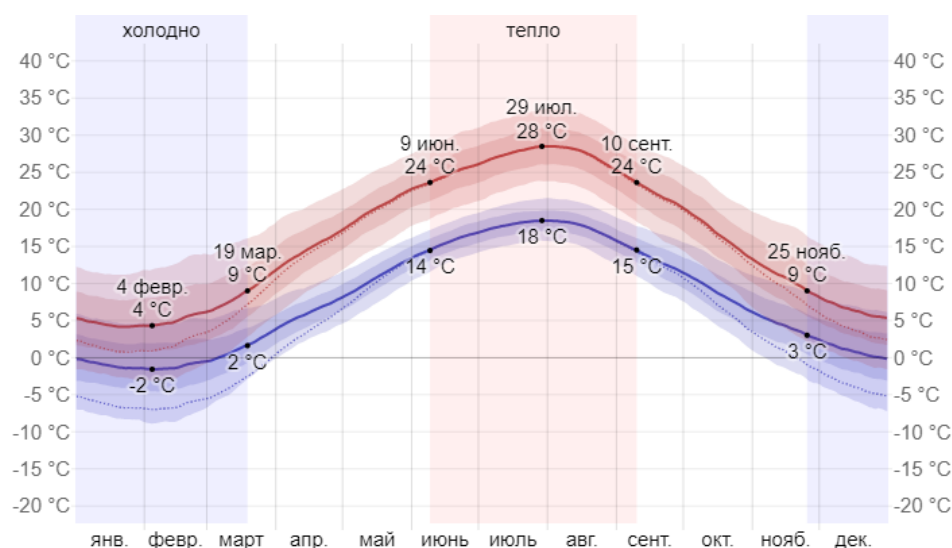


Рисунок 2.2 – Средняя максимальная и минимальная температура в районе Севастополя (*WeatherSpark.com*)

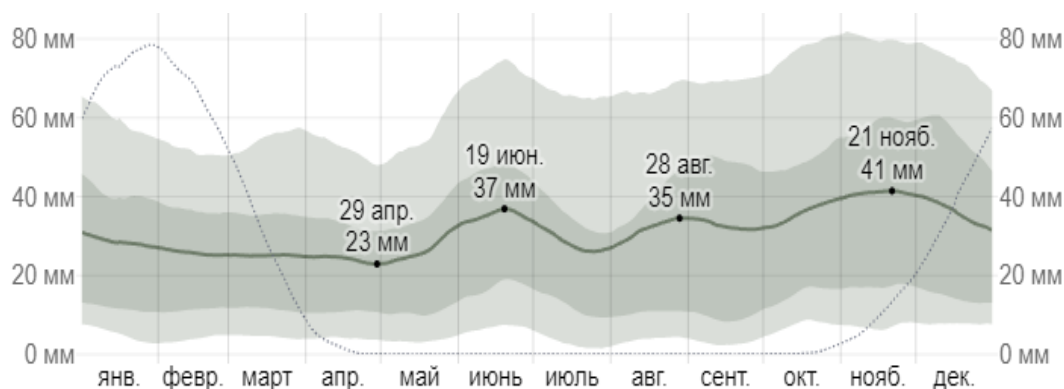


Рисунок 2.3 – Среднемесячное количество осадков и их максимальная суточная интенсивность в районе Севастополя (*WeatherSpark.com*)

Среднее количество дождевых осадков (сплошная линия), с усреднением по скользящему 31-дневному периоду, с диапазонами 25–75 и 10–90 перцентилей. Тонкая пунктирная линия – соответствующее среднее количество снеговых осадков.

Климат региона исследования – умеренно-континентальный предгорный и субтропический средиземноморский прибрежный. Самый холодный месяц – февраль со средней температурой +2,8 °С, самый теплый – июль, со средней температурой воздуха +22,4 °С (рис. 2.2) [15].

Месячные суммы осадков осенне-зимнего периода существенно выше их среднегодовых значений, а весенне-летнего – значительно ниже средних величин (рис. 2.3) [20].

В целом агроклиматический потенциал территории исследования и разнообразие локальных агроклиматических условий благоприятствуют развитию виноградарства и виноделия, поэтому данная отрасль является основным направлением сельскохозяйственного производства в Севастопольском регионе.

Почвы Севастопольского региона отличаются разнообразием, встречаются черноземы предгорные, бурые горные лесные, дерново-карбонатные, горно-луговые черноземовидные, коричневые почвы, большинство из которых пригодны для выращивания различных сельскохозяйственных культур, садов и виноградников, табака, эфиромасличных культур и т. д.

На склонах Внутренней и Внешней гряд Крыма преобладают черноземы карбонатные, которые формируются на элювии и делювии карбонатных пород. Маломощные щебнистые дерново-карбонатные почвы распространены в горном Крыму, где они образуются на маломощных продуктах выветривания плотных известняков, мергелей и других пород. Бурые горные лесные щебнистые почвы формируются под буковыми, дубовыми, смешанными и сосновыми лесами, на продуктах выветривания известняков и глинистых сланцев [22].

В речных долинах на аллювиальных глинистых и суглинистых отложениях, переслаивающихся с галечниками и песками, сформировались аллювиально-луговые и лугово-черноземные почвы [22].

Объектами исследования в настоящей работе выступили коричневые типичные легкоголистые щебнистые почвы (Классификация и диагностика..., 2004; *Naptic cambisols* (WRB, 2006); *Eutric Cambisols* (FAO, 1988)), образовавшиеся в условиях средиземноморского климата на продуктах выветривания известняков,

мергелей, глинистых сланцев и песчаников [22,29]. Коричневые почвы в основном встречаются в восточной части Северного Кавказа. Встречаются они и на южном склоне Большого Кавказа, недалеко от Новороссийска. Эти почвы образуются в нижнем горном поясе под низкорослыми ксерофитными лесами из дуба и грабинника, а также под колючекустарниковыми зарослями в условиях контрастного семиаридного климата. Морфологическое строение профиля – (O) — A — Bm(ca) — BCsa — Csa [35]. Особенностью этих почв является преобладание коричневого цвета в окраске. Под нетолстым слоем подстилки находится тёмно-коричневый с серым оттенком комковато-зернистый гумусово-аккумулятивный горизонт A. За ним следует буро-коричневый уплотнённый метаморфический горизонт Bm, который затем переходит в более светлую карбонатную породу Csa. Реакция на соляную кислоту обычно начинается в нижней части метаморфического горизонта или в переходном к материнской породе слое. Максимальное скопление карбонатов в виде прожилок и крупных мучнистых белоглазок наблюдается в верхней части горизонта Csa. Основными почвообразовательными процессами являются: подстилкообразование, гумусово-аккумулятивный процесс, биогенное и коагуляционное оструктурирование, оглинивание, элювиально-иллювиальное деление карбонатов.

В верхних слоях этих почв под естественной растительностью количество гумуса может достигать 5–7%. Гумусовые вещества проникают на большую глубину: на уровне 1 метра содержание гумуса составляет 0,8–1%. Отношение углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот примерно равно единице, то есть преобладает гуматно-фульватный состав. Преобладают гумусовые кислоты, связанные с кальцием.

В результате выветривания внутри почвы накапливается ил, что приводит к оглиниванию всего почвенного слоя, особенно его средней части. Коричневые почвы отличаются высокой ёмкостью катионного обмена и почти полной насыщенностью поглощающего комплекса основаниями. Также для них характерно накопление несиликатного (подвижного и окристаллизованного) железа, наибольшее количество которого находится в горизонте наибольшего

оглинивания [35]. При этом профиль почвы дифференцируется по текстуре, а не по валовому химическому составу.

2.2 Определение агроклиматических показателей

С целью изучения агроклиматических условий выращивания винограда в Севастопольском районе Республики Крым и выявления лимитирующих продуктивность агроклиматических факторов был использован метод расчета агроклиматических показателей, рекомендованных Руководством Международной организации винограда и вина (OIV) по терруарной специализации виноградарско-винодельческой отрасли на основе почвенных и климатических показателей [147].

Источниками данных для расчета агроклиматических показателей (индексов) являются Ogimet.com, Университет Вайоминга, Институт метеорологии и управления водными ресурсами – Национальный научно-исследовательский институт (IMGW-PIB), Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA) – Лаборатория исследований системы Земля, Отдел глобального мониторинга и Интегрированный почасовой мониторинг поверхности (NOAA ISH). Информационный сервис погоды Ogimet.com (<http://ogimet.com/index.phtml.en>) использует доступные климатические данные из сети (главным образом, от NOAA) и открытое программное обеспечение для их обработки. Ресурс предоставляет данные о текущих погодных условиях. Метеорологические данные были получены путем загрузки почасовых и ежедневных метеорологических данных со станций SYNOP, доступных в коллекции Ogimet.com. Загрузка информации о ближайших к выбранной точке (г. Севастополь) станциях проводилась также с использованием репозитория Ogimet.

Индекс прохладности ночей (Cool Night Index, CI) рассчитывался как средняя минимальная температура воздуха в период созревания винограда (в сентябре) по формуле:

$$CI = \frac{\sum T_{\text{мин}}}{N} \quad (1)$$

где $T_{\text{мин}}$ – минимальная суточная температура за период (например, за месяц)

N – количество дней в периоде.

Градации, по которым оценивался данный показатель, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Классификация терруара по Индексу прохладности ночей (CI) (цит. по Tonietto & Carbonneau, 2004 [334])

Класс	Акроним	Интервал значения, °C
Тёплые ночи	CI ₋₂	>18
Умеренные ночи	CI ₋₁	14-18
Прохладные ночи	CI ₊₁	12-14
Холодные ночи	CI ₊₂	<12

Средняя температура вегетационного периода (Average Growing Season Temperatures, GST) рассчитывалась по формуле:

$$GST = \frac{\sum T_{\text{сут}}}{N} \quad (2)$$

где $\sum T_{\text{сут}}$ – сумма средних суточных температур за вегетационный период, °C;

N — количество дней в вегетационном периоде.

Сумму активных температур (Biologically Effective Growing Degree Days, BEDD или CAT) рассчитывали путём сложения всех среднесуточных температур воздуха, превышающих +10 °C, начиная с даты, когда среднесуточная температура воздуха и почвы установилась выше +10 °C, и до момента полного созревания ягод ($T_{\text{сут}}$) по формуле:

$$BEDD = \sum [T_{\text{сут}} - T_{\text{мин}}] \quad (3)$$

где $T_{\text{сут}}$ – среднесуточная температура воздуха, °C;

$T_{\text{мин}}$ – биологический минимум температуры для растений.

Гелиотермический индекс Хуглина (Huglin Heliothermal Index, HI) рассчитывали как сумму температур, учитывающую влияние полуденных температур, когда фотосинтетическая активность лозы максимальная. Индекс

также учитывает коэффициент длины дня, который зависит от широты. В Северном полушарии рассчитывается для периода с 1 апреля по 30 сентября. Формула для расчета показателя:

$$HI = \sum_{i=1}^n \left[\frac{T_{max} + T_{min}}{2} - 10 \right] * k \quad (4)$$

где T_{max} – максимальная дневная температура,

T_{min} – минимальная ночная температура,

10 – базовая температура, ниже которой виноград не развивается,

k – коэффициент, учитывающий продолжительность дня (обычно равен 1 для широт ниже 45° и 1,06 для широт выше 45°),

n – количество дней в вегетационном периоде.

Гелиотермический индекс Хуглина интерпретировали согласно таблице 2.2 [334]

Таблица 2.2 – Классификация винодельческих регионов по индексу Хуглина (HI)

Класс климата	Акроним	Интервал значения, °С	Сорт винограда
Очень прохладный	HI-3	<1500	Только раносозревающие сорта, преимущественно белые, такие как Muller-Thurgau, Pinot Blanc, Gamay, Gewurztraminer
Прохладный	HI-2	1500–1800	Riesling, Pinot Noir, Chardonnay, Merlot, Cabernet Franc
Умеренный	HI-1	1800–2100	Cabernet-Sauvignon, Ugni Blanc, Syrah
Умеренно-тёплый	HI+1	2100–2400	Grenache, Mourvedre, Carignan
Тёплый	HI+2	2400–3000	Потенциал, превышающий гелиотермические потребности созревания винограда даже поздних сортов (но не исключён риск стресса)
Очень тёплый	HI+3	>3000	Гелиотермические ограничения для созревания винограда отсутствуют

Тепловой индекс Уинклера (Winkler Thermal Index, WI или Growing Degree Days, GDD) рассчитывали как сумму среднесуточных температур выше 10°C (базовой температуры, при которой начинается активный рост винограда) за период вегетации (обычно с 1 апреля по 31 октября в Северном полушарии):

$$WI = \sum_{i=1}^n [T_{mean} - 10] \quad (5)$$

где T_{mean} – среднесуточная температура,

10 – базовая температура (ниже которой виноград не развивается),

n – количество дней в вегетационном периоде.

Рассчитанные по формуле показатели индекса интерпретировали в соответствии с таблицей 2.3 [76].

Таблица 2.3 – Классификация винодельческих регионов по градусо-дням Уинклера (GDD) и средней максимальной температуре июля (СТИ)

Класс	GDD, °C (Индекс Уинклера)	СТИ, °C	Сорт винограда	Винодельческие регионы
Регион I	<1390	<19,8	Pinot Noir, Riesling, Chardonnay, Gewurztraminer, Pinot Grigio, Sauvignon Blanc	Chablis, Friuli, Champagne, Marlborough, Tasmania
Регион II	1391 – 1670	19,9–21,3	Cabernet Sauvignon, Chardonnay, Merlot, Semillon, Syrah	Bordeaux, Alsace, Yarra Valley, Frankland River
Регион III	1671 – 1940	21,4–22,8	Grenache, Barbera, Tempranillo, Syrah	Clare Valley, Lower Hunter, Rioja, Piemonte
Регион IV	1941 – 2220	22,9–24,3	Carignan, Cinsault, Mourvedre, Tempranillo	McLaren Vale, Upper Hunter, Langhorne Creek, MontPELLIER
Регион V	>2220	>24,3	Primitivo, Nero d'Avola, Palomino, Fiano	Jerez, Greek Islands, Sicilia, Sardinia

В дополнение к агроэкологическим индексам, рекомендованным OIV, нами были рассчитаны следующие показатели:

Гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) рассчитывали по формуле:

$$\text{ГТК} = \frac{\sum P}{\sum T * 10} \quad (6)$$

где $\sum P$ — сумма осадков за период (обычно за месяц или вегетационный период), мм, $\sum T$ — сумма средних суточных температур за тот же период, °С.

В соответствии с классификацией Г.Т. Селянинова, по показателю ГТК выделяются следующие зоны: ГТК < 0,4 – очень сильная засуха; $0,4 \leq \text{ГТК} < 0,5$ – сильная засуха; $0,5 \leq \text{ГТК} < 0,7$ – средне засушливо; $0,7 \leq \text{ГТК} \leq 1,0$ – недостаточно влажно; $1,0 \leq \text{ГТК} \leq 2,0$ – достаточно влажно; ГТК > 2,0 – переувлажнено [35, 61].

Коэффициент увлажнения (КУ) рассчитывали как отношение годового количества осадков к годовой величине испаряемости по формуле:

$$\text{КУ} = \frac{P}{E} \quad (7)$$

где P – среднегодовое количество осадков, мм;

величина испаряемости (количество влаги, которое может испариться с водной поверхности при данной температуре) [20], мм.

Для расчета испаряемости (E , мм/месяц) использовалась эмпирическая формула Иванова [35, 56]:

$$E = 0,0018(T + 25)^2 \cdot (100 - r) \quad (8)$$

T – средняя месячная температура воздуха, °С;

r – средняя месячная относительная влажность воздуха, %.

При КУ > 1 – увлажнение избыточное, КУ \approx 1 – увлажнение достаточное,

$0,3 < \text{КУ} < 1$ – увлажнение недостаточное, КУ < 0,3 – скудное увлажнение.

2.3 Методы почвенных исследований

Для агроэкологической оценки пространственной изменчивости почв исследуемых ампелоценозов были использованы физико-химические, эколого-геохимические и микробиологические методы исследований. Применение эколого-геохимических методов исследований при проведении агроэкологического

мониторинга почв ампелоценозов обусловлен их частым расположением в горных ландшафтах, что позволяет объективно выявлять качественные [10] и количественные характеристики почвенных миграционных процессов, в том числе с участием экотоксикантов, и связанные с этим экологические риски для сопредельных сред и производства экологически безопасной продукции виноградарства и виноделия [10].

2.3.1 Отбор проб почвы и пробоподготовка

Для отбора проб почвы были выбраны представительные по ландшафтным условиям участки в 14 винодельческих хозяйствах Севастопольского района Республики Крым. Пробоотбор проводили в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017. Для получения обобщенной картины распределения почвенных свойств по каждому хозяйству использовался так называемый метод «конверта». Этот метод предполагает отбор пяти проб с участка размером 5 x 5 м (по углам и в середине). Из каждой точки отбирали пробу массой 0,5 кг. Затем пять отдельных образцов объединяли, перемешивали и из общей массы выделяли один объединенный образец массой 1,0 кг. Отбор почвенных образцов производили почвенным буром [10] на глубину 0–10 и 10–20 см. Образцы почвы помещали в чистые полиэтиленовые пакеты, снабжали этикеткой и транспортировали в лабораторию.

Пробоподготовку почвенных проб выполняли в соответствии с ГОСТ ISO 11464-2015 [10]. После высушивания почву освобождали от корней растений, камней и других включений, перетирали в агатовой ступке и просеивали через сито с размером ячеек 1 мм.

2.3.2 Физико-химические методы исследований

Измерение водородного показателя рН почвы проводили по ГОСТ 26423–85 «Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки» потенциометрическим методом с [21]использованием рН-метра Mettler Toledo SevenCompact s220.

Содержание органического вещества в почве определяли по методу Тюрина в модификации ЦИНАО по ГОСТ 26213–91 «Почвы. Методы определения органического вещества» фотометрическим методом с использованием

спектрофотометра Leki UV2107.

Содержание подвижной серы в почве определяли по ГОСТ 26490–85 «Определение подвижной серы по методу ЦИНАО» турбидиметрическим методом с использованием спектрофотометра Leki UV2107.

Содержание подвижных форм фосфора и калия в почве определяли по ГОСТ 26205–91 «Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО» фотометрическим методом с использованием спектрофотометра Leki UV2107 и пламенного фотометра ФПА-2-01 [15].

Валовое содержание тяжелых металлов в почве определяли эмиссионным методом спектрального анализа на оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 5110 ICP-OES и абсорбционным методом на атомно-абсорбционном спектрофотометре Agilent 240FS Series AA в соответствии с М-МВИ-80-2008 «Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложений методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии» (1М HNO₃ вытяжка). Пробоподготовку почвенных проб выполняли [8] с использованием системы пробоподготовки Milestone ETHOS UP.

Определение подвижных форм тяжелых металлов выполняли атомно-абсорбционным методом на атомно-абсорбционном спектрофотометре Agilent 240FS Series AA по РД 52.18.289–90 «Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом» с использованием ацетатно-аммонийного буфера с pH 4,8 [15].

Определение гранулометрического состава проводили ареометрическим методом с использованием ареометра для грунта (паспорт ГФ 2.843.012 ПС) путем измерения плотности суспензии ареометром в процессе ее отстаивания (ГОСТ 12536-2014 «Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава).

Измерения физико-химических показателей проводили в трехкратной повторности.

2.3.3 Микробиологические методы исследований

Субстрат-индуцированное дыхание (СИД) определяли путем измерения начального максимального выделения CO_2 из почвы, обогащенной глюкозой, после ее инкубации на протяжении не более 6 часов [7, 52, 77]. За этот короткий период времени в почве происходит окисление или соокисление глюкозы микроорганизмами. Рост микроорганизмов на глюкозе при этом исключается [39].

Перед измерением дыхания образцы почвы (массой 0,3–0,5 кг) инкубировали при 55% от полной влагоемкости в течение 7 суток при температуре 22 °С.

Пробу почвы массой 2 г помещали во флакон объемом 15 мл, добавляли раствор глюкозы из расчета 0,1 мл на 1 г сухой почвы и герметично закрывали резиновой пробкой. Почву, обогащенную глюкозой, инкубировали в течение 4 часов при температуре 22 °С, после чего из флакона шприцем отбирали пробу воздуха и вводили ее в газовый хроматограф «Хроматэк-Кристалл 5000.1» с пламенно-ионизационным и электронно-захватным детектором (фирма «Хроматэк», г. Йошкар-Ола, Россия). Скорость СИД выражали в мкл $\text{CO}_2/\text{г}$ почвы/час [39].

Величину СИД использовали для расчета содержания углерода микробной биомассы в почве (Смик) и рассчитывали по формуле [77]:

$$\text{Смик (мкг С/г почвы)} = \text{СИД} \times 40,04 + 0,37 \quad (9)$$

Скорость базального (микробного) дыхания почвы (БД) измеряли в небогатенных (исходных) образцах почвы массой 2 г, которые инкубировали в течение 24 часов при температуре 22 °С [39]. Определение БД проводили по методике SN NS-EN ISO 16072:2011 Soil quality - Laboratory methods for determination of microbial soil respiration (ISO 16072:2002) [Качество почвы - Лабораторные методы для определения микробного дыхания почвы (ISO 16072:2002)] [20]. аналогично СИД, но вместо раствора глюкозы в почву добавляли дистиллированную воду. Скорость базального дыхания выражали в мкг $\text{CO}_2\text{-C /г}$ почвы/час.

Измерения БД и СИД проводили в пятикратной повторности.

Для определения экофизиологического статуса почвенного микробиома использовали следующие индексы:

1. Удельное дыхание микробной биомассы, или микробный метаболический коэффициент (qCO_2) рассчитывали по формуле:

$$qCO_2 \text{ (мкг } CO_2\text{-C/мг } S_{\text{мик}}\text{/час)} = \text{БД} / S_{\text{мик}} \quad (10)$$

2. Долю углерода микробной биомассы (%) в общем содержании органического углерода почвы рассчитывали как отношение содержания углерода микробной биомассы ($S_{\text{мик}}$) [156] к общему содержанию органического углерода в почве ($S_{\text{орг}}$) [89]. Отношение $S_{\text{мик}}/S_{\text{орг}}$ служит индикатором доступности органического углерода почвы [6].

3. Эффективность использования органического вещества микроорганизмами оценивали как отношение микробного метаболического коэффициента qCO_2 к содержанию органического углерода $S_{\text{орг}}$ и выражали в мкг $CO_2\text{-C/мг } S_{\text{мик}}\text{/час/ г } S_{\text{орг}}\text{/г}$ почвы.

2.4 Эколого-геохимические методы исследований

С целью изучения накопления и миграционных потоков вещества по геохимическим сопряжениям в условиях комбинаторного действия природных и агрогенных факторов [10] были исследованы почвы двух разновозрастных ампелоценозов, расположенных на склонах различной морфологии. Особенности применяемых в данных ампелоценозах агротехнологий и морфологическая характеристика склонов приведены в таблице 2.4.

Отбор почвенных образцов на каждом склоне проводили по приведенной выше схеме в пределах трех участков, расположенных в автономном (А), трансэлювиальном (ТЭ) и трансэлювиально-аккумулятивном (ТЭА) элементах ландшафта [10].

В основе исследования миграционных путей перемещения тяжелых металлов по склонам лежало учение об элементарных геохимических ландшафтах в представлении Б.Б. Польшова (1956), развитое в дальнейшем А.И. Перельманом (1975) и М.А. Глазовской (1988) [24, 56, 57]. Согласно их представлениям, характер

связей между элементарными геохимическими ландшафтами, входящими в геохимическое сопряжение, отражается на перераспределении химических элементов и определяет их накопление или рассеивание. Соответственно, под латеральной миграцией понимаются процессы перемещения веществ по земной поверхности от автономного элементарного ландшафта к подчиненному [80]. В качестве основного критерия выделения элементарных ландшафтов используются формы (элементы) рельефа.

Таблица 2.4 – Особенности агротехнологий и морфологическая характеристика склонов под виноградниками в Севастопольском районе Республики Крым

Элемент агротехнологий и рельеф склонов	Склон 1	Склон 2
Система ведения куста	Двуплечий горизонтальный кордон	Гюйо одноплечий
Сорт винограда	Мускат Италия	Пино Нуар
Урожайность	45 ц/га	60 ц/га
Химический способ защиты	Применяется	
Экспозиция, форма склона, протяженность	Южная, пологая прямая, 120 м	Северо-восточная, вогнутая, 650 м
Длительность выращивания	С 1985 года	С 2019 года
Морфология склона А – автономный элемент ландшафта ТЭ – трансэлювиальный элемент ландшафта ТЭА – трансэлювиально–аккумулятивный элемент ландшафта		

Количественную оценку субгоризонтальной пространственной неоднородности почв по содержанию тяжелых металлов проводили на основе сравнения значений коэффициента латеральной дифференциации (L) в почве

геохимически подчиненных элементарных геохимических ландшафтов (трансэлювиальных и трансаккумулятивных) и автономной (элювиальной) части [1]. Данный коэффициент характеризует латеральную миграцию химических веществ в почвах, связанных едиными потоками влаги, которая перемещается по рельефу сверху вниз под действием силы тяжести. Коэффициент латеральной дифференциации L тяжелых металлов в почве сопряженных элементов трансэлювиального геохимического ландшафта определяли по формуле [10]:

$$L = \frac{L_{x(\text{подч.})}}{L_{x(\text{авт.})}} \quad (11)$$

где $L_{x(\text{подч.})}$ – концентрация тяжелых металлов в почве геохимически подчиненного элементарного геохимического ландшафта (трансэлювиального или трансэлювиально-аккумулятивного);

$L_{x(\text{авт.})}$ – концентрация тяжелых металлов в почве автономного (элювиального) элементарного геохимического ландшафта [10].

При анализе латеральной миграции тяжелых металлов по склону использовали следующие диапазоны значений коэффициента латеральной дифференциации L : более 1,7 – высокое накопление элемента; 1,1–1,6 – накопление средней силы; 0,6–0,9 – незначительный вынос элементов; менее 0,5 – интенсивный вынос [1, 10].

Для оценки процессов концентрации или рассеяния тяжелых металлов в почве изучаемых ампелозкосистем рассчитывали кларки концентрации и кларки рассеяния, характеризующие распространённость металлов в почве относительно их содержания в литосфере.

Кларк концентрации определяли как отношение содержания металла в почве к его кларку в литосфере. Кларк рассеяния – показатель, обратный кларку концентрации. Для расчета кларков концентрации и рассеяния использовали следующие значения кларков литосферы (мг/кг): для меди – 27 [190], цинка – 75 [25], марганца – 770 [25], кобальта – 15 [21, 190]. Данные значения кларков рекомендованы Касимовым и Власовым (2015) для использования в качестве эталонов при эколого-геохимических исследованиях [43]. Кроме этого, для оценки

уровня накопления тяжелых металлов в почве с учетом региональных геохимических особенностей территории исследования, были выполнены расчеты кларков концентрации и рассеяния тяжелых металлов относительно их содержания в эталонной коричневой почве, поскольку расхождения между значениями регионального кларка, приведенными в доступных источниках, очень велики. Эталонная почва отражает специфику и длительность педогенеза на Южном берегу Крыма и представлена на почвенном стационаре, заложенном на территории заповедника «Мыс Мартьян» в начале 1980-х годов XX века [48]. Для сравнительного анализа и расчета кларков концентрации и рассеяния использовали следующие концентрации тяжелых металлов в горизонте 0–20 см эталонной почвы (мг/кг): для меди – 76,6, цинка – 111,9, марганца – 750, кобальта – 24, хрома – 107,9, свинца – 22,3 [21].

Величину кларков концентрации и рассеяния интерпретировали следующим образом: $K > 1,1$ – накапливающиеся в почве металлы, $K < 0,9$ – рассеивающиеся металлы, $K = 0,9–1,1$ – металлы, близкие к фону по относительной концентрации.

2.5 Статистическая обработка данных экологического мониторинга почв

Для оценки статистической значимости различий химических и микробиологических свойств почв ампелоценозов с разной степенью антропогенной нагрузки был применен непараметрический дисперсионный анализ (критерий Краскела-Уоллиса и критерий знаковых рангов Уилкоксона) с последующим попарным сравнением.

Взаимосвязь между химическими и микробиологическими показателями почвы исследована методами корреляционного анализа (коэффициенты Спирмена и Пирсона). Кроме того, для этих параметров проведен анализ простой и множественной линейной регрессии.

Выбор статистических методов основан на предварительном анализе данных, включающем проверку нормальности распределения (критерий Шапиро-Уилка) и однородности дисперсий (критерий Левена). Данные были обработаны с использованием программной среды R (версии 4.2.3) для статистических

вычислений и графики. Пакет FactoMiner использовался для факторного анализа смешанных данных (FAMD) [219] и пакет FactoExtra для визуализации [205, 365].

Для расчета агроклиматических показателей (индексов) использовался пакет «climate» [131] и «rnoaa».

Глава 3. АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВЫРАЩИВАНИЯ ВИНОГРАДА В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

Анализ климатических условий района исследования проводился с целью определения региональных особенностей и возможных ограничивающих факторов выращивания винограда.

Различные биоклиматические индексы были разработаны для классификации климатических условий и помощи в определении лучших регионов для определенных сортов винограда. В частности, данные индексы были использованы для построения диаграммы диапазонов температур вегетационного периода, которые считаются оптимальными для производства высококачественных вин из некоторых наиболее известных сортов. Важно также отслеживать динамику биоклиматических индексов и в связи с глобальными процессами изменения климата с целью принятия своевременных и обоснованных решений о внесении изменений в систему управления виноградниками и пригодности сортов для определенного региона или субрегиона.

Рассчитанные нами биоклиматические индексы для Севастопольской зоны виноделия Республики Крым за период с 2003 по 2023 гг. представлены в таблице 3.1.

Средний показатель индекса прохладности ночей CI за период с 2003 по 2023 годы был рассчитан по формуле (1) и составил $12,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует классу прохладных ночей (CI_{+1}) (табл. 2.1). По этому показателю в исследуемом регионе складываются оптимальные условия для сбалансированного созревания винограда. Важность прохладных ночей для виноградарства обусловлена тем, что низкие ночные температуры замедляют дыхание виноградных ягод, что помогает сохранить кислотность сока, способствуют накоплению ароматических веществ, таких как терпены, которые важны для аромата вина, помогают достичь баланса между сахаристостью и кислотностью, что критически важно для качества вина.

Средние температуры вегетационного периода GST были рассчитаны по формуле (2) и с 2003 года по 2023 год колебались от $16,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Среднее значение данного показателя за весь исследуемый период составило $18,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такая

температура соответствует умеренному климату и характерна для виноградников Франции, Италии и Испании.

Таблица 3.1 – Биоклиматические индексы, гидротермический коэффициент Селянинова и годовая сумма осадков за период 2003–2023 гг. для территории Севастопольского района Республики Крым

Год	CI	GST	CAT	HI	WI	ГТК	Годовая сумма осадков, мм
	°С						
2023	13,5	19,0	4201	2388	1950	0,7	520
2022	12,5	18,1	3854	2275	1775	0,5	642
2021	10,9	17,6	3674	2202	1681	1,6	698
2020	14,8	19,1	4055	2393	1981	0,3	366
2019	12,3	18,8	4096	2407	1928	0,4	408
2018	13,7	19,8	4185	2663	2114	0,5	506
2017	14,1	18,1	3848	2330	1779	0,4	509
2016	12,1	18,3	3934	2411	1854	0,5	576
2015	14,9	н.д.	3666	н.д.	н.д.	0,5	623
2014	12,4	18,1	3733	2363	1801	0,4	407
2013	10,7	17,9	3823	2350	1765	0,3	532
2012	12,6	20,2	4333	2675	2199	0,3	317
2011	12,0	17,2	3373	2195	1667	0,5	392
2010	13,3	18,4	4035	2455	1872	0,7	561
2009	12,3	18,1	3809	2250	1785	0,7	362
2008	11,8	17,8	3808	2234	1703	0,6	419
2007	13,1	18,8	3864	2436	1944	0,4	465
2006	12,1	17,6	3515	2163	1671	0,8	455
2005	13,6	17,8	3696	2290	1766	0,5	546
2004	11,6	16,6	3592	1965	1497	1,03	769
2003	н.д.	н.д.	3280	н.д.	н.д.	0,4	492
<i>В среднем за период</i>	<i>12,7</i>	<i>18,3</i>	<i>3827</i>	<i>2339</i>	<i>1828</i>	<i>0,6</i>	<i>503</i>

*н.д. – нет данных

Сумма активных температур САТ – это показатель, который учитывает температуру выше биологического минимума, необходимого для роста винограда (+10 °С). Сумма активных температур, рассчитанная по формуле (3), изменялась за

исследуемый период от 3280 °С в 2003 году до 4333 °С в 2012 году со средним значением 3827 °С.

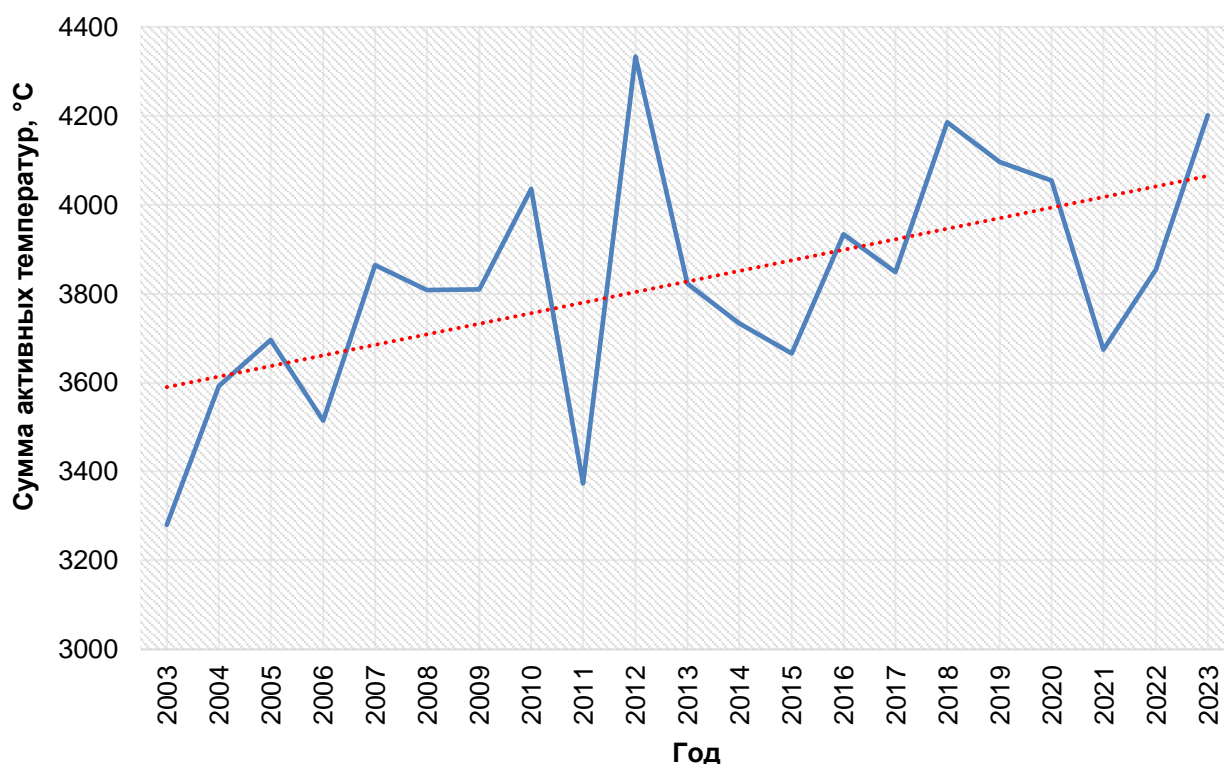


Рисунок 3.1 – Динамика суммы активных температур за период 2003–2023 гг., °С

Показателен тренд увеличения суммы активных температур в регионе за рассматриваемый период, который поддерживает общемировой тренд потепления климата (рис. 3.1).

Гелиотермический индекс Хуглина HI учитывает как средние, так и максимальные температуры, а также продолжительность светового дня, что важно для оценки тепловой обеспеченности территории и позволяет сравнивать условия в разных регионах. Рассчитанный нами по формуле (4) гелиотермический индекс Хуглина варьировался в интервале 1965–2675 °С со средним значением за период 2339 °С, что соответствовало умеренно-теплому классу климата ($HI+1$). Согласно данному индексу, Севастопольский район подходит для поздних сортов винограда (например, Сира, Мерло). Близким по данному показателю оказался винодельческий регион Тоскана в Италии ($HI \approx 2200–2400$). Необходимо отметить,

что в отдельные годы исследуемого периода гелиотермический индекс Хуглина поднимался выше 2400 °С (2007, 2010, 2012, 2016, 2018, 2019 гг.) и соответствовал классу тёплого климата (НН+2), что выше гелиотермических потребностей винограда при созревании даже поздних сортов (табл. 2.2).

Тепловой индекс Уинклера WI для исследуемого района рассчитывался по формуле (5) и колебался по годам в диапазоне от 1497 °С (2004 год) до 2199 °С (2012 год). В среднем за исследуемый период значение индекса составило 1828 °С, что позволяет отнести исследуемую территорию к региону III (табл. 2.4). Отмеченная в главе 2 средняя температура воздуха для Севастопольского района в июле (+22,4 °С) также соответствует региону III (рис. 2.2). Это тёплые зоны для виноделия, подходящие для сортов Зинфандель, Сира. Однако значение индекса Уинклера для 2007, 2012, 2018, 2020 и 2023 годов составило соответственно 1944 °С, 2199 °С, 2114 °С, 1950 °С и 1950 °С, что соответствовало региону IV – очень тёплым зонам, подходящим для сортов, требующих больше тепла (Кариньян, Сенсо, Мурведр, Темпанильо).

Гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова – показатель, используемый для оценки увлажненности территории. Особенно полезен для анализа условий увлажнения в регионах с континентальным и умеренно континентальным климатом, где осадки и температура могут значительно варьироваться. ГТК рассчитывался по формуле (6) и колебался по годам в широком интервале от 0,3 в 2012, 2013 и 2020 годах до 1,6 в 2021 году. Среднее значение показателя ГТК за десятилетний период составило 0,6, что соответствовало условиям недостаточного увлажнения, но на это усредненное значение сильное влияние оказал высокий показатель ГТК за 2021 год (1,6), когда на полуостров в июне и августе обрушились проливные дожди, спровоцировавшие растрескивание и загнивание ягод и недобор урожая. Из двадцати исследуемых лет четырнадцать лет приходились на засушливые условия с ГТК около 0,5 или менее.

Годовая сумма осадков за 20-летний период составила 503 мм. На данный период выпал один очень засушливый год (2012) со средним количеством осадков 317 мм, шесть лет были засушливыми (среднегодовое количество осадков

составило 400–500 мм), на протяжении семи лет среднегодовое количество осадков составило 500–600 мм, выпадение 600–700 мм осадков приходилось на три года и 700 мм – на два года (табл. 3.1). Таким образом, каждый третий год рассматриваемого периода был засушливым или очень засушливым. Интересно, что в отличие от суммы активных температур, среднесуточный тренд годовой суммы осадков оставался стабильным на протяжении всего учётного периода (рис. 3.2).

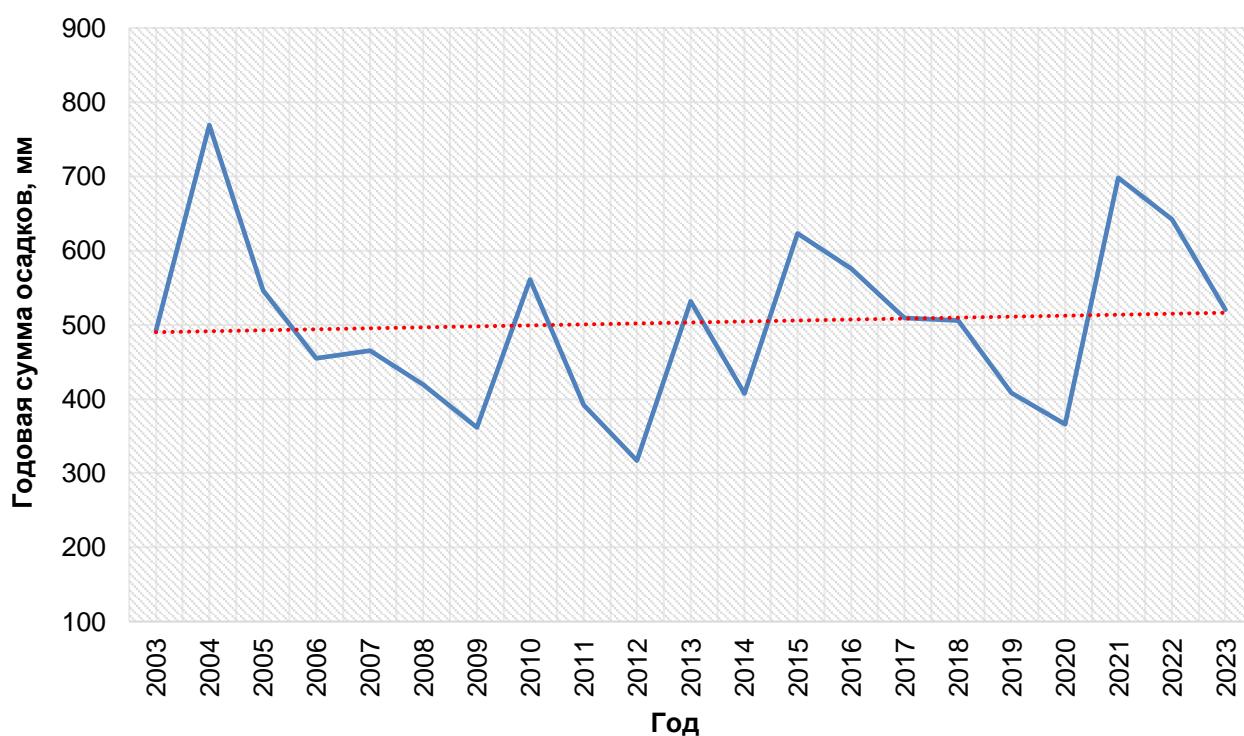


Рисунок 3.2 – Динамика годовой суммы осадков за период 2003–2023 гг., мм

Коэффициенты вариации для всех рассчитанных биоклиматических индексов, в основе расчета которых лежали температурные показатели, были невысокими и колебались в диапазоне от 7% до 23%, а коэффициент вариации среднегодовых температур вегетационного периода (GST) составил всего 4%. В то же время, коэффициент вариации гидротермического коэффициента Селянинова составил 52%, что указывает на повышенную неустойчивость водного режима исследуемого региона по сравнению с температурным.

Обсуждение результатов по главе 3

Рассчитанные биоклиматические индексы показали, что исследуемый регион обладает достаточным количеством тепла (уровень теплообеспеченности относительно высокий) для выращивания сортов винограда разных сроков созревания, в том числе поздних сортов. Однако выявленный за исследуемый 20-летний период отчетливый тренд на увеличение температуры воздуха может привести к тому, что в будущем виноградные растения могут страдать от избыточного теплового стресса. В настоящее время регион относится к тёплому, а в перспективе через 10 лет – к жаркому климату, поэтому важно подбирать сорта винограда с учетом этого тренда, чтобы фенольная зрелость (накопление вкусоароматических веществ) в перспективе наступала одновременно с технической зрелостью (накоплением сахаров). Это достигается выбором позднезревающих сортов и их клонов. Расчет по нескольким биоклиматическим индексам дает ориентир по возможным сортам, соответствующим аналогичным климатическим параметрам в других частях земного шара. В частности, наиболее близкими по климату к исследуемому региону оказались регионы Ajaccio и Bastia (о. Корсика), Montpellier и Perpignan во Франции, Ravenna в Италии, Tarragona в Испании и Tekirdag в Турции.

Тот факт, что климатические изменения на полуострове связаны, в первую очередь, с общим трендом повышения температуры, подтверждают данные других авторов [34, 171]. Прогнозирование климатических изменений затрудняют их асинхронность и зависимость от большого разнообразия климатических условий, усиление аридности ряда областей, учащение неблагоприятных погодных явлений (возвратных заморозков, сильных ливневых дождей, шквалистых ветров, засух, суховеев и т.д.) [156].

Как показали рассчитанные биоклиматические индексы, устойчивое развитие отрасли виноградарства и виноделия в Севастопольском регионе сдерживается выраженным сезонным дефицитом доступной растениям влаги, что усиливает неопределенность региональных изменений климата полуострова на фоне его ускоренных глобальных изменений. Так, анализ среднегодового

количества осадков за двадцатилетний период показал, что каждый третий год был засушливым или очень засушливым, а согласно расчетам гидротермического коэффициента Селянинова, четырнадцать лет из учётного периода характеризовались засушливыми условиями. Выявленные тенденции подтверждаются данными других авторов за больший период наблюдений [107].

Среди климатических факторов, лимитирующих продуктивность ампелоценозов, также следует отметить высокую вариабельность показателей, характеризующих водный режим исследуемого региона, против незначительной вариации показателей температурного режима. Это свидетельствует о том, что на фоне стабильности годовой суммы осадков (среднеголетнее значение составило около 500 мм) характер выпадения осадков был крайне неустойчивым, с чередованием засушливых периодов разной продолжительности и экстремальных осадков высокой интенсивности. Такие тенденции характерны не только для юго-западного берега Крыма, но и для других винодельческих регионов, например, Автономного края Воеводины Республики Сербия [34, 241].

Отмеченные негативные климатические тренды обуславливают необходимость адаптации агротехнологий и, прежде всего, систем орошения и защиты растений. Вследствие роста средних зимних температур (средняя температура января за последние 30 лет повысилась до +0,6 °C) [34] и отсутствия морозов в зимний период отмечается активизация традиционных и появление новых вредителей и возбудителей болезней растений, которые ранее в этих условиях не были способны к перезимовке [156]. Поскольку в условиях Крыма ежегодный недобор урожая винограда вследствие развития вредных организмов часто достигает 30–50% [2], современные технологии возделывания винограда в зависимости от устойчивости сортов и складывающихся погодных условий предусматривают от 2–3 до 10–12 обработок пестицидами за сезон, а в промышленных виноградниках в отдельные годы их количество может возрастать до 15–16 [345]. Такие сценарии несут потенциальную угрозу загрязнения почв ампелоценозов остаточными количествами пестицидов и их метаболитов, а также тяжелыми металлами, входящими в состав используемых фунгицидов.

Заключение по главе 3

По результатам анализа климатических факторов выращивания винограда и расчета биоклиматических индексов в Севастопольском регионе Республики Крым за период 2003–2023 годы выявлен тренд повышения суммы активных температур, поддерживающий общемировой тренд потепления климата. Однако на фоне относительной стабильности среднегодового значения годовой суммы осадков на уровне 500 мм выявлен крайне неустойчивый характер их выпадения (коэффициент вариации гидротермического коэффициента Селянинова составил 52 %) с чередованием засушливых периодов с осадками высокой интенсивности. В связи с этим сезонный дефицит доступной растениям влаги выступает лимитирующим фактором выращивания винограда, что диктует необходимость системной адаптации применяемых в виноградарстве технологий для смягчения последствий экстремальных погодных явлений с акцентом на методы ирригации, защиты растений и подбор устойчивых сортов.

Глава 4. АНАЛИЗ ЛИМИТИРУЮЩИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВЫРАЩИВАНИЯ ВИНОГРАДА ПРИ РАЗНОМ УРОВНЕ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Устойчивое выращивание винограда сопряжено с целым комплексом абиотических и биотических факторов [5, 211], использованием высокопродуктивных и адаптивных сортов [5], совокупностью технологических приемов с возможностью управления качеством продукции на стадии формирования урожая [49] и длительностью того или иного вида землепользования [51]. В то же время существуют объективные ограничения для получения высококачественной продукции, связанные, с одной стороны, с климатическими изменениями, а с другой стороны, с рядом специфических для ампелоценозов экологических рисков, таких как бессменное длительное выращивание на одной территории, снижение видового и почвенного биоразнообразия, развитие эрозионных процессов, многолетняя высокая пестицидная нагрузка и др. Все перечисленные и прочие негативные явления в виноградарстве отражаются на экологическом состоянии почвы и, в первую очередь, на ее биологических свойствах. В отличие от содержания гумуса, который является более стабильным показателем, зависящим прежде всего от целого ряда свойств и генетических особенностей почвы, функциональное состояние почвенного микробного сообщества более динамично в зависимости от воздействия внешних факторов [156]. В связи с этим нами проведен анализ экологического состояния представительных почв традиционных, органических виноградников, а также постагрогенных почв Севастопольского района Республики Крым по комплексу физико-химических, экотоксикологических показателей и дыхательной активности почвенного микробоценоза для выявления экологических факторов, лимитирующих выращивание винограда в регионе, и определения возможности использования микробиологических показателей и рассчитанных на их основе экофизиологических индексов для диагностики начального проявления негативных воздействий на почву и степени ее нарушенности.

Предполагается, что уровень антропогенного воздействия на компоненты

агроэкосистем виноградников и сопредельные среды в результате применения в винодельческих хозяйствах традиционных интенсивных технологий выращивания заведомо более высокий, чем в хозяйствах, применяющих альтернативные (органические) системы землепользования. В традиционной виноделии используется широкий спектр химических препаратов различных классов и степени опасности как для профилактических обработок, так и для лечения растений винограда. Интерес к альтернативному виноградарству и виноделию в последние годы возрос в связи с вниманием общества к проблемам охраны окружающей среды и снижению темпов деградации почв и повышением спроса на экологически безопасную продукцию. Органическое земледелие представляет собой системный подход, направленный на поддержание здоровья агроэкосистемы в целом, и почвы – в частности, активное использование биологического метода при удобрении и контроле вредных организмов.

4.1 Анализ экологического состояния почв виноградников при разном уровне антропогенного воздействия

Результаты определения гранулометрического состава коричневой типичной и бурой лесной почв исследуемых винодельческих хозяйств показали его варьирование с преобладанием почв легкоглинистого и тяжелосуглинистого состава с минимальным содержанием физической глины в почвах залежных участков (табл. 4.1, рис. 4.1). Почвы такого гранулометрического состава просты в обработке, равномерно прогреваются в весенне-летний период года, для них характерна повышенная влагоемкость.

Согласно исследованиям В.Г. Унгурияна [65, 66], в виноградарстве можно использовать почвы с разным гранулометрическим составом, однако максимальное накопление корневой массы и наилучший рост надземной части растений наблюдались на легкосуглинистых и среднесуглинистых серых и бурых лесных почвах, а также на легко-, средне- и тяжелосуглинистых чернозёмах.

Таблица 4.1 – Экологическая характеристика почв виноградников с разным уровнем антропогенного воздействия (среднее ± ст. ошибка)

Номер хозяйства	Система землепользования	Глубина, см	рН (Н ₂ O), ед.	Песок	Глина	Ил	Сорг, %	P ₂ O ₅	K ₂ O	S _{подв}	
				%				мг/кг			
1	Органическая	0–10	7,5 ± 0,1	20	15	65	1,48 ± 0,30	84,8 ± 29,7	521 ± 104	28,1 ± 2,1	
		10–20	7,8 ± 0,1				2,47 ± 0,49	48,8 ± 17,1	551 ± 110	16,3 ± 1,2	
2		0–10	7,9 ± 0,1	40	28	32	3,53 ± 0,53	21,3 ± 4,3	575 ± 115	29,2 ± 2,2	
		10–20	7,8 ± 0,1				2,48 ± 0,50	3,8 ± 0,8	168 ± 34	17,1 ± 1,3	
3		0–10	6,5 ± 0,1	35	30	35	2,28 ± 0,46	14,6 ± 2,9	428 ± 86	10,7 ± 0,8	
		10–20	6,7 ± 0,1				2,21 ± 0,44	8,1 ± 1,6	433 ± 87	9,4 ± 0,7	
4		0–10	7,9 ± 0,1	35	20	45	2,78 ± 0,56	14,3 ± 2,9	478 ± 96	13,7 ± 1,0	
		10–20	7,9 ± 0,1				2,48 ± 0,50	1,94 ± 0,4	328 ± 66	12,3 ± 0,9	
5		0–10	7,2 ± 0,1	20	5	75	3,48 ± 0,52	43,8 ± 15,3	521 ± 104	10,6 ± 0,8	
		10–20	7,3 ± 0,1				3,84 ± 0,58	46,9 ± 16,4	514 ± 102	7,6 ± 0,6	
6		0–10	7,2 ± 0,1	40	35	25	1,93 ± 0,39	31,4 ± 11,0	359 ± 72	37,8 ± 2,8	
		10–20	7,4 ± 0,1				1,74 ± 0,35	35,2 ± 12,3	410 ± 82	26,3 ± 2,0	
7		Традиционная	0–10	7,9 ± 0,1	35	30	35	3,53 ± 0,53	21,3 ± 4,3	575 ± 115	39,2 ± 3,0
			10–20	7,9 ± 0,1				3,41 ± 0,51	17,6 ± 3,5	475 ± 95	4,7 ± 0,5
8	0–10		7,9 ± 0,1	30	25	45	3,49 ± 0,52	20,9 ± 4,2	578 ± 115	3,6 ± 3,6	
	10–20		8,1 ± 0,1				3,28 ± 0,49	11,5 ± 2,3	547 ± 109	3,4 ± 0,3	
9	0–10		8,1 ± 0,1	35	25	40	4,34 ± 0,65	49,2 ± 17,2	1109 ± 221	2,1 ± 0,5	
	10–20		8,2 ± 0,1				4,13 ± 0,62	60,7 ± 21,3	1152 ± 230	2,1 ± 0,5	
10	0–10		7,5 ± 0,1	40	20	40	2,04 ± 0,41	138,3 ± 48,4	709 ± 141	5,7 ± 0,4	
	10–20		7,6 ± 0,1				1,96 ± 0,39	57,4 ± 20,1	729 ± 145	4,2 ± 0,4	
11	0–10		8,1 ± 0,1	20	10	70	3,24 ± 0,49	5,2 ± 1,0	373 ± 75	7,8 ± 0,6	
	10–20		8,2 ± 0,1				3,19 ± 0,48	6,1 ± 1,2	431 ± 86	7,4 ± 0,6	
12	Залежь		0–10	8,3 ± 0,1	40	25	35	3,31 ± 0,50	29,0 ± 5,8	511 ± 102	6,4 ± 0,5
			10–20	8,4 ± 0,1				3,09 ± 0,46	17,9 ± 3,6	408 ± 82	5,7 ± 0,4
13			0–10	8,2 ± 0,1	35	30	35	3,64 ± 0,55	50,0 ± 17,5	475 ± 95	3,6 ± 0,4
			10–20	8,2 ± 0,1				3,83 ± 0,57	19,0 ± 3,8	485 ± 97	3,1 ± 0,3
14		0–10	8,3 ± 0,1	45	35	20	3,17 ± 0,48	10,7 ± 2,1	556 ± 111	7,8 ± 0,6	
		10–20	8,3 ± 0,1				3,08 ± 0,46	4,7 ± 0,9	374 ± 75	6,4 ± 0,5	

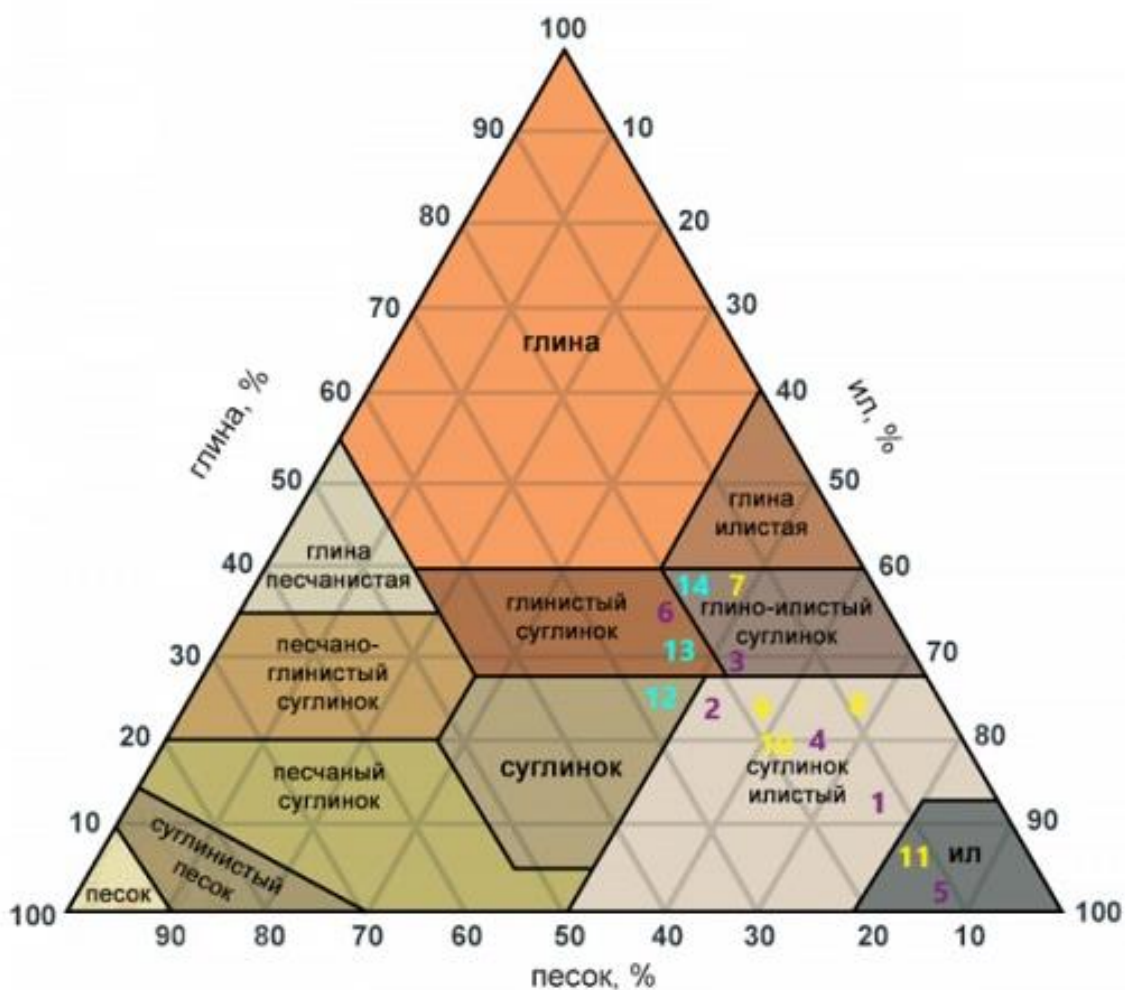


Рисунок 4.1 – Характеристика гранулометрического состава исследуемых почв в соответствии с диаграммой Ферре (номера на диаграмме соответствуют номерам хозяйств с разным уровнем антропогенного воздействия).

Значения рН водной вытяжки в почвах исследуемых хозяйств находились в диапазоне от 7,2 до 8,4, что соответствовало нейтральной – умеренно щелочной среде, идеально подходящей для виноградной культуры (табл. 4.1) [22]. В большинстве случаев значения рН почвы с глубиной повышались, что, очевидно, обусловлено карбонатностью почвообразующих пород.

Содержание органического вещества (Сорг) в верхнем слое исследуемых почв существенно различалось — от 1,48 до 4,34%, и, как показал корреляционный анализ, не зависел от типа исследуемых почв (рис.4.10). Наибольшие показатели зафиксированы в залежных почвах (3,37%) и в хозяйствах с традиционной системой землепользования (3,33%). В то же время в почвах органических хозяйств

содержание Сорг оказалось самым низким — 2,54–2,58% в зависимости от горизонта (табл. 4.1).

Фосфор является одним из ключевых элементов питания винограда. Он необходим для правильного развития корневой системы, формирования крупных соцветий и ускорения созревания ягод. В почвах изученных хозяйств уровень подвижного фосфора варьировался в значительном диапазоне – от 3,8 до 138,3 мг P_2O_5 /кг почвы (табл. 4.1), что соответствует разным грациям обеспеченности – от крайне низкой до чрезвычайно высокой. Такая вариабельность указывает на то, что в некоторых хозяйствах именно содержание подвижного фосфора может ограничивать урожайность и качество винограда. Так, по содержанию подвижного фосфора в горизонте 0–10 см два хозяйства (№ 11 и № 14) попали в категорию с очень низкой обеспеченностью данным элементом, два хозяйства (№ 3 и № 4) – с низкой обеспеченностью, четыре хозяйства (№ 2 № 7, № 8, № 12) – со средней обеспеченностью, почвы хозяйств № 5 и № 6 обладают повышенным уровнем обеспеченности, почвы хозяйств № 1, № 9, № 10 и № 13 – высокой и очень высокой обеспеченностью.

Учитывая, что примерно 45% активной части корневой системы винограда находится на глубине до 30 см, а 70% – на глубине до 45 см [63], важна обеспеченность фосфором всех почвенных горизонтов. Результаты исследования выявили, что в половине хозяйств содержание элемента в слое 10-20 см уменьшилось в 1,6-7,4 раза по сравнению с поверхностным горизонтом. Лишь в пяти хозяйствах разница между горизонтами не достигала статистической значимости. Определенной закономерности в распределении хозяйств по степени обеспеченности подвижным фосфором не обнаружено – во всех категориях обеспеченности имеются как органические и традиционные хозяйства, так и залежные почвы.

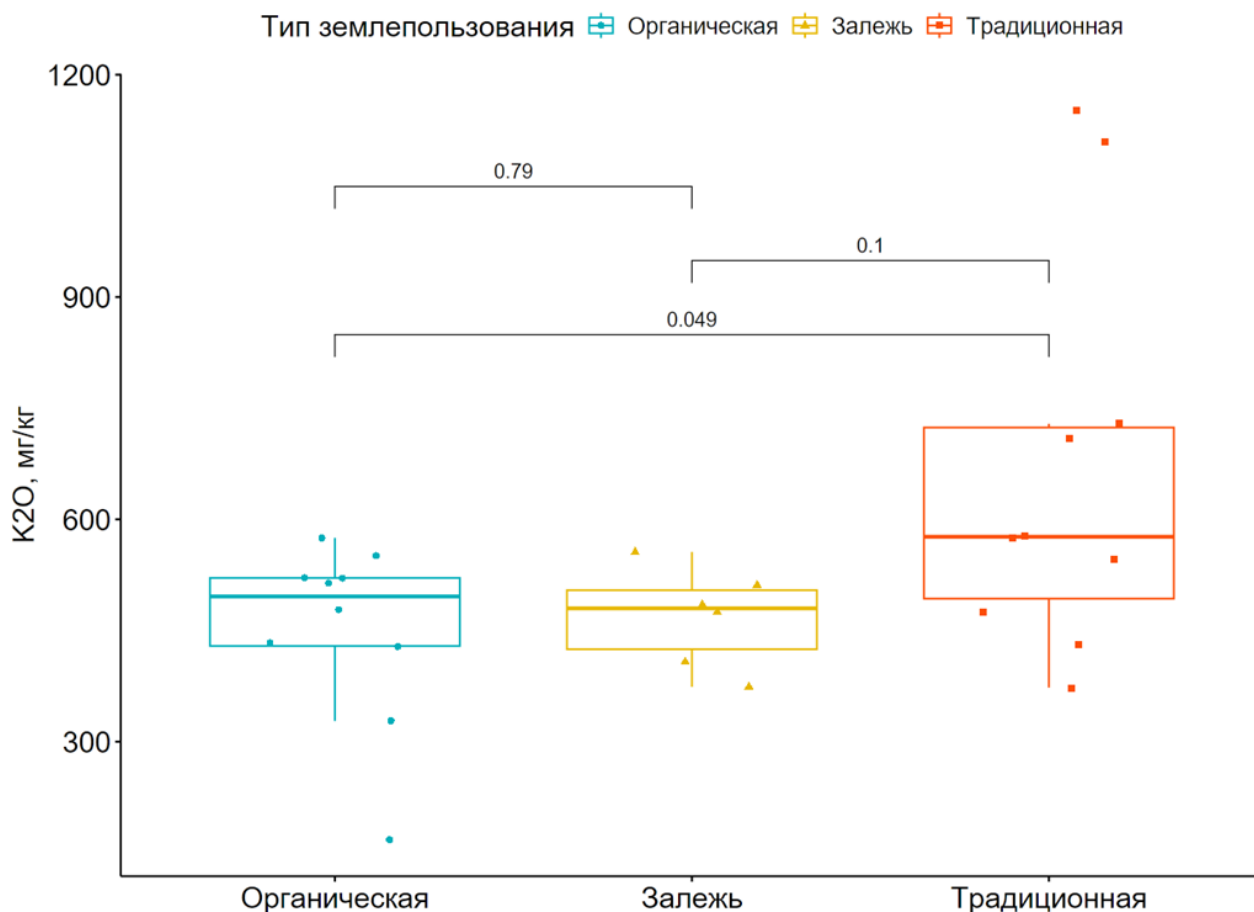


Рисунок 4.2 – Зависимость содержания подвижного калия (мг/кг) в почвах исследуемых ампелоценозов от уровня антропогенного воздействия при разных системах землепользования согласно критерию Уилкоксона.

Калий является фундаментальным макроэлементом для роста виноградного растения, недостаток которого приводит к снижению продуктивного потенциала винограда, ухудшению качественных и количественных характеристик ягод. В отличие от подвижного фосфора, содержание обменного калия в почвах винодельческих хозяйств соответствовало высокой и очень высокой обеспеченности и варьировало от 359 до 1109 и от 168 до 1152 мг K_2O /кг почвы в горизонтах соответственно 0–10 и 10–20 см (табл. 4.1). Необходимо отметить, что содержание подвижного калия в верхнем горизонте почв органических хозяйств и залежных почв варьировалось в относительно нешироком диапазоне, тогда как в почвах традиционных хозяйств, напротив, колебание данного показателя было значительным [15].

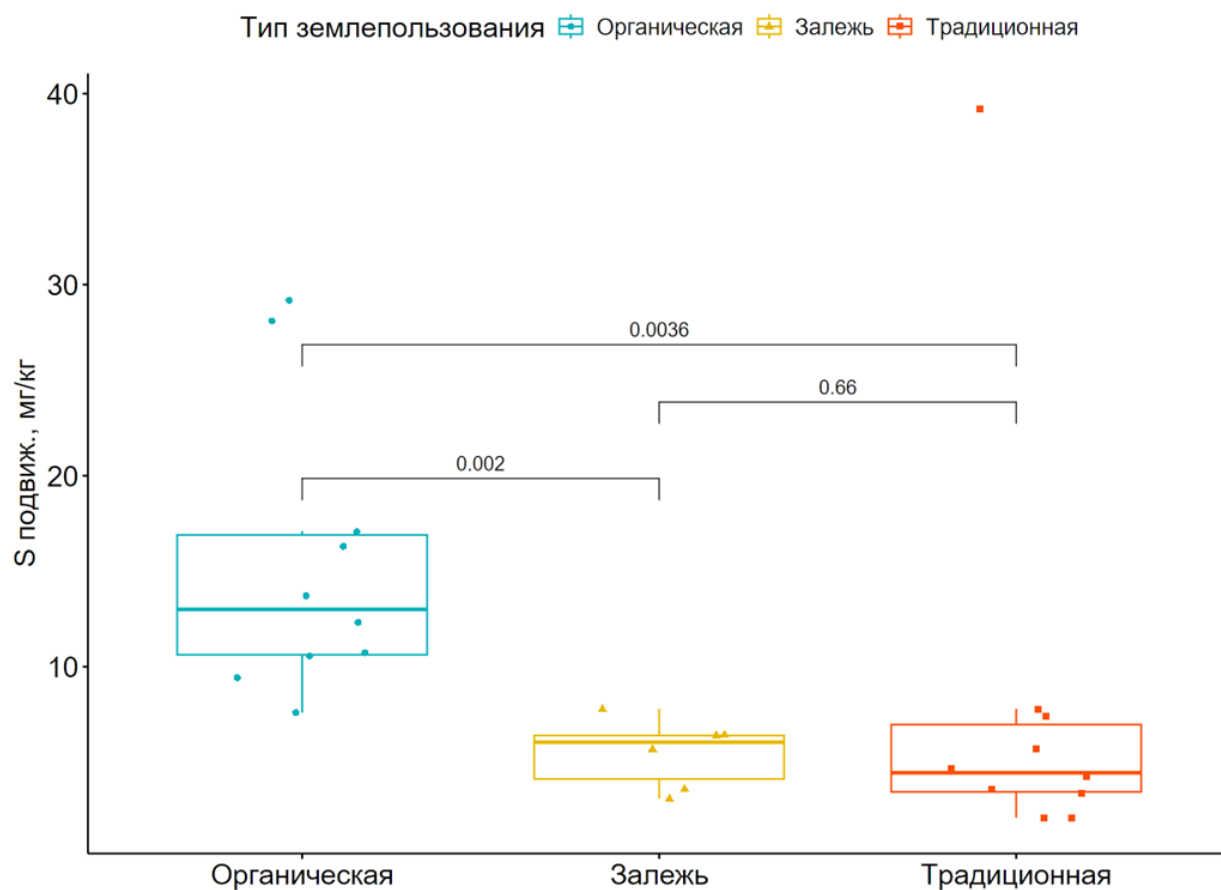


Рисунок 4.3 – Зависимость содержания подвижной серы (мг/кг) в почвах исследуемых ампелоценозов от уровня антропогенного воздействия при разных системах землепользования согласно критерию Уилкоксона.

В отличие от подвижного фосфора, содержание подвижного калия оказалось достоверно выше в традиционных хозяйствах по сравнению с органическими (рис. 4.2).

Включение подвижной серы в программу агроэкологического мониторинга почв исследуемых винодельческих хозяйств обусловлено не только ее многофункциональной ролью в решении вопросов управления плодородием почв и продуктивностью сельскохозяйственных культур [15], но и повсеместным применением серосодержащих пестицидов, в особенности, для обработки многолетних насаждений. С древних времен серу использовали в качестве природного инсектицида против паразитов, фунгицида для растений, консерванта для вина, бактерицида и антиоксиданта [15].

Содержание подвижной серы в почвах исследуемых винодельческих хозяйств находилось в диапазоне от 2,1 до 39,2 мг/кг (табл. 4.1) и, согласно критерию Уилкоксона, коррелировало с уровнем антропогенного воздействия в результате применения в хозяйствах разных систем землепользования (рис. 4.3) [15].

Почвы органических хозяйств достоверно отличались более высокой обеспеченностью подвижной серой по сравнению с почвами традиционных хозяйств и залежи, содержание которой составило в среднем 18,3 мг/кг против 8,0 и 5,5 мг/кг соответственно. Согласно классификации, которой руководствуется Росагрохимслужба, почвы традиционных хозяйств и залежи, за редким исключением, относились к группе с низким уровнем содержания подвижной серы (менее 6,0 мг/кг) или близким к нему. В почве хозяйств с органической системой землепользования среднее содержание серы составило 21,7 и 14,8 мг/кг в горизонтах 0–10 и 10–20 см соответственно, что в 1,8–3,4 и 2,9–3,7 раза выше по сравнению с почвами традиционных хозяйств и залежи [15].

Ввиду охвата большего диапазона содержания подвижной серы в почве по сравнению с отечественной классификацией уровней обеспеченности почв подвижной серой, в настоящей работе была использована группировка, принятая в зарубежных странах [11]. Согласно этой группировке, в группу с очень низким (менее 5 мг/кг) уровнем содержания подвижной серы в горизонте 0–10 см попали хозяйства № 8, № 9 и № 13, низким (5–10 мг/кг) – хозяйства №№ 10, 11, 12 и 14, средним (10–35 мг/кг) – хозяйства №№ 1, 2, 3, 4, 5 и высоким (более 35 мг/кг) – хозяйства № 6 и № 7. В группе с низким и очень низким содержанием подвижной серы в горизонте 0–10 см оказались почвы залежи и традиционных хозяйств, со средним и высоким – почвы всех органических и только одного традиционного хозяйства [15].

В горизонте 10–20 см содержание подвижной серы было ниже, чем в горизонте 0–10 см, что отмечалось и в других исследованиях [132]. Этот горизонт характеризовался очень низкой и низкой обеспеченностью элемента, а в категорию с высокой обеспеченностью не попало ни одно хозяйство.

Таблица 4.2 – Валовое содержание и содержание подвижных форм тяжелых металлов (мг/кг) в почве виноградников с разным уровнем антропогенного воздействия (ср. ± ст. ошибка) (*жирным ирифтом выделены значения, превышающие ПДК*)

Номер хозяйства	Система землепользования	Глубина, см	Cu		Cd		Cr		Pb		Zn		
			Валовое содержание	Подвижная форма	Валовое содержание	Подвижная форма	Валовое содержание	Подвижная форма	Валовое содержание	Подвижная форма	Валовое содержание	Подвижная форма	
1	Органическая	0–10	36,5 ± 11,0	3,7 ± 0,6	0,21 ± 0,06	0,13 ± 0,04	23,6 ± 7,1	1,9 ± 0,5	10,2 ± 3,1	1,3 ± 0,3	40,8 ± 12,2	0,9 ± 0,3	
		10–20	40,5 ± 12,2	0,9 ± 0,1	0,19 ± 0,06	0,14 ± 0,05	26,9 ± 8,1	3,4 ± 0,9	10,9 ± 3,3	0,8 ± 0,2	43,1 ± 12,9	0,8 ± 0,3	
2		0–10	55,9 ± 16,8	6,0 ± 1,0	0,18 ± 0,05	0,16 ± 0,05	24,4 ± 7,3	3,1 ± 0,8	7,2 ± 2,2	0,5 ± 0,1	32,7 ± 9,8	0,7 ± 0,3	
		10–20	55,0 ± 16,5	9,2 ± 1,5	0,20 ± 0,06	0,18 ± 0,06	23,9 ± 7,2	2,8 ± 0,7	8,0 ± 2,4	1,8 ± 0,4	33,7 ± 10,1	0,5 ± 0,2	
3		0–10	50,0 ± 15,0	4,5 ± 0,7	0,13 ± 0,04	0,13 ± 0,04	24,9 ± 7,5	1,9 ± 0,5	7,1 ± 2,1	1,4 ± 0,3	40,3 ± 12,1	0,5 ± 0,2	
		10–20	48,3 ± 14,5	6,1 ± 1,0	0,18 ± 0,05	0,32 ± 0,11	24,4 ± 7,3	2,4 ± 0,6	6,8 ± 2,0	1,1 ± 0,3	36,5 ± 11,0	0,3 ± 0,1	
4		0–10	14,8 ± 4,4	1,0 ± 0,2	0,15 ± 0,05	0,02 ± 0,01	35,5 ± 10,7	5,4 ± 1,4	9,4 ± 2,8	0,1 ± 0,03	38,8 ± 11,6	0,5 ± 0,2	
		10–20	18,0 ± 5,4	5,4 ± 0,9	0,23 ± 0,07	0,08 ± 0,03	42,5 ± 12,8	0,2 ± 0,1	10,5 ± 3,2	0,6 ± 0,1	43,2 ± 13,0	0,6 ± 0,2	
5		0–10	27,1 ± 8,1	0,9 ± 0,1	0,30 ± 0,09	0,01 ± 0,003	43,9 ± 13,2	7,3 ± 1,8	15,8 ± 4,7	0,1 ± 0,02	58,0 ± 17,4	0,5 ± 0,2	
		10–20	22,2 ± 6,7	2,7 ± 0,4	0,25 ± 0,08	0,03 ± 0,01	38,9 ± 11,7	2,5 ± 0,6	14,1 ± 4,2	0,02 ± 0,01	51,2 ± 15,4	0,5 ± 0,2	
6		0–10	45,6 ± 13,7	1,4 ± 0,2	0,28 ± 0,08	0,07 ± 0,02	57,7 ± 17,3	1,8 ± 0,5	23,5 ± 7,1	0,8 ± 0,2	103,2 ± 31,0	0,8 ± 0,3	
		10–20	42,9 ± 12,9	1,2 ± 0,2	0,19 ± 0,06	0,05 ± 0,02	50,3 ± 15,1	2,0 ± 0,5	21,7 ± 6,5	0,4 ± 0,1	91,2 ± 27,4	0,7 ± 0,2	
7		Традиционная	0–10	48,6 ± 14,6	2,5 ± 0,4	0,18 ± 0,05	0,15 ± 0,05	42,7 ± 12,8	2,1 ± 0,5	12,7 ± 3,8	1,2 ± 0,3	59,8 ± 17,9	0,8 ± 0,3
			10–20	47,3 ± 14,2	4,5 ± 0,7	0,19 ± 0,06	0,07 ± 0,02	41,9 ± 12,6	3,0 ± 0,8	13,2 ± 4,0	0,4 ± 0,1	57,0 ± 17,1	0,7 ± 0,3
8	0–10		54,0 ± 16,2	2,9 ± 0,5	0,24 ± 0,07	0,14 ± 0,05	44,5 ± 13,4	2,5 ± 0,6	12,7 ± 3,8	1,3 ± 0,3	50,4 ± 15,1	0,4 ± 0,2	
	10–20		50,9 ± 15,3	1,8 ± 0,3	0,25 ± 0,08	0,11 ± 0,04	44,1 ± 12,2	2,6 ± 0,7	12,9 ± 3,9	0,8 ± 0,2	51,0 ± 15,3	0,6 ± 0,2	
9	0–10		100,3 ± 30,1	5,1 ± 0,8	0,29 ± 0,09	0,14 ± 0,05	46,3 ± 14,0	2,2 ± 0,6	14,1 ± 4,2	1,6 ± 0,4	60,8 ± 18,2	0,5 ± 0,2	
	10–20		83,7 ± 25,1	3,2 ± 0,5	0,27 ± 0,08	0,10 ± 0,03	37,9 ± 11,4	2,5 ± 0,6	11,9 ± 3,6	0,7 ± 0,2	50,5 ± 15,2	0,8 ± 0,3	
10	0–10		68,2 ± 20,5	5,1 ± 0,8	0,22 ± 0,07	0,03 ± 0,01	12,9 ± 3,9	1,0 ± 0,3	9,0 ± 2,7	0,7 ± 0,2	53,2 ± 16,0	0,4 ± 0,2	
	10–20		47,8 ± 14,3	3,9 ± 0,6	0,16 ± 0,05	0,02 ± 0,01	9,3 ± 2,8	1,6 ± 0,4	6,7 ± 2,0	0,1 ± 0,01	38,3 ± 11,5	0,5 ± 0,2	
11	0–10		24,8 ± 7,4	1,0 ± 0,2	0,29 ± 0,09	0,12 ± 0,04	36,3 ± 10,9	2,1 ± 0,5	13,4 ± 4,0	1,4 ± 0,3	43,9 ± 13,2	0,3 ± 0,1	
	10–20		23,6 ± 7,1	0,7 ± 0,1	0,22 ± 0,07	0,11 ± 0,04	33,7 ± 10,1	2,6 ± 0,7	11,9 ± 3,6	0,8 ± 0,2	39,9 ± 12,0	0,6 ± 0,2	
12	Залежь		0–10	45,6 ± 13,7	5,8 ± 0,9	0,24 ± 0,07	0,23 ± 0,08	27,0 ± 8,1	3,4 ± 0,9	8,4 ± 2,5	2,7 ± 0,7	35,4 ± 10,6	1,2 ± 0,4
			10–20	49,6 ± 14,9	4,3 ± 0,7	0,17 ± 0,05	0,19 ± 0,06	28,5 ± 8,6	3,3 ± 0,8	8,9 ± 2,7	1,9 ± 0,4	36,3 ± 10,9	0,7 ± 0,2
13			0–10	64,0 ± 19,2	4,0 ± 0,6	0,22 ± 0,07	0,16 ± 0,05	34,5 ± 10,4	3,1 ± 0,8	11,2 ± 3,4	1,5 ± 0,4	45,0 ± 13,5	0,6 ± 0,2
			10–20	58,1 ± 17,4	4,3 ± 0,7	0,20 ± 0,06	0,19 ± 0,06	29,8 ± 8,9	3,0 ± 0,8	10,0 ± 3,0	1,7 ± 0,4	41,4 ± 12,4	0,6 ± 0,2
14		0–10	60,8 ± 18,2	5,4 ± 0,9	0,19 ± 0,06	0,21 ± 0,07	31,1 ± 9,3	3,0 ± 0,8	10,0 ± 3,0	2,0 ± 0,5	43,3 ± 13,0	0,8 ± 0,3	
		10–20	47,3 ± 14,2	3,2 ± 0,5	0,17 ± 0,05	0,06 ± 0,02	24,6 ± 7,4	3,2 ± 0,8	8,1 ± 2,4	0,5 ± 0,1	32,8 ± 9,8	0,5 ± 0,2	
<i>ОДК / ПДК</i>			<i>132,0 /</i>	<i>/ 3,0</i>	<i>/ 2,0</i>	–	–	<i>/ 6,0</i>	<i>130,0 /</i>	<i>/ 6,0</i>	<i>220,0 /</i>	<i>/ 23,0</i>	
<i>Эталонная почва</i>			<i>76,6</i>	–	–	–	<i>107,9</i>	–	<i>22,3</i>	–	<i>111,9</i>	–	

Варьирование данного показателя было не таким широким, как в верхнем горизонте, и охватывало диапазон от 3,5 мг/кг в группе с низким содержанием элемента до 18,0 мг/кг в группе с его средним содержанием [10].

4.2 Экологическая оценка накопления тяжелых металлов в почвах виноградников с разным уровнем антропогенного воздействия

Средние значения валового содержания меди в почвах исследуемых ампелоценозов изменялись в ряду: традиционные хозяйства (54,9 мг/кг) = залежь (54,2 мг/кг) > органические хозяйства (38,1 мг/кг) (табл. 4.2). В поверхностном горизонте содержание меди в органических хозяйствах варьировалось в диапазоне от 14,8 до 48,6 мг/кг, тогда как в традиционных хозяйствах и залежных почвах – от 24,8 до 100,3 мг/кг [22].

Валовое содержание меди ни в одном хозяйстве не превысило величину ориентировочно-допустимой концентрации (ОДК) данного элемента с учетом установленной реакции среды и гранулометрического состава почв – 132 мг/кг (СанПиН 1.2.3685-21), однако наиболее близким к нему было значение 100,3 мг/кг, которое было обнаружено в поверхностном горизонте почвы хозяйства № 9 с традиционной системой землепользования.

В большинстве хозяйств валовое содержание меди оказалось ниже аналогичного показателя в региональной эталонной почве или приближалось к нему за исключением хозяйства № 9, где валовое содержание меди в почве на 31 и 9% превышало данный показатель в эталонной почве соответственно в горизонте 0–10 и 10–20 см.

Между валовым содержанием меди в почве ампелоценозов и применяемой в винодельческих хозяйствах системой землепользования достоверной зависимости не выявлено [22].

Содержание подвижной формы меди в почве десяти из четырнадцати винодельческих хозяйств независимо от применяемой системы землепользования превышало величину предельно-допустимой концентрации (ПДК) (3,0 мг/кг) (СанПиН 1.2.3685-21) в 1,2–3,1 раза, что согласуется с данными других авторов для

винодельческих хозяйств Анапо-Таманской и Южно-предгорной зон Краснодарского края [22, 47]. При этом наблюдалась тенденция к повышению содержания этой формы меди в почвах залежи – во всех трех обследованных хозяйствах данный показатель превысил ПДК как в поверхностном, так и в подповерхностном горизонтах.

В органических хозяйствах содержание в почве подвижной формы меди широко варьировалось в диапазонах 0,9–6,0 и 0,9–9,2 мг/кг, соответственно, в горизонтах 0–10 и 10–20 см (табл. 4.2). Только в двух (№ 5 и № 6) из шести изученных органических хозяйств содержание подвижной формы меди не превышало нормативное значение. В традиционных хозяйствах варьирование содержания подвижной формы меди в почве было не таким широким и составило 1,0–5,1 и 0,7–4,5, соответственно, в горизонтах 0–10 и 10–20 см с превышением ПДК в трех из пяти хозяйств [10].

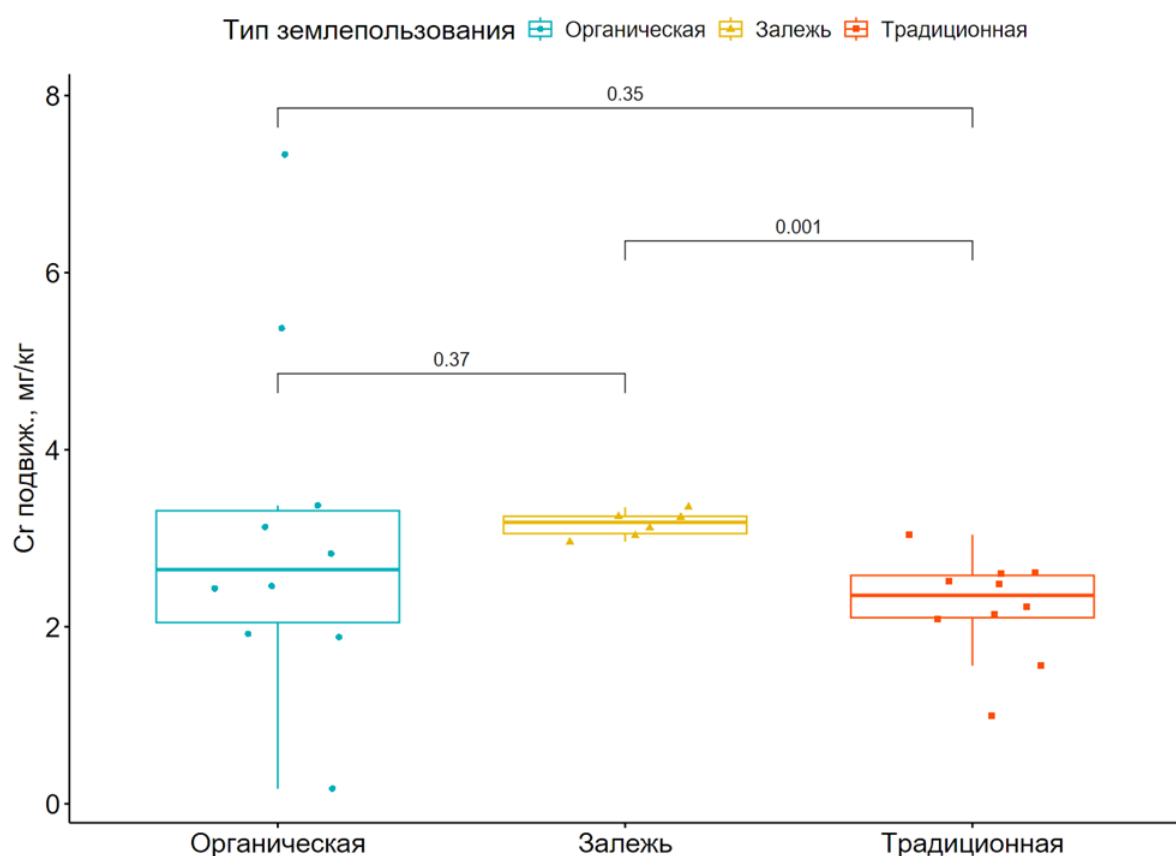


Рисунок 4.4 – Зависимость содержания подвижных форм хрома (мг/кг) в почве исследуемых ампелоценозов от уровня антропогенного воздействия при разных системах землепользования согласно критерию Уилкоксона.

В органических хозяйствах и залежи доля подвижной меди в ее валовом содержании в обоих исследованных горизонтах была заметно выше, чем в традиционных хозяйствах: средние значения составили соответственно 8,5 и 10,3% в поверхностном горизонте и 10,9 и 11,6% в подповерхностном горизонте против 5,1 и 3,8% в традиционных хозяйствах. Следует отметить, что в хозяйстве № 4, реализующем органическую систему землепользования, при невысоком валовом содержании меди [10] и превышении ПДК по ее подвижной форме доля последней в валовом содержании достигала 30% в горизонте 10–20 см, что в 2–3 раза больше, чем в других обследованных хозяйствах [22].

Валовое содержание и содержание подвижной формы кадмия в почвах ампелоценозов изменялись в диапазонах соответственно 0,13–0,29 и 0,01–0,32 мг/кг (табл. 4.2).

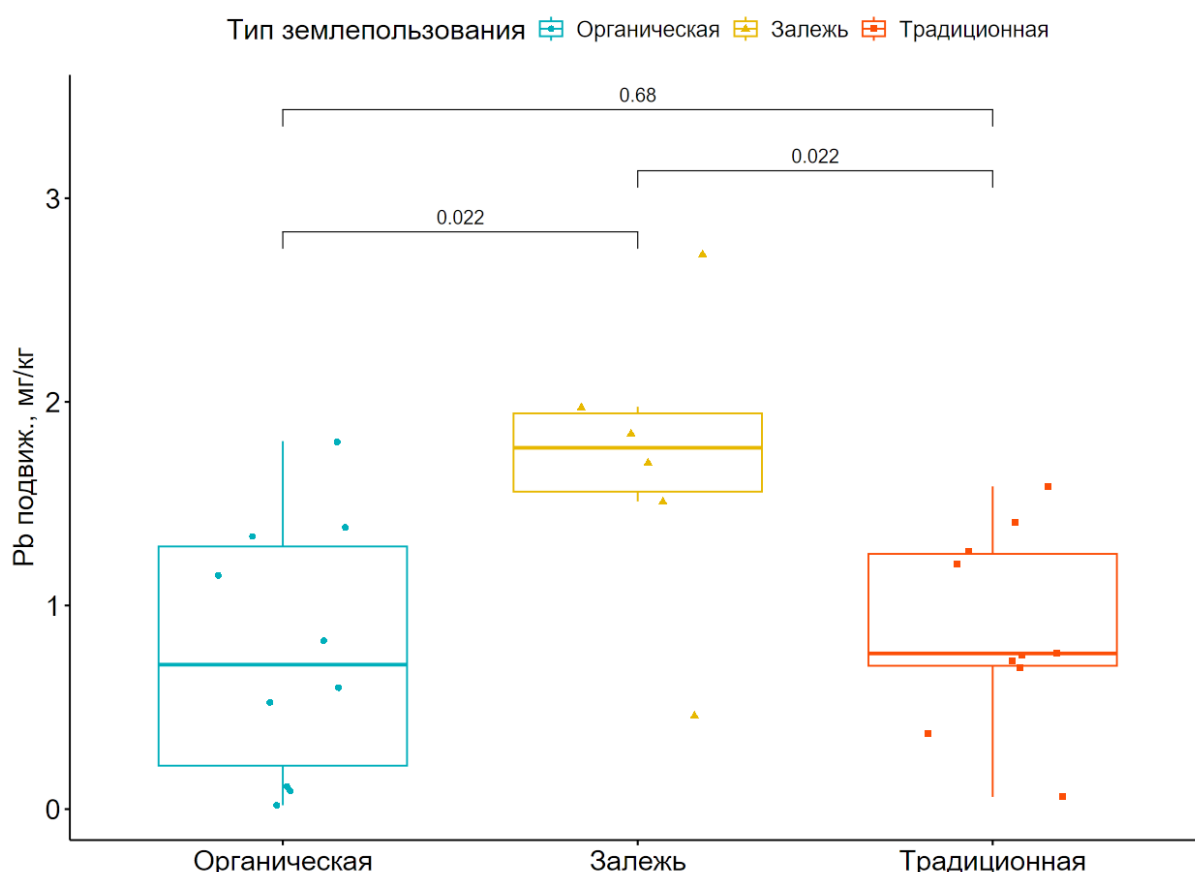


Рисунок 4.5 – Зависимость содержания подвижных форм свинца (мг/кг) в почве исследуемых ампелоценозов от уровня антропогенного воздействия при разных системах землепользования согласно критерию Уилкоксона.

При этом средние значения валового содержания кадмия во всех категориях хозяйств были примерно одинаковыми (0,20–0,23 мг/кг), в то время как в залежных почвах содержание его подвижных форм оказалось в 1,7 раза выше, а их доля в валовом содержании составила 87% против 59 и 43% в органических и традиционных хозяйствах соответственно. Тем не менее, содержание кадмия в почве всех хозяйств не превышало величину ОДК (2,0 мг/кг) и кларковое содержание элемента (0,5 мг/кг) для почв региона исследования [22].

Валовое содержание хрома и свинца в поверхностном горизонте почв винодельческих хозяйств изменялось в пределах от 12,9 до 57,7 мг/кг и от 7,1 до 23,5 мг/кг соответственно (табл. 4.2). Среднее валовое содержание как хрома, так и свинца в почвах органических и традиционных хозяйств было сопоставимым и соответственно на 18–19 и 27–29% превышало аналогичный показатель в почвах залежи [10, 22].



Рисунок 4.6 – Зависимость содержания подвижных форм кадмия (мг/кг) в почве исследуемых ампелоценозов от уровня антропогенного воздействия при разных системах землепользования согласно критерию Уилкоксона.

На долю подвижных форм хрома и свинца [21, 22] приходилось всего 7–11 и 7–18% от их валового содержания соответственно, причем в почвах залежи их было заметно больше. Превышение ПДК подвижной формы хрома было зафиксировано только в горизонте 0–10 см органического хозяйства № 5. Содержание хрома в почвах всех исследуемых ампелоценозов не превышало содержания элемента в региональной эталонной почве. Валовое содержание и содержание подвижных форм свинца во всех хозяйствах оказались значительно ниже установленных нормативных значений, а по валовому содержанию – ниже данного показателя в региональной эталонной почве или примерно на одном уровне с ним [21, 22].

Среднее валовое содержание цинка в почвах органических и традиционных хозяйств составило 51 мг/кг, что соответственно на 31 и 29% выше, чем в почвах залежи (табл. 4.2). Однако обращает внимание очень низкое содержание подвижных форм цинка, доля которых от валового содержания составила всего 1,1–1,8% в зависимости от хозяйства. Это значительно ниже, чем отмеченные аналогичные значения для других исследованных металлов. В то же время, как и в случае с другими металлами, доля подвижных форм цинка в залежных почвах оказалась выше по сравнению с практикующими органическими и традиционными хозяйствами. Превышения установленных нормативных значений по валовому содержанию и содержанию подвижных форм цинка в почве зафиксировано не было, как не было превышения валового содержания цинка относительно его уровня в региональной эталонной почве [22].

Таким образом, по относительной подвижности рассматриваемые тяжелые металлы в почвах ампелоценозов Севастопольского района располагались в ряду: $Cd \gg Cr \approx Pb > Cu > Zn$.

Статистическая обработка полученных данных показала наличие зависимости между содержанием подвижных форм хрома ($p = 0,03$) (рис. 4.4), свинца ($p = 0,02$) (рис. 4.5) и кадмия ($p = 0,04$) (рис. 4.6) в почве исследуемых виноградников и практикуемой в хозяйстве системой землепользования. Достоверно наибольшее содержание подвижных форм хрома, свинца и кадмия установлено в залежной почве.

4.3 Анализ экологического состояния почв виноградников с разным уровнем антропогенного воздействия по показателям почвенного дыхания и экофизиологических индексов

Дыхание почвы является информативным показателем ее биологической активности. Дыхание почвы, освобожденной от корней растений и обусловленное только деятельностью микроорганизмов (базальное дыхание, БД) широко используется для определения физиологического статуса почвенного микробиома [8, 39, 74, 364].

Величина базального дыхания в поверхностном горизонте почв органических, традиционных хозяйств и залежи колебалась в пределах от 0,25 до 1,50; от 0,11 до 0,54 и от 0,21 до 0,45 мкг $\text{CO}_2\text{-C/г}$ почвы/ч соответственно (табл. 4.3). В подповерхностном горизонте почвы большинства хозяйств величина базального дыхания снизилась по сравнению с горизонтом 0–10 см и варьировалась в пределах 0,20–0,92; 0,09–0,33 и 0,06–0,31 мкг $\text{CO}_2\text{-C/г}$ почвы/ч соответственно в органических, традиционных хозяйствах и залежи.

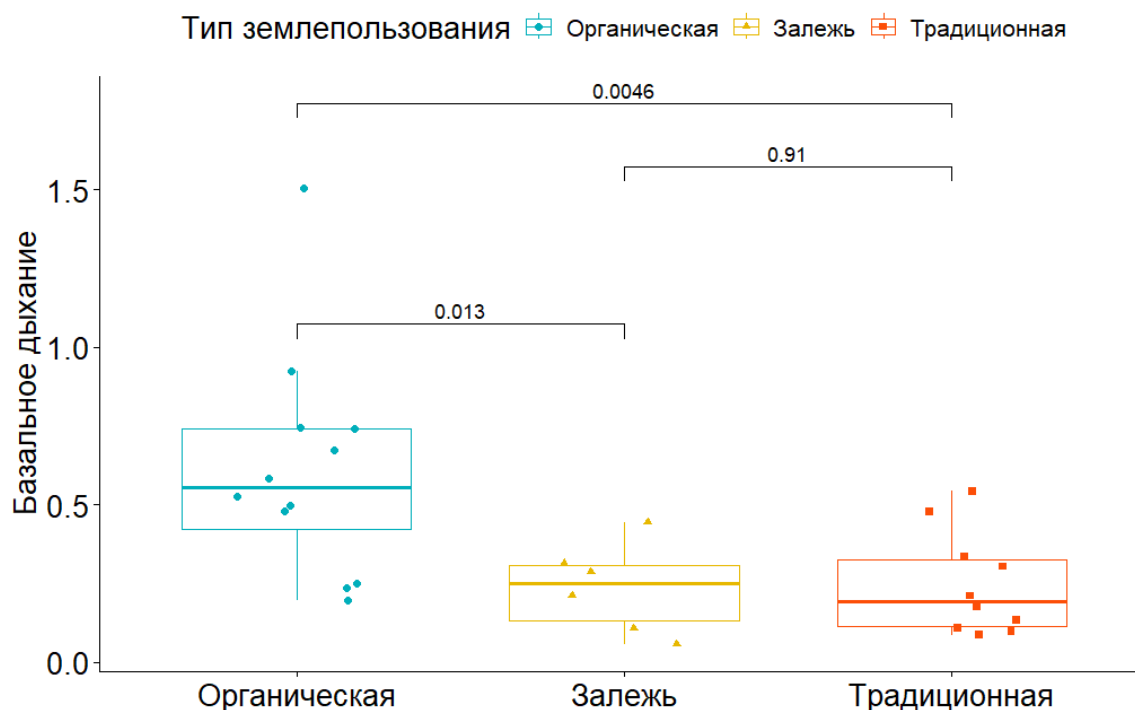


Рисунок 4.7 – Зависимость базального дыхания (мкг $\text{CO}_2\text{-C/г}$ почвы/ч) почвы исследуемых ампелоценозов от уровня антропогенного воздействия при разных системах землепользования согласно критерию Уилкоксона.

Таблица 4.3 – Показатели почвенного дыхания (базальное (БД, мкг CO₂-С/г почвы/ч) и субстрат-индуцированное (СИД, мкл CO₂/г почвы/ч)), содержание углерода микробной биомассы (Смик, мкг С/г почвы), микробный метаболический коэффициент (qCO₂, мкг CO₂-С/мг Смик/ч), доля углерода микробной биомассы в органическом углероде (Смик/Сорг, %), эффективность использования органического вещества микроорганизмами (qCO₂/Сорг, мкг CO₂-С/мг Смик/ч/г Сорг/г почвы) и коэффициент микробного дыхания (QR) в почвах виноградников (ср. ± ст. ошибка)

Номер хозяйства	Система земледелия	Глубина, см	БД	СИД	Смик	qCO ₂	Смик/Сорг	qCO ₂ /Сорг	QR	
1	Органическая	0-10	0,59 ± 0,09	9,05 ± 0,58	363 ± 27	1,63 ± 0,28	2,45	110,1	0,07	
		10-20	0,67 ± 0,08	8,57 ± 0,46	344 ± 25	1,94 ± 0,49	1,39	78,5	0,08	
2		0-10	0,48 ± 0,18	6,27 ± 0,58	251 ± 23	1,90 ± 0,33	0,71	53,8	0,08	
		10-20	0,24 ± 0,14	8,47 ± 0,67	340 ± 29	0,69 ± 0,19	1,37	27,8	0,03	
3		0-10	0,74 ± 0,29	22,65 ± 0,96	907 ± 21	0,82 ± 0,38	3,98	36,0	0,05	
		10-20	0,53 ± 0,21	21,38 ± 0,84	856 ± 34	0,61 ± 0,21	3,87	27,6	0,02	
4		0-10	0,74 ± 0,20	15,58 ± 0,77	624 ± 41	1,20 ± 0,54	2,24	43,2	0,05	
		10-20	0,20 ± 0,16	2,13 ± 0,46	86 ± 13	2,16 ± 0,59	0,35	87,1	0,09	
5		0-10	1,50 ± 0,27	19,89 ± 0,91	797 ± 33	1,90 ± 0,32	2,29	54,6	0,08	
		10-20	0,92 ± 0,13	7,18 ± 0,44	288 ± 48	3,21 ± 0,58	0,75	83,6	0,13	
6		0-10	0,25 ± 0,29	8,31 ± 0,39	333 ± 29	0,73 ± 0,13	1,73	37,8	0,03	
		10-20	0,50 ± 0,18	8,95 ± 0,33	359 ± 47	1,41 ± 0,21	2,06	81,0	0,06	
7		Традиционная	0-10	0,48 ± 0,01	6,27 ± 0,56	251 ± 32	1,90 ± 0,17	0,71	53,8	0,08
			10-20	0,10 ± 0,04	3,87 ± 0,49	155 ± 19	0,63 ± 0,09	0,45	18,5	0,03
8	0-10		0,30 ± 0,12	3,52 ± 0,61	141 ± 52	2,15 ± 0,36	0,40	61,6	0,09	
	10-20		0,18 ± 0,05	7,52 ± 0,77	302 ± 24	0,58 ± 0,04	0,92	17,7	0,02	
9	0-10		0,21 ± 0,08	2,11 ± 0,41	85 ± 17	2,44 ± 0,32	0,19	56,2	0,10	
	10-20		0,13 ± 0,04	3,04 ± 0,36	122 ± 28	1,11 ± 0,11	0,30	26,9	0,04	
10	0-10		0,54 ± 0,21	5,89 ± 0,55	236 ± 51	2,31 ± 0,32	1,16	113,2	0,09	
	10-20		0,09 ± 0,01	4,85 ± 0,48	194 ± 26	0,45 ± 0,08	0,99	23,0	0,02	
11	0-10		0,11 ± 0,05	2,28 ± 0,39	92 ± 18	1,23 ± 0,17	0,28	38,0	0,05	
	10-20		0,33 ± 0,14	2,13 ± 0,31	86 ± 15	4,01 ± 0,87	0,27	125,7	0,15	
12	Залежь		0-10	0,45 ± 0,03	2,03 ± 0,41	82 ± 17	5,57 ± 0,87	0,26	168,3	0,22
			10-20	0,11 ± 0,08	3,19 ± 0,47	128 ± 36	0,84 ± 0,24	0,41	27,2	0,03
13			0-10	0,21 ± 0,02	3,10 ± 0,31	125 ± 42	1,70 ± 0,56	0,34	46,7	0,07
			10-20	0,06 ± 0,01	4,46 ± 0,48	179 ± 51	0,33 ± 0,19	0,47	8,6	0,01
14		0-10	0,29 ± 0,04	1,98 ± 0,59	80 ± 21	3,61 ± 0,78	0,25	113,9	0,15	
		10-20	0,31 ± 0,02	2,50 ± 0,28	100 ± 28	3,14 ± 0,64	0,32	101,9	0,12	

Средняя величина БД в целом по типам хозяйств изменялась в ряду: в горизонте 0–10 см – органические хозяйства (0,72 мкг $\text{CO}_2\text{-C/г}$ почвы/ч) > традиционные хозяйства (0,33 мкг $\text{CO}_2\text{-C/г}$ почвы/ч) = залежь (0,32 мкг $\text{CO}_2\text{-C/г}$ почвы/ч); в горизонте 10–20 см – органические хозяйства (0,51 мкг $\text{CO}_2\text{-C/г}$ почвы/ч) > традиционные хозяйства (0,17 мкг $\text{CO}_2\text{-C/г}$ почвы/ч) = залежь (0,16 мкг $\text{CO}_2\text{-C/г}$ почвы/ч). При этом в подповерхностном горизонте показатель БД снизился в почвах органических хозяйств в 1,4 раза, тогда как традиционных хозяйств и залежи – в 1,9 и 2 раза соответственно. Это свидетельствует о том, что почвенный микробиом в органических виноградниках активен в корнеобитаемом слое почвы большей мощности по сравнению с другими исследуемыми типами землепользования. Корреляционный анализ с применением критерия Уилкоксона подтвердил статистически значимые отличия по величине БД между органическими хозяйствами, с одной стороны, и традиционными хозяйствами и залежью, с другой (рис. 4.7). В подповерхностном горизонте почвы большинства хозяйств величина базального дыхания снизилась по сравнению с горизонтом 0–10 см и варьировалась в пределах 0,20–0,92; 0,09–0,33 и 0,06–0,31 мкг $\text{CO}_2\text{-C/г}$ почвы/ч соответственно в органических, традиционных хозяйствах и залежи.

Величина субстрат-индуцированного дыхания (СИД), которая характеризует потенциальную активность микроорганизмов в почве, варьировалась в горизонте 0–10 см в очень широких пределах: от 6,27 до 22,65 и от 2,11 до 6,27 мкл $\text{CO}_2/\text{г}$ почвы/ч соответственно в органических и традиционных виноградниках.

Результаты корреляционного анализа с использованием критерия Уилкоксона (рис. 4.8) подтвердили статистически значимое превышение показателей СИД в почвах органических хозяйств по сравнению с традиционными хозяйствами и постагрогенными почвами.

Более высокие значения показателей БД и СИД указывают на способность почвенной экосистемы поддерживать устойчивость под воздействием внешних факторов. Состояние микробиома почв органических хозяйств оказалось более стабильным по сравнению с почвами хозяйств, применяющих или применявших ранее химическую систему защиты винограда от вредных организмов.

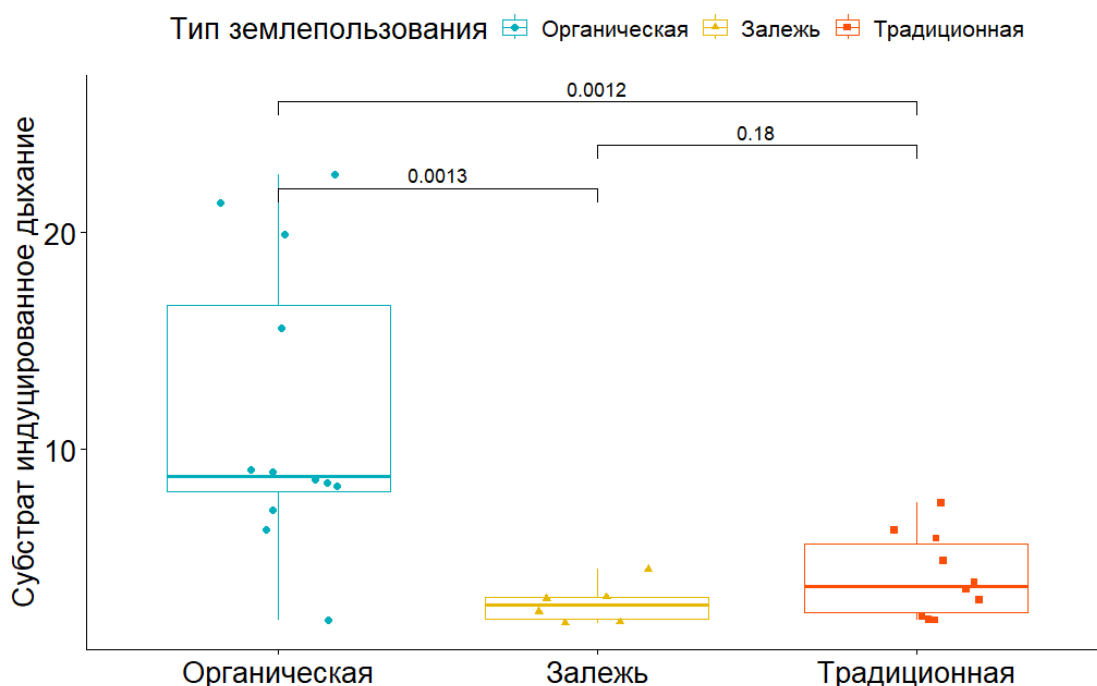


Рисунок 4.8 – Зависимость субстрат-индуцированного дыхания (мкл $\text{CO}_2\text{-C/g}$ почвы/ч) почвы исследуемых ампелоценозов от уровня антропогенного воздействия при разных системах землепользования согласно критерию Уилкоксона.

Содержание углерода микробной биомассы $\text{С}_{\text{мик}}$, как и показатели дыхания, отличалось высокой вариабельностью в зависимости от системы землепользования и хозяйства даже в пределах одной системы.

Исходя из средних значений $\text{С}_{\text{мик}}$, тенденция к их повышению в почвах органических виноградников по сравнению с почвами традиционных хозяйств и залежей сохранялась. Так среднее значение $\text{С}_{\text{мик}}$ в почве органических виноградников оказалось в 2,8 и 4,0 раза выше, чем в традиционных и залежи соответственно. Если базальное дыхание для почв традиционных виноградников и залежей было примерно одинаковым, то наименьшее значение субстрат-индуцированного дыхания [15], как и содержания углерода микробной биомассы, было установлено в почве залежи. Особенно низкими значениями БД, СИД и $\text{С}_{\text{мик}}$ отличалась постагрогенная почва хозяйства № 14. Напротив, максимальные значения дыхательной активности почвы (15,58–22,65 мкл $\text{CO}_2\text{-C/g}$ почвы/ч) и

содержания углерода микробной биомассы [156] (624–907 мкг С/г почвы) были обнаружены в хозяйствах №№ 3, 4 и 5, практикующих органическую систему землепользования.

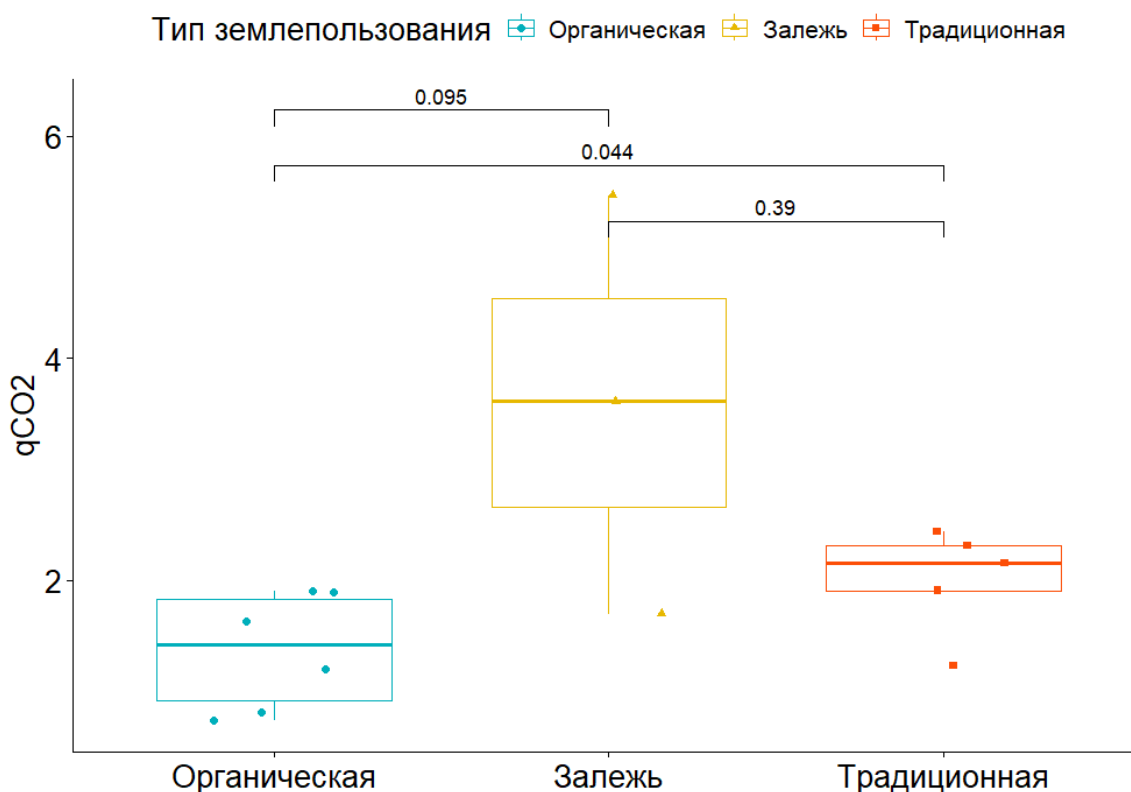


Рисунок 4.9 – Зависимость микробного метаболического коэффициента (qCO_2) в горизонте 0–10 см почв исследуемых ампелоценозов от уровня антропогенного воздействия при разных системах землепользования согласно критерию Уилкоксона.

Наибольший средний показатель микробного метаболического коэффициента qCO_2 , который считается показателем микробного стресса, обнаружен для залежных почв (3,63 мкг CO_2 -С/мг Смик/ч), в которых он оказался в 1,5 и 1,7 раза выше, чем в традиционных и органических хозяйствах соответственно (табл. 4.4). В верхнем слое почв залежи и традиционных хозяйств значения qCO_2 превышали показатели подповерхностного горизонта в 2,5 и 1,5 раза соответственно, тогда как в органических хозяйствах наблюдалась противоположная тенденция.

Хотя наши исследования не выявили значимых отличий в значениях

микробного метаболического коэффициента для залежных почв и почв традиционных и органических хозяйств, коэффициент qCO_2 в поверхностном горизонте почв органических хозяйств был значимо ниже по сравнению с традиционными ($p = 0,044$) (рис. 4.9).

Таблица 4.4 – Средние показатели микробного метаболического коэффициента (qCO_2 , мкг CO_2 -С/мг Смик/ч), доля углерода микробной биомассы в органическом углероде (Смик/Сорг, %), эффективность использования органического вещества микроорганизмами $qCO_2/Сорг$, мкг CO_2 -С/мг Смик/ч/г Сорг/г почвы) и коэффициент микробного дыхания (QR) в горизонтах 0–10 и 10–20 см почв виноградников.

Система землепользования	qCO_2		Смик/Сорг		$qCO_2/Сорг$		QR	
	0–10	10–20	0–10	10–20	0–10	10–20	0–10	10–20
Органическая	1,36	1,67	2,23	1,63	55,9	64,3	0,06	0,07
<i>среднее</i>	1,52		1,93		60,1		0,07	
Традиционная	2,01	1,36	0,55	0,59	64,6	42,4	0,08	0,05
<i>среднее</i>	1,69		0,57		53,5		0,07	
Залежь	3,63	1,44	0,28	0,40	109,6	45,9	0,15	0,05
<i>среднее</i>	2,54		0,34		77,8		0,10	

Доля углерода микробной биомассы составляет 1–5% от органического углерода почвы [78, 156], и чем она выше, тем доступнее органический углерод. Поэтому в исследованиях микробиологической активности почвы нередко прибегают к расчету соотношения Смик к Сорг (иногда это соотношение называют «микробным коэффициентом») как показателя благоприятности условий функционирования микробного сообщества почвы, который учитывает количество и качество органического вещества почвы и степень ее микробной колонизации [136].

Максимальной средней величины отношение Смик/Сорг достигло в поверхностном горизонте почв органических хозяйств и составило в среднем 2,23%, тогда как в почвах традиционных хозяйств и залежи это отношение оказалось соответственно в 4,1 и 8 раз ниже (табл. 4.4). В горизонте 10–20 см

показатель $S_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ также был в 2,8 и 4,1 раза ниже соответственно в почвах традиционных виноградников и в залежных почвах по сравнению с органическими. Таким образом, высокие значения $S_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ в почве органических винодельческих хозяйств указывают на то, что биотоп благоприятствует разнообразию эдафона и активному метаболизму почвенной микрофлоры, создает благоприятные условия для закрепления углерода в составе микробной биомассы.

Усредненные данные по величине $S_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ показали, что в почве органических виноградников этот показатель был в 1,4 раза выше, в почве залежи – в 1,4 раза ниже в горизонте 0–10 см по сравнению с горизонтом 10–20 см, а в почве традиционных виноградников отличий по данному отношению между горизонтами практически не наблюдалось.

Отношение q_{CO_2} к $C_{\text{орг}}$ показывает эффективность использования органического вещества почвы микроорганизмами и, в отличие от показателя $S_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$, как правило, выше в нарушенных почвах. Отношение $q_{\text{CO}_2}/C_{\text{орг}}$ в почвах исследуемых виноградников колебалось в очень широких пределах от 8,6 (в горизонте 10–20 см залежи хозяйства № 13) до 168,3 $\text{мкг CO}_2\text{-C/мг } S_{\text{мик}}/\text{ч/г } C_{\text{орг}}/\text{г почвы}$ (в горизонте 0–10 см залежи хозяйства № 12) (табл. 4.3). Усредненные данные показали, что наибольшие отличия по величине $q_{\text{CO}_2}/C_{\text{орг}}$ наблюдались в поверхностном горизонте, тогда как в подповерхностном отличия между хозяйствами, практикующими разные типы землепользования, сглаживались (табл. 4.4). Наибольшее значение $q_{\text{CO}_2}/C_{\text{орг}}$ зафиксировано в поверхностном слое залежных почв – 109,6 $\text{мкг CO}_2\text{-C/мг } S_{\text{мик}}/\text{ч/г } C_{\text{орг}}/\text{г почвы}$. В традиционных и органических хозяйствах этот показатель был ниже в 1,7 и 2 раза соответственно. Это может свидетельствовать о том, что в залежной почве эффективность усвоения органического углерода почвенными микроорганизмами в целом ниже, чем в действующих хозяйствах, хотя в отдельных случаях рассматриваемый показатель был высоким и в органическом хозяйстве № 1, и в традиционных хозяйствах № 10 и № 11, а низким значением $q_{\text{CO}_2}/C_{\text{орг}}$ отличалась залежная почва хозяйства № 13. Эти отличия, возможно, связаны с особенностями применяемых в разных винодельческих хозяйствах агротехнологий, либо со сложившимися локальными

климатическими и почвенными условиями, к которым показатели биологической активности почвы чрезвычайно восприимчивы.

Коэффициент микробного дыхания (QR) - важный показатель почвенного дыхания, рассчитываемый как отношение базального дыхания (БД) к субстрат-индуцированному дыханию (СИД). Этот интегральный параметр отражает состояние почвы и ее микробного сообщества. В ходе исследования максимальное среднее значение QR (0,15) зарегистрировано в поверхностном слое залежных почв (табл. 4.4). В традиционных хозяйствах этот показатель был значительно ниже (0,08), а минимальные значения (0,06) наблюдались в органических хозяйствах (табл. 4.4). В подповерхностном горизонте отличий по величине усредненного коэффициента микробного дыхания между традиционными хозяйствами и залежью не обнаружено, показатель QR был очень низким, что может свидетельствовать о дефиците элементов питания в более глубоких горизонтах почвы.

Обсуждение результатов по главе 4

Наши исследования по оценке дыхательной активности почвенной микробиоты в ампелоценозах выявили существенные изменения экофизиологического статуса почвенного микробиома виноградников в зависимости от уровня антропогенного воздействия вследствие применения разных систем землепользования. Есть мнение, что активность почвенных микробоценозов в большей степени зависит от общего пула органического углерода [215]. Согласно нашим данным [156], содержание органического вещества в почвах органических хозяйств было в среднем на 26–31% ниже, чем в почвах традиционных хозяйств и залежи, хотя значимость отличий по величине Сорг между хозяйствами с разным типом землепользования статистически не подтвердилась. Однако достоверные отличия были обнаружены по всем исследованным показателям микробной активности и рассчитанным экофизиологическим индексам, которые показали, что наиболее благоприятные условия для функционирования почвенной микробиоты сложились на

виноградниках в условиях органического землепользования.

Базальное дыхание, которое отражает текущую активность микроорганизмов, и субстрат-индуцированное дыхание, отражающее потенциальную активность микробиоты при добавлении легкоразлагаемого субстрата, в поверхностном горизонте почвы органических хозяйств оказались соответственно в 2,2–2,3 и 3,4–5,8 раза выше, чем в почве традиционных винодельческих хозяйств и залежи [15]. Это указывает на то, что микробное сообщество почв органических хозяйств обладает более высокой метаболической активностью и способно быстро реагировать на доступные ресурсы. В обоих изучаемых горизонтах почв органических хозяйств обнаружено максимальное содержание микробной биомассы (545,8 мкг С/г почвы), что указывает на благоприятные условия для их развития. Повышенная микробная биомасса и активность микроорганизмов в почвах органических хозяйств, вероятно, обусловлена характерной для этого типа земледелия практикой внесения органических удобрений, компостов, сидератов и других легкоразлагаемых субстратов при полном отсутствии синтетических минеральных удобрений и агрохимикатов.

Также в почве органических винодельческих хозяйств отмечено самое низкое значение микробного метаболического коэффициента qCO_2 и коэффициента микробного дыхания QR , что подтверждает эффективность функционирования микробиоты, экономно расходующей энергию на поддержание своей жизнедеятельности. Это характерно для стабильной почвенной экосистемы, в которой микроорганизмы адаптированы к условиям среды. Схожие данные приводятся в работе Probst et al. (2008), где изучалось влияние органической и традиционной технологий выращивания винограда на почвенную микробную биомассу и экофизиологические индексы в условиях северо-востока Франции [14, 291]. Авторы обнаружили наибольшее содержание микробной биомассы и наименьшее значение qCO_2 в почве органических хозяйств, причем микробиологическая активность почвы положительно коррелировала с продолжительностью практики органического землепользования [20].

Почвы органических хозяйств превосходили традиционные хозяйства и залежные земли по содержанию Смик – в 3,4 и 5,7 раза соответственно. Минимальное среднее содержание углерода микробной биомассы (96 мкг С/г почвы) установлено в поверхностном горизонте залежной почвы. Здесь же обнаружен самый высокий показатель микробного метаболического коэффициента qCO_2 , что означает бóльшие траты микроорганизмами энергии на дыхание, чем на рост. Это, в свою очередь, может быть связано с неоптимальными условиями или низким качеством субстрата. Считается, что повышенные значения микробного метаболического коэффициента характерны для нарушенных или деградированных почв. В почвах устойчивых экосистем этот показатель находится в диапазоне $\leq 2-4$ мкг $CO_2-C/мг$ Смик/ч [14], тогда как в нашем исследовании в поверхностном горизонте залежной почвы хозяйства № 12 qCO_2 составил 5,57 мкг $CO_2-C/мг$ Смик/ч. Это указывает на низкую эффективность микроорганизмов в использовании органических соединений для поддержания [156] своей жизнедеятельности и высокую скорость отмирания микробной биомассы, что подтверждают отмеченный выше низкий показатель содержания углерода микробной биомассы и минимальная доля Смик в Сорг (0,28% против 2,23% в органических хозяйствах) (табл. 4.3.2). Также на дисбаланс в функционировании микробиоты этой категории почв указывает и максимальный среди всех изученных почв показатель $qCO_2/Сорг$.

По данным Ковалевской с соавторами [215], перевод пахотной почвы в залежную приводил к накоплению органического вещества в верхних горизонтах почвы, что, в свою очередь, способствовало усилению дыхательной активности почв и увеличению запасов микробного углерода. Результаты наших исследований показали, что содержание Сорг в залежных почвах действительно было несколько выше, чем в почвах органических хозяйств, однако это не приводило к улучшению показателей микробиологической активности. Напротив, активная и потенциально активная (реагирующая на легкодоступный субстрат) часть микробного пула в залежных почвах оказалась малочисленной и слабоактивной по сравнению с почвой действующих виноградников. Установленные микробиологические

показатели и индексы также свидетельствуют об определенной степени нарушенности микробного сообщества залежных почв.

После прекращения сельскохозяйственного использования почва находится в состоянии восстановления, и ее микробное сообщество может быть менее сбалансированным, что приводит к неэффективному использованию субстрата. Причиной данного явления могут выступить снижение минерализуемого пула (совокупности растительных остатков, микробной биомассы и подвижного гумуса) и повышение доли устойчивых форм органического вещества, которые труднее минерализуются. Соответственно, чтобы разложить труднодоступный субстрат, микроорганизмы тратят больше энергии на дыхание, что увеличивает такие экофизиологические индексы, как qCO_2 , $qCO_2/C_{орг}$ и QR . Также следует обратить внимание на тот факт, что залежные почвы ранее порядка 40–60 лет находились в сельскохозяйственном обороте с применением традиционных агротехнологий и химической системы защиты растений винограда, вследствие чего в них могут сохраняться остаточные количества пестицидов и других агрохимикатов, которые способны долгое время подавлять активность микроорганизмов и увеличивать долю энергии, используемой ими на дыхание [82].

Почвы традиционных винодельческих хозяйств по всем изученным показателям почвенного дыхания и расчетным индексам уступали почвам органических хозяйств, однако микробиологическая активность и стабильность почвенного микробиома в них оказались все же выше, чем в залежных почвах. Возможно, определенную роль в этом сыграл фактор времени: в исследованных традиционных хозяйствах виноград культивировался в течение 5–20 лет, тогда как залежные почвы имели существенно более длительную историю землепользования.

Наши исследования выявили статистически значимое более высокое содержание подвижной серы в почве органических хозяйств по сравнению с традиционными и залежными почвами [15]. В научной литературе достаточно широко обсуждается вопрос дефицита серы в агроэкосистемах [11, 33, 53], который действительно является распространенным явлением для пахотных почв на

территории нашей страны, однако мало внимания уделяется проблеме ее накопления в верхних частях почвенного профиля [185]. Между тем избыток серы в почве может оказывать токсическое воздействие на растения и почвенную микробиоту, нанести вред биоразнообразию и здоровью человека [15, 315, 322].

По всей видимости, существенным источником пополнения пула подвижной серы в почве при производстве органической винодельческой продукции являлось поступление элемента с разрешенными к применению в таком типе хозяйств серосодержащими фунгицидами, акарицидами и репеллентами. Причем в ближайшие годы следует ожидать увеличения числа таких обработок ампелоценозов Крыма вследствие происходящих в регионе климатических изменений, появления резистентных штаммов патогенов и новых возбудителей заболеваний, использования восприимчивых сортов [15, 160, 171, 345]. В этой связи следует отметить, что повышенное содержание серы в почве органических виноградников увеличивает доступность растениям азота и его усвоение, что может отрицательно влиять на органолептические и физико-химические показатели получаемой винодельческой продукции, поскольку приводит к снижению накопления в ягодах винограда фенольных соединений, определяющих качество виноматериала и его принадлежность к определенному терруару [9, 259].

Накопление серы в почве ампелоценозов может также иметь негативные экологические последствия для сопредельных сред [10]. Известно, что миграционные потери серы вследствие вымывания сульфат-ионов из почвы являются одними из главных статей ее расхода, хотя и сильно зависящим от почвенно-климатических условий. Немногочисленные исследования на эту тему применительно к ампелоценозам свидетельствуют о том, что сера в виноградных насаждениях подвержена вымыванию из корнеобитаемого слоя, главным образом, в хорошо обеспеченных влагой регионах и при использовании орошения. В частности, интенсивное выщелачивание сульфат-иона отмечалось в теплом и влажном климате региона Апулия на юго-востоке Италии и на орошаемых виноградниках северной Калифорнии [9, 15, 186, 303]. При сильном переувлажнении и возникновении анаэробных условий возможны также

газообразные потери серы из почвы [15].

В условиях Севастопольского региона Республики Крым, где запасы почвенной влаги чаще всего выступают лимитирующим фактором урожайности, потери подвижной серы в результате процессов вымывания в течение вегетационного сезона при отсутствии ирригационных систем оцениваются как незначительные. Дисбаланс между поступлением и расходом серы в сторону увеличения первой статьи может привести к ее накоплению в верхних горизонтах почв во время вегетации растений винограда, что было установлено в настоящем исследовании для почв органических винодельческих хозяйств.

Таким образом, по результатам анализа экологических показателей и микробиологической активности почвы следует отметить следующее:

1. Высокие показатели дыхания (БД и СИД) почв органических виноградников на фоне снижения среднего значения Сорг по сравнению с почвами традиционных хозяйств и залежи свидетельствует о быстром круговороте органического вещества, высоком содержании в его составе легкоразлагаемых форм (за счет внесения компостов, сидератов и т.д.), которые быстро усваиваются микроорганизмами. Это поддерживает высокую биологическую активность почвы, но не всегда приводит к существенному накоплению в ней стабильного органического вещества, что в долгосрочной перспективе может привести к истощению запасов гумуса. Таким образом, полученные нами результаты подчеркивают важность не только количественных характеристик органического вещества почвы, но и качественных, а также демонстрируют роль микробной активности в поддержании здоровья почвы.

2. Некоторое повышение накопления органического вещества в почвах традиционных хозяйств и залежи на фоне низких показателей почвенного дыхания (БД и СИД) и низкого (менее 2%) отношения Смик/Сорг может косвенно указывать на замедление темпов минерализации органического вещества из-за подавления микробного разнообразия и активности в результате применяющихся или применявшихся ранее интенсивных приемов возделывания винограда (использование пестицидов, агрохимикатов, интенсивная механическая обработка

почвы) [21]. В связи с этим при проведении экологических мониторинговых исследований почв ампелоценозов имеет смысл определять не только валовое количество Сорг, но и его содержание в химически лабильных и биологически активных пулах и фракциях.

3. Очень низкие показатели QR в действующих винодельческих хозяйствах и, прежде всего, органических указывают, с одной стороны, на здоровую и эффективную почвенную экосистему, где микроорганизмы активно участвуют в круговороте питательных веществ. Однако, с другой стороны, согласно подходу в трактовке данного показателя, предложенном Благодатской и др. (1995), значения QR менее 0,1 отражают недостаток питательных веществ в почве [14]. Согласно результатам наших исследований, представленным в разделе 4.1, в почве многих из исследованных винодельческих хозяйств независимо от типа землепользования обнаружен недостаток подвижного фосфора. Также распространенным явлением для почв региона исследования является недостаточное содержание в почве азота, хотя для качества ягод винограда и получаемой продукции данный показатель не имеет такого определяющего значения, как содержание фосфора и калия.

В интервале 0,1–0,2 величина QR свидетельствует о благоприятном состоянии почвенного микробного сообщества, а величины, превышающие 0,2–0,3, указывают на неблагоприятные климатические или антропогенные воздействия на почву. Залежная почва хозяйства № 12 со значением QR, равном 0,22, попала в эту категорию. В то же время высоких (близких к 1,0 и выше) значений QR, указывающих на интенсивное разложение органического вещества и нарушение стабильности почвенных микробиоценозов, в почве исследованных хозяйств не выявлено.

4. Содержание подвижной формы меди в почве семи из одиннадцати органических и традиционных винодельческих хозяйств и во всех залежных почвах превышало величину предельно-допустимой концентрации в 1,2–3,1 раза [82], что указывает на последствие применяемых для контроля вредных организмов на виноградниках медьсодержащих фунгицидов. Установлена достоверная зависимость между содержанием подвижных форм хрома, свинца и кадмия и

системой землепользования с более высоким их накоплением в залежных почвах по сравнению с почвами действующих виноградников. Эти данные в определенной мере объясняют выявленный дисбаланс в функционировании микробиоценоза почв залежи.

5. Почвы органических хозяйств отличались высокой обеспеченностью подвижной серой (18,3 мг/кг против 8,0 мг/кг в традиционных хозяйствах), что, по всей видимости, являлось следствием применения серосодержащих препаратов, включенных в перечень разрешенных для защиты растений в органическом земледелии. Однако существует мнение, что повышение доступной серы в почве ампелоценозов увеличивает доступность растениям азота и усвоение данных элементов, что в совокупности может привести к снижению накопления в ягодах винограда фенольных соединений и ухудшению качества получаемого из них виноматериала [9, 259].

Корреляционный анализ показал, что установленное по результатам проведенных исследований варьирование физико-химических, химических и биологических показателей почв не было связано с их типом и гипсометрическим положением винодельческих хозяйств (рис. 4.10).

Применение PCA-анализа позволило обобщить информацию, визуализировать результаты и подтвердить существенную разницу в почвенных свойствах (микробиологических и физико-химических) между виноградниками с разными системами хозяйствования (рис. 4.11).

Оценка правильного количества осей для интерпретации предполагает ограничение анализа описанием первых трех осей, которые обладают большей дисперсией, чем те, что получены по 0,95 квантилю случайных распределений (66,8% против 51,5%), и большей, чем все остальные главные компоненты. Следовательно, дальнейший анализ предполагает описание только этих главных компонент. Первые две из них описывают 48,12% общей дисперсии имеющегося набора данных. Это значение превышает контрольное значение (0,95 квантиль процентного распределения дисперсии, полученный при моделировании 924 214 таблиц данных эквивалентного размера на основе нормального распределения),

равное 30,39%, поэтому дисперсия, объясняемая этими главными компонентами, является значимой.

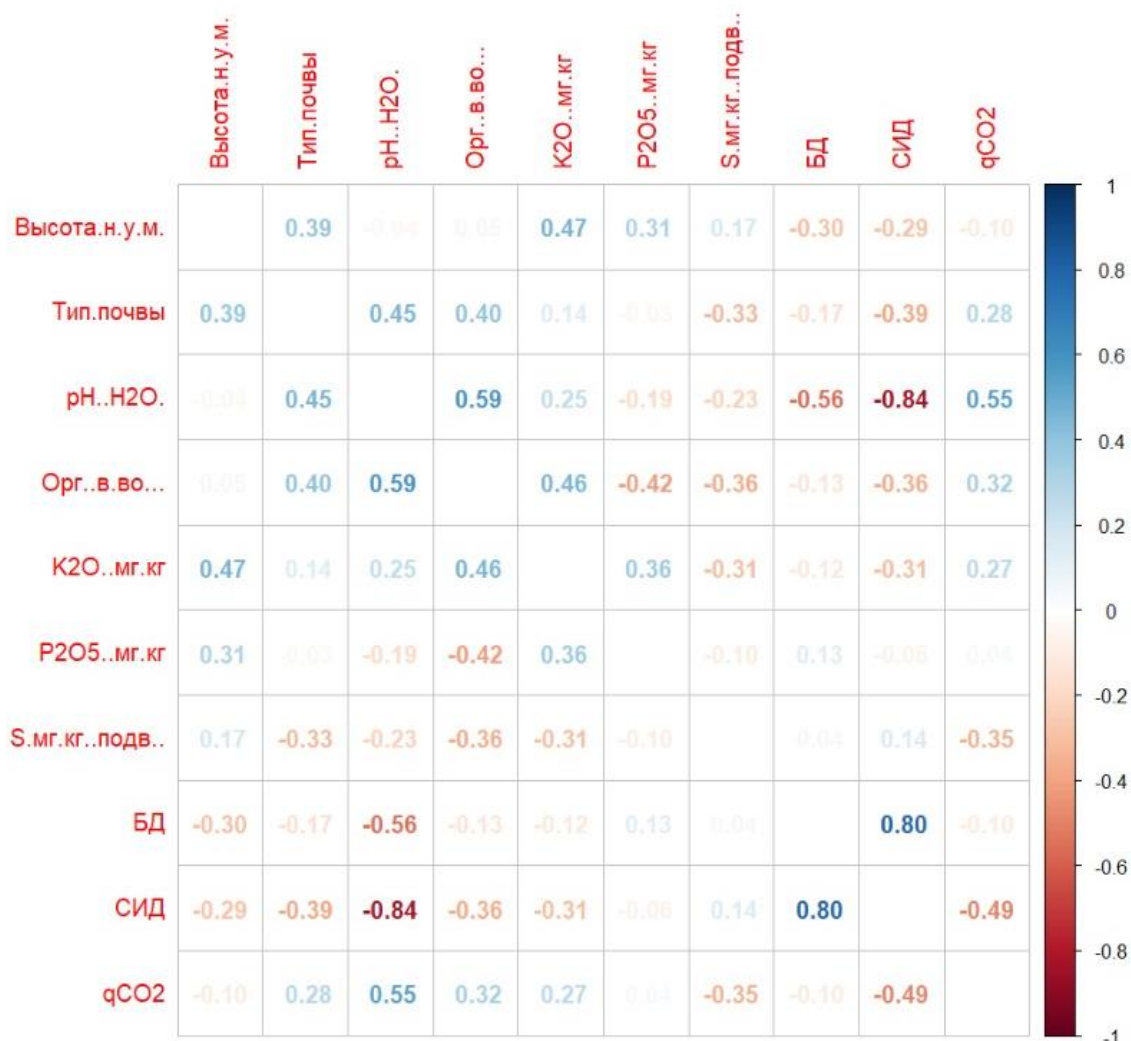


Рис. 4.10. Матрица корреляций между типом почв, высотой над уровнем моря, физико-химическими, химическими свойствами и параметрами дыхания почв ампелоценозов с разным уровнем антропогенного воздействия ($p < 0,05$).

Гистограммы в верхней части рисунка 4.11 А–С количественно оценивают вклад физико-химических свойств почвы и рассматриваемых микробиологических показателей и индексов по первым трем компонентам и дают пороговое значение для вклада более высоких переменных (красная пунктирная линия). Важно отметить, что группировка переменных в главные компоненты может быть логически интерпретирована. Так, первая главная компонента состоит в основном из переменных, связанных с микробной биомассой (Смик/Сорг, СИД, БД, Сорг) и

свойствами почвы и экосистемы, непосредственно влияющими на нее (возраст виноградника, $pH(H_2O)$)[156].

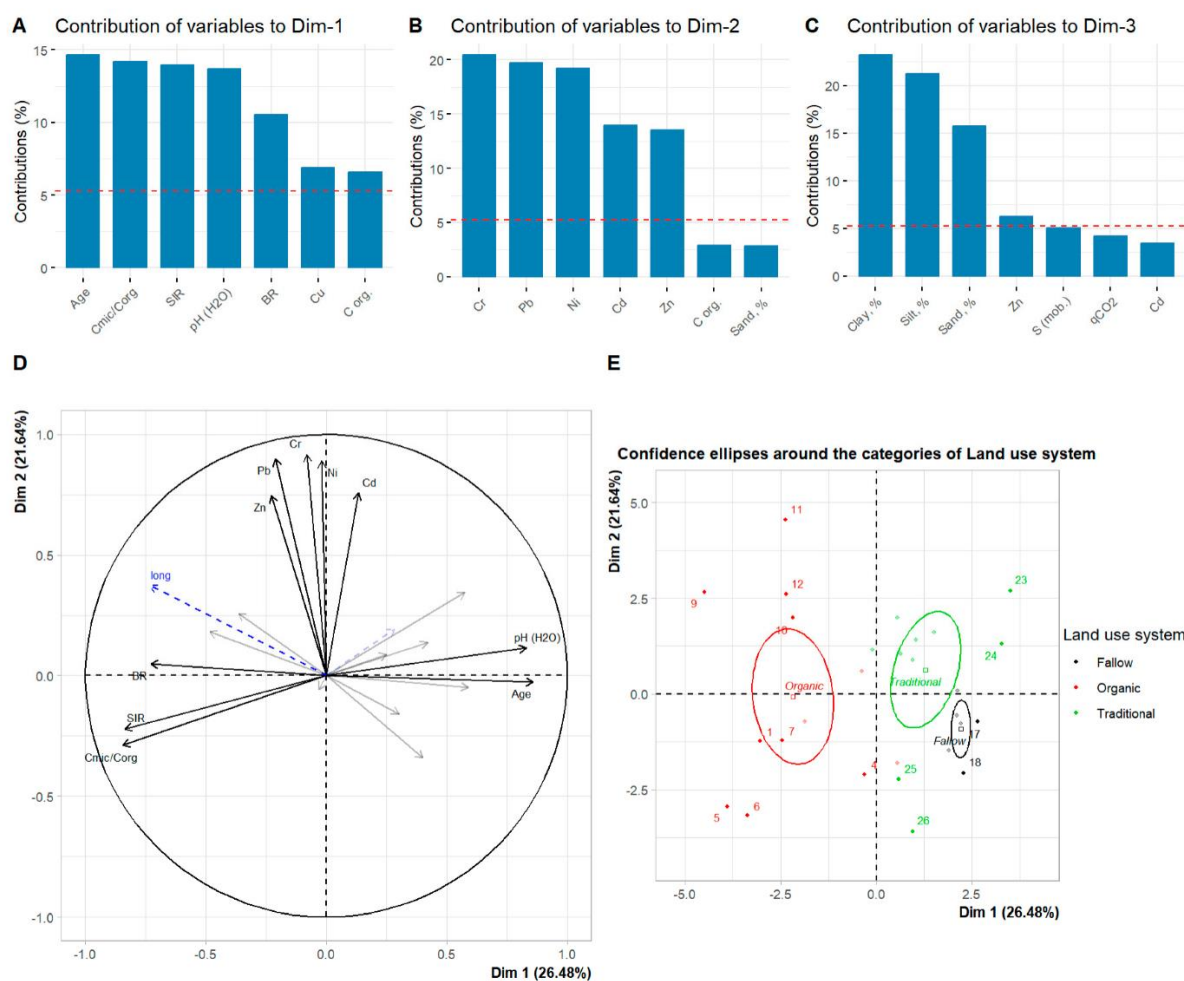


Рисунок 4.11 – Анализ главных компонент микробиологических (BR – базальное дыхание, SIR – субстрат-индуцированное дыхание, qCO_2 , $C_{мик}/C_{орг}$), физико-химических и химических ($C_{орг}$, pH , P_2O_5 , K_2O , $Spодв$, Cu , Pb , Cd , Zn , Cr) показателей почв виноградников с разной системой землепользования (fallow – залежь, organic – органическая, traditional – традиционная) и их возраста (Age).

В нашем исследовании возраст виноградника был равносителен системе землепользования, поскольку залежные почвы наиболее длительный период времени использовались под виноградники, вторую по длительности землепользования группу составляли почвы традиционных хозяйств и самые молодые лозы, выращиваемые с 2018–2019 гг., относились к органической системе.

Вторая главная компонента определяется в основном содержанием тяжелых металлов в почве (Cr, Pb, Cd, Zn), а третья – гранулометрическим составом почвы и биогенными элементами (глина, ил, песок, Zn, Сподв).

Распределение весов главных компонент для трех систем землепользования по первым двум осям главных компонент продемонстрировано на рисунке 4.11 Е. Диаграмма показывает, что по первой оси главных компонент почвы, отобранные на виноградниках с разными системами землепользования, различаются. Поскольку возраст и $pH(H_2O)$ вносят большой вклад в первую ось [156] главных компонент и отрицательно коррелируют, а Смик/Сорг, СИД и БД вносят меньший вклад и положительно коррелируют (рис. 4.11 D), органические виноградники можно отличить от традиционных по более низкой величине pH , меньшему возрасту насаждений, более высокой дыхательной активности почвы и более высокой доле углерода микробной биомассы в органическом углероде почвы.

Близкая локализация почв традиционных хозяйств и залежных почв (рис. 4.11 Е), несмотря на их отнесение к разным категориям, свидетельствует об их схожести по изучаемым показателям, что логично, исходя из многолетнего использования почв, впоследствии перешедших в категорию залежных, для выращивания винограда по традиционным технологиям.

Заключение по главе 4

Результаты исследований экологических и микробиологических свойств почв 14 винодельческих хозяйств показали наличие достоверных отличий между свойствами почв органических хозяйств, с одной стороны, и почв традиционных хозяйств и залежи, с другой. В почве органических хозяйств выявлены наиболее благоприятные условия для микробиологической активности и закрепления углерода в составе микробной биомассы, что отмечается и в работах других авторов [156].

Несмотря на то, что свидетельств критического нарушения устойчивости почв исследованных ампелоценозов Севастопольской зоны виноделия по результатам проведенных экологических исследований не выявлено, установлены

негативные тенденции, которые в будущем могут привести к дестабилизации функционирования почвенного микробиома, снижению продуктивности и качества виноградарско-винодельческой продукции: дефицит в ряде винодельческих хозяйств питательных веществ, повышенная минерализация органического вещества и высокое содержание подвижной серы в почве органических хозяйств, превышение предельно допустимой концентрации меди в почве отдельных традиционных и органических хозяйств и во всех залежных почвах, низкие показатели микробной биомассы и дыхательной активности [82, 156], а также выходящие за пределы оптимальных значений экофизиологические индексы залежных почв, ранее длительно используемых под виноградники, что указывает на неблагоприятные условия функционирования микробного сообщества [82].

Исследования показали необходимость в комплексном подходе к проведению экологического мониторинга почв ампелоценозов с включением в программу исследований микробиологических показателей и расчетных экофизиологических индексов, а также определения соотношения лабильной и консервативной фракций органического вещества для более точного отражения происходящих в почве процессов и их адекватной оценки.

Глава 5. ВЛИЯНИЕ ОРОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА НАКОПЛЕНИЕ И МИГРАЦИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ ВИНОГРАДНИКОВ В УСЛОВИЯХ СКЛОНОВОГО ЛАНДШАФТА

Виноградники нередко размещают в горных или холмистых районах, где они соседствуют как с пахотными землями и другими многолетними культурными насаждениями, так и с природными экосистемами: лесами, кустарниками, водными источниками.

Вследствие геохимического сопряжения элементарных ландшафтов склонов наблюдаются активные процессы латерального перемещения веществ в виде их механической миграции и растворов с поверхностным и внутрипочвенным стоком в нижележащие элементы рельефа и соседние ландшафты с формированием зон аккумуляции и рассеивания. Эрозионные процессы на склоновых почвах под виноградниками могут усиливать высокое среднегодовое количество осадков [146], повышение частоты экстремальных осадков, собирающие и выпуклые формы склонов, легкий гранулометрический состав почв с невысоким содержанием органического вещества, расположение рядов винограда вдоль склона, отсутствие почвопокровных культур в междурядьях [82] и их интенсивная культивация [108, 181, 293].

Указанные обстоятельства диктуют необходимость применения эколого-геохимических подходов при проведении экологических мониторинговых исследований почв виноградников с оценкой распределения в поверхностном и подповерхностном горизонтах почвы между элементарными геохимическими ландшафтами склонов меди и других тяжелых металлов, определение кларков их концентрации и рассеивания, коэффициента латеральной дифференциации. Результаты подобных исследований, проведенных нами в историческом винодельческом регионе Фрушка Гора Автономного края Воеводина Республики Сербия [9], содержатся в ряде наших работ [9, 10, 80, 81]. На территории Севастопольского района Республики Крым нами проведена эколого-геохимическая оценка латеральной миграции меди, цинка, марганца и кобальта в почве [80] сопряженных транзитных элементов склонов двух [21] ампелоценозов

интенсивного типа возрастом 40 и 6 лет, расположенных на склонах различной морфологии, включая оценку экологического состояния почв по показателям почвенного дыхания и расчетным экофизиологическим индексам.

5.1 Анализ экологического состояния почв разновозрастных виноградников в условиях склонового ландшафта

Исследуемые виноградники различались системами ведения куста, выращиваемыми сортами винограда, экспозицией, формой и протяженностью склона, а также длительностью выращивания винограда на них (табл. 2.4).

Таблица 5.1 – Экологическая характеристика почв исследуемых склонов под разновозрастными виноградниками (среднее \pm стандартная ошибка).

Склон	Элемент склона	Глубина, см	рН (H ₂ O), ед.		Сорг, %		Сподв, мг/кг	
			Ряд	Между-рядье	Ряд	Между-рядье	Ряд	Между-рядье
1	А	0–10	7,9 \pm 0,1	7,8 \pm 0,1	1,31 \pm 0,3	1,15 \pm 0,2	5,0 \pm 0,5	3,0 \pm 0,5
		10–20	7,9 \pm 0,1	8,0 \pm 0,1	1,13 \pm 0,2	0,85 \pm 0,2	3,9 \pm 0,4	3,1 \pm 0,3
	ТЭ	0–10	7,5 \pm 0,1	8,1 \pm 0,1	1,67 \pm 0,4	1,31 \pm 0,3	3,6 \pm 0,4	3,1 \pm 0,3
		10–20	7,6 \pm 0,1	7,7 \pm 0,1	1,12 \pm 0,2	0,89 \pm 0,2	3,2 \pm 0,3	4,2 \pm 0,6
	ТЭА	0–10	7,6 \pm 0,1	7,6 \pm 0,1	1,95 \pm 0,4	1,44 \pm 0,3	3,1 \pm 0,3	3,2 \pm 0,3
		10–20	7,5 \pm 0,1	7,7 \pm 0,1	1,55 \pm 0,3	0,92 \pm 0,2	3,0 \pm 0,3	4,3 \pm 0,4
2	А	0–10	8,0 \pm 0,1	8,1 \pm 0,1	1,19 \pm 0,2	1,07 \pm 0,2	5,1 \pm 0,4	2,3 \pm 0,2
		10–20	7,9 \pm 0,1	8,1 \pm 0,1	1,04 \pm 0,2	0,76 \pm 0,2	4,1 \pm 0,4	4,1 \pm 0,4
	ТЭ	0–10	8,0 \pm 0,1	8,1 \pm 0,1	1,35 \pm 0,3	1,20 \pm 0,3	4,3 \pm 0,3	3,2 \pm 0,5
		10–20	7,8 \pm 0,1	8,0 \pm 0,1	1,17 \pm 0,2	0,85 \pm 0,2	3,2 \pm 0,3	4,3 \pm 0,4
	ТЭА	0–10	8,0 \pm 0,1	8,1 \pm 0,1	1,78 \pm 0,4	1,34 \pm 0,3	3,5 \pm 0,3	3,2 \pm 0,3
		10–20	8,0 \pm 0,1	7,8 \pm 0,1	1,24 \pm 0,2	0,94 \pm 0,2	2,6 \pm 0,3	4,8 \pm 0,5

Поскольку физико-химические и химические показатели, в особенности, содержание органического вещества, оказывают существенное влияние на накопление и пространственное варьирование элементов в склоновом ландшафте,

были проанализированы показатели рН (Н₂О), содержание органического вещества и подвижной серы в верхних горизонтах почв склона 1 возрастом 40 лет и склона 2 возрастом 6 лет (табл. 5.1).

Показатель рН почвы на всех изучаемых элементах обоих склонов и в обоих горизонтах как рядов, так и междурядий виноградников находился в диапазоне от 7,5 до 8,1 (табл. 5.1). При этом рН почвы первого склона за небольшим исключением соответствовал слабощелочной реакции среды, тогда как почвы второго склона – щелочной. Значимых различий по показателю рН в зависимости от горизонта не выявлено.

Содержание органического вещества (Сорг) в почве рядов винограда первого и второго склонов варьировалось в диапазонах 1,12–1,95% и 1,04–1,78%, соответственно, и характеризовалось как очень низкое. В междурядьях содержание органического вещества было в 1,2–1,4 раза ниже, чем в рядах.

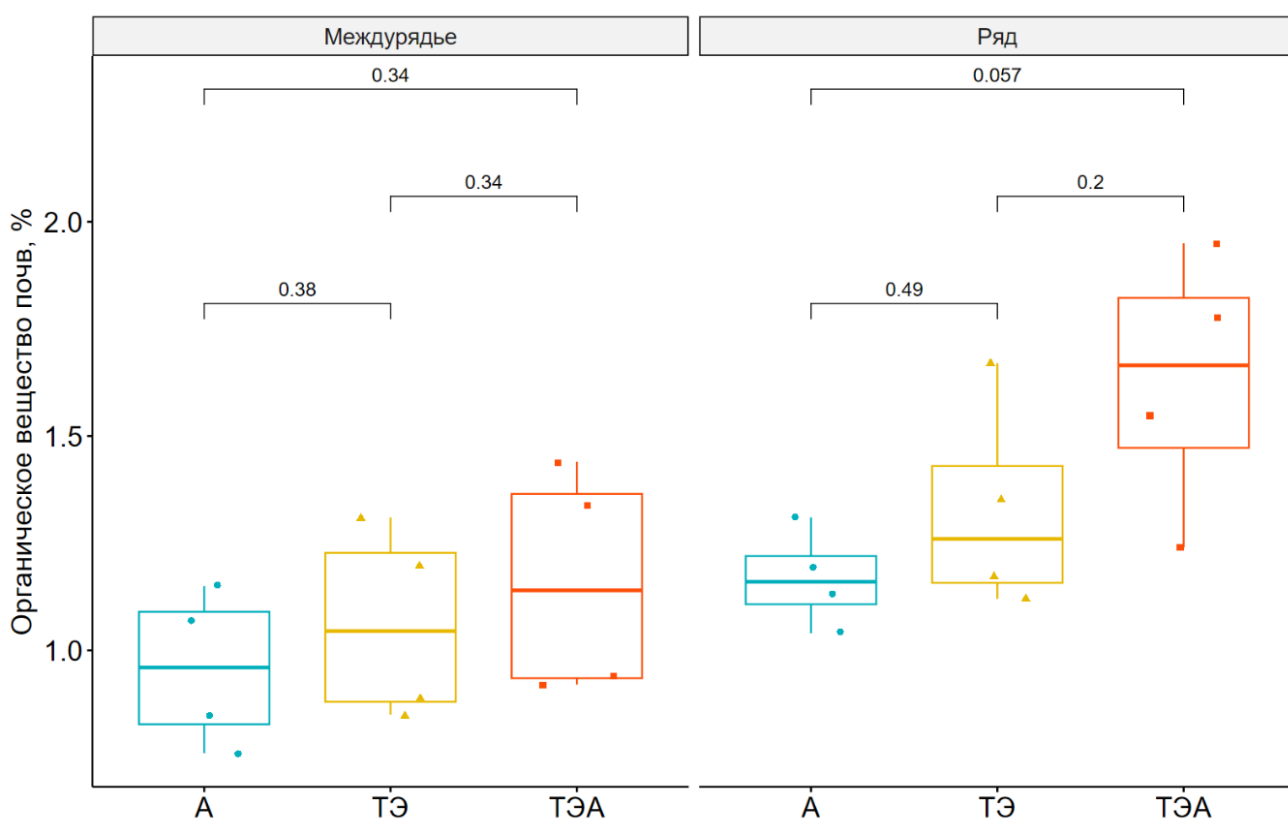


Рисунок 5.1 – Зависимость содержания органического вещества (%) в почве рядов и междурядий склоновых элементов ландшафта под виноградниками согласно критерию Уилкоксона.

В рядах винограда содержание органического вещества между элементами обоих склонов было более контрастным, чем в междурядьях. Достоверных отличий по содержанию Сорг между верхней и средней частями обоих склонов не наблюдалось, тогда как в нижней части данный показатель в поверхностном горизонте почвы рядов винограда был в 1,3–1,5 раза выше, чем в верхней (рис. 5.1). Так, в поверхностном горизонте трансаккумулятивного элемента первого склона показатель Сорг составил 1,95% против 1,67 и 1,31% в трансэлювиальном и автономном элементах.

На втором склоне содержание Сорг в почве всех элементов геохимического ландшафта было ниже, чем в первом, но тенденция к большему накоплению в нижней части склона сохранялась, что было характерно как для рядов, так и междурядий винограда (рис. 5.2 и 5.3).

Преимущественное накопление органического вещества в трансаккумулятивной части склона по сравнению с автономным элементом ландшафта свидетельствует о наличии склоновых эрозионных процессов, связанных с привнесом вещества вместе с почвенным материалом со склонов [10].

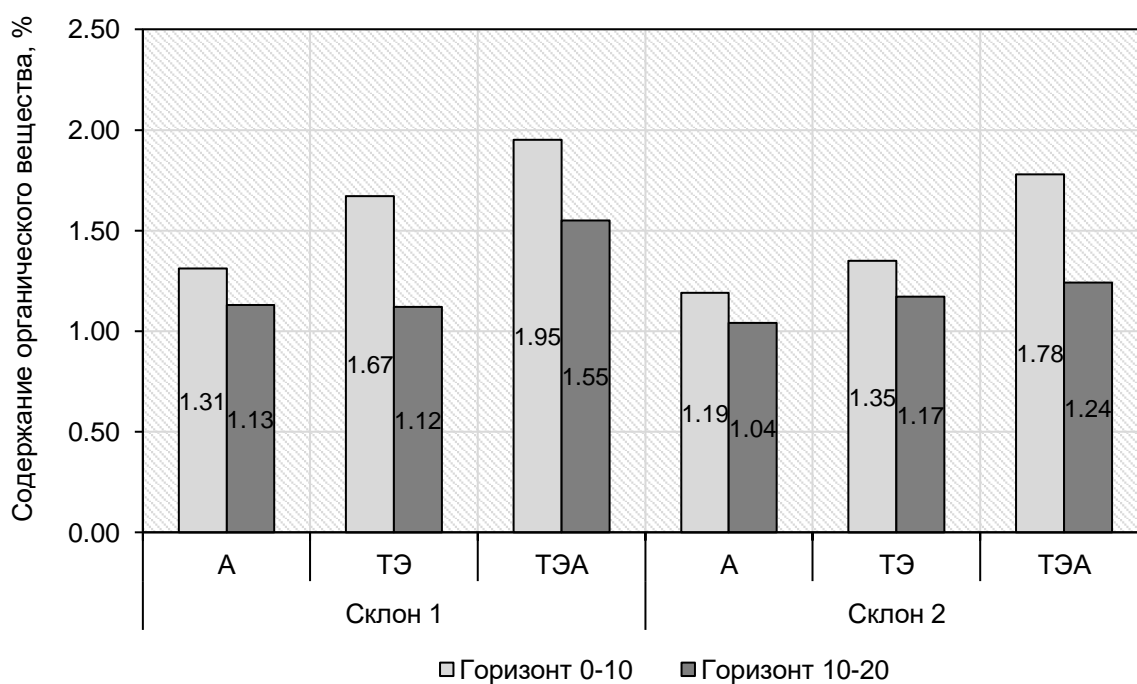


Рисунок 5.2 – Распределение органического вещества (%) в почве рядов винограда между автономным (А), трансэлювиальным (ТЭ) и трансэлювиально-аккумулятивным (ТЭА) элементами склонов.

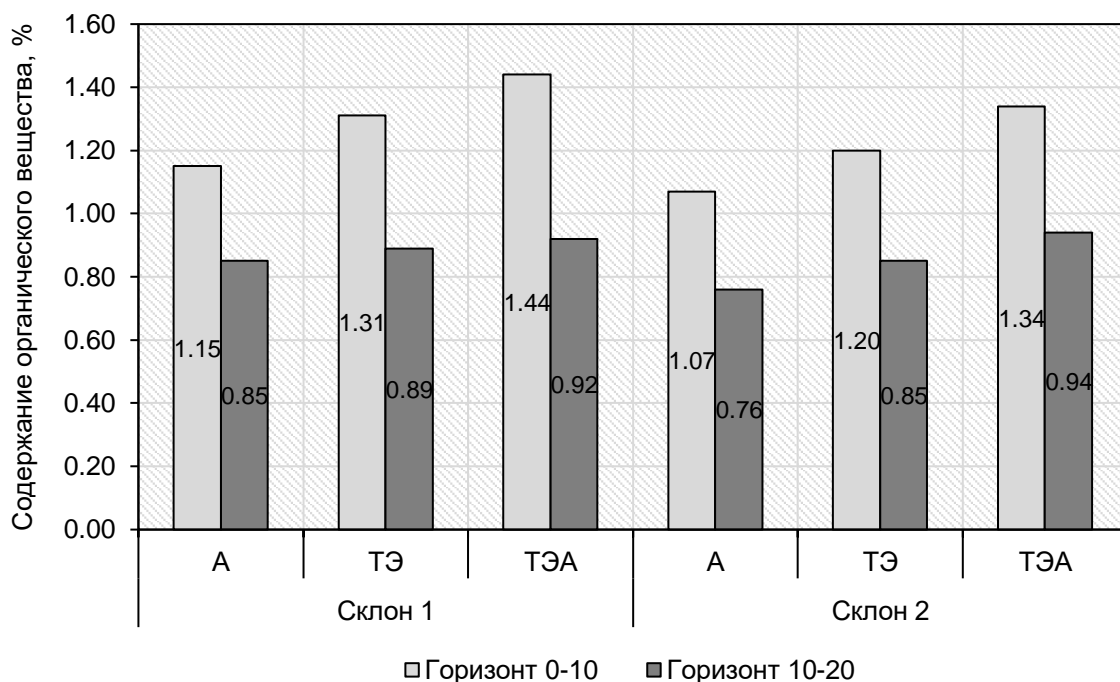


Рисунок 5.3 – Распределение органического вещества (%) в почве междурядий винограда между автономным (А), трансэлювиальным (ТЭ) и трансэлювиально-аккумулятивным (ТЭА) элементами склонов.

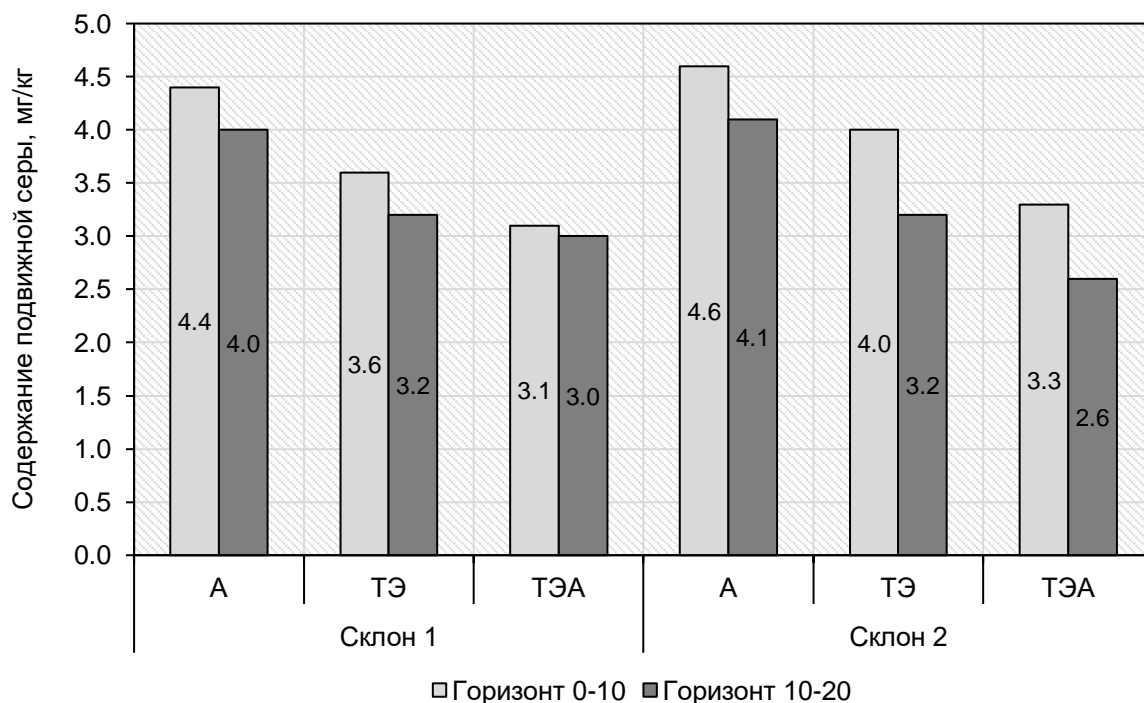


Рисунок 5.4 – Распределение подвижной серы (мг/кг) в почве рядов винограда между автономным (А), трансэлювиальным (ТЭ) и трансэлювиально-аккумулятивным (ТЭА) элементами склонов.

Содержание органического вещества соответствовало его классическому профильному распределению и с глубиной снижалось в почве обоих склонов (рис. 5.2 и 5.3).

Наибольшие показатели Сорг отмечались в горизонте 0–10 см, что на 23% выше, чем в горизонте 10–20 см (среднее значение 1,54% против 1,25% соответственно). Следует отметить тенденцию к более высокому накоплению органического вещества в рядах винограда по сравнению с междурядьями, хотя статистически эти отличия не подтверждаются (рис. 5.1).

Содержание подвижной серы (мг/кг) в почве рядов винограда колебалось от 3,1 до 4,6 мг/кг в поверхностном горизонте и от 2,6 до 4,1 мг/кг в подповерхностном горизонте в зависимости от склона и его части (рис. 5.4). В междурядьях данный показатель варьировался примерно в тех же диапазонах (рис. 5.5).

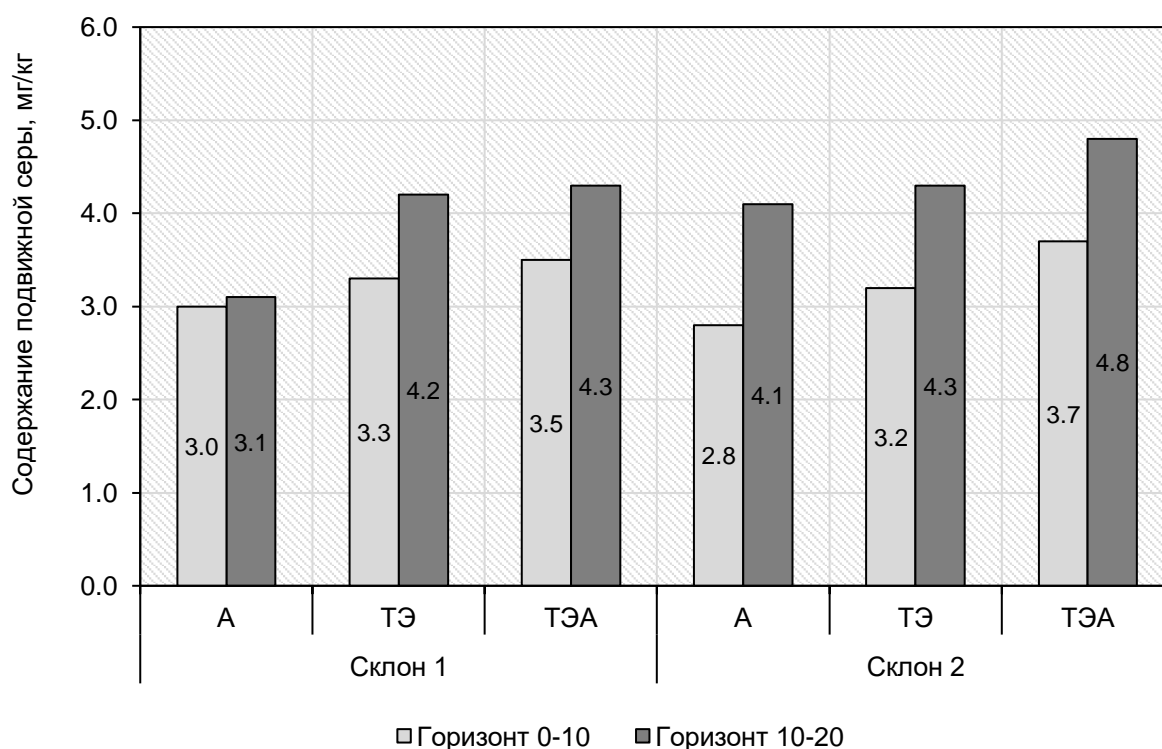


Рисунок 5.5 – Распределение подвижной серы (мг/кг) в почве междурядий винограда между автономным (А), трансэлювиальным (ТЭ) и трансэлювиально-аккумулятивным (ТЭА) элементами склонов.

В целом в почве рядов винограда в автономном элементе ландшафта содержание подвижной серы в поверхностном горизонте было в 1,6 раза выше [21],

чем в междурядьях, в трансэлювиальном элементе различия сглаживались, а в трансаккумулятивном, напротив, подвижной серы накапливалось больше в почве междурядий, чем рядов (рис. 5.6).

Примечательно распределение подвижной серы между поверхностным и подповерхностным горизонтами: если в рядах данный показатель был выше в горизонте 0–10 см во всех частях обоих склонов, то в междурядьях установлена обратная закономерность – в поверхностном горизонте почвы в междурядьях первого и второго склонов содержание подвижной серы было соответственно на 23–27% и на 30–46% выше, чем в горизонте 10–20 см (рис. 5.5 и 5.6).

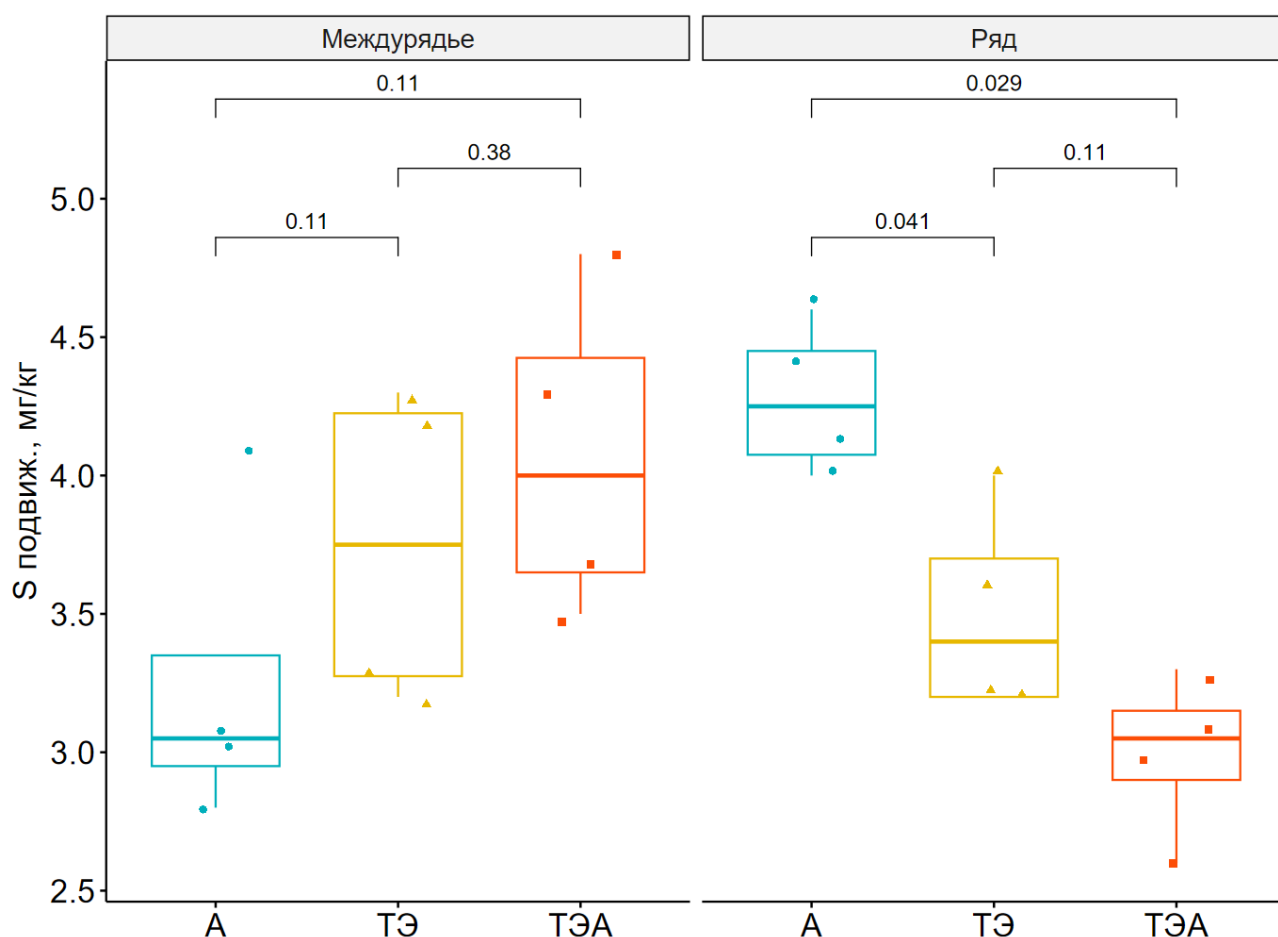


Рисунок 5.6 – Зависимость содержания подвижной серы (мг/кг) в почве рядов и междурядий склоновых элементов ландшафта под виноградниками согласно критерию Уилкоксона.

В целом содержание подвижной серы в почве обоих склонов, согласно классификации Росагрохимслужбы [21], было низким, а в соответствии с группировкой, принятой за рубежом, – очень низким, что согласуется с результатами, полученными нами для почв пяти традиционных хозяйств и приведенными в главе 4 настоящей работы.

Интересно отметить, что в отличие от распределения органического вещества, распределение подвижной серы в рядах винограда обоих изучаемых склонов подчинялось обратной закономерности: ее содержание снижалось от автономного элемента склона к нижнему трансаккумулятивному как в поверхностном, так и в подповерхностном горизонтах (рис. 5.6). При этом значимых различий по рассматриваемому показателю между верхней и средней, и между средней и нижней частями склонов не обнаружено, тогда как различия между автономным и трансаккумулятивным, а также между автономным трансэлювиальным элементами склона подтверждены статистически (рис. 5.6).

В междурядьях склонов, напротив, наблюдалась тенденция к последовательному возрастанию содержания подвижной серы к подошве обоих склонов, однако значимых отличий в распределении данного показателя между элементами склона в междурядьях согласно критерию Уилкоксона не обнаружено. (рис. 5.6).

5.2 Влияние орографических факторов на накопление и латеральную миграцию тяжелых металлов в агроэкосистемах виноградников

Валовое содержание меди в почве первого склона варьировалось от 173,3 до 246,6 мг/кг, второго склона – от 81,3 до 133,2 мг/кг (табл. 5.2). Наиболее высокое накопление меди наблюдалось в обоих горизонтах почвы трансэлювиального элемента геохимического ландшафта первого склона (234,0–246,6 мг/кг) и в поверхностном горизонте почвы автономного элемента второго склона (133,2 мг/кг).

По результатам статистической обработки полученных данных согласно критерию Краскела-Уоллиса, валовое содержание меди в почвах ампелоценозов на

первом склоне оказалось в среднем по горизонтам значимо в 1,7 раза выше, чем в почве второго склона (рис. 5.7).

Таблица 5.2 – Распределение валового содержания тяжелых металлов (мг/кг) в почве рядов винограда между склоновыми элементами ландшафта (среднее \pm стандартная ошибка).

Склон	Элемент ландшафта	Глубина, см	Cu	Zn	Mn	Co
1	А	0–10	195,8 \pm 16,7	41,5 \pm 10,4	955,4 \pm 57,3	19,3 \pm 1,8
		10–20	181,8 \pm 14,3	85,0 \pm 17,2	807,2 \pm 67,8	15,5 \pm 2,1
	ТЭ	0–10	246,6 \pm 19,5	122,9 \pm 19,3	1137,2 \pm 94,4	21,2 \pm 3,4
		10–20	234,0 \pm 14,3	108,7 \pm 22,3	1039,4 \pm 76,9	19,5 \pm 2,7
	ТЭА	0–10	173,3 \pm 18,0	56,5 \pm 9,4	707,0 \pm 58,0	9,4 \pm 2,2
		10–20	213,8 \pm 16,7	92,5 \pm 16,8	897,5 \pm 70,9	12,9 \pm 1,9
2	А	0–10	133,2 \pm 16,8	105,4 \pm 18,6	869,3 \pm 65,2	20,3 \pm 2,1
		10–20	83,2 \pm 14,9	62,2 \pm 9,5	536,4 \pm 39,6	8,5 \pm 1,6
	ТЭ	0–10	81,3 \pm 13,2	78,2 \pm 11,1	711,7 \pm 56,9	13,0 \pm 2,0
		10–20	104,4 \pm 11,6	94,4 \pm 14,3	857,9 \pm 66,1	11,2 \pm 2,4
	ТЭА	0–10	115,4 \pm 15,1	88,2 \pm 15,5	608,7 \pm 56,2	11,1 \pm 2,3
		10–20	116,2 \pm 13,6	97,9 \pm 18,2	629,9 \pm 51,7	12,9 \pm 1,8
<i>ПДК/ОДК</i>			<i>-/132</i>	<i>-/220</i>	<i>1500/-</i>	<i>-</i>

*Жирным шрифтом выделены значения, превышающие установленные нормативы по СанПиН 1.2.3685-21.

Преимущественное накопление меди на первом склоне происходило в почве трансэлювиального элемента ландшафта: в среднем 240,3 мг/кг против 188,8 и 193,6 мг/кг соответственно в автономном и трансаккумулятивном элементах (рис. 5.8) [9].

Накопление меди во всех частях склона и исследуемых горизонтах первого склона и в горизонте 0–10 см автономного ландшафта второго склона в 1,3–1,9 раза превышало ориентировочно допустимую концентрацию (ОДК) данного элемента с учетом реакции среды и гранулометрического состава почвы, установленную в СанПиН 1.2.3685-21.

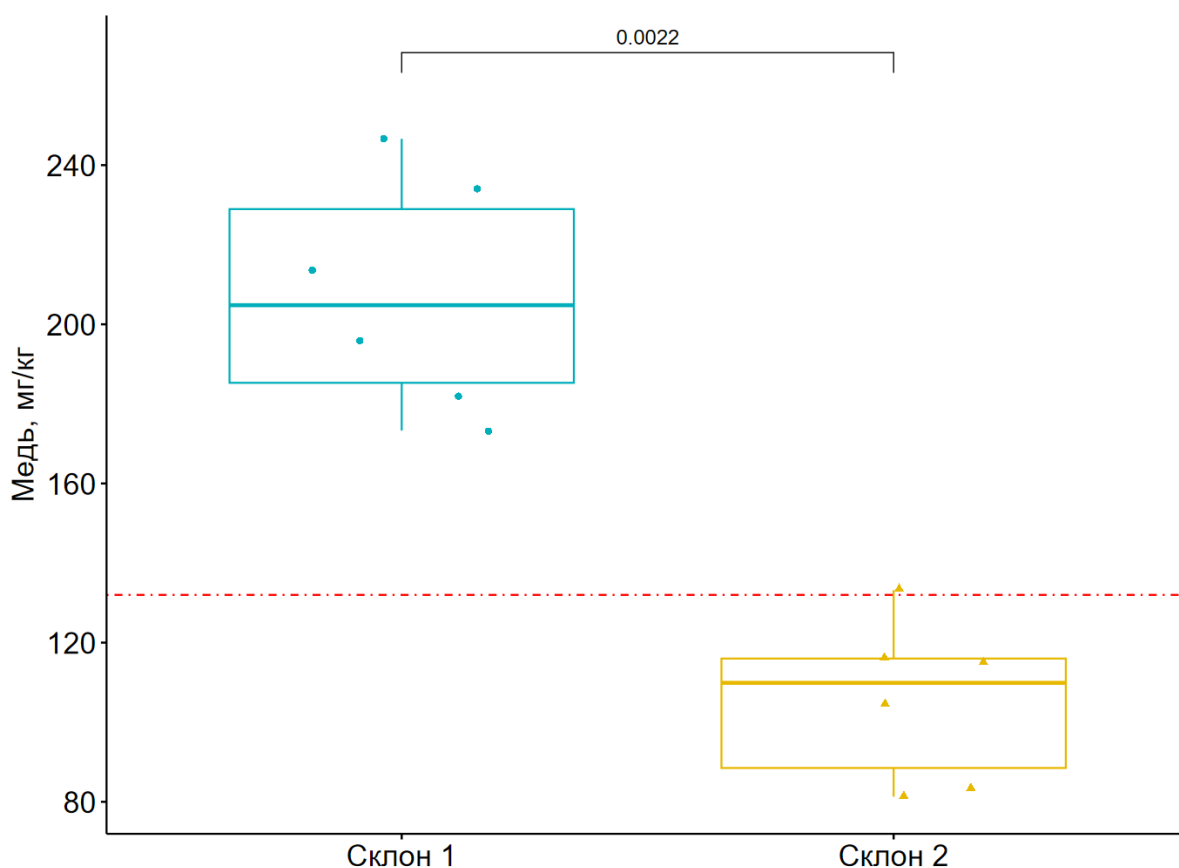


Рисунок 5.7 – Распределение валового содержания меди (мг/кг) в почве рядов винограда между склоновыми элементами ландшафта согласно критерию Краскела-Уоллиса ($p = 0,0022$); красной пунктирной линией обозначена ОДК валового содержания меди в почве (132 мг/кг).

По результатам определения подвижных форм меди в почве рядов виноградников на обоих склонах выявлено превышение установленной предельно допустимой концентрации (ПДК=3,0 мг/кг) в 1,2 – 3,4 раза (табл. 5.3). На первом склоне превышение было обнаружено во всех элементах транзитного ландшафта и во всех исследованных горизонтах с максимальным значением 10,3 и 31,8 мг/кг соответственно в рядах и между рядах винограда.

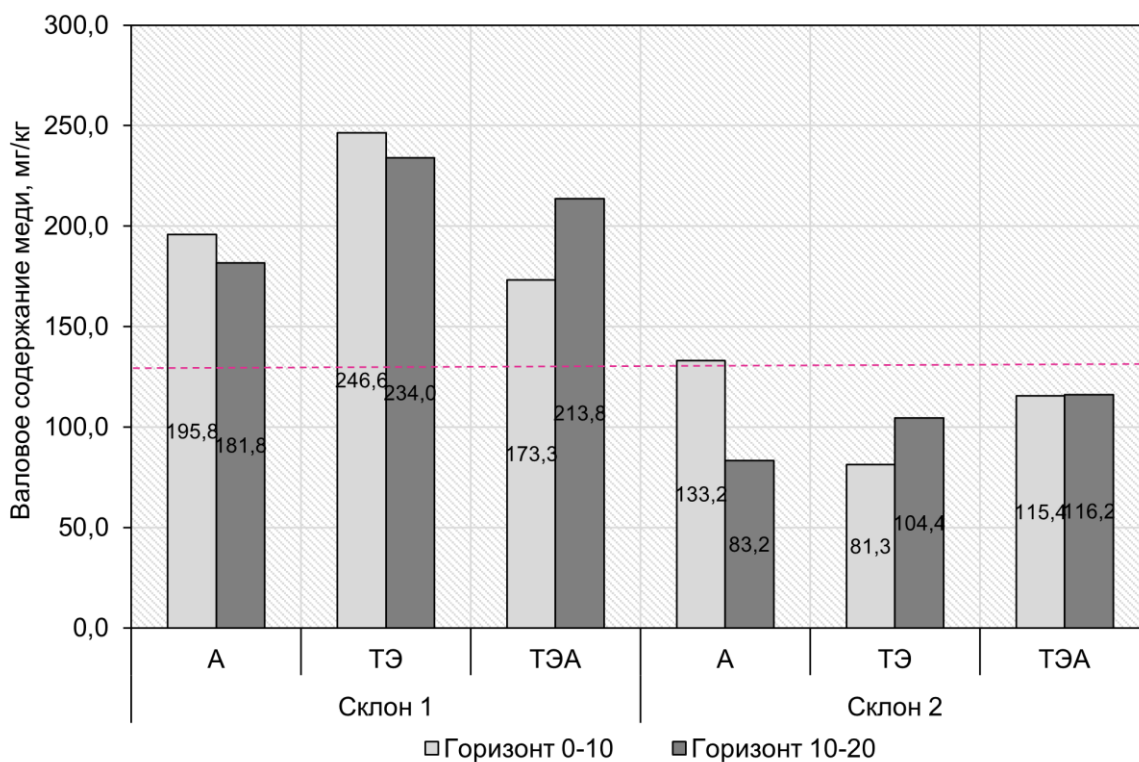


Рисунок 5.8 – Распределение валового содержания меди в почве рядов винограда между склоновыми элементами ландшафта; красной пунктирной линией обозначена ОДК валового содержания меди в почве (132 мг/кг).

Таблица 5.3 – Содержание подвижных форм меди и цинка (мг/кг) в почве склоновых элементов ландшафта под виноградниками (среднее ± ст. ошибка)

Склон	Элемент ландшафта	Глубина, см	Cu		Zn	
			Ряд	Между-рядье	Ряд	Между-рядье
1	А	0–10	6,1 ± 0,9	14,3 ± 2,7	3,7 ± 0,4	3,5 ± 0,5
		10–20	6,9 ± 1,0	31,8 ± 6,4	3,9 ± 0,7	3,1 ± 0,4
	ТЭ	0–10	7,7 ± 1,2	8,7 ± 1,7	3,1 ± 0,2	3,9 ± 0,6
		10–20	10,3 ± 1,5	9,6 ± 1,5	2,9 ± 0,3	4,0 ± 0,7
	ТЭА	0–10	8,1 ± 1,5	11,1 ± 2,2	4,4 ± 0,6	2,8 ± 0,5
		10–20	10,2 ± 1,6	13,9 ± 2,8	3,7 ± 0,5	3,5 ± 0,7
2	А	0–10	4,6 ± 1,0	2,8 ± 0,4	2,6 ± 0,5	1,8 ± 0,3
		10–20	4,5 ± 0,8	17,6 ± 3,5	2,4 ± 0,2	1,8 ± 0,2
	ТЭ	0–10	6,5 ± 1,3	2,7 ± 0,5	4,5 ± 0,6	1,5 ± 0,2
		10–20	3,6 ± 0,7	3,6 ± 0,2	2,5 ± 0,3	2,1 ± 0,4
	ТЭА	0–10	1,6 ± 0,4	3,8 ± 0,6	2,5 ± 0,2	1,8 ± 0,3
		10–20	2,8 ± 0,3	4,0 ± 0,8	1,5 ± 0,2	1,7 ± 0,4
<i>ПДК</i>			3,0		23,0	

На втором склоне накопление подвижных форм меди по склону было меньше, чем на первом (рис. 5.9), однако и там в почве автономного и трансэлювиального ландшафта в рядах, и во всех элементах рельефа в междурядьях наблюдалось превышение ПДК данной формы меди в 1,2–5,9 раза (табл. 5.3).

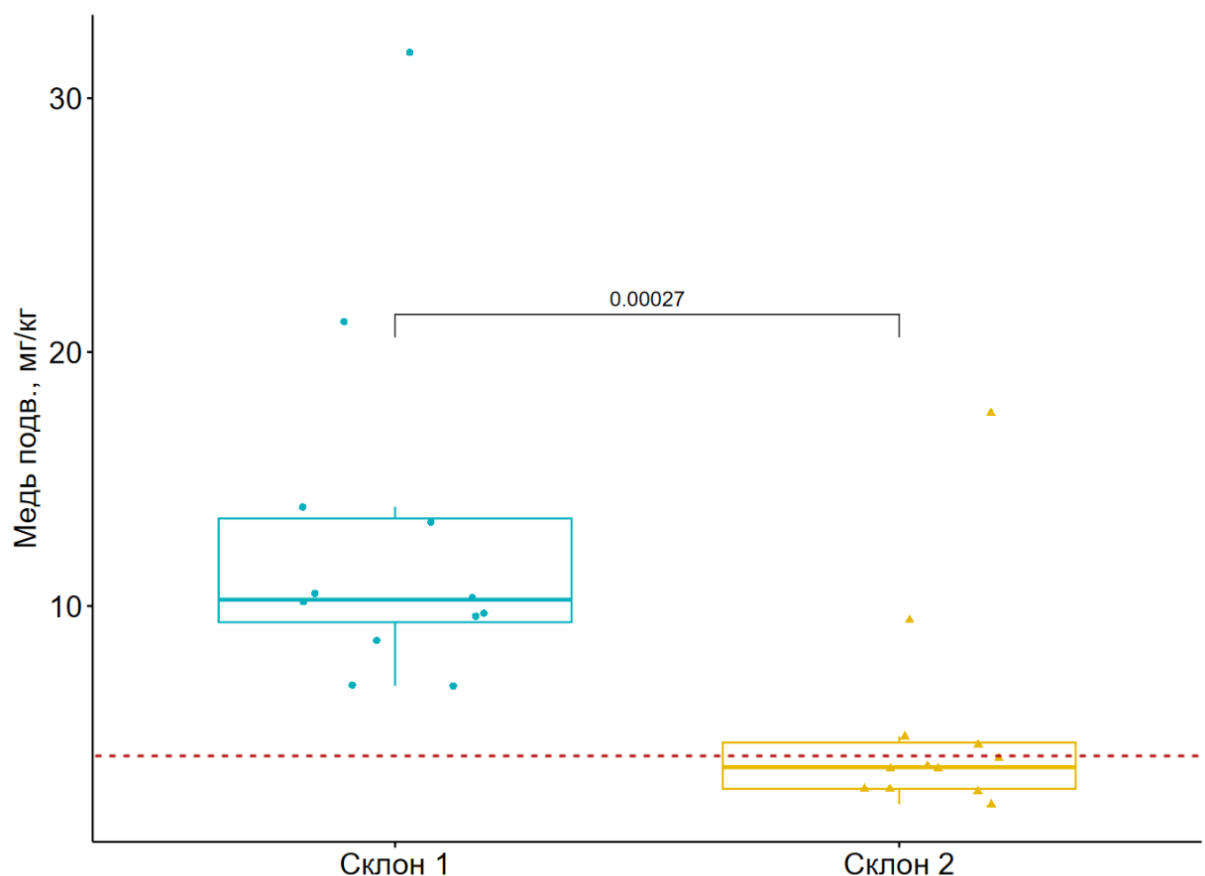


Рисунок 5.9 – Распределение подвижной формы меди (мг/кг) в почве рядов винограда между склоновыми элементами ландшафта согласно критерию Краскела-Уоллиса ($p = 0,00027$); красной пунктирной линией обозначена ПДК подвижных форм меди в почве (3,0 мг/кг).

Валовое содержание цинка в почве виноградников на первом и втором склоне находилось в диапазонах соответственно 41,5–122,9 мг/кг и 62,2–105,4 мг/кг (табл. 5.2), причем различия между ними не были статистически значимыми (рис. 5.10).

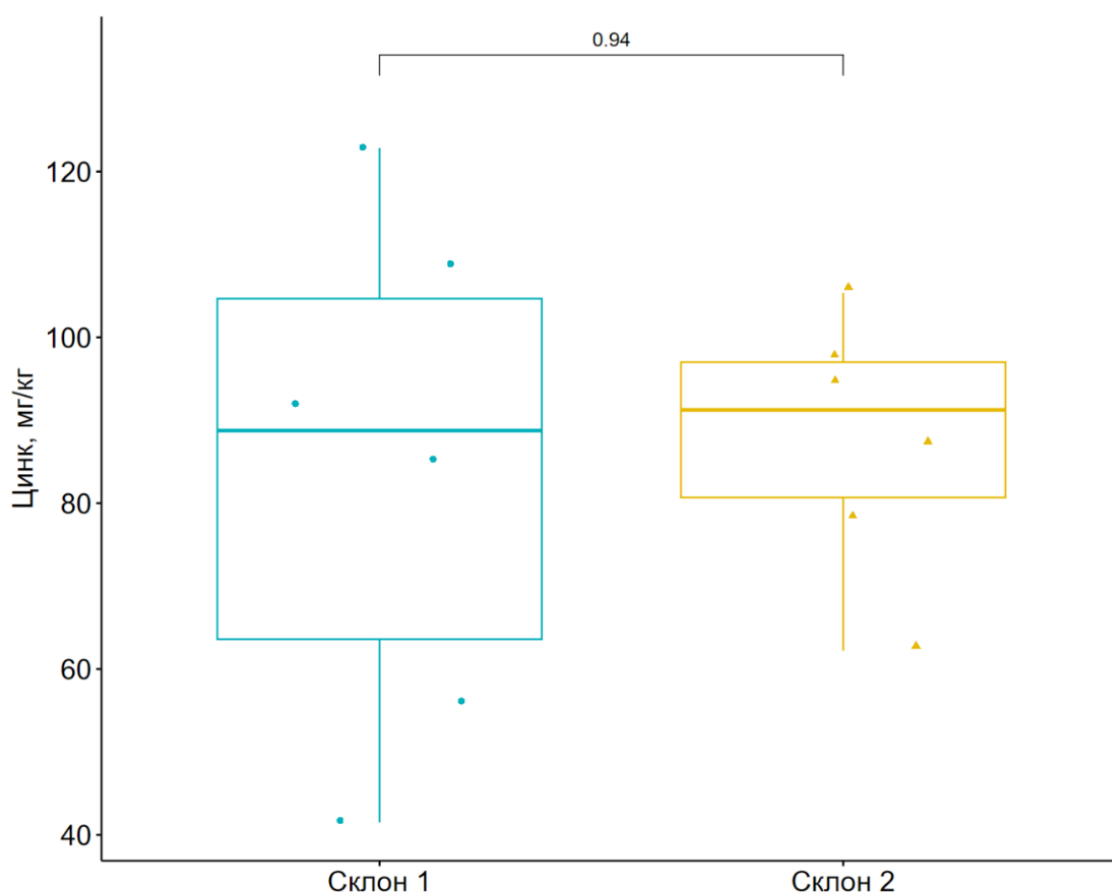


Рисунок 5.10 – Распределение валового содержания цинка (мг/кг) в почве рядов винограда между склоновыми элементами ландшафта согласно критерию Краскела-Уоллиса ($p = 0,94$).

Наибольший уровень накопления цинка на первом склоне обнаружен в почве обоих горизонтов трансэлювиальной части склона, на втором склоне – в почве поверхностного горизонта автономной части (более 100 мг/кг почвы).

Концентрация подвижных форм цинка варьировалась в диапазонах 2,8–4,4 мг/кг и 1,5–4,5 мг/кг на первом и втором склонах соответственно, что значительно ниже установленного нормативного значения для данной формы элемента (23 мг/кг согласно СанПиН 1.2.3685-21). Как и содержание подвижной формы меди, аналогичный показатель по цинку был значимо в 1,3 раза выше в почве первого склона по сравнению со вторым (рис. 5.11).

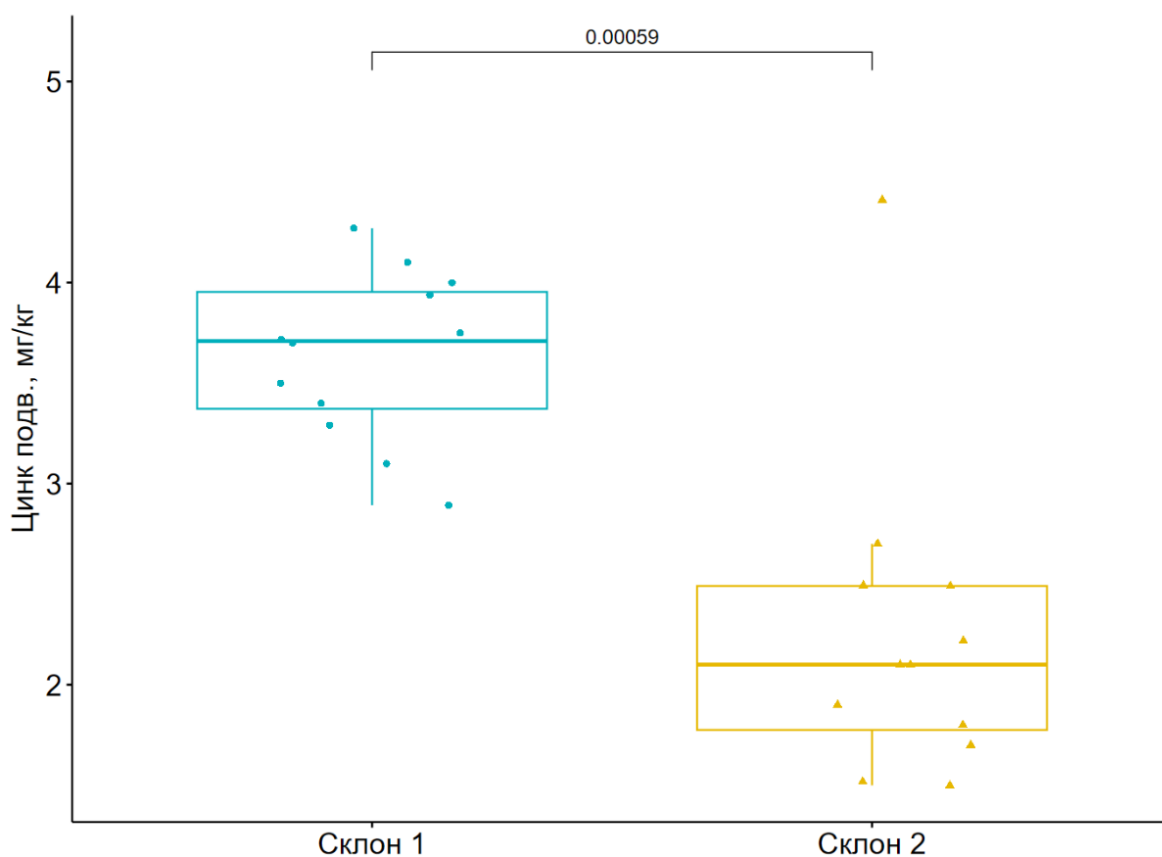


Рисунок 5.11 – Распределение подвижной формы цинка (мг/кг) в почве рядов винограда между склоновыми элементами ландшафта согласно критерию Краскела-Уоллиса.

Чтобы оценить длительность антропогенного воздействия, часто прибегают к расчету доли подвижной формы элемента от его валового содержания. Эта величина для меди на первом склоне варьировалась от 3,1 до 4,8%, на втором – от 1,4 до 8,0% (табл. 5.4). Доля подвижных форм цинка изменялась в схожем диапазоне и составила 1,6–8,9% от валового содержания в почве обоих виноградников (табл. 5.4).

Относительно невысокая часть меди и цинка в почве обоих склонов приходилась на подвижные формы (в среднем 3,2–5,1), что может указывать на их привнос в ампелоценозы в течение длительного периода времени.

Валовое содержание марганца в почве первого и второго склонов варьировалось от 707,0 до 1137,2 мг/кг и от 608,7 до 869,3 мг/кг соответственно.

Таблица 5.4 – Доля подвижных форм меди и цинка от их валового содержания (%) в почве склоновых элементов ландшафта в рядах винограда.

Элемент ландшафта	Горизонт, см	Склон 1		Склон 2	
		Cu	Zn	Cu	Zn
А	0–10	3,1	8,9	3,5	2,5
	10–20	3,8	4,6	5,4	3,9
ТЭ	0–10	3,1	2,5	8,0	5,8
	10–20	4,4	2,7	3,4	2,6
ТЭА	0–10	4,7	7,8	1,4	2,8
	10–20	4,8	4,0	2,4	1,6

Накопление элемента отмечалось в обоих горизонтах трансэлювиального ландшафта первого склона (более 1000 мг/кг), на втором склоне определенных закономерностей в распределении элемента по склону и изучаемым горизонтам не установлено (табл. 5.2).

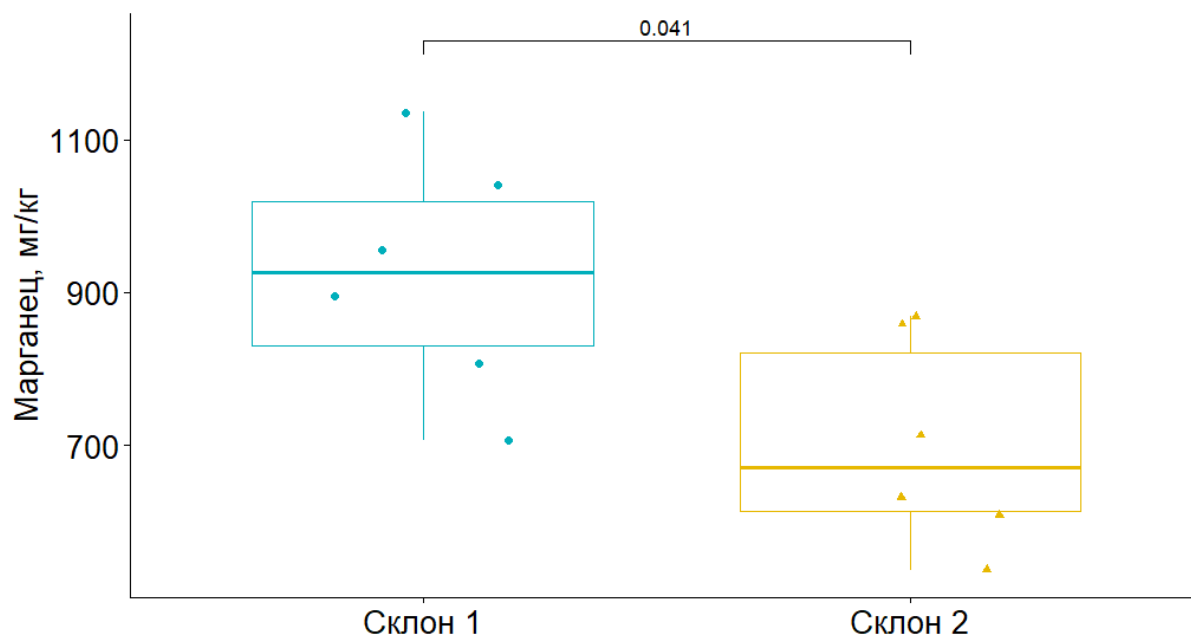


Рисунок 5.12 – Распределение валового содержания марганца (мг/кг) в почве рядов винограда между склоновыми элементами ландшафта согласно критерию Краскела-Уоллиса.

В почве первого склона накапливалось значимо в 1,3 раза больше марганца

по сравнению со вторым склоном, что было отмечено ранее для меди и цинка (рис. 5.12).

Валовое содержание кобальта в почвах первого и второго склонов изменялось в близких диапазонах от 9,4 до 21,2 мг/кг и от 8,5 до 20,3 мг/кг соответственно. Каких-либо закономерностей в распределении кобальта между горизонтами почв и элементами склонов не выявлено, хотя можно отметить повышенное накопление элемента в обоих горизонтах почвы трансэлювиальной части первого склона и поверхностном горизонте автономного ландшафта второго склона (около 20 мг/кг) по сравнению с другими фациями.

Для оценки процессов концентрации или рассеяния рассматриваемых тяжелых металлов в почве склоновых элементов ландшафта были определены кларки концентрации и кларки рассеяния, характеризующие распространённость металлов в почве относительно их содержания в литосфере и эталонной почве (табл. 5.5) [21].

Согласно результатам, представленным в таблице 5.5, установлена значительная вариабельность коэффициентов концентрации и рассеяния металлов в зависимости от горизонта почвы и части склона. Анализ пространственного распределения металлов выявил четкую дифференциацию зон их аккумуляции и миграции в почвенном профиле склоновых катен. Особый интерес представляет аномально высокая кларковая концентрация меди, которая существенно превышает как среднее содержание данного элемента в литосфере, так и его фоновые значения в эталонной почве. В почве первого склона значения ее кларка концентрации относительно кларка литосферы достигали 6,4–9,1, второго склона – 3,0–4,9. Относительно региональной эталонной почвы кларки концентрации были меньше – 2,3–3,2 и 1,4–1,7, но тем не менее превышали таковые для других изучаемых металлов. Ни в одной части как первого, так и второго склона рассеяния меди не обнаружено.

Для цинка установлено накопление при сравнении с кларком литосферы (кларк концентрации составил 1,2–1,6 для обоих склонов), однако при сравнении с эталонной почвой региона кларк концентрации цинка либо приближался к эталону,

либо был ниже его в 1,2–2,7 раза (табл. 5.5).

В случае с марганцем установлены различия между изучаемыми склонами: если во всех частях первого склона марганец накапливался в верхней части профиля как относительно кларка литосферы так и относительно содержания в эталонной почве (кларки концентрации составили 1,2–1,5), то на втором склоне, за исключением поверхностного горизонта автономного ландшафта, в основном происходило рассеяние элемента (кларки рассеяния составили 1,2–1,4), либо его содержание приближалось к эталонному (табл. 5.5).

Таблица 5.5 – Кларки концентрации и кларки рассеяния тяжелых металлов в почве рядов виноградников в склоновом ландшафте относительно кларка литосферы (КЛ) и эталонной почвы (ЭП) (*накапливающиеся металлы по кларку концентрации выделены красным цветом, рассеивающиеся по кларку рассеяния – фиолетовым цветом, близкие к кларку литосферы или содержанию в эталонной почве – белым цветом*).

Склон	Элемент ландшафта	Глубина, см	Cu		Zn		Mn		Co	
			КЛ	ЭП	КЛ	ЭП	КЛ	ЭП	КЛ	ЭП
1	А	0–10	7,3	2,6	1,8	2,7	1,2	1,3	1,3	1,2
		10–20	6,7	2,4	1,1	1,3	1,0	1,1	1,0	1,5
	ТЭ	0–10	9,1	3,2	1,6	1,1	1,5	1,5	1,4	1,1
		10–20	8,7	3,1	1,4	1,0	1,3	1,4	1,3	1,2
	ТЭА	0–10	6,4	2,3	1,3	2,0	1,1	1,1	1,6	2,6
		10–20	7,9	2,8	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,9
2	А	0–10	4,9	1,7	1,4	1,1	1,1	1,2	1,4	1,2
		10–20	3,1	1,1	1,2	1,8	1,4	1,4	1,8	2,8
	ТЭ	0–10	3,0	1,1	1,0	1,4	1,1	1,1	1,2	1,8
		10–20	3,9	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	1,3	2,1
	ТЭА	0–10	4,3	1,5	1,2	1,3	1,3	1,2	1,4	2,2
		10–20	4,3	1,5	1,3	1,1	1,2	1,2	1,2	1,9

Кобальт в почве первого склона при сравнении с кларком литосферы в автономном и трансэлювиальном ландшафте, в основном, накапливался, а в почве второго склона преимущественно рассеивался (табл. 5.5). Относительно эталонной

почвы наблюдалось рассеивание элемента во всех элементах ландшафта обоих склонов.

В целом необходимо отметить, что по сравнению с медью, невысокие значения отдельных кларков концентрации у остальных изучаемых элементов, не превышающие 1,6, и преобладание их рассеяния свидетельствует о преимущественно геогенном происхождении, тогда как двух – девятикратное превышение содержания в почве ампелоценозов меди над ее кларком литосферы и двух – трехкратное – над содержанием элемента в региональной эталонной почве указывает на дополнительный привнос элемента в ампелоэкосистемы, то есть на агрогенное происхождение меди в почве виноградников.

Таблица 5.6 – Коэффициенты латеральной дифференциации (L) меди, цинка, марганца и кобальта по валовому содержанию (BC) и меди и цинка по содержанию подвижных форм (ПФ) в почве рядов винограда автономного и транзитных элементов ландшафта.

Склон	Элемент ландшафта	Горизонт, см	Cu		Zn		Mn	Co
			BC	ПФ	BC	ПФ	BC	BC
1	ТЭ	0–10	1,26	1,26	2,96	0,84	1,19	1,10
		10–20	1,29	1,49	1,28	0,74	1,29	1,26
	ТЭА	0–10	0,89	1,33	1,36	1,19	0,74	0,49
		10–20	1,18	1,48	1,09	0,95	1,11	0,83
2	ТЭ	0–10	0,61	1,41	0,74	1,73	0,82	0,64
		10–20	1,25	0,80	1,52	1,04	1,60	1,31
	ТЭА	0–10	0,87	0,34	0,84	0,96	0,70	0,55
		10–20	1,40	0,62	1,57	0,63	1,17	1,51

По данным таблицы 5.6, в почве транзитных частей склонов наблюдалась миграция меди и цинка разной интенсивности, в результате чего формировались зоны аккумуляции и рассеивания данных элементов. На первом винограднике происходила миграция по склону как валовой меди, так и ее подвижных форм, в результате чего в трансэлювиальной и трансэлювиально-аккумулятивной частях склона наблюдалось накопление элемента средней силы ($L = 1,18–1,40$ и $1,26–1,49$ по валовому содержанию и подвижной форме соответственно) с преобладанием

миграции меди в форме подвижных соединений. Необходимо отметить, что накопление меди в почве трансаккумулятивного элемента ландшафта обоих склонов, а во втором еще и в трансэлювиального, происходило в горизонте 10–20 см, тогда как в поверхностном горизонте наблюдалось его рассеяние.

На первом склоне в почве трансэлювиального элемента ландшафта обнаружена высокая интенсивность накопления цинка ($L = 2,96$ по валовому содержанию), в почве трансаккумулятивного элемента цинк накапливался умеренно (табл. 5.6). В среднем интенсивность латеральной миграции цинка была схожей с медью, коэффициенты латеральной дифференциации варьировались в диапазоне 0,84–1,57 (за исключением поверхностного горизонта транзитной части первого склона) и 0,63–1,73 по валовому содержанию и содержанию подвижной формы соответственно. Однако в отличие от меди, накопления подвижных форм цинка на первом склоне практически не наблюдалось, формировались зоны его рассеяния.

Содержание марганца и кобальта характеризовалось низкой степенью латеральной дифференциации в пределах склонового ландшафта: коэффициенты вариации составили 0,70–1,60 для Mn и 0,49–1,51 для Co, что характеризует миграцию данных элементов как незначительный вынос, главным образом, в поверхностном горизонте трансаккумулятивного элемента склона, и средней силы накопление рассматриваемых элементов в подповерхностном горизонте всех рассматриваемых элементов как первого, так и второго склонов.

Обобщая полученные данные, можно заключить, что в почвах первого склона (40-летний виноградник) для всех исследованных металлов наблюдалось преобладание аккумуляционных процессов над элювиальными в обоих генетических горизонтах. Наиболее выраженная аккумуляция зафиксирована для меди, что проявлялось как в валовом содержании, так и в концентрации подвижных форм. На втором склоне выявлена дифференциация латеральной миграции по почвенным горизонтам: в поверхностном слое (0–10 см) доминировали процессы рассеивания металлов, тогда как в подповерхностном горизонте (10–20 см) установлено их умеренное накопление.

5.3 Анализ экологического состояния склоновых почв разновозрастных виноградников по показателям почвенного дыхания и экофизиологическим индексам

Скорость базального (микробного) дыхания почвы исследуемых склонов варьировалась от 0,21 до 0,59 мкг СО₂-С/г почвы/ч на первом склоне и от 0,13 до 0,32 мкг СО₂-С/г почвы/ч – на втором склоне (табл. 5.7). Наибольшие значения БД отмечались для поверхностного горизонта обоих склонов.

Таблица 5.7 – Показатели почвенного дыхания (базальное (БД, мкг СО₂-С/г почвы/ч) и субстрат-индуцированное (СИД, мкл СО₂/г почвы/ч)), содержание углерода микробной биомассы (Смик, мкг С/г почвы), микробный метаболический коэффициент (qСО₂, мкг СО₂-С/мг Смик/ч), доля углерода микробной биомассы в органическом углероде (Смик/Сорг, %), эффективность использования органического вещества микроорганизмами (qСО₂/Сорг, мкг СО₂-С/мг Смик/ч/г Сорг/г почвы) и коэффициент микробного дыхания (QR) в почве склоновых элементов ландшафта под разновозрастными виноградниками (среднее ± стандартная ошибка).

Склон	Часть склона	Глубина, см	БД	СИД	Смик	qСО ₂	Смик/Сорг	qСО ₂ /Сорг	QR
1	А	0–10	0,59 ± 0,01	14,57 ± 0,79	584 ± 32	1,02 ± 0,05	4,46	77,9	0,04
		10–20	0,58 ± 0,09	8,14 ± 0,05	327 ± 2	1,79 ± 0,29	2,89	158,4	0,07
	ТЭ	0–10	0,38 ± 0,02	8,62 ± 0,78	346 ± 32	1,11 ± 0,13	2,07	66,5	0,04
		10–20	0,21 ± 0,01	5,37 ± 0,21	216 ± 9	1,01 ± 0,04	1,93	90,2	0,04
	ТЭА	0–10	0,45 ± 0,12	9,26 ± 0,38	371 ± 15	1,21 ± 0,33	1,90	62,1	0,05
		10–20	0,37 ± 0,05	11,10 ± 0,31	445 ± 13	0,83 ± 0,13	2,87	53,5	0,03
2	А	0–10	0,18 ± 0,01	5,25 ± 0,09	211 ± 4	0,88 ± 0,01	1,77	73,9	0,03
		10–20	0,16 ± 0,01	5,99 ± 0,04	240 ± 2	0,68 ± 0,01	2,31	65,4	0,03
	ТЭ	0–10	0,32 ± 0,02	9,55 ± 0,15	383 ± 6	0,85 ± 0,07	2,84	63,0	0,03
		10–20	0,25 ± 0,01	5,33 ± 0,13	214 ± 5	1,18 ± 0,08	1,83	100,9	0,05
	ТЭА	0–10	0,24 ± 0,01	7,98 ± 0,33	320 ± 14	0,75 ± 0,06	1,80	42,1	0,03
		10–20	0,13 ± 0,01	4,58 ± 0,13	184 ± 5	0,73 ± 0,03	1,48	58,9	0,03

Необходимо отметить, что среднее значение БД в почве обоих склонов (0,32 мкг СО₂-С/г почвы/ч) полностью соответствовало средним показателям для

поверхностного горизонта почв традиционных хозяйств и залежи (0,33 и 0,32 мкг $\text{CO}_2\text{-C}/\text{г}$ почвы/ч соответственно), приведенным в четвертой главе настоящей работы. Однако установлены и различия по показателю БД между склонами: в почве первого склона он был в 1,6–5,7 раза выше по сравнению с почвой второго склона, что подтверждается статистическим анализом по критерию Краскела-Уоллиса (рис. 5.13).

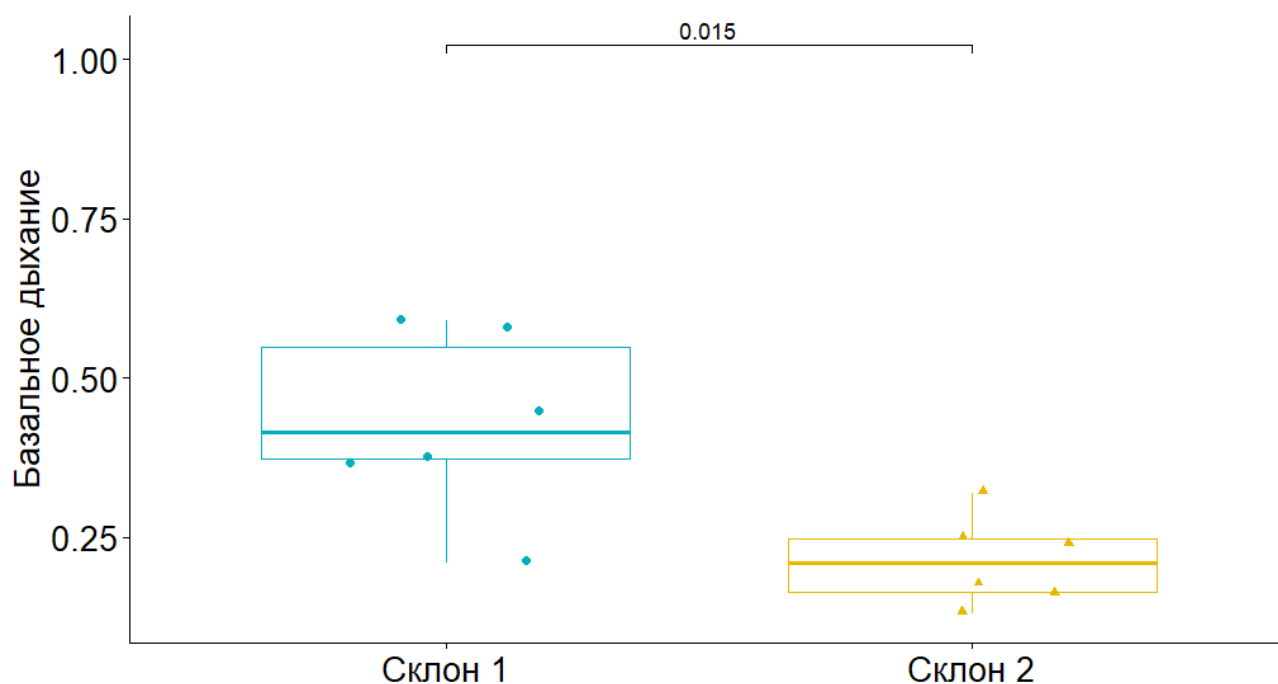


Рисунок 5.13 – Зависимость базального дыхания (мкг $\text{CO}_2\text{-C}/\text{г}$ почвы/ч) в почве склонов под разновозрастными виноградниками согласно критерию Краскела-Уоллиса.

Значения субстрат-индуцированного дыхания широко варьировались от 5,37 до 14,57 мкг $\text{CO}_2\text{-C}/\text{г}$ почвы/ч в почве первого склона и от 4,58 до 9,55 мкг $\text{CO}_2\text{-C}/\text{г}$ почвы/ч – второго склона (табл. 5.7). Однако, в отличие от БД, значимых отличий значений СИД между склонами не выявлено, хотя следует отметить тенденцию к некоторому повышению в 1,1–1,5 раза показателя в почве первого склона по сравнению со вторым (рис. 5.14).

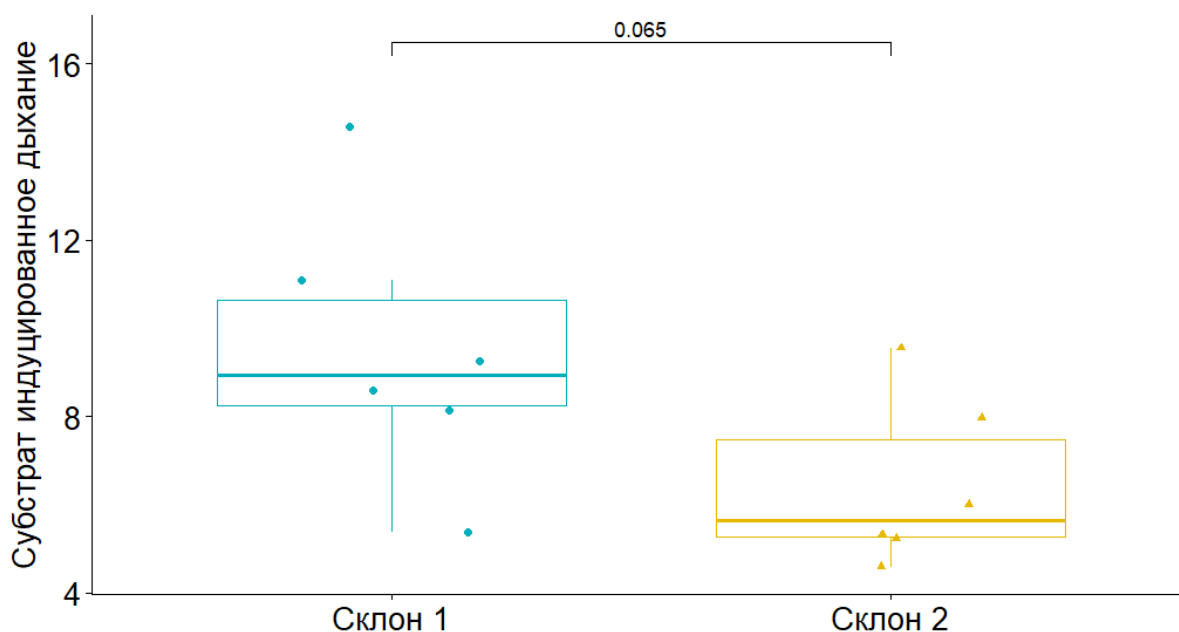


Рисунок 5.14 – Зависимость субстрат-индуцированного дыхания (мкл $\text{CO}_2\text{-C}/\text{г}$ почвы/ч) в почве склонов под разновозрастными виноградниками согласно критерию Краскела-Уоллиса.

Результаты исследования показали, что значения СИД в почве как поверхностного, так и подповерхностного горизонтов на склонах значительно превышали аналогичные показатели традиционных хозяйств и залежных земель (7,59–10,82 против 4,01 мкл $\text{CO}_2\text{-C}/\text{г}$ почвы/ч). Особенно высокие значения были зафиксированы в автономной части первого склона: в горизонте 0–10 см СИД достигал 14,57 мкл $\text{CO}_2\text{-C}/\text{г}$ почвы/ч (что выше среднего для органических хозяйств – 13,63), а в горизонте 10–20 см – 8,14 против 9,45 мкл $\text{CO}_2\text{-C}/\text{г}$ почвы/ч.

Содержание углерода микробной биомассы $\text{C}_{\text{мик}}$ изменялось аналогично показателю СИД и было достоверно выше на первом склоне с максимальным значением в автономном элементе ландшафта (табл. 5.7). Судя по средним значениям данного показателя, он занимал промежуточное положение между почвами традиционных и органических хозяйств, приведенных в четвертой главе настоящей работы.

Анализ микробного метаболического коэффициента (qCO_2) выявил следующие диапазоны значений в почвах исследуемых склонов: 0,83-1,79 мкг CO_2 -С/мг Смик/ч для первого склона и 0,68-1,18 мкг CO_2 -С/мг Смик/ч для второго склона (табл. 5.7). Хотя значения коэффициента qCO_2 в почве 40-летнего ампелоценоза были в 1,2–1,5 раза выше по сравнению с 6-летним в зависимости от части склона и горизонта, значимость отличий между ними при $p < 0,05$ не подтвердилась (рис. 5.15).

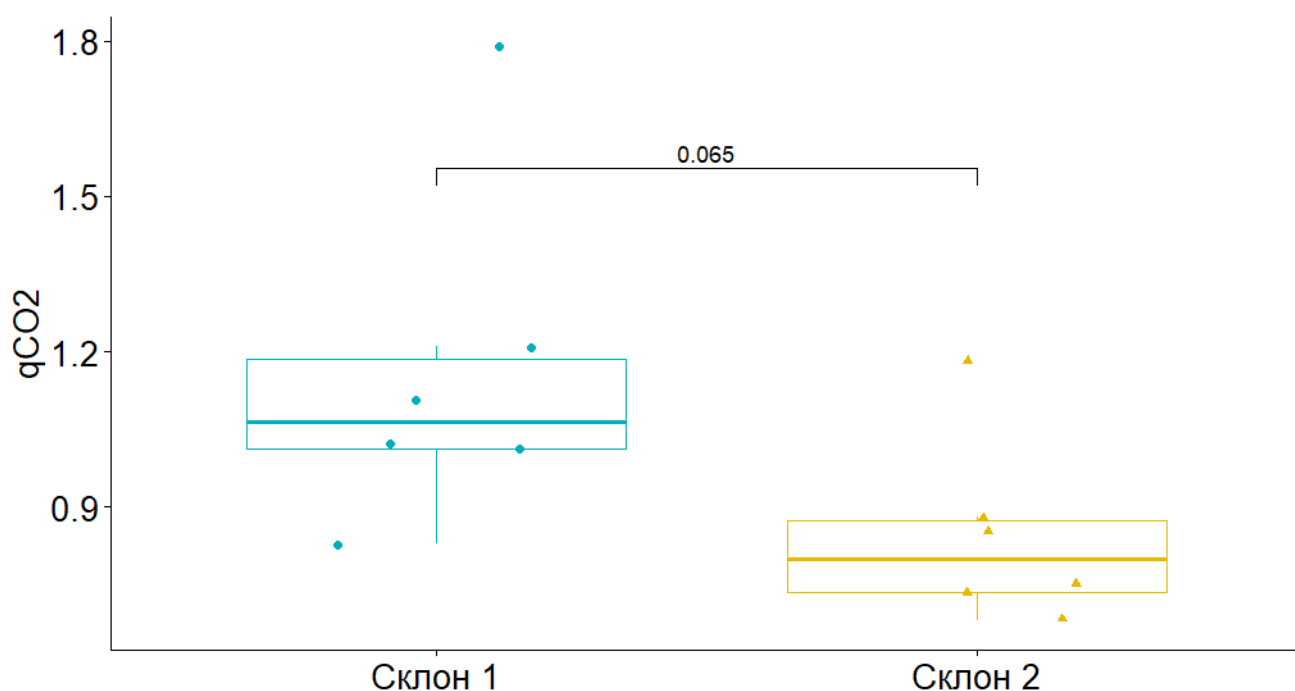


Рисунок 5.15 – Зависимость показателя микробного метаболического коэффициента (мкг CO_2 -С/мг Смик/ч) в почве склонов под разновозрастными виноградниками согласно критерию Краскела-Уоллиса.

При сравнении микробного метаболического коэффициента с аналогичным показателем для почв с разной системой землепользования, оказалось, что среднее значение данного показателя для почвы первого и второго склона ниже в 1,5 и 1,7 раза, чем в почве органических и традиционных хозяйств соответственно.

Отношение Смик/Сорг, характеризующее «качество» органического вещества почвы, изменялось в диапазонах 1,90–4,46% и 1,48–2,84% соответственно

в почве первого и второго склонов (табл. 5.7). При этом достоверных отличий между склонами по данному показателю не выявлено.

Для оценки эффективности использования органического вещества микроорганизмами использовался показатель $q\text{CO}_2/\text{C}_{\text{орг}}$ [119, 263]. Повышение значений этого показателя свидетельствует о снижении эффективности использования органики микробным сообществом. В ходе исследования зафиксированы следующие диапазоны значений: 53,5 до 158,4 мкг $\text{CO}_2\text{-C}/\text{мг Смик}/\text{ч}/\text{г Сорг}/\text{г}$ почвы на первом склоне и от 42,1 до 100,9 мкг $\text{CO}_2\text{-C}/\text{мг Смик}/\text{ч}/\text{г Сорг}/\text{г}$ почвы на втором склоне.

Статистический анализ не выявил достоверных отличий между склонами по данному показателю, так и по соотношению $\text{Смик}/\text{Сорг}$.

Рассчитанный коэффициент микробного дыхания (QR), который служит интегральным показателем, позволяющим оценить состояние почвы и её микробного сообщества, в почве разных элементов склона варьировал от 0,03 до 0,07 на первом склоне и от 0,03 до 0,05 на втором склоне, что существенно ниже оптимального диапазона QR (0,1–0,2). Как указывалось в 4-й главе, это может свидетельствовать о неоптимальных условиях функционирования микробного сообщества почвы, возможно, вследствие ее низкой обеспеченности элементами питания.

В целом необходимо отметить, что между почвами двух склонов согласно исследованным микробиологическим показателям и экофизиологическим индексам существовали достоверные отличия, однако значимых отличий по данным показателям между элементами каждого из рассматриваемых склонов обнаружено не было.

Обсуждение по главе 5

Статистическая обработка полученных данных для почв под разновозрастными виноградниками выявила наличие множества корреляционных связей между исследуемыми параметрами (по Спирмену, $p < 0,05$) (рис. 5.16). При этом все выявленные зависимости между показателями отмечались по отношению

к почве только первого склона, на котором виноград выращивался в течение 40 лет (рис. 5.16). Отсутствие отдельных исследуемых показателей в корреляционной матрице означает, что значимых корреляционных зависимостей с другими показателями при уровне значимости менее 0,05 не установлено.

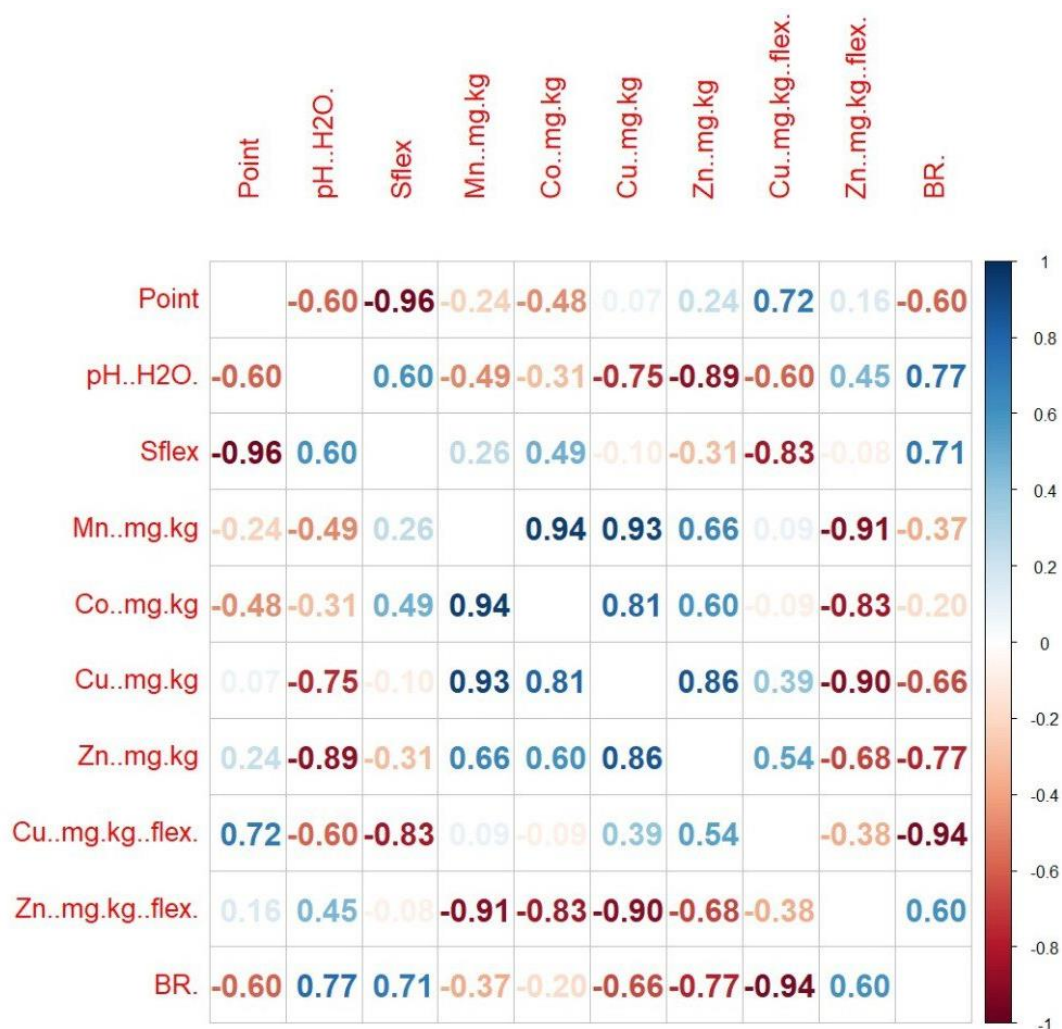


Рисунок 5.16 – Матрица корреляций ($p < 0,05$) между физико-химическими, химическими свойствами и базальным дыханием почв первого склона под 40-летним виноградником (*Point* – Часть склона; *pH.H2O* – pH (водн.); *Sflex* – Содержание подвижной серы, мг/кг; *Mn, mg/kg* – Валовое содержание марганца, мг/кг; *Co, mg/kg* – Валовое содержание кобальта, мг/кг; *Cu, mg/kg* – Валовое содержание меди, мг/кг; *Cu, mg/kg (flex)* – Содержание подвижных форм меди, мг/кг; *Zn, mg/kg (flex)* – Содержание подвижных форм цинка, мг/кг; *BR* – БД, мкг CO_2-C/g почвы/ч; *eu* – Смик, мкг C/g почвы).

Несмотря на то, что ранее отмечалось возрастание содержания органического вещества в поверхностном горизонте рядов винограда от верхней к нижней частям обоих склонов, отсутствие статистически значимой корреляции между данным показателем и элементом склонового ландшафта указывает на слабое проявление эрозионных процессов в пределах исследуемых участков. Возможно, это связано с недостаточным уровнем увлажнения исследуемого района. Так, в контрастных по количеству выпадающих осадков условиях на территории Автономного края Воеводины Республики Сербии на виноградниках интенсивного типа поверхностный смыв почвы проявлялся гораздо сильнее [8–10, 80, 81].

Из всех изученных показателей только содержание подвижной серы коррелировало с частью склона ($r = -0,96$), что указывает на накопление элемента в автономном ландшафте и значимое снижение его содержания в геохимически подчиненных элементах ландшафта (рис. 5.16).

Известно, что уровень накопления серы в почве зависит от ее содержания в почвообразующей породе, содержания органического вещества, гранулометрического состава, влажности почвы [33, 128, 230, 313]. Согласно данным корреляционного анализа статистически значимой взаимосвязи между содержанием подвижной серы и содержанием органического вещества в исследуемых почвах не выявлено. С учетом общего низкого содержания Сорг в исследуемой почве обоих склонов (0,76–2,14%), это косвенно свидетельствует о низкой контрастности геохимического барьера в виде гумусового горизонта. В то же время, установленная тесная отрицательная связь содержания подвижной серы в исследуемом слое почвы 0–20 см с частью склона может быть связана с контрастной степенью увлажнения почвы между элювиальным и трансэлювиально-аккумулятивным элементами ландшафта. Как известно, пространственное размещение и глубина проникновения корней винограда зависит, помимо прочих причин, от содержания в верхней части профиля почвы влаги. При дефиците влаги максимальная плотность корней наблюдается в более глубоких слоях почвы, тогда как при оптимальных условиях увлажнения активная всасывающая часть корневой системы приурочена к верхней части профиля, где

складываются более благоприятные условия для усвоения питательных веществ. Можно предположить, что в почве подошвы склона с более оптимальными условиями увлажнения функция биогенного геохимического барьера в виде корней виноградных растений в рядах способствует обеднению почвы этой части геохимического ландшафта подвижной серой по сравнению с почвой автономного ландшафта, где из-за пониженной влажности верхних горизонтов почвы и невысокой концентрации корней создаются условия для накопления элемента. Аналогичная тенденция отмечалась и в отношении валового содержания цинка, марганца и кобальта. Также в условиях повышенной влажности возможна миграция подвижной серы из поверхностных в нижележащие горизонты почвенного профиля.

В нашем исследовании установлено достоверно более высокое накопление меди, как по валовому содержанию, так и по содержанию подвижных форм, в почве склона под 40-летним виноградником по сравнению с 6-летним. Исследования других авторов также подтверждают зависимость между накоплением меди в почве ампелоценозов и длительностью выращивания на ней винограда [119, 263], что существенно увеличивает степень экологического риска для агроэкосистем возрастных виноградников и сопредельных ландшафтов. Содержание цинка и марганца, как и меди, в почве первого склона под 40-летним виноградником было статистически значимо выше по сравнению с почвой второго склона под 6-летним виноградником. Однако превышения нормативных значений по данным металлам в почве обоих склонов не выявлено [21].

Валовое содержание меди во всех частях склона в горизонте 0–20 см в рядах виноградных насаждений превышало норматив ОДК (СанПиН 2.1.3685-21) в 1,3–1,9 раза с учетом реакции среды и механического состава почвы. Превышение ПДК по подвижным формам меди в почве склона с длительной историей землепользования было еще более значительным – в 2,0–3,4 и 2,9–10,6 раза в почве рядов и междурядий соответственно. В агроценозе молодого виноградника, расположенного на втором склоне, выявлено превышение предельно допустимых концентраций подвижных форм меди в 1,2–3,3 раза. Данная закономерность

наблюдалась как в рядах, так и в междурядьях, что свидетельствует о пространственной однородности загрязнения.

Между валовым содержанием меди и содержанием ее подвижных форм в почве первого склона статистически достоверная корреляционная связь отсутствовала, однако при расширении массива данных с учетом обоих изучаемых склонов между показателями была выявлена положительная корреляционная связь ($r = 0,69$). Необходимо отметить, что наличие данной зависимости исследованиями одних авторов подтверждается [12, 135, 208, 302], а других – опровергается [236, 299, 311, 321]. Такая противоречивость представленных в разных исследованиях результатов, скорее всего, обусловлена множеством различных факторов, которые могут оказать влияние на подвижность металла в почве и, соответственно, изменить характер корреляционных связей между его формами. В связи с этим прогноз подвижности элемента по его валовому содержанию нельзя считать надежным способом выявления экологического риска возможного загрязнения в системе «почва – растение».

В исследовании установлена тесная положительная корреляция между валовым содержанием марганца и валовым содержанием кобальта ($r = 0,94$), валовым содержанием меди ($r = 0,93$) (рис. 5.16). В наших исследованиях почв виноградников на территории региона Фрушка Гора в Республике Сербии также была выявлена корреляционная связь между медью и марганцем [80]. Обнаруживали ее и другие авторы [285]. Подобную положительную связь между марганцем и ионами других металлов можно объяснить их связыванием с оксидами и гидроксидами марганца, которые имеют высокую удельную поверхность и большое количество активных центров. Например, медь может сорбироваться на поверхности этих соединений за счет как ионного обмена, так и образования комплексов на поверхности оксидов марганца, причем в условиях нейтральной и слабощелочной среды оксиды и гидроксиды марганца проявляют высокую сорбционную способность по отношению к меди. Так, по данным Bradl (2004), сродство меди к отдельным фракциям почвы уменьшалось в следующем порядке: гидроксиды марганца > органическое вещество > гидроксиды железа > глинистые

минералы [21, 82, 110]. Учитывая отсутствие корреляционной зависимости между содержанием органического вещества и содержанием меди, предполагаем, что основная форма связывания меди и кобальта в почве исследуемых ампелоценозов – в составе оксидов и гидроксидов марганца.

Интересно, что наши исследования показали наличие тесной положительной корреляционной зависимости между валовым содержанием меди и цинка в почве ($r = 0,86$), иногда о такой связи сообщается и в других исследованиях (рис. 5.16). Можно предположить, что подобная связь обусловлена общим источником их поступления в почву виноградников [21]: медь вносят с медьсодержащими фунгицидами, а цинк – с фунгицидами на основе дитиокарбаматов.

Из других рассматриваемых показателей выявлена сильная отрицательная корреляция между рН водной вытяжки и валовым содержанием цинка ($r = -0,89$) и корреляция средней силы между рН и валовым содержанием меди ($r = -0,75$), однако статистическая значимость последней не подтверждена (рис. 5.16). Это соответствует общим представлениям о снижении подвижности большинства тяжелых металлов вследствие усиления специфической абсорбции с повышением рН почвы.

Эколого-геохимический анализ распределения тяжелых металлов в почве сопряженных элементов геохимического ландшафта показал, что из всех изучаемых металлов наибольшими значениями кларка концентрации относительно как кларка литосферы, так и содержания в эталонной почве, отличалась медь. Так, в почве склона под возрастным виноградником кларк концентрации меди достигал 6,4–9,1 относительно кларка литосферы и 2,3–3,2 – относительно региональной эталонной почвы. При этом ни в одном элементе ландшафта как первого, так и второго склона рассеяния меди не обнаружено. В отношении других металлов наблюдалось чередование зон накопления со значениями кларка концентрации, не превышающими 1,6, и зон рассеивания в зависимости от горизонта и части склона. Такие отличия в накоплении меди по сравнению с цинком, марганцем и кобальтом указывают на ее агрогенное, а в отношении других металлов – преимущественно геогенное происхождение в почве ампелоценозов.

На основании рассчитанных коэффициентов латеральной дифференциации удалось обнаружить миграцию меди по склону с ее накоплением средней силы ($L = 1,18-1,40$ и $1,26-1,49$ по валовому содержанию и подвижной форме соответственно) в трансэлювиальном и трансаккумулятивном элементах геохимического ландшафта возрастного виноградника с преобладанием миграции меди в форме подвижных соединений. В почве 40-летнего ампелоценоза с той же степенью интенсивности, как и медь, мигрировал цинк. Для марганца и кобальта зоны выноса, главным образом, в поверхностном горизонте ($L = 0,49-0,82$) чередовались с зонами накопления средней силы в подповерхностном горизонте ($L = 1,11-1,60$) обоих склонов, что, по всей видимости, указывает на преобладание радиальной миграции элементов над латеральной.

В условиях превышения установленных нормативных значений содержания меди в почве 40-летнего виноградника представляла интерес реакция на загрязнение почвенной микробиоты, оцененная нами по показателям дыхания и экофизиологическим индексам. Из литературных источников известно, что в условиях загрязнения верхних горизонтов почв виноградников медью проявлялись различные признаки ее токсичности для эдафобионтов разных размерных групп, и, прежде всего, снижение их общей численности и сокращение видового разнообразия [86, 129, 203, 246, 275, 359]. В таком случае это не могло не отразиться на показателях дыхательной активности почвы.

В почве 40-летнего виноградника в диапазоне валового содержания меди $173,3-246,6$ мг/кг (превышении ОДК в $1,3-1,9$ раза) и диапазоне содержания подвижных форм меди $6,1-31,8$ мг/кг (превышении ПДК в $2,0-10,6$ раза), средние значения БД и СИД оказались соответственно в $2,0$ и $1,5$ раза выше, чем в почве молодого ампелоценоза. Более того, по уровню субстрат-индуцированного дыхания эти значения приближались к таковым в почве органических виноградников, о которых шла речь в четвертой главе настоящей работы, а микробный метаболический коэффициент, который считается показателем микробного стресса, оказался даже ниже, чем в почве органических и традиционных виноградников ($1,16$ против $1,36$ и $2,01$ мкг $\text{CO}_2\text{-C}/\text{мг Смик}/\text{ч}$

соответственно) [21]. Это свидетельствует о том, что при менее чем двукратном превышении установленных нормативных значений валового содержания меди и двух – десятикратном – содержания подвижных форм меди в почве первого склона микробиологические параметры почвы не могут служить в качестве надежного индикатора ее загрязнения данным элементом. Это может быть связано с недостаточными для проявления токсических эффектов уровнями содержания меди в почве. Так, в работе [316] на основании статистического анализа массива из 389 данных, было установлено снижение эмиссии CO_2 из почвы при уровне загрязнения ее медью от 265 мг/кг и выше, в то время как до этого значения эмиссия диоксида углерода при повышении концентрации меди, напротив, повышалась. Кроме концентрации, большое влияние на проявление токсического эффекта оказывает фактор времени, в данном случае – длительность применения медьсодержащих пестицидов. В краткосрочной перспективе загрязнение медью может подавлять микробную активность, но в долгосрочной перспективе микроорганизмы могут адаптироваться, что приводит к восстановлению или даже увеличению дыхательной активности [274]. Например, в исследовании [343] приводятся данные о том, что несмотря на снижение активности уреазы и дегидрогеназы, уменьшения общей численности и видового состава микроорганизмов в условиях сильного загрязнения медью, в почве тем не менее присутствовали активные и потенциально активные штаммы бактерий, что свидетельствует об изменении состава микробного сообщества, в котором выживали и доминировали устойчивые виды.

Несмотря на то, что почвы возрастного виноградника характеризовались достоверно более высокими значениями как базального, так и субстрат-индуцированного дыхания в сравнении с молодыми насаждениями, корреляционный анализ выявил статистически значимую отрицательную зависимость между интенсивностью базального дыхания и содержанием подвижных форм меди ($r = -0,94$) и отсутствие значимой зависимости между БД и валовым содержанием меди. Это логично, поскольку токсичность меди и других тяжелых металлов зависит от их химической формы и доступности для

микроорганизмов. Наши исследования показали, что 95–97% меди в почве исследуемых виноградников слабо- или недоступно для биоты, соответственно, не оказывает существенное влияние на ее дыхательную активность и биомассу. Увеличение содержания доступных форм меди приводит к угнетению базального дыхания, что связано с чувствительностью автохтонной почвенной микрофлоры к токсическому воздействию в условиях низкой метаболической активности, но не сказывается на субстрат-индуцированном дыхании. Это подтверждает приведенный выше тезис о присутствии в почве, которая длительное время подвергалась воздействию медьсодержащих фунгицидов, потенциально активных штаммов микроорганизмов, которые при появлении легкодоступного питательного субстрата переходят в состояние активного роста, что повышает их устойчивость и способность адаптироваться к токсическим воздействиям за счет повышенной метаболической активности и выработки защитных механизмов.

Заключение по главе 5

Проведенные исследования в условиях склонового ландшафта позволили выявить существенные отличия между разновозрастными ампелоценозами как по накоплению и миграции меди и других тяжелых металлов, так и по функциональной активности почвенного микробоценоза. Установлено преимущественное накопление меди, а также цинка и марганца в почве 40-летнего виноградника, причем кратное превышение установленных нормативных значений как по валовому содержанию, так и по содержанию подвижных форм меди обнаружено во всех частях склона как в рядах, так и в междурядьях винограда.

Эколого-геохимический анализ показал, что кларк концентрации меди в почве 40-летнего ампелоценоза относительно кларка литосферы и содержания в региональной эталонной почве достигал соответственно 6,4–9,1 и 2,3–3,2, что указывает на преимущественно агрогенное происхождение данного элемента.

На фоне общего слабого развития эрозионных процессов обнаружена миграция преимущественно подвижных форм меди по склону с ее накоплением средней силы в трансэлювиальном и трансаккумулятивном элементах

геохимического ландшафта 40-летнего виноградника с коэффициентами латеральной дифференциации 1,26–1,49.

Базальное и субстрат-индуцированное дыхание в почве 40-летнего ампелоценоза оказалось соответственно в 2,0 и 1,5 раза выше, чем в почве 6-летнего ампелоценоза. Статистический анализ полученных данных показал, что трехдесятикратное превышение содержания подвижных форм меди в почве возрастного виноградника угнетало базальное, но не субстрат-индуцированное дыхание, что свидетельствует об успешной адаптации почвенной микрофлоры при длительном применении медьсодержащих фунгицидов к повышенному уровню меди в верхних горизонтах почвы, вероятно, за счет изменения состава микробного сообщества в сторону преобладания устойчивых, потенциально активных штаммов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в диссертационной работе материал обобщает пятилетние исследования автора по оценке экологического состояния почв представительных ампелоценозов юго-западной части Крымского полуострова с различным уровнем антропогенного воздействия.

Проведённые исследования позволили комплексно оценить климатические, орографические и экотоксикологические факторы выращивания винограда в Севастопольском районе Республики Крым с выявлением лимитирующих экологических факторов.

Регион характеризуется умеренно-тёплым климатом с прохладными ночами, что делает его сопоставимым с известными винодельческими регионами Европы. Однако выявленный за 20-летний период тренд повышения суммы активных температур на фоне выраженного сезонного дефицита доступной растениям влаги в перспективе потребует адаптации технологий выращивания винограда с подбором его засухоустойчивых подвоев и сортов.

В работе впервые для Севастопольского региона дана сравнительная оценка экологического состояния почв представительных ампелоценозов с различным уровнем антропогенного воздействия. Выявлены существующие и потенциальные проблемные экологические ситуации, которые могут привести к дестабилизации функционирования почвенного микробиома, снижению продуктивности и качества виноградарско-винодельческой продукции. На основе экотоксикологических показателей и расчетных экофизиологических индексов установлено наличие последствий многолетнего выращивания винограда по интенсивным технологиям для залежных почв.

Оценка влияния орографических факторов показала различную степень концентрирования или рассеивания меди и других тяжелых металлов, особенности их латеральной миграции в почве сопряженных элементов геохимического ландшафта под разновозрастными виноградниками. Показано, что в отличие от других тяжелых металлов, медь в почвах ампелоценозов имеет преимущественно антропогенное происхождение, накапливается в верхних горизонтах почвы с

кратным превышением установленных нормативных значений и способна к латеральной миграции по склону с накоплением средней силы.

Результаты экотоксикологических и микробиологических исследований почв ампелоценозов Севастопольского региона впервые продемонстрировали, что дыхательная активность почвы и рассчитанные экофизиологические индексы являются эффективными индикаторами изменения экологического состояния почв виноградников при различных уровнях антропогенной нагрузки. Однако в условиях длительного загрязнения почвы медью показатели базального и субстрат-индуцированного дыхания могут не адекватно отражать ее реальное экологическое состояние вследствие формирования у почвенной микробиоты адаптационных механизмов устойчивости к данному элементу.

Представленные в работе результаты, полученные на основе современных инструментальных методов анализа и статистической обработки, вносят вклад в решение ряда задач, связанных с актуальными проблемами экологии, включающими комплексную оценку состояния экосистем и их устойчивости, определение интенсивности переноса и аккумуляции вещества, оценку накопления и пространственной дифференциации биогенных элементов и токсичных веществ в экосистемах, антропогенное воздействие на популяции, сообщества и экосистемы.

Результаты исследований демонстрируют недостаточность определения при оценке экологического состояния почв ампелоценозов только общепринятых показателей их физико-химических и химических свойств, которые рекомендуется дополнять динамикой активности почвенного микробиома, уточняющей текущее состояние почвы и на ранних стадиях диагностирующей негативные изменения, вызванные как природными абиотическими, так и антропогенными факторами.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные комплексные экологические исследования коричневых типичных и бурых лесных почв применяющих традиционные и органические технологии винодельческих хозяйств в условиях юго-западной части Крымского полуострова показали, что лимитирующими выращивание винограда экологическими факторами выступают: выраженный сезонный дефицит доступной почвенной влаги, низкая обеспеченность почв отдельных хозяйств подвижным фосфором (5,2–14,6 мг/кг), избыточное содержание в почвах органических хозяйств подвижной серы (28,1–37,8 мг/кг) и последствие многолетнего применения медьсодержащих пестицидов, характерное для всех хозяйств независимо от уровня антропогенного воздействия.

2. С применением метода главных компонент и непараметрического дисперсионного анализа доказано экологически значимое различие интегральных микробиологических показателей почв ампелоценозов с разной антропогенной нагрузкой. По совокупности показателей содержания микробной биомассы, ее доли в органическом углероде почвы и экофизиологического статуса микробного сообщества почвы (базальное и субстрат-индуцированное дыхание, микробный метаболический коэффициент, эффективность использования органического вещества микроорганизмами) в почвах органических ампелоценозов сформированы наиболее благоприятные условия для микробиологической активности и закрепления углерода в составе микробной биомассы, тогда как экофизиологические индексы почв в многолетнем залежном состоянии после длительного выращивания винограда могут выходить за пределы оптимальных значений этих показателей.

3. Валовое содержание меди в почвах рядов 40-летнего виноградника, выращиваемого в условиях склонового ландшафта, варьировалось от 173,3 до 246,6 мг/кг, что вдвое выше по сравнению с почвой 6-летнего виноградника и на 31–87% выше ориентировочно допустимой концентрации. Для почв 40-летнего и 6-летнего ампелоценозов кларк концентрации меди относительно кларка литосферы составил соответственно 6,4–9,1 и 3,0–4,9, относительно региональной эталонной почвы –

2,3–3,2 и 1,4–1,5 без зон рассеяния, которые были выявлены для других исследуемых микроэлементов (тяжелых металлов), что указывает на преимущественно агрогенное происхождение меди в почвах исследованных виноградников. Обнаружена умеренная миграция меди по склону с коэффициентами латеральной дифференциации 1,18–1,29, главным образом, в горизонте 10–20 см, с накоплением средней силы в трансэлювиальном и трансаккумулятивном элементах ландшафта.

4. Содержание подвижных форм меди в почвах всех исследуемых виноградников варьирует в широком диапазоне: 0,7–31,8 мг/кг – с превышением предельно допустимой концентрации в 1,2–10,6 раза и преимущественным накоплением в рядах и междурядьях 40-летнего ампелоценоза, где медь в форме подвижных соединений активнее мигрировала по склону с коэффициентом латеральной дифференциации 1,25–1,40 в горизонтах 0–10 и 10–20 см.

5. На фоне общего повышения в 1,6–5,7 раза уровня дыхательной активности загрязненной медью почвы 40-летнего ампелоценоза по сравнению с 6-летним, по результатам корреляционного анализа установлено ингибирующее воздействие доступной формы меди на базальное дыхание микробного сообщества почвы ($r = -0,94$) и отсутствие значимого токсического эффекта на субстрат-индуцированное дыхание, что может свидетельствовать о временной стимуляции потенциально активных штаммов микроорганизмов и адаптированности почвенного микробоценоза, формируемого в условиях длительного применения медьсодержащих фунгицидов.

6. В условиях намечающихся трендов перехода отдельных винодельческих хозяйств Крыма с традиционных систем земледелия на органические и широкой практики возрождения виноградников на ранее длительно использованных в виноградарстве залежных землях регионально протестированные показатели интегральной микробиологической активности могут рассматриваться в качестве перспективных диагностических параметров нормативно прогнозируемого агроэкологического состояния почв проектируемых в Крыму ампелоценозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авессаломова И.А. Геохимические показатели при изучении ландшафтов. Уч.-метод. пособие / Авессаломова И.А., Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 108 с.
2. Авидзба А.М. [и др.]. Состояние виноградарства Крыма в 2014 году // «Магарач». Виноградарство и виноделие. 2015. (4). С. 3–4.
3. Авидзба А.М. [и др.]. Проблемы развития виноделия с географическим статусом в Крыму и пути их решения // Магарач. Виноградарство и виноделие. 2016. (1). С. 25–30.
4. Адамень Ф.Ф., Плугатарь Ю.В., Сташкина А.Ф. Наука и опытное дело как основа развития аграрного производства Крыма / Адамень Ф.Ф., Плугатарь Ю.В., Сташкина А.Ф., Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2015. 252 с.
5. Алейникова Н.В., Галкина Е.С., Диденко П.А., Диденко Л.В. Оценка влияния отечественных микроудобрений линии Полидон на продуктивность винограда столовых и технических сортов в условиях Крыма // Бюллетень ГНБС. 2018. Вып.126. С. 102–110.
6. Ананьева Н. Д. [и др.]. Микробное дыхание почв подтайги и лесостепи европейской части России: полевой и лабораторный подходы // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1276–1286.
7. Ананьева Н. Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г. Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. (11). С. 1327–1333.
8. Андреева И.В., Габечая В.В., Морев Д.В. Экологическая оценка накопления и миграции меди в почве возрастных ампелоценозов в результате длительного применения медьсодержащих фунгицидов в регионе Фрушка Гора Республики Сербия // АгроЭкоИнфо. 2023. (5 (59)).
9. Андреева, И. В. Эколого-геохимическая оценка латеральной миграции подвижной серы в почве склоновых ландшафтов под разновозрастными виноградниками Автономного края Воеводина Республики Сербия / И. В. Андреева, В. В. Габечая // Проблемы агрохимии и экологии. – 2023. – № 4. – С. 36–

41. – DOI 10.26178/AE.2023.94.54.007. – EDN OIPXFO.

10. Андреева И.В., Габечая В.В., Морев Д.В., Таллер Е.Б. Эколого-геохимическая оценка накопления тяжелых металлов в почве разновозрастных ампелоценозов в условиях склонового ландшафта горной гряды Фрушка гора Республики Сербия. Тимирязевский биологический журнал. 2023;1(3):13-28. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-3-13-28>.

11. Аристархов А. Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // Международный сельскохозяйственный журнал. 2016. (5). С. 39–47.

12. Багрова Л.А., Боков В.А., Багров Н.В. География Крыма / Багрова Л.А., Боков В.А., Багров Н.В., Киев: Лыбидь., 2001. 302 с.

13. Батманов А.В. Аккумуляция тяжелых металлов интродуцированными сортами земляники садовой в условиях степной зоны Самарского Заволжья 2017.

14. Белюченко И.С., Гукалов В.Н., Мельник О.А. Динамика органического вещества и проблемы его трансформация в почвах агроландшафта степной зоны края // Экол. вестник Сев. Кавказа. 2007. (Т. 3. – №. 1). С. 5–17.

15. Благодатская Е.В, Ананьева Н.Д., Мякишина Т.Н. Характеристика состояния микробного сообщества почвы по величине метаболического коэффициента // Почвоведение. 1995. (2). С. 205–210.

16. Васенев И.И., Александров Н.А., Андреева И.В. и др. Наилучшие доступные почво- и углерод-сберегающие технологии природопользования, экологического мониторинга и контроля / Васенев И.И., Александров Н.А., Андреева И.В., под ред. Васенев И.И., Москва: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023. 1–242 с.

17. Волков Я.А., Волкова М.В. Методические рекомендации по выращиванию технических сортов винограда в системе органического сельского хозяйства на примере КФХ Д.В. Шелаев, Республика Крым // <https://soz.bio/metodicheskie-rekomendacii-po-vyrashhi/>.

18. Волкова А.А. Экологизированное производство винограда на Кубани в условиях применения медьсодержащих препаратов 2009.

19. Воронин И. Н. Севастополь: природа, экономика, экология / И. Н. Воронин, Симферополь: Крымское учебно-педагогическое государственное издательство, 1998. 96 с.
20. Габечая В.В. [и др.]. Содержание тяжелых металлов в почвах ампелоценозов Крыма в условиях применения различных систем защиты растений // Материалы международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова. 2022. С. 114–118.
21. Габечая В.В., Андреева И.В., Морев Д.В. Сравнительный анализ лимитирующего функционирования почвенного микробиома факторов при культивировании винограда в условиях южного берега Крыма и автономного края Воеводина республики Сербия // АгроЭкоИнфо. 2023. (6 (60)).
22. Габечая В.В., Андреева И.В., Морев Д.В. Эколого-геохимическая оценка накопления и миграции тяжелых металлов в почве разновозрастных виноградников интенсивного типа в условиях эродированного ландшафта южнобережной зоны Крыма // Агроэкоинфо. 2024. (6 (66)).
23. Габечая В.В., Смирнова Е.С., Андреева И.В. Содержание меди в почве ампелоценозов Крыма в условиях органической и традиционной систем землепользования // Аграрная наука - 2022 материалы Всероссийской конференции молодых исследователей. 2022.
24. Гаркуша Л. Я., Багрова Л. А., Позаченюк Е. А. Разнообразие ландшафтов Крыма со средиземноморскими элементами флоры // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского, серия «География». 2012. (Том 25 (64). №2). С. 36–47.
25. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР / Глазовская М.А., Москва: 1988. 329 с.
26. Григорьев Н.А. Распределение кадмия в верхней части континентальной коры // Литосфера. 2013. (2). С. 157–162.
27. Добровольский Г.В. Структурно-функциональная роль почвы в биосфере / Добровольский Г.В., Москва: М.: Наука, 2003. 261 с.
28. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах /

- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д., Москва: М.: Наука, 1990. 261 с.
29. Драган Н.А. Почвы Крыма / Драган Н.А., Симферополь: Симфероп. гос. ун-т им. М. В. Фрунзе, 1983. 94 с.
30. Драган Н.А. Почвенные ресурсы Крыма / Драган Н.А., Симферополь: Доля, 2004. 208 с.
31. Дубровский Н.И. Химический состав почв Таврич. Губ. В связи с вопросом их улучшения / Дубровский Н.И., 1908.
32. Егоров Е. А., Серпуховитина К.А., Худавердов Э.Н. Базовые положения ресурсосберегающего производства винограда в Российской Федерации // Сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 180- летию НИИВиВ «Магарач». 2008. (Т.2.). С. 21–22.
33. Егоров Е.А. [и др.]. Устойчивое производство винограда. Состояние и перспективы развития / Егоров Е.А., Серпуховитина К.А., Худавердов Э.Н., Жуков А.И., Перов Н.Н., [и др.], Краснодар: 2002. 122 с.
34. Жуйков Д. В. Сера и микроэлементы в агроценозах (обзор) // Достижения науки и техники АПК. 2020. (Т.34, №11). С. 32–43.
35. Жук В.О. Методика оценки потенциальной гидрометеорологической опасности территории Крымского полуострова 2021.
36. Иванов Н.Н. Об определении величин испаряемости // Известия Всесоюзного географического общества. 1954. (Т.87. №2). С. 189–196.
37. Иванов С.П., Фатерыга А.В. Красная книга Республики Крым. Животные / Иванов С.П., Фатерыга А.В., Симферополь: ООО ИТ «АРИАЛ», 2015. 440 с.
38. Иванченко В. И., Булава А.Н. Влияние орографических факторов на эффективность размещения виноградных насаждений в условиях предгорного виноградо-винодельческого района республики Крым // Агротомия. 2003. С. 125–138.
39. Иванченко В.И., Райков А.В. Влияние привойно-подвойных комбинаций винограда аборигенных сортов Крыма на механическую прочность срастания компонентов прививки // Виноградарство и виноделие. 2022. (Т. 51). С. 37–40.
40. Иващенко К.В. Обилие и дыхательная активность микробного сообщества

почвы при антропогенном преобразовании наземных экосистем 2017.

41. Казанцева Л.П., Фурса Д.И. Влияние некоторых экологических факторов на урожайность и сахаристость винограда // Экология винограда и урожай. 1985. С. 58–61.
42. Казеев К.Ш. [и др.]. Ферментативная активность некоторых почв Крыма // Научный журнал КубГАУ. 2014. (104(10)). С. 1–12.
43. Казиев Р.А., Аличаев М.М., Баламирзоев М.А. Почвенные условия и продуктивность винограда // Стратегия устойчивого развития и инновационные технологии в садоводстве и виноградарстве. – Материалы Междунар. науч.-практич. конф., посвященной 80-летию академика Н.А. Алиева. 2010. С. 126–129.
44. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. 2016. (2). С. 7–17.
45. Клепинин Н.Н. Почвы Крыма / Клепинин Н.Н., Симферополь: гос. изд Крым АССР, 1935. 118 с.
46. Колесников С.И. Агроэкология / Колесников С.И., КноРус, 2023. 534 с.
47. Кошкин, Е. И. Влияние глобальных изменений климата на продуктивность и устойчивость сельскохозяйственных культур к стрессорам / Е. И. Кошкин, И. В. Андреева, Г. Г. Гусейнов // Агрохимия. – 2019. – № 12. – С. 83-96. – DOI 10.1134/S0002188119120068. – EDN OXJPEY.
48. Красильников А.А., Руссо Д.Э. Интенсификация минерального питания виноградников: Методические рекомендации / Красильников А.А., Руссо Д.Э., Краснодар: ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия», 2019. 64 с.
49. Лисецкий Ф.Н., Зеленская Е.Я. Различия в содержании тяжелых металлов в почвах Южного берега Крыма (пространственно-временной анализ) // Экосистемы. 2023. (34). С. 81–91.
50. Лисецкий Ф.Н., Смекалова Т.Н. Ампелопедологические и экологические особенности виноградарства в сельской округе Калос Лимена Симферополь: Материалы III Международной научно-практической конференции 29–31 мая 2017, 2017.С. 110–117.

51. Лукьянов А. А. Ключевые факторы, обуславливающие развитие водной эрозии почвы на виноградниках // Плодоводство и виноградарство Юга России . 2015. (№32(02)).
52. Мацкул А.В., Короткова Т.Г. Экологическая безопасность винодельческой продукции в системе «Почва-Виноград-Вино» // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2019. (3). С. 853–863.
53. Мирчинк Т.Г., Паников Н.С. Современные подходы к оценке биомассы и продуктивности грибов и бактерий в почве // Успехи микробиологии. 1985. (20). С. 198–226.
54. Нортон Р., Миккелсен Р., Дженсен Т. Значение серы в питании растений // Вестник Международного института питания растений. 2014. (3). С. 2–5.
55. Овсиенко Н.А. [и др.]. Изменение химического состава ягод винограда в процессе созревания // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. 2010. (Том 23 (62)). С. 201–207.
56. Пенюгалов А.В. Климат Крыма. Опыт климатического районирования / Пенюгалов А.В., Симферополь: Крымгосиздат, 1930. 178 с.
57. Перельман А.И. Геохимия ландшафта / Перельман А.И., Москва: 1975. 341 с.
58. Польшов Б.Б. Геохимические ландшафты / Польшов Б.Б., Москва: Изд-во АН СССР, 1956.
59. Раджабов А.К. Удобрение виноградников // Виноградарство с основами виноделия. 2003. (Изд-во СКНЦ ВШ). С. 252–277.
60. Рыбалко Е. А. Climatic indices in viticulture // Magarach Vinogradstvo i Vinodelie. 2020. № 1(111). С. 26–28.
61. Рыбалко Е.А., Баранова Н.В., Борисова В.Ю. Оценка почвенных условий Крымского полуострова применительно к культуре винограда // «Магарах». Виноградарство и виноделие. 2019. (21 (3)). С. 235–239.
62. Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. (20). С. 165–177.
63. Соколова Г.Г. Влияние высоты местности, экспозиции и крутизны склона на особенности пространственного распределения растений // Acta Biologica Sibirica.

2016. (2 (3)). С. 34–45.

64. Стоев К.Д. Физиологические основы виноградарства / Стоев К.Д., 1971.

65. Странишевская Е. П. [и др.]. System of protection and technological aspects of organic grape production in conditions of the South Coast of Crimea // *Magarach Vinogradstvo i Vinodelie*. 2020. № 4(114). С. 336–343.

66. Унгурян В. Г. Выбор и оценка почв для посортной закладки виноградников в Молдавии. Кишинев, 1977.

67. Унгурян В. Г. Почвенно-экологические параметры основных сортов винограда Кишинев: Штиинца:, 1981.

68. Унгурян В.Г. Почва и виноград / Унгурян В.Г., Кишинев: 1979. 24 с.

69. Агроэкология / В. А. Черников, Р. М. Алексахин, А. В. Голубев и др.; Под А26 ред. В. А. Черникова, А. И. Чекереса. — М.: Колос, 2000. - 536 с.: ил. - (Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений).

ISBN 5-10-003269-3.

70. Adhikari K., Hartemink A. E. Linking soils to ecosystem services — A global review // *Geoderma*. 2016. (262). С. 101–111.

71. Afonso J. M.; [и др.]. Enrelvamento do Solo em Vinha na Região dos Vinhos Verdes. Três Anos de Estudo na Casta ‘Alvarinho’ // *Ciência e Técnica Vitivinícola Ciência e Técnica Vitivinícola*. 2003. (18). С. 47–63.

72. Agnelli A. [и др.]. Carbon and nitrogen in soil and vine roots in harrowed and grass-covered vineyards // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2014. (193). С. 70–82.

73. Agrios G. N. Control of Plant Diseases // *Plant Pathology*. 1997. (4th Edition). С. 200–216.

74. Alaoui-Sossé B. [и др.]. Effect of copper on growth in cucumber plants (*Cucumis sativus*) and its relationships with carbohydrate accumulation and changes in ion contents // *Plant Science*. 2004. № 5 (166). С. 1213–1218.

75. Alef K. Soil respiration // *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. 1995. С. 214–218.

76. Alengebawy A. [и др.]. Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications // *Toxics*. 2021. № 3 (9). С.

42.

77. Amerine M. A., Winkler A. J. Composition and Quality of Musts and Wines of California Grapes // *Hilgardia*. 1944. № 6 (15). C. 493–675.

78. Anderson J. P. E., Domsch K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 1978. № 3 (10). C. 215–221.

79. Anderson T., Domsch K. H. Carbon assimilation and microbial activity in soil // *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 1986. № 4 (149). C. 457–468.

80. Anderson T.-H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2003. № 1–3 (98). C. 285–293.

81. Andreeva I. [и др.]. How Landscapes and History Shape Copper in Vineyard Soils: Example of Fruška Gora Region, Serbia // *Land*. 2025. № 1 (14). C. 96.

82. Andreeva I., Gabechaya V., Morev D. Comparative analysis of different-age vineyards in Fruška Gora National Park, in the Autonomous province of Vojvodina, Republic of Serbia, on the characteristics of lateral migration of mobile sulphur // *BIO Web of Conferences*. 2024. (85). C. 01056.

83. Andreeva I. V., Gabechaya V. V. Copper in the soil of agroecosystems of vineyards: a modern view of the problem // *Agrohimiâ*. 2024. № 11. C. 56–80.

84. Angelova V. [и др.]. Heavy metal (Pb, Cu, Zn and Cd) content in wine produced from grape cultivar Mavrud, grown in an industrially polluted region // *OENO One*. 1999. № 3 (33). C. 119.

85. Apel K., Hirt H. Reactive Oxygen Species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction // *Annual Review of Plant Biology*. 2004. № 1 (55). C. 373–399.

86. Arias L. A. [и др.]. Climate Change Effects on Grapevine Physiology and Biochemistry: Benefits and Challenges of High Altitude as an Adaptation Strategy // *Frontiers in Plant Science*. 2022. (13).

87. ASH C. [и др.]. Elevated soil copper content in a Bohemian vineyard as a result of fungicide application // *Soil and Water Research*. 2012. № 4 (7). C. 151–158.

88. Ausseil A.-G. E. [и др.]. Projected Wine Grape Cultivar Shifts Due to Climate Change in New Zealand // *Frontiers in Plant Science*. 2021. (12).

89. Babić V., Krstić M. Climate characteristics of the ses-sile oak forest belt on Fruška Gora // Шумарство. 2014. (V. 3-4). С. 49–62.
90. Bai Z. [и др.]. Response of Microbial Community to Long-Term Fertilization and Land Management in a Chinese Mollisol IEEE, 2009.С. 1–6.
91. Bao L. [и др.]. Grape Cultivar Features Differentiate the Grape Rhizosphere Microbiota // Plants. 2022. № 9 (11). С. 1111.
92. Baša Česnik H., Gregorčič A., čuš F. Pesticide residues in grapes from vineyards included in integrated pest management in Slovenia // Food Additives & Contaminants: Part A. 2008. № 4 (25). С. 438–443.
93. Beck T. [и др.]. An inter-laboratory comparison of ten different ways of measuring soil microbial biomass C // Soil Biology and Biochemistry. 1997. № 7 (29). С. 1023–1032.
94. Bélanger R. R., [и др.]. The powdery mildews. A comprehensive treatise // APS Press.
95. Belda I. [и др.]. From Vineyard Soil to Wine Fermentation: Microbiome Approximations to Explain the “terroir” Concept // Frontiers in Microbiology. 2017. (8).
96. Berger E [и др.]. Kupfer als Pflanzenschutzmittel—Strategie für einen nachhaltigen und umweltschonenden Einsatz // Austrian Agency for Health and Food safety. 2012.
97. Bezdicek D.F., Papendic R.I., Lal R Introduction: Importance of Soil Quality to Health and Sustainable Land Management // Soil Science Society of America Journal. 1996. (Publ. 49). С. 1–18.
98. Biasi R. [и др.]. Viticulture as Crucial Cropping System for Counteracting the Desertification of Coastal Land // Acta Horticulturae. 2012. № 931. С. 71–77.
99. Biddoccu M. [и др.]. Long-term monitoring of soil management effects on runoff and soil erosion in sloping vineyards in Alto Monferrato (North–West Italy) // Soil and Tillage Research. 2016. (155). С. 176–189.
100. Bisiach M. White rot // APS Press. 1988. С. 22–23.
101. Bissonnais Y. Le, Lecomte V., Cerdan O. Grass strip effects on runoff and soil loss // Agronomie. 2004. № 3 (24). С. 129–136.
102. Blanco-Pérez R. [и др.]. Organic viticulture enhanced the activity of native entomopathogenic nematodes in DOCa Rioja soils (North of Spain) // Agriculture,

- Ecosystems & Environment. 2022. (332). C. 107931.
103. Bloem J.; Ruiter P. C. de; Bouwman L. A. Soil food webs and nutrient cycling in agroecosystems New York: Research Institute for Agrobiolgy and Soil Fertility, 1997. C. 245–278.
104. Blotevogel S. [и др.]. Soil chemistry and meteorological conditions influence the elemental profiles of West European wines // Food Chemistry. 2019. (298). C. 125033.
105. Blum W. E. H. Functions of Soil for Society and the Environment // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 2005. № 3 (4). C. 75–79.
106. Blum W. E. H., Swaran H. Soils for Sustaining Global Food Production // Journal of Food Science. 2004. № 2 (69).
107. Bogoni M. [и др.]. Effects of soil physical and chemical conditions on grapevine nutritional status // Acta Horticulturae. 1995. № 383. C. 299–312.
108. Borisenko M. N., Berezovskaya S. P. Irrigation of Crimean vineyards as a strategic element to obtain the grapes of high quality // Fruit growing and viticulture of South Russia. 2018. № 54 (6). C. 33–51.
109. Bortoluzzi E. C. [и др.]. Accumulation and Precipitation of Cu and Zn in a Centenarian Vineyard // Soil Science Society of America Journal. 2019. № 2 (83). C. 492–502.
110. Bougnom B. P. [и др.]. Soil microbial dynamics in organic (biodynamic) and integrated apple orchards // Organic Agriculture. 2012. № 1 (2). C. 1–11.
111. Bradl H. B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents // Journal of Colloid and Interface Science. 2004. № 1 (277). C. 1–18.
112. Bregaglio S., Donatelli M., Confalonieri R. Fungal infections of rice, wheat, and grape in Europe in 2030–2050 // Agronomy for Sustainable Development. 2013. № 4 (33). C. 767–776.
113. Brejda J. J. [и др.]. Identification of Regional Soil Quality Factors and Indicators II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie // Soil Science Society of America Journal. 2000. № 6 (64). C. 2125–2135.
114. Brook P. J. Epidemiology of grapevine anthracnose and downy mildew in an Auckland, New Zealand vineyard // New Zealand Journal of Crop and Horticultural

Science. 1992. № 1 (20). С. 37–49.

115. Brookes P. C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals // *Biology and Fertility of Soils*. 1995. № 4 (19). С. 269–279.

116. Brun L. A. [и др.]. Relationships between extractable copper, soil properties and copper uptake by wild plants in vineyard soils // *Environmental Pollution*. 1998. № 2–3 (102). С. 151–161.

117. Brun L. A. [и др.]. Evaluation of copper availability to plants in copper-contaminated vineyard soils // *Environmental Pollution*. 2001. № 2 (111). С. 293–302.

118. Brun L. A., Corff J. Le, Maillet J. Effects of elevated soil copper on phenology, growth and reproduction of five ruderal plant species // *Environmental Pollution*. 2003. № 3 (122). С. 361–368.

119. Brundtland G. H. *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Geneva, 1987.

120. Brunetto G. [и др.]. Copper accumulation in vineyard soils: Rhizosphere processes and agronomic practices to limit its toxicity // *Chemosphere*. 2016. (162). С. 293–307.

121. Cabras P. [и др.]. Interactions during fermentation between pesticides and oenological yeasts producing H₂S and SO₂ // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1995. № 2 (43). С. 370–373.

122. Cabré M. F., Quérol H., Nuñez M. Regional climate change scenarios applied to viticultural zoning in Mendoza, Argentina // *International Journal of Biometeorology*. 2016. № 9 (60). С. 1325–1340.

123. Carter M. R. [и др.]. Interpretation of microbial biomass measurements for soil quality assessment in humid temperate regions // *Canadian Journal of Soil Science*. 1999. № 4 (79). С. 507–520.

124. Caspari H. W., Neal S., Naylor A. Cover crop management in vineyards to enhance deficit irrigation in a humid climate // *Acta Horticulturae*. 1997. № 449. С. 313–320.

125. Cataldo E. [и др.]. Sustainable Viticulture: Effects of Soil Management in *Vitis vinifera* // *Agronomy*. 2020. № 12 (10). С. 1949.

126. Cataldo E., Fucile M., Mattii G. B. A Review: Soil Management, Sustainable Strategies and Approaches to Improve the Quality of Modern Viticulture // *Agronomy*.

2021. № 11 (11). С. 2359.

127. Chaignon V. [и др.]. Copper bioavailability and extractability as related to chemical properties of contaminated soils from a vine-growing area // *Environmental Pollution*. 2003. № 2 (123). С. 229–238.

128. Chaignon V., Quesnoit M., Hinsinger P. Copper availability and bioavailability are controlled by rhizosphere pH in rape grown in an acidic Cu-contaminated soil // *Environmental Pollution*. 2009. № 12 (157). С. 3363–3369.

129. Churka Blum S. [и др.]. Sulfur forms in organic substrates affecting S mineralization in soil // *Geoderma*. 2013. (200–201). С. 156–164.

130. Cornu J.-Y. Copper ecotoxicity in French vineyard soils // *IVES Technical Reviews, vine and wine*. 2023.

131. Coventry J. M. [и др.]. Reflective mulch to enhance berry quality in Ontario wine grapes // *Acta Horticulturae*. 2005. № 689. С. 95–102.

132. Czernecki B., Głogowski A., Nowosad J. Climate: An R Package to Access Free In-Situ Meteorological and Hydrological Datasets for Environmental Assessment // *Sustainability*. 2020. № 1 (12). С. 394.

133. Dad J. M., Abdollahi L. Changes in soil organic carbon, nitrogen and sulphur along a slope gradient in apple orchard soils of Kashmir Himalaya // *Journal of Mountain Science*. 2021. № 9 (18). С. 2377–2387.

134. Delas J D. A. Exemples des problèmes régionaux // *Annales Agronomiques*. 1970. (21). С. 603–615.

135. Deluisa A. [и др.]. Copper pollution in Italian vineyard soils // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1996. № 5–8 (27). С. 1537–1548.

136. Deluisa A. [и др.]. Copper pollution in Italian vineyard soils // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1996. № 5–8 (27). С. 1537–1548.

137. Dilly O. *Microbial Energetics in Soils* Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, С. 123–138.

138. Dobrovol'skaya T. G. [и др.]. The role of microorganisms in the ecological functions of soils // *Eurasian Soil Science*. 2015. № 9 (48). С. 959–967.

139. Doran J. W., Zeiss M. R. *Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic*

- Component of Soil Quality // Applied Soil Ecology. 2000. (15). C. 3–11.
140. Dordevic D. [и др.]. Comparison of Conventional and Organic Wines Produced in Kutnohorsk Region (Czech Republic) // Fermentation. 2023. № 9 (9). C. 832.
141. Dumitriu (Gabur) G.-D., Teodosiu C., Cotea V. V. Management of Pesticides from Vineyard to Wines: Focus on Wine Safety and Pesticides Removal by Emerging Technologies IntechOpen, 2022.
142. Duteau J., G. Seguin Caractères analytiques des Sols des grands Crus du Médoc / J, Duteau, G. Seguin, Académie d'Agriculture de France, 1973.
143. Escalona J. M.; Flexas J.; Bota J. Distribution of leaf photosynthesis and transpiration within grapevine canopies under different drought conditions // VITIS - Journal of Grapevine Research. 2003. (42 (2)). C. 57–64.
144. Escalona J. M., Flexas J., Medrano H. Stomatal and non-stomatal limitations of photosynthesis under water stress in field-grown grapevines // Functional Plant Biology. 2000. № 1 (27). C. 87.
145. Estrany J., Garcia C., Batalla R. J. Suspended sediment transport in a small Mediterranean agricultural catchment // Earth Surface Processes and Landforms. 2009. № 7 (34). C. 929–940.
146. Fageria N. K., Baligar V. C., Bailey B. A. Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2005. № 19–20 (36). C. 2733–2757.
147. Faucher M. [и др.]. Mediterranean vineyard soil seed bank characterization along a slope/disturbance gradient: Opportunities for land sharing // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2024. (361). C. 108821.
148. Federico Castellucci resolution OIV-VITI 423-2012 REV1. OIV guidelines for vitiviniculture zoning methodologies on a soil and climate level. Izmir, 2012.
149. Ferrise R. [и др.]. Climate Change and Grapevines: A Simulation Study for the Mediterranean Basin // Journal of Wine Economics. 2016. № 1 (11). C. 88–104.
150. Fischer M., Kassemeyer H. H. Fungi associated with Esca disease of grapevine in Germany // Vitis. 2003. (42). C. 109–116.
151. Flexas J. [и др.]. Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field

conditions: an evaluation of stomatal and mesophyll limitations // *Functional Plant Biology*. 2002. № 4 (29). С. 461.

152. Fließbach A. [и др.]. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2007. № 1–4 (118). С. 273–284.

153. Fließbach A., [и др.]. Soil organic matter quality and soil aggregate stability in organic and conventional soils // 13th International IFOAM Scientific Conference, IFOAM 2000.

154. Forster P. M. [и др.]. Evaluating adjusted forcing and model spread for historical and future scenarios in the CMIP5 generation of climate models // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. № 3 (118). С. 1139–1150.

155. Franco G. C. [и др.]. Soil Microbial Communities and Wine Terroir: Research Gaps and Data Needs // *Foods*. 2024. № 16 (13). С. 2475.

156. Freitas N. de O. [и др.]. Soil biochemistry and microbial activity in vineyards under conventional and organic management at Northeast Brazil // *Scientia Agricola*. 2011. № 2 (68). С. 223–229.

157. Gabechaya V. [и др.]. Exploring the Influence of Diverse Viticultural Systems on Soil Health Metrics in the Northern Black Sea Region // *Soil Systems*. 2023. № 3 (7). С. 73.

158. Gadd G. M. *Microbial Roles in Mineral Transformations and Metal Cycling in the Earth's Critical Zone* Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. С. 115–165.

159. Gadd G. M., Griffiths A. J. Influence of pH on toxicity and uptake of copper in *Aureobasidium pullulans* // *Transactions of the British Mycological Society*. 1980. № 1 (75). С. 91–96.

160. Gadd G. M., Sayer J. A. *Influence of Fungi on the Environmental Mobility of Metals and Metalloids* Washington, DC, USA: ASM Press, 2014. С. 237–256.

161. Galkina Y., Aleinikova N. Сравнительный анализ многолетней динамики развития основных болезней винограда в условиях Крыма // *Magarach. Vinogradstvo i Vinodelie*. 2019. № 3(109) part: 21. С. 244–249.

162. García-Ruiz J. M. [и др.]. Flood generation and sediment transport in experimental

- catchments affected by land use changes in the central Pyrenees // *Journal of Hydrology*. 2008. № 1–2 (356). С. 245–260.
163. Germanier R., Moricciani N. Perceiving and Adapting to Climate Change: Perspectives of Tuscan Wine-Producing Agritourism Owners // *Sustainability*. 2023. № 3 (15). С. 2100.
164. Gherghina С.-А. [и др.]. Influence of land use on microbiological activity of sandy soils Bucharest, Romania: In Proceedings of the ICAMS 2014—5th International Conference on Advanced Materials and Systems, 2014.С. 427–432.
165. Giffard В. [и др.]. Vineyard Management and Its Impacts on Soil Biodiversity, Functions, and Ecosystem Services // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2022. (10).
166. Gilbert J. A., Lelie D. van der, Zorraonaindia I. Microbial terroir for wine grapes // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. № 1 (111). С. 5–6.
167. Girotto E. [и др.]. Copper availability assessment of Cu-contaminated vineyard soils using black oat cultivation and chemical extractants // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2014. № 12 (186). С. 9051–9063.
168. Gobbi A. [и др.]. A global microbiome survey of vineyard soils highlights the microbial dimension of viticultural terroirs // *Communications Biology*. 2022. № 1 (5). С. 241.
169. Golf-Guillou I.; Le, Marsault J.; Riou C. Impacts de l'enherbement sur le fonctionnement de la vigne, la composition des mouûts, les dure'es de fermentation et la qualite' des vins // *Progre's Agric. Vitic*. 2000. (117). С. 103–110.
170. Golge O., Kabak B. Pesticide Residues in Table Grapes and Exposure Assessment // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2018. № 7 (66). С. 1701–1713.
171. Gómez-Armesto A. [и др.]. Copper content and distribution in vineyard soils from Betanzos (A Coruña, Spain) // *Spanish Journal of Soil Science*. 2015. (5).
172. Gorbunov R. V. [и др.]. Change of air temperature in Crimea // *Socialno-ecologicheskie technologii*. 2020. № 3 (10). С. 370–383.
173. Gräber I. [и др.]. Accumulation of Copper and Zinc in Danish Agricultural Soils in Intensive Pig Production Areas // *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*. 2005. № 2 (105). С. 15–22.

174. Gregorich E. G. [и др.]. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils // *Canadian Journal of Soil Science*. 1994. № 4 (74). С. 367–385.
175. Gregorich L. J., Acton D. F. The health of our soils: toward sustainable agriculture in Canada / L. J. Gregorich, D. F. Acton, [Ottawa]: Agriculture and Agri-Food Canada, 1995.
176. Gregory V. Jones Climate Change: Observations, Projections, and General Implications for Viticulture and Wine Production // 2007. С. 17.
177. Grimalt S., Dehouck P. Review of analytical methods for the determination of pesticide residues in grapes // *Journal of Chromatography A*. 2016. (1433). С. 1–23.
178. Gristina L., Novara A., Minacapilli M. Rethinking vineyard ground management to counter soil tillage erosion // *Soil and Tillage Research*. 2022. (217). С. 105275.
179. Guerra B., Steenwerth K. Influence of Floor Management Technique on Grapevine Growth, Disease Pressure, and Juice and Wine Composition: A Review // *American Journal of Enology and Viticulture*. 2012. № 2 (63). С. 149–164.
180. Gulick S. H.; [и др.]. Cover-crop-enhanced water infiltration of a slowly permeable fine sandy loam // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 1994. (58). С. 1539–1546.
181. Gupta A. [и др.]. Linking Soil Microbial Diversity to Modern Agriculture Practices: A Review // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. № 5 (19). С. 3141.
182. Ha Nhung P. T., Viet N. Q. Assessing the Impact of Erosion and Farming Practices on the Spatial Distribution of Topsoil Characteristics in a Sloping Vineyard Using an Open-source QGIS Software // *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*. 2023. № 4 (39).
183. Hannah L. [и др.]. Climate change, wine, and conservation // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013. № 17 (110). С. 6907–6912.
184. Harter R. D. Adsorption of Copper and Lead by Ap and B2 Horizons of Several Northeastern United States Soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1979. № 4 (43). С. 679–683.

185. Hewitt W. B. Berry rots and raisin molds // *Compendium of grape diseases*. 1988. C. 26–28.
186. Hinckley E.-L. S., Fendorf S., Matson P. Short-term fates of high sulfur inputs in Northern California vineyard soils // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2011. № 1 (89). C. 135–142.
187. Hinckley E.-L. S., Matson P. A. Transformations, transport, and potential unintended consequences of high sulfur inputs to Napa Valley vineyards // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011. № 34 (108). C. 14005–14010.
188. Hira A., Swartz T. What makes Napa Napa? The roots of success in the wine industry // *Wine Economics and Policy*. 2014. № 1 (3). C. 37–53.
189. Hornby D., Bateman G. L. Potential use of plant root pathogens as bioindicators of soil health Wallingford: 1997. C. 179–200.
190. Hosseinabad A., Khadivi A. The Effect of Microelements on Qualitative and Quantitative Characteristics of *Vitis vinifera* cv. Thompson Seedless // *Erwerbs-Obstbau*. 2019. № S1 (61). C. 41–46.
191. Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // *Chemical Geology*. 2008. № 3–4 (253). C. 205–221.
192. Huber S., [и др.]. Proposal for a European soil monitoring and assessment framework. Copenhagen, Denmark, 2001.
193. Hummes A. P. [и др.]. Transfer of Copper and Zinc from Soil to Grapevine-Derived Products in Young and Centenarian Vineyards // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2019. № 7 (230). C. 150.
194. Huyssteen L. van. The effect of soil management and fertilization on grape composition and wine quality with special reference to South African conditions // *In Proceedings of the 7th Australian Wine Industry Conference*. 1989. C. 16–25.
195. Imfeld G. [и др.]. Soil Management Drives Copper and Zinc Export in Runoff from Vineyard Plots // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2023. № 6 (234). C. 357.
196. Jacometti M. A., Wratten S. D., Walter M. Understorey management increases grape quality, yield and resistance to *Botrytis cinerea* // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2007. № 3 (122). C. 349–356.

197. Jenkinson D. S. The Determination of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Soil. // *Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems*. 1988. С. 368–386.
198. Jermini M. Epidemiology and Control of Grape Black Rot in Southern Switzerland // *Plant Disease*. 1996. № 3 (80). С. 322.
199. Jones G. V. [и др.]. Climate Change and Global Wine Quality // *Climatic Change*. 2005. № 3 (73). С. 319–343.
200. Jones G. V., Alves F. Impact of climate change on wine production: a global overview and regional assessment in the Douro Valley of Portugal // *International Journal of Global Warming*. 2012. № 3/4 (4). С. 383.
201. Judit G.; [и др.]. Comparison of three soil management methods in the Tokaj wine region // *Mitteilungen Klosterneuburg*. 2011. (61(4)). С. 187–195.
202. Kabala C., Singh B. R. Fractionation and Mobility of Copper, Lead, and Zinc in Soil Profiles in the Vicinity of a Copper Smelter // *Journal of Environmental Quality*. 2001. № 2 (30). С. 485–492.
203. Karapetsas N. [и др.]. Delineating Natural Terroir Units in Wine Regions Using Geoinformatics // *Agriculture*. 2023. № 3 (13). С. 629.
204. Karimi B. [и др.]. Ecotoxicity of copper input and accumulation for soil biodiversity in vineyards // *Environmental Chemistry Letters*. 2021. № 3 (19). С. 2013–2030.
205. Karlen D. L., [и др.]. Soil Quality: A Concept, Definition and Framework for Evaluation // *Soil Science Society of America Journal*. 1997. (61). С. 4–10.
206. Kassambara A., Mundt F. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses // *CRAN: Contributed Packages*. 2016.
207. Kassemeyer H.-H., Berkelmann-Löhnertz B. *Fungi of Grapes Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*, С. 61–87.
208. Kaufman D.D., Williams L.E. Influence of soil reaction and mineral fertilization on numbers and types of fungi antagonistic to four soil-borne plant pathogens / Kaufman D.D., Williams L.E., 1965. 570 с.
209. Kelepertzis E. [и др.]. Copper accumulation in vineyards soils from Nemea, Greece // *Bulletin of the Geological Society of Greece*. 2017. № 4 (50). С. 2192.
210. Kennedy A. C., Smith K. L. Soil microbial diversity and the sustainability of

- agricultural soils // *Plant and Soil*. 1995. № 1 (170). С. 75–86.
211. Koch A. [и др.]. Soil Security: Solving the Global Soil Crisis // *Global Policy*. 2013. № 4 (4). С. 434–441.
212. Kolesnikov S. I. [и др.]. The Limits of Resistance of Soils and Ecosystems of Crimea to Heavy Metals Pollution // *Ecology and Industry of Russia*. 2019. № 10 (23). С. 56–60.
213. Komárek M. [и др.]. Retention of copper originating from different fungicides in contrasting soil types // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. № 2–3 (166). С. 1395–1402.
214. Komárek M. [и др.]. Contamination of vineyard soils with fungicides: A review of environmental and toxicological aspects // *Environment International*. 2010. № 1 (36). С. 138–151.
215. Kopittke P. M., Blamey F. P. C., Menzies N. W. Toxicities of soluble Al, Cu, and La include ruptures to rhizodermal and root cortical cells of cowpea // *Plant and Soil*. 2008. № 1–2 (303). С. 217–227.
216. Kovalevskaya N. P. [и др.]. Biological activity of sod-podzolic soils in the longterm experiment with different agrotechnical methods // *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2019. № 3. С. 38–41.
217. Krysanova V., [и др.]. Practices and Lessons Learned in Coping with Climatic Hazards at the River-Basin Scale: Floods and Droughts // *Ecology and Society*. 2008. (13, вып. 2). С. 27.
218. Lai H.-Y., Juang K.-W., Chen B.-C. Copper concentrations in grapevines and vineyard soils in central Taiwan // *Soil Science and Plant Nutrition*. 2010. № 4 (56). С. 601–606.
219. Lanyon D. M., Cass A., Hansen D. The effect of soil properties on vine performance / D. M., Lanyon, A., Cass, D. Hansen, CSIRO Land Water, 2004. 54 с.
220. Lê S., Josse J., Husson F. FactoMineR : An R Package for Multivariate Analysis // *Journal of Statistical Software*. 2008. № 1 (25).
221. Leeuwen C. van [и др.]. Influence of Climate, Soil, and Cultivar on Terroir // *American Journal of Enology and Viticulture*. 2004. № 3 (55). С. 207–217.
222. Leeuwen C. van Terroir: the effect of the physical environment on vine growth,

- grape ripening and wine sensory attributes Elsevier, 2010.С. 273–315.
223. Leeuwen C. van [и др.]. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050 // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2013. № 33 (110).
224. Leeuwen C. Van [и др.]. Recent advancements in understanding the terroir effect on aromas in grapes and wines // OENO One. 2020. № 4 (54).
225. Leeuwen C. Van, Seguin G. The concept of terroir in viticulture // Journal of Wine Research. 2006. № 1 (17). С. 1–10.
226. Lehmann J. [и др.]. The concept and future prospects of soil health // Nature Reviews Earth & Environment. 2020. № 10 (1). С. 544–553.
227. Li J. [и др.]. Field-based evidence for consistent responses of bacterial communities to copper contamination in two contrasting agricultural soils // Frontiers in Microbiology. 2015. (6).
228. Liao J., Liang Y., Huang D. Organic Farming Improves Soil Microbial Abundance and Diversity under Greenhouse Condition: A Case Study in Shanghai (Eastern China) // Sustainability. 2018. № 10 (10). С. 3825.
229. Likar M. [и др.]. Importance of soil and vineyard management in the determination of grapevine mineral composition // Science of The Total Environment. 2015. (505). С. 724–731.
230. Lisetskii Fedor Ампелопедологические особенности географических районов виноградарства Крыма // Почвоведение. 2022. С. 1540–1556.
231. Lisowska A. [и др.]. Changes in Soil Sulfate Sulfur Content as an Effect of Fertilizer Granules Containing Elemental Sulfur, Halloysite and Phosphate Rock // Agronomy. 2023. № 5 (13). С. 1410.
232. Lisso L., Lindsay J. B., Berg A. Evaluating the Topographic Factors for Land Suitability Mapping of Specialty Crops in Southern Ontario // Agronomy. 2024. № 2 (14). С. 319.
233. Litskas V. [и др.]. Sustainable Viticulture: First Determination of the Environmental Footprint of Grapes // Sustainability. 2020. № 21 (12). С. 8812.
234. Liu D. [и др.]. From the Vineyard to the Winery: How Microbial Ecology Drives

- Regional Distinctiveness of Wine // *Frontiers in Microbiology*. 2019. (10).
235. Lu C.; Zhang J. Effects of water stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and photoinhibition in wheat plants // *Plant Physiol*. 1998. (25). С. 883–892.
236. Mackie K. A. [и др.]. Long-term copper application in an organic vineyard modifies spatial distribution of soil micro-organisms // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. (65). С. 245–253.
237. Mackie K. A., Müller T., Kandeler E. Remediation of copper in vineyards – A mini review // *Environmental Pollution*. 2012. (167). С. 16–26.
238. Mäder P. [и др.]. Arbuscular mycorrhizae in a long-term field trial comparing low-input (organic, biological) and high-input (conventional) farming systems in a crop rotation // *Biology and Fertility of Soils*. 2000. № 2 (31). С. 150–156.
239. Maeder P. [и др.]. Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming // *Science*. 2002. № 5573 (296). С. 1694–1697.
240. Maetens W. [и др.]. Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean // *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 2012. № 5 (36). С. 599–653.
241. Maigre D.; Aerny J. Enherbement permanent et fumure azote'e sur cv. 'Gamay' dans le Valais Central // *Revue Suisse. Vitic. Arboric. Hortic*. 2001. (33). С. 343–349.
242. Malinovic-Milicevic S. [и др.]. Extreme precipitation indices in Vojvodina region (Serbia) // *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic SASA*. 2018. № 1 (68). С. 1–15.
243. Manaljav S. [и др.]. The Impact of Soil Erosion on the Spatial Distribution of Soil Characteristics and Potentially Toxic Element Contents in a Sloping Vineyard in Tállya, Ne Hungary // *Journal of Environmental Geography*. 2021. № 1–2 (14). С. 47–57.
244. Mandl K. [и др.]. Effects of Glyphosate-, Glufosinate- and Flazasulfuron-Based Herbicides on Soil Microorganisms in a Vineyard // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2018. № 5 (101). С. 562–569.
245. Marangoni B., [и др.]. Effects of vineyard soil management and fertilization on grape diseases and wine quality // *IOBC WPRS BULLETIN*. 2001. (24 (5)). С. 353–358.
246. Marco-Lajara B. [и др.]. Wine clusters and Protected Designations of Origin (PDOs)

- in Spain: an exploratory analysis // *Journal of Wine Research*. 2022. № 3 (33). С. 146–167.
247. Marini E. [и др.]. Copper toxicity on *Eisenia fetida* in a vineyard soil: a combined study with standard tests, genotoxicity assessment and gut metagenomic analysis // *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. № 9 (31). С. 13141–13154.
248. Martens R. Estimation of microbial biomass in soil by the respiration method: Importance of soil pH and flushing methods for the measurement of respired CO₂ // *Soil Biol. Biochem.* 1987. (19). С. 77–81.
249. Masotti P. [и др.]. Environmental Impacts of Organic and Biodynamic Wine Produced in Northeast Italy // *Sustainability*. 2022. № 10 (14). С. 6281.
250. Matese A. [и др.]. Spatial variability of meteorological conditions at different scales in viticulture // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2014. (189–190). С. 159–167.
241. Matthews M. A.; Kriedemann P. E. Water deficit, yield, and berry size as factors for composition and sensory attributes of red wine // *Australian Society of Oenology and Viticulture, Mildura Arts Centre*. 2006. С. 46–54.
252. McBratney A. [и др.]. Frameworks for digital soil assessment CRC Press, 2012. С. 9–14.
253. Mendez-Costabel M. P. [и др.]. Effect of winter rainfall on yield components and fruit green aromas of *Vitis vinifera* L. cv. Merlot in California // *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2014. № 1 (20). С. 100–110.
254. Merrington G. [и др.]. *Agricultural Pollution* / G. Merrington, D. L. W. Nfa, R. Parkinson, M. Redman, L. Winder, CRC Press, 2002.
255. Merrington G., Rogers S. L., Zwieten L. Van The potential impact of long-term copper fungicide usage on soil microbial biomass and microbial activity in an avocado orchard // *Soil Research*. 2002. № 5 (40). С. 749.
256. Miao S. [и др.]. Soil bacterial community responses to land-use change in Mollisol of Northeast China // *Ecological Engineering*. 2022. (184). С. 106771.
257. Miguéns T. [и др.]. Biochemical properties of vineyard soils in Galicia, Spain // *Science of The Total Environment*. 2007. № 1–2 (378). С. 218–222.
258. Milićević T. [и др.]. Environmental pollution influence to soil–plant–air system in

- organic vineyard: bioavailability, environmental, and health risk assessment // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. № 3 (28). С. 3361–3374.
259. Mirás-Avalos J., Araujo E. Optimization of Vineyard Water Management: Challenges, Strategies, and Perspectives // *Water*. 2021. № 6 (13). С. 746.
260. Mocali S. [и др.]. Microbial Functional Diversity in Vineyard Soils: Sulfur Metabolism and Links with Grapevine Plants and Wine Quality // *Frontiers in Environmental Science*. 2020. (8).
261. Monteiro A., Lopes C. M. Influence of cover crop on water use and performance of vineyard in Mediterranean Portugal // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2007. № 4 (121). С. 336–342.
262. Montemurro F. [и др.]. Organic Fertilization, Green Manure, and Vetch Mulch to Improve Organic Zucchini Yield and Quality // *HortScience*. 2013. № 8 (48). С. 1027–1033.
263. Moolenaar S. W., Beltrami P. Heavy Metal Balances of an Italian Soil as Affected by Sewage Sludge and Bordeaux Mixture Applications // *Journal of Environmental Quality*. 1998. № 4 (27). С. 828–835.
264. Morgan R. K., Taylor E. Copper Accumulation in Vineyard Soils in New Zealand // *Environmental Sciences*. 2004. № 2 (1). С. 139–167.
265. Morlat R.; Jacquet A.; Asselin C. L'enherbement permanent controle des sols viticoles: Principaux resultats obtenus en Anjou // In Proceedings of the 7e´me Colloque Viticole et Oenologique. 1993. С. 89–95.
266. Moutinho-Pereira J. M. [и др.]. Leaf Gas Exchange and Water Relations of Grapevines Grown in Three Different Conditions // *Photosynthetica*. 2004. № 1 (42). С. 81–86.
267. Müller-Nedebock D., Chaplot V. Soil carbon losses by sheet erosion: a potentially critical contribution to the global carbon cycle // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2015. № 13 (40). С. 1803–1813.
268. Murugan R. [и др.]. Changes in Soil Microbial Biomass and Residual Indices as Ecological Indicators of Land Use Change in Temperate Permanent Grassland // *Microbial Ecology*. 2014. № 4 (67). С. 907–918.

269. Muscas E. [и др.]. Effects of vineyard floor cover crops on grapevine vigor, yield, and fruit quality, and the development of the vine mealybug under a Mediterranean climate // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2017. (237). С. 203–212.
270. Nagajyoti P. C., Lee K. D., Sreekanth T. V. M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // *Environmental Chemistry Letters*. 2010. № 3 (8). С. 199–216.
271. Navarro S [и др.]. Evolution of residual levels of six pesticides during elaboration of red wines. Effect of winemaking procedures in their disappearance // 1999. Т. 47. С. 264–270.
272. Nazralla J. B. Influencia del manejo del suelo y las coberturas vegetales en el microclima de la canopia de la vid, la composición de la uva y el vino // *Agrar*. 2008. (40). С. 85–104.
273. Nielsen M.N., Winding A. Microorganisms as indicators of soil health / Nielsen M.N., Winding A., National environmental research institute, 2002. 84 с.
274. Nogueira M. A. [и др.]. Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural, reforested and agricultural land use in southern Brazil // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2006. № 1–4 (115). С. 237–247.
275. Nunes I. [и др.]. Coping with copper: legacy effect of copper on potential activity of soil bacteria following a century of exposure // *FEMS Microbiology Ecology*. 2016. № 11 (92). С. fiw175.
276. Ochmian I., Malinowski R. Effect of Multi-Year Protection of Grapevines with Copper Pesticides on the Content of Heavy Metals in Soil, Leaves, and Fruit // *Agronomy*. 2024. № 8 (14). С. 1677.
277. Okur N. [и др.]. Microbial biomass and enzyme activity in vineyard soils under organic and conventional farming systems // *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2009.
278. Omer E. [и др.]. Farming Practice Variability and Its Implications for Soil Health in Agriculture: A Review // *Agriculture*. 2024. № 12 (14). С. 2114.
279. Pankhurst C. [и др.]. Evaluation of soil biological properties as potential bioindicators of soil health // *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 1995. № 7

(35). C. 1015.

280. Pankhurst C.E., Doube B., Gupta V.V.S.R. Biological Indicators of Soil Health CAB International, 1997.C. 419–435.

281. Pardini A., [и др.]. Cover crop species and their management in vineyards and olive groves // *Advances in Horticultural Science*. 2002. (16(3/4)). C. 225–234.

282. Paull J. Attending the First Organic Agriculture Course: Rudolf Steiner's Agriculture Course at Koberwitz, 1924. // *European Journal of Social Sciences*. 2011. (21(1)). C. 64–70.

283. Pazzirota T. [и др.]. Processing factor for a selected group of pesticides in a wine-making process: distribution of pesticides during grape processing // *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2013. № 10 (30). C. 1752–1760.

284. Peterlunger E., [и др.]. Stress idrico della vite e qualità dell'uva e del vino // *Notiziario ERSA*. 2007. (3).

285. Petersen S. O., [и др.]. A comparison of phospholipid and chloroform fumigation analyses for biomass in soil - potentials and limitations // *FEMS Microbiology Ecology*. 1991. (85). C. 257–268.

286. Pham N. T. H. [и др.]. Accumulation patterns and health risk assessment of potentially toxic elements in the topsoil of two sloping vineyards (Tokaj-Hegyalja, Hungary) // *Journal of Soils and Sediments*. 2022. № 10 (22). C. 2671–2689.

287. Pickering G. J.; Wheeler S. The effects of soil management techniques on grape and wine quality Helsinki, Finland: WFL Publisher, 2006.C. 195–208.

288. Pietrzak U., McPhail D. C. Copper accumulation, distribution and fractionation in vineyard soils of Victoria, Australia // *Geoderma*. 2004. № 2–4 (122). C. 151–166.

289. Pose-Juan E. [и др.]. Pesticide residues in vineyard soils from Spain: Spatial and temporal distributions // *Science of The Total Environment*. 2015. (514). C. 351–358.

290. Pou A. [и др.]. Cover cropping in Vitis vinifera L. cv. Manto Negro vineyards under Mediterranean conditions: effects on plant vigour, yield and grape quality // *OENO One*. 2011. № 4 (45). C. 223.

291. Powell K. S. A Holistic Approach to Future Management of Grapevine Phylloxera Dordrecht: Springer Netherlands, 2012.C. 219–251.

292. Probst B., Schüler C., Joergensen R. G. Vineyard soils under organic and conventional management—microbial biomass and activity indices and their relation to soil chemical properties // *Biology and Fertility of Soils*. 2008. № 3 (44). С. 443–450.
293. Prosdocimi M., Cerdà A., Tarolli P. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review // *CATENA*. 2016. (141). С. 1–21.
294. Prosdocimi M., Cerdà A., Tarolli P. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review // *CATENA*. 2016. (141). С. 1–21.
295. Reeve A. L. [и др.]. Vineyard Floor Management and Cluster Thinning Inconsistently Affect ‘Pinot noir’ Crop Load, Berry Composition, and Wine Quality // *HortScience*. 2018. № 3 (53). С. 318–328.
296. Renouf, V., Gindreau, E., Claisse, O., & Lonvaud-Funel, A. Understanding the microbial ecosystem on the grape berry surface through numeration and identification of yeast and bacteria // *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2005. № 3 (11). С. 316–327.
297. Roberts P. D. [и др.]. Evaluation of spray programs containing famoxadone plus cymoxanil, acibenzolar-S-methyl, and *Bacillus subtilis* compared to copper sprays for management of bacterial spot on tomato // *Crop Protection*. 2008. № 12 (27). С. 1519–1526.
298. Rodrigo Comino J. [и др.]. Understanding soil erosion processes in Mediterranean sloping vineyards (Montes de Málaga, Spain) // *Geoderma*. 2017. (296). С. 47–59.
299. Rodrigo-Comino J. Five decades of soil erosion research in “terroir”. The State-of-the-Art // *Earth-Science Reviews*. 2018. (179). С. 436–447.
300. Romanenko E. A. [и др.]. Mobile forms of metals in soils in the Nadym-Pur interfluve (Western Siberia)// *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2020. № 2. С. 136–145.
301. Romano P. [и др.]. Role of Yeasts on the Sensory Component of Wines // *Foods*. 2022. № 13 (11). С. 1921.
302. Romero-Freire A. [и др.]. Is soil basal respiration a good indicator of soil pollution? // *Geoderma*. 2016. (263). С. 132–139.
303. Romi M. [и др.]. Copper Accumulation in Vineyard Soils: Distribution,

Fractionation and Bioavailability Assessment InTech, 2014.

304. Rosaria Provenzano M. [и др.]. Total Sulphur Contents over a Three-Year Period in Different Organic Vineyards of Apulia Region, South-Eastern Italy // Italian Journal of Agronomy. 2011. № 3 (6). С. е27.

305. Roškarič M. [и др.]. Development of a “0-Pesticide Residue” Grape and Wine Production System for Standard Disease-Susceptible Varieties // Agronomy. 2023. № 2 (13). С. 586.

306. Ruyters S. [и др.]. Copper toxicity in soils under established vineyards in Europe: A survey // Science of The Total Environment. 2013. (443). С. 470–477.

307. Ruyters S. [и др.]. Copper toxicity in soils under established vineyards in Europe: A survey // Science of The Total Environment. 2013. (443). С. 470–477.

308. Rybalko E. A., Baranova N. V. Agroecological regionalization of the Crimean peninsula for grapes cultivation // Monitoring systems of environment. 2018. № 1. С. 90–94.

309. Saccá M. L. [и др.]. Ecosystem Services Provided by Soil Microorganisms Cham: Springer International Publishing, 2017.С. 9–24.

310. Sadras V. O., [и др.]. Field Crops 2003. (Res. 84, 241).

311. Saladin G., Magné C., Clément C. Stress reactions in *Vitis vinifera* L. following soil application of the herbicide flumioxazin // Chemosphere. 2003. № 3 (53). С. 199–206.

312. Saparov G. [и др.]. Assessing Heavy Metal Contamination for Soil Reclamation: Implications for Sustainable Urban Development // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. 2024. № 6 (19). С. 2197–2204.

313. Schouten A. J., [и др.]. Development of a biological indicator for soil quality // SETAC Globe. 2000. С. 30–32.

314. Schroth A. W. [и др.]. Sulfur species behavior in soil organic matter during decomposition // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2007. № G4 (112).

315. Schultz H. R., Jones G. V. Climate Induced Historic and Future Changes in Viticulture // Journal of Wine Research. 2010. № 2–3 (21). С. 137–145.

316. Seralini GE, Douzelet J, Halley JC Sulfur in Wines and Vineyards: Taste and Comparative Toxicity to Pesticides // Food & Nutrition Journal. 2021. (6).

317. Sereni L., Guenet B., Lamy I. Does Copper Contamination Affect Soil CO₂ Emissions? A Literature Review // *Frontiers in Environmental Science*. 2021. (9).
318. Sharley D. J., Hoffmann A. A., Thomson L. J. The effects of soil tillage on beneficial invertebrates within the vineyard // *Agricultural and Forest Entomology*. 2008. № 3 (10). C. 233–243.
319. Sharma P. [и др.]. The Role of Cover Crops towards Sustainable Soil Health and Agriculture—A Review Paper // *American Journal of Plant Sciences*. 2018. № 09 (09). C. 1935–1951.
320. Shellie K. C. Vine and Berry Response of Merlot (*Vitis vinifera* L.) to Differential Water Stress // *American Journal of Enology and Viticulture*. 2006. № 4 (57). C. 514–518.
321. Shibayama K., Kondo K., Otaguro M. Yeast Diversity in Wine Grapes from Japanese Vineyards and Enological Traits of Indigenous *Saccharomyces cerevisiae* Strains // *Microorganisms*. 2024. № 9 (12). C. 1769.
322. Sindireva A. V., Kotchenko S. G., Elizarov O. I. Environmental assessment of the copper content in the soil cover in the South of the Tyumen Region // *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2022. № 1 (57). C. 82–90.
323. Skura E. [и др.]. Comparative characteristics of plant protection against copper and sulphur influence // *Scientific Horizons*. 2023. № 1 (26).
324. Smith J. L., Paul E. A. The Significance of Soil Microbial Biomass Estimations // *Bollag, J. and Stotzky, J.D.G., Eds., SOIL Biochemistry*. 1990. C. 357–396.
325. Sojka R. E., Upchurch D. R. Reservations Regarding the Soil Quality Concept // *Soil Science Society of America Journal*. 1999. № 5 (63). C. 1039–1054.
326. Sparling G. P. [и др.]. Estimation of soil microbial c by a fumigation-extraction method: use on soils of high organic matter content, and a reassessment of the kec-factor // *Soil Biology and Biochemistry*. 1990. № 3 (22). C. 301–307.
327. Stafford J. Native grasses in the vineyards. A resume of native grass establishment. 2008.
328. Tamm L. [и др.]. Use of Copper-Based Fungicides in Organic Agriculture in Twelve European Countries // *Agronomy*. 2022. № 3 (12). C. 673.

329. Thomson L. J., Hoffmann A. A. Effects of ground cover (straw and compost) on the abundance of natural enemies and soil macro invertebrates in vineyards // *Agricultural and Forest Entomology*. 2007. № 3 (9). С. 173–179.
330. Tiecher T. L. [и др.]. Forms and accumulation of copper and zinc in a sandy typic hapludalf soil after long-term application of pig slurry and deep litter // *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2013. № 3 (37). С. 812–824.
331. Tiecher T. L. [и др.]. Tolerance and translocation of heavy metals in young grapevine (*Vitis vinifera*) grown in sandy acidic soil with interaction of high doses of copper and zinc // *Scientia Horticulturae*. 2017. (222). С. 203–212.
332. Tomasi D. [и др.]. Influence of Soil Chemical Features on Aromatic Profile of *V. vinifera* cv. Corvina Grapes and Wines: A Study-Case in Valpolicella Area (Italy) in a Calcareous and Non-Calcareous Soil // *Agriculture*. 2022. № 12 (12). С. 1980.
333. Tonello M. S. [и др.]. Copper transfer from vineyard watershed: mineralogy and copper forms // *Journal of Sedimentary Environments*. 2023. № 3 (8). С. 283–296.
334. Tonietto J. *Macroclimats Viticoles Mondiaux et l’Influence du Mésoclimat sur la Typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France: Méthodologie de Caractérisation* / J. Tonietto, Agronomique-e изд., Montpellier: 1999. 233 с.
335. Tonietto J., Carbonneau A. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2004. № 1–2 (124). С. 81–97.
336. Trivellone V. [и др.]. Management pressure drives leafhopper communities in vineyards in Southern Switzerland // *Insect Conservation and Diversity*. 2012. № 1 (5). С. 75–85.
337. Turco R. F., Kennedy A. C., Jawson M. D. Microbial indicators of soil quality. In: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* // Soil Science Society of America. 1994. С. 73–90.
338. Tyler LD, McBride MB. Mobility ... cadmium, copper, nickel, and zinc in organic and mineral soil columns. *Soil Science* 1982; 134: 198-205.
339. Uyan M., Janus J., Ertunç E. Land Use Suitability Model for Grapevine (*Vitis vinifera* L.) Cultivation Using the Best Worst Method: A Case Study from

- Ankara/Türkiye // Agriculture. 2023. № 9 (13). С. 1722.
340. Vavoulidou E. [и др.]. Copper Content in Agricultural Soils Related to Cropping Systems in Different Regions of Greece // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2005. № 4–6 (36). С. 759–773.
341. Vázquez-Blanco R. [и др.]. Risk Assessment and Limiting Soil Factors for Vine Production—Cu and Zn Contents in Vineyard Soils in Galicia (Rías Baixas D.O.) // Agronomy. 2023. № 2 (13). С. 309.
342. Vig K. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review // Advances in Environmental Research. 2003. № 1 (8). С. 121–135.
343. Visconti F., López R., Olego M. Á. The Health of Vineyard Soils: Towards a Sustainable Viticulture // Horticulturae. 2024. № 2 (10). С. 154.
344. Volkova M. [и др.]. Organic viticulture as an important aspect of conserving biodiversity in Crimean agrocenoses // E3S Web of Conferences. 2020. (175). С. 09004.
345. Vrščaj B. [и др.]. Pesticide Residues and Heavy Metals in Vineyard Soils of the Karst and Istria // Land. 2022. № 12 (11). С. 2332.
346. Vystavna Y. [и др.]. Trace metals in wine and vineyard environment in southern Ukraine // Food Chemistry. 2014. (146). С. 339–344.
347. Walsh LM, Erhardt WH, Seibel HD Copper toxicity in snap beans (*Phaseolus vulgaris* L) // Journal of Environmental Quality. 1972. (1). С. 197–200.
348. Wang Q.-Y. [и др.]. Distribution and availability of fungicide-derived copper in soil aggregates // Journal of Soils and Sediments. 2020. № 2 (20). С. 816–823.
349. Wang Y. [и др.]. The influence of soil heavy metals pollution on soil microbial biomass, enzyme activity, and community composition near a copper smelter // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2007. № 1 (67). С. 75–81.
350. Wei X. [и др.]. Enhancing Soil Health and Plant Growth through Microbial Fertilizers: Mechanisms, Benefits, and Sustainable Agricultural Practices // Agronomy. 2024. № 3 (14). С. 609.
351. Whalen P. ‘Insofar as the Ruby Wine Seduces Them’: Cultural Strategies for Selling Wine in Inter-war Burgundy // Contemporary European History. 2009. № 1 (18). С. 67–

98.

352. Wheeler S. J.; Pickering G. J. Optimizing grape quality through soil management practices // *Journal of Food Agriculture and Environment*. 2003. (1 (2)). С. 190–197.

353. White R. E. *Understanding Vineyard Soils* / R. E. White, Oxford University Press, 2015.

354. Widmer R. [и др.]. Global perspectives on e-waste // *Environmental Impact Assessment Review*. 2005. № 5 (25). С. 436–458.

355. Wightwick A. M. [и др.]. Copper Fungicide Residues in Australian Vineyard Soils // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2008. № 7 (56). С. 2457–2464.

356. Williams L. E., Matthews M. A Grapevine Madison: 1990.С. 1019–1055.

357. Williams L. E.; Matthews M. A. In *Irrigation of Agricultural Crop Madison: American Society of Agronomy*, 1990.С. 1019–1055.

358. Xianghua Xu [и др.]. Ecological effects of single and combined pollution of cadmium and phenanthrene on soil microorganisms *IEEE*, 2011.С. 247–250.

359. Xu W., Jin Y., Zeng G. Introduction of heavy metals contamination in the water and soil: a review on source, toxicity and remediation methods // *Green Chemistry Letters and Reviews*. 2024. № 1 (17).

360. Zamulina I. V. [и др.]. Soil organic matter and biological activity under long-term contamination with copper // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. № 2 (44). С. 387–398.

361. Zapotoczny S. [и др.]. Accumulation of copper by *Acremonium pinkertoniae*, a fungus isolated from industrial wastes // *Microbiological Research*. 2007. № 3 (162). С. 219–228.

362. Zehetner F. [и др.]. Soil organic carbon and microbial communities respond to vineyard management // *Soil Use and Management*. 2015. № 4 (31). С. 528–533.

363. Zelles L. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil: a review // *Biology and Fertility of Soils*. 1999. № 2 (29). С. 111–129.

364. Zhang X.-K. [и др.]. The Role of Indigenous Yeasts in Shaping the Chemical and Sensory Profiles of Wine: Effects of Different Strains and Varieties // *Molecules*. 2024.

№ 17 (29). С. 4279.

365. Zibilske L. M. Carbon mineralization // *Methods of Soil Analysis. Part 2 Microbiological and Biochemical Properties*. Soil Science Society of America. 1994. С. 835–863.

366. R Core Team (2022) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. // <https://www.R-project.org>.

367. Концепция развития виноделия города федерального значения Севастополя // https://sevzakon.ru/assets/files/koncepciya_razvitiya_vinodeliya/koncepciya_rezyume.pdf.