

АГРОХИМИЯ  
И ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

УДК 631.48:911.6

АМПЕЛОПЕДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
ГЕОГРАФИЧЕСКИХ РАЙОНОВ ВИНОГРАДАРСТВА КРЫМА<sup>1</sup>

© 2022 г. Ф. Н. Лисецкий<sup>a, b, \*</sup>, Е. Я. Зеленская<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
ул. Победы, 85, Белгород, 308015 Россия

<sup>b</sup>Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008 Россия  
\*e-mail: liset@bsu.edu.ru

Поступила в редакцию 16.05.2022 г.

После доработки 07.07.2022 г.

Принята к публикации 08.07.2022 г.

Большое ландшафтное разнообразие территории Крымского п-ова, которое формируется за счет 20 агроклиматических районов и 17 генетических групп почв, способствует формированию местных терруаров для виноградарства, что может обеспечить создание широкого спектра продукции виноделия с органолептической индивидуальностью. Цель исследования состояла в сравнительном анализе физико-химических и биогеохимических особенностей региональных почв в трех исторических и пяти современных географических районах виноградарства. Для комплексного исследования почв под виноградниками использован почвенно-генетический и биогеохимический подход, что позволило установить для районов виноградарства уникальные комбинации почвенных параметров, которые в комплексе с местными экологическими условиями формируют ключевые компоненты для применения концепции терруара на региональном уровне. При попарном сопоставлении валового состава постагрогенных почв из трех районов античного виноградарства (Северо-Западный, Юго-Западный и предгорный Крым) установлено, что наибольшие различия между ними отмечаются по содержанию таких макроэлементов в оксидной форме, как CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, MnO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, а также микроэлементов (Sr, Rb, As). Сравнение почв под виноградниками показало, что ведущая роль географического фактора установлена как при их классификации по агрофизическим показателям, так и при сравнении содержания 18 химических элементов. Благоприятным биогеохимическим потенциалом обладают почвы Юго-Западного и предгорного Крыма, для которых установлено превышение в 1.5–2 раза по сравнению с другими районами содержания ряда эссенциальных элементов (Ca, P, K). При сравнительном анализе геохимических особенностей почв пяти основных районов виноградарства диагностическими элементами на Южном берегу Крыма выступают Sr, Co и Ba. На почвах под современными виноградниками выявлено повышенное содержание Cu, Cr, Ni, Pb, V. При увеличении площадей крымских виноградников возрастает значение ампелопедологического подхода для диагностики агропроизводственных групп почв, способных обеспечить получение винодельческой продукции яркой индивидуальности и формирование системы внутрирегиональных терруаров.

**Ключевые слова:** *haplic Chernozems, Cambisols, терруар, биогеохимия почв, физико-химические свойства почв*

**DOI:** 10.31857/S0032180X22600688

ВВЕДЕНИЕ

Площадь современных плодоносящих виноградников на Крымском п-ове составляет 20.1 тыс. га (25% от общей площади виноградников России) [20]. Перспектива увеличения объема производимой продукции (80 тыс. т винограда в год) затрудняется тем, что виноградники имеют возраст свыше 20 лет более чем на половине площадей. Для повышения конкурентоспособности необходимо более эффективно использовать земельные ре-

сурсы в традиционных районах виноградарства, что стимулируется принятым в 2019 г. правительством Российской Федерации законом, направленным на увеличение площадей виноградников и улучшение качества производимой продукции, которая будет обладать системой защиты по географическому признаку.

Понятие терруар (фр. terroir) в виноградарстве включает сочетание местного ландшафта и свойственных только этому району условий окружающей среды, которое обеспечивает создание продукции яркой индивидуальности, оцениваемой как “букет вина” [49]. Географический фактор,

<sup>1</sup> Дополнительные материалы к этой статье доступны по doi 10.31857/S0032180X22600688 для авторизованных пользователей.

который образно называют “вкус места” [30] или дактилоскопический отпечаток вина (geographical “fingerprint” of a wine) [44], явно или опосредованно обусловлен влиянием семи основных факторов, среди которых “экогеопедологическая среда”, включая влагообеспеченность и минеральное питание [44]. При индивидуализации земельного участка ключевыми факторами при определении терруара определены климат, почва и сорт винограда. Эффективность виноградарства в условиях склонового земледелия существенно зависит от гипсометрического уровня расположения участка, уклона и экспозиции, а также местоположения участка относительно макрорельефа местности (оценка заморозкоопасности и др.) [9]. Среди почвоведов доминирует трактовка термина “терруар”, обоснованная школой Бордо (*Institut des Sciences de la Vigne et du Vin*), как экофизиологического понятия, согласно которому органолептические характеристики вина связаны с его географическим происхождением [48, 49]. И поскольку терруар является многофакторным понятием, то отличительные характеристики вина из определенного места обусловлены уникальной комбинацией почвенных параметров, которые, взаимодействуя с местным климатом, сортом винограда, урожаем и техникой виноделия, формируют терруар конкретного участка [50].

Виноградное растение может произрастать на одном месте длительный период (около 60–80 лет), оно характеризуется развитой корневой системой, которая уходит вглубь на 6–8 м. Поэтому виноград отличается высокой способностью извлекать питательные вещества из больших глубин корнеобитаемого слоя, в то же время растение чутко реагирует на факторы среды и дает при различных условиях урожай, заметно отличающийся по величине и качеству [15, 33, 35, 36]. Элементный состав вина зависит от биогеохимии той почвы, на которой выращивается виноград, и поэтому используется для определения географического происхождения различных вин [45]. Поскольку на качество вин влияют почти все свойства почвы и в целом ее плодородие, то это определяет важную роль ампелопедологии, которая обеспечивает результаты генетического изучения почв под виноградниками.

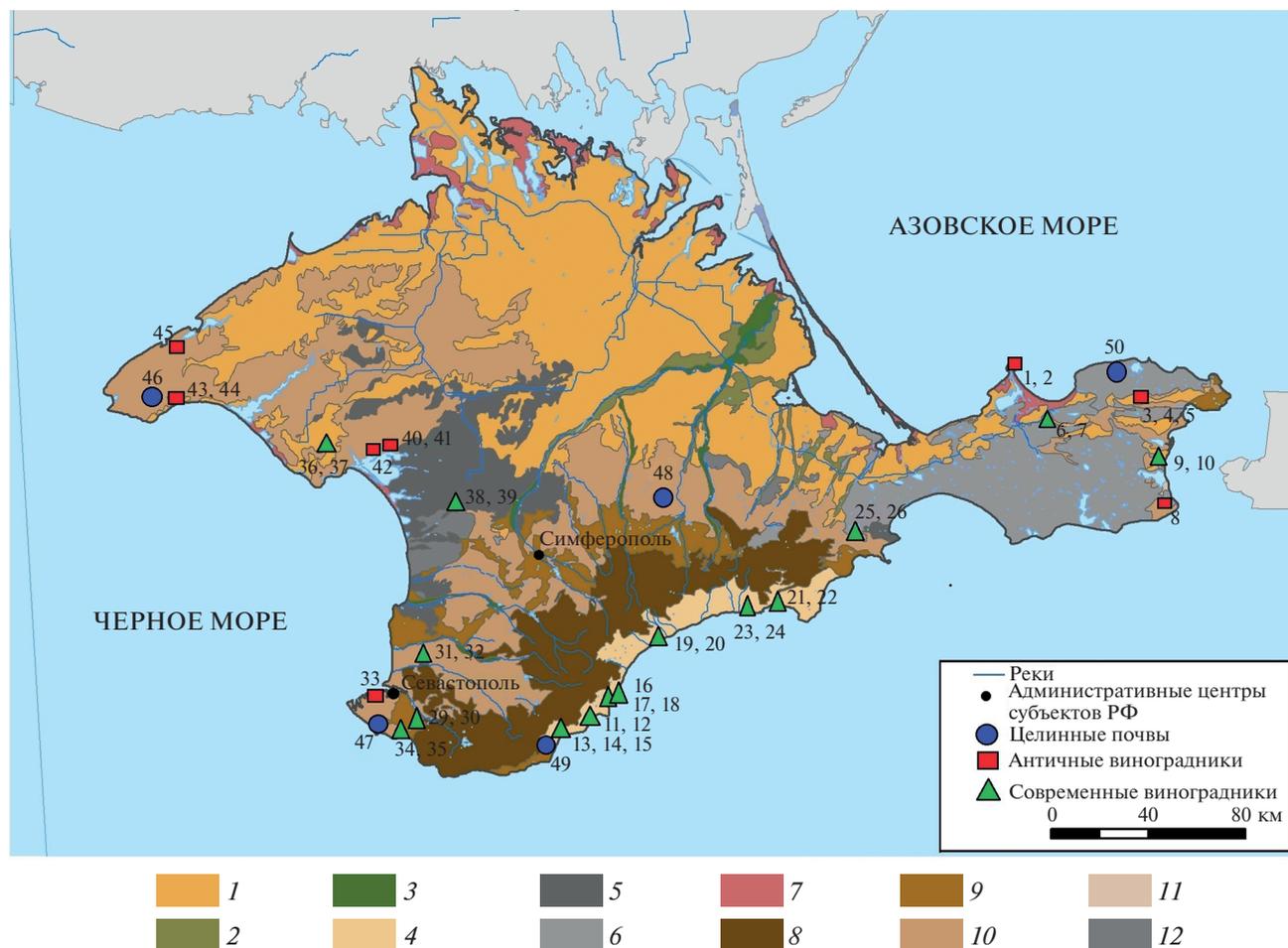
Цель ампелопедологического изучения территории Крымского п-ова заключалась в сравнительной оценке почв в пяти географических районах виноградарства, в которых крупнейшие предприятия могут нарастить объемы производимой продукции за счет расширения площадей, а также на перспективных землях для размещения виноградной культуры с учетом богатого исторического прошлого региона.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

**Объекты исследований.** Эмпирическую основу составили наряду с современными почвами под

виноградниками (32 объекта), постагrogenные почвы в размежеванных наделах и на террасах (13 объектов), а также эталоны (целинные почвы) в каждом из пяти районов виноградарства (рис. 1). Почвы под виноградниками— это обобщенное название, которое в условиях сложной структуры почвенного покрова подразумевает общую агротехническую трансформацию (плантажную обработку, регулярные обработки междурядий, значительную агрохимическую нагрузку и др.), не подменяя их генетической и классификационной идентичности. Полевые исследования в исторических районах виноградарства выполняли на залежах, имеющих объективные свидетельства размежевания и плантажа в античную эпоху [5, 21]. Такие объекты изучали в Юго-Западном (Гераклейский п-ов), Северо-Западном (мыс Ойрат, земли вблизи античных центров и усадеб: Калос-Лимен, Ортли, Мамай-Тюп) и Восточном Крыму: виноградные террасы на п-ове Казантип и к западу от Керчи (Пантикапея), у с. Октябрьское (табл. 1).

*Исторические районы виноградарства*, сложившиеся в Тавриде в античную эпоху, охватывали значительные площади земель в Юго-Западном и Восточном Крыму, на отдельных массивах в Северо-Западном Крыму и предгорьях. Но сельское хозяйство греков не распространялось на территории, заселенными таврами, и, в частности, на южный берег Крыма (ЮБК) от Балаклавы до Феодосии, который имеет благоприятные почвенно-климатические условия для культивирования виноградной лозы. Боспорские виноградари в Восточном Крыму стали заниматься акклиматизацией винограда уже в VI–V вв. до н. э., через два века многолетние насаждения появились в Юго-Западном Крыму. В сельской округе Херсонесского государства виноградарство, как отрасль аграрного сектора экономики, доминировало в доскифский период: виноградниками была занята прибрежная зона Гераклейского п-ова в IV–начале III вв. до н. э. [5]. В Северо-Западном Крыму, начиная с первой четверти IV в. до н. э., стало развиваться садоводство и виноградарство, о чем свидетельствуют следы древнего размежевания земель вблизи восьми поселений и усадеб [46]. Большая роль, которая отводилась древнегреческими земледельцами культивированию виноградной лозы в различных районах Крыма, а также винодельческой технологии в экономике античных государств, оказала влияние на распространение полного цикла виноградарства у скифов и тавров, что, например, фиксируется археологическими данными на поселениях поздних скифов (II–III вв. н. э.), а также палеоботаническими анализами косточек, которые свидетельствуют о развитии местной селекции культурного винограда, основанной на использовании сорта дикого лесного винограда горного Крыма [5, 8, 16, 28, 31]. На большинстве боспорских поселений I в. до н. э.—



**Рис. 1.** Расположение точек отбора почвенных образцов на постантичных залежах и современных виноградниках Крымского п-ова (в подложке – слой материнских пород из векторизованной карты (источник: Почвенная карта Крымского п-ова, Укрземпроект, 1972, М 1 : 200000). 1 – лёссы и лёссовидные суглинки, 2 – аллювий древний, 3 – аллювий современный, 4 – элювий сланцев и песков, 5 – глины, 6 – глины засоленные, 7 – современные морские отложения, 8 – глины, конгломераты, песчаники, 9 – делювий карбонатных пород, 10 – элювий карбонатных пород, 11 – элювий рудных пород, 12 – галечник и конгломераты.

III в. н. э. производственные объемы виноматериалов превышали собственные потребности, активное развитие этой отрасли продолжалось в конце III–V вв. до н. э. [5]. Крымское виноделие на местном сырье развивалось в Юго-Западном Крыму и в эпоху средневековья, о чем свидетельствуют находки около 200 винодельческих комплексов, которые могли одновременно производить не менее 2 млн л винной продукции [7].

Почвы, которые сформированы на элювии карбонатных пород, широко представлены как в Северо-Западном (56% площади), так и в Восточном Крыму (на скалистых известняковых гребнях Керченского холмогорья). Это черноземы карбонатные (Haplic Chernozems) и дерновые карбонатные почвы (Calcaric Chernic Rendzic Phaeozems), которые уже с 40–55 см подстилаются плитой известняка и на которых в районах виноградарства применяли плантажную обработку. В Северо-Западном Крыму античные виноград-

ники в 1.2 км к северо-востоку от античного центра Калос Лимена (начало IV в. до н. э.–начало II в. н. э.) и вблизи усадеб Ортли и Мамай-Тюп (второй половины IV–III вв. до н. э.), открытые крымскими археологами [22, 46], изучали в ходе междисциплинарных исследований, что определило репрезентативность заложения почвенных разрезов в системах внутривинного межевания. Результаты дистанционных и геофизических исследований хорошо сохранившегося надела под многолетние насаждения у мыса Ойрат вблизи усадьбы конца IV–II вв. до н. э. [21], которые позволили определить планировочную структуру (ограды участка, плантажные стены), способствовали организации детальных почвенных опробований с применением системы спутниковой навигации геодезического класса. Почвенные образцы на Гераклеяском п-ове отбирали в 69 наиболее хорошо сохранившихся земельных наделах сельской округи Херсонеса Таврического.

**Таблица 1.** Объекты изучения залежных почв на античных виноградниках Крыма

Античное поселение	№ объекта*	Высота над уровнем моря, м	Уклон, град	Экспозиция	Основной (внутренний) размер участка	Почва, порода**
Гераклий	1, 2	15	3–5	ЮЗ	100 × 100	Д-К, Эл.
Пантикапей	3–5	95	3–5	ЮВ	250 × 200	Д-К, Эл.
Китей	8	12–15	1–2	В	210 × 210	ЧЮ, Гл.
Херсонес	33	50	1–2	ЮВ	630 × 420 (210 × 210)	К, Эл.-Дел.
Ортли	40, 41	5–8	1–2	ЗЮЗ	210 × 210	ЧК, Щ.
Мамай-Тюп	42	2–8	0–3	Ю, ЮВ	220 × 270 (52.5 × 52.5)	Д-К, Эл.
Ойрат	43, 44	6–10	2–3	ЮВ	210 × 210 (52.5 × 52.5)	Д-К, Эл.
Калос Лимен	45	7–8	1–2	В	52.5 × 52.5	ЧК, Сср.

\* Номер объекта соответствует рис. 1.

\*\* Д-К, Эл. — дерновые карбонатные почвы на элювии плотных карбонатных пород, К, Эл.-Дел. — коричневые горные карбонатные почвы на элювии и делювии коренных пород, ЧК, Сср. — чернозем карбонатный среднесуглинистый на лёссовидных суглинках, ЧК, Щ. — чернозем карбонатный щебнистый на суглинках, ЧЮ, Гл. — чернозем южный глинистый.

На территории Восточного Крыма изучены два сходных объекта — античные земельные наделы под виноградники на склонах южной экспозиции с дерновыми карбонатными щебенчатыми почвами на элювии плотных карбонатных пород: у поселения Казантип I (II в. до н. э.—III в. н. э.) и у античной усадьбы (IV—III вв. до н. э.) вблизи с. Октябрьское (в 9 км к западу от Керчи (античного Пантикапея)). На юге Керченского п-ова, где в приморской зоне развиты черноземы на плотных серо-зеленых (2.5Y 6/4 (dry)) глинах, в 2019–2020 гг. авторами повторно изучены земельные участки шириной 15–16 м с оградами в 520 м к западу от городища Китей (V в. до н. э.—V в. н. э.). Результаты ранее проведенных почвенных исследований позволили определить, что формируемые турбированного горизонта (мощностью 70 см) произошло 2400 лет назад [26]. Почвы Восточного Крыма, сформированные на элювии плотных пород и на плотных глинах, по содержанию карбонатов кальция (CaCO<sub>3</sub>) значительно отличаются: в среднем 38 и 16% соответственно. Поэтому эти группы объектов далее анализируются отдельно.

В современных районах виноградарства полевые исследования выполняли в Юго-Западном (Балаклавский и Нахимовский р-ны), Северо-Западном (Сакский р-н) и Восточном (Ленинский р-н) Крыму, в предгорном Крыму (Белогорский р-н) и на южном берегу Крыма (ЮБК) (городские округа: Ялта, Алушта, Судак, Феодосия) (табл. 2). Наиболее привлекательные для виноградарства субсредиземноморские ландшафты ЮБК занимают самый низкий ярус Главной гряды Крымских гор шириной 1–15 км на общей площади 1255 км<sup>2</sup> [39]. В этом районе, а также в предгорьях к западу и востоку от Главной гряды, представлены коричне-

вые лесные почвы (по номенклатуре почв Крыма) или Cambisols [34].

На территориях современных виноградников отбор почвенных образцов проводили в горизонтах А, АВ и В (0–120 см) в междурядье, а для сравнения агрофизических показателей в горизонтах А и АВ, как в ряду виноградника, так и в его междурядье. Кроме того, отобрали 41 образец из горизонта В (>80 см) и по вертикали для построения геохимических эпюр в двух разрезах почвенно-лёссовой толщи глубиной 2.5 и 6.5 м (у современного виноградника и на целине). На постантичных залежах ниже дернинного слоя (мощностью 3–6 см) выделяли ренатурированный горизонт агропедогенеза мощностью 21–25 см, который и был объектом изучения.

**Методы исследований.** Научный подход, основанный на интеграции почвоведения, археологии, геоморфологии ландшафта, данных дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий, позволяющий обнаружить следы древнего землеустройства и земледелия [37], уже показал свою эффективность. Но для исторических районов виноградарства был дополнен результатами обработки данных дистанционного зондирования и геомагнитной съемки [23, 46]. При исследованиях почв виноградников результаты применения комплексного почвенно-генетического и биогеохимического подхода являются ключевым компонентом для практического использования концепции “терруар”.

Большое разнообразие почвообразующих пород Крымского п-ова объясняется сложностью его геологического строения. Их пространственное распределение методами картографии выполняли в локальной ГИС на многофункциональной платформе ArcGIS 10.5 от ESRI. Создание и оцифров-

**Таблица 2.** Объекты изучения почв под современными виноградниками на Крымском п-ове

Населенный пункт	№ объекта*	Высота над уровнем моря, м	Уклон, град	Экспозиция	Почва	Гранулометрический состав почв
Останино	6, 7	30	1–2	Ю	Чернозем южный слабогумусированный на лёссовидных глинах и суглинках	Легкоглинистый
Челядиново	9, 10	64	2–3	ЮЗ	Чернозем южный слабогумусированный мицеллярно-высококарбонатный на лёссовидных глинах и суглинках	Средне и тяжелоглинистый
Ялта	11, 12	20	2–3	Ю	Коричневые горные некарбонатные почвы на элювии и делювии коренных пород	Тяжелосуглинистый, щебенчатый
	13–15	260	3–5	Ю	Коричневые горные карбонатные почвы на элювии и делювии коренных пород	Легкоглинистый, щебенчатый
Гурзуф	16	155	2–3	ЮВ	Коричневые горные некарбонатные почвы на элювии и делювии коренных пород	Тяжелосуглинистый, щебенчатый
	17, 18	75	5–7	ЮВ		
Алушта	19, 20	65	2–3	Ю	Коричневые горные некарбонатные почвы на элювии и делювии коренных пород	Тяжелосуглинистый, щебенчатый
Судак	21, 22	67	1–2	ЮВ	Коричневые горные некарбонатные почвы на элювии и делювии коренных пород	Тяжелосуглинистый, щебенчатый
Новый Свет	23, 24	140	2–3	В	Коричневые горные солонцеватые почвы на делювии коренных пород	Легкоглинистый, щебенчатый
Феодосия	25, 26	93	1–2	ЮВ	Чернозем солонцеватый на плотных глинах	Легкоглинистый, щебенчатый
Кричное	27, 28	270	3–5	ЮВ, В	Дерновые карбонатные почвы на элювии плотных карбонатных пород	Легкоглинистый
Севастополь	29, 30	115	1–2	Ю, ЮВ	Коричневые горные карбонатные почвы на элювии и делювии коренных пород	Тяжелосуглинистый, щебенчатый
	34, 35	180	1–2	ЮВ		
Солнечный	31, 32	102	2–3	Ю	Коричневые горные карбонатные почвы на элювии и делювии коренных пород	Тяжелосуглинистый, щебенчатый
Ромашкино	36, 37	35	1–2	Ю, ЮВ	Чернозем южный слабогумусированный мицеллярно-высококарбонатный на лёссовидных глинах и суглинках	Легкоглинистый
Скворцово	38, 39	43	1–2	ЮВ	Чернозем, преимущественно карбонатный, щебнистый и галечниковый на элювии плотных и галечниковых карбонатных и окаربончатых пород	Легкоглинистый

\* Номер объекта соответствует рис. 1.

ку картографического материала проводили в географической системе координат WGS-1984. Для обеспечения подосновы в ГИС на всю территорию полуострова конвертировали и по сетке разграфки привязывали листы топографической карты масштаба 1 : 200 000 (Почвенная карта Крымского п-ова. Укрземпроект, 1972). Также

в качестве подложки использовали современные (2017–2020 гг.) мозаики высокдетальных космических снимков, предоставляемые картографическими веб-сервисами от Google, Yandex.

*Агрофизическое состояние почв* определяли по 45 объектам в горизонтах А и АВ (0–35 см) современных почв под виноградниками (в ряду и меж-

дурядье) и для постантичных залежей, используя фракционирование почвы в воздушно-сухом состоянии и оценку водоустойчивости мезоагрегатов. Сухое просеивание выполняли с использованием комплекта из восьми сит с квадратными ячейками *Fritch GmbH* (диаметром <0.25, 0.25–1, 1–2, 2–3.15, 3.15–5, 5–7, 7–10, >10 мм) на структурные отдельности по методу Н.И. Саввинова. Для наглядного отображения результатов использовали треугольник Ферре, который обычно применяют для представления результатов структурного состава почв [27]. Коэффициент структурности почвы ( $K_{стр}$ ) рассчитывали, как соотношение массы структурных отдельностей от 1 до 7 мм к массе структурных отдельностей <1 и >7 мм [18]. Коэффициент дефляционной опасности определяли по доле макроагрегатов >1 мм. Анализ водоустойчивости мезоагрегатов по градациям диаметров 1–2, 2–3.15, 3.15–5 мм проводили путем оценки скорости распада агрегатов ( $n = 50$ ) на увлажненной фильтровальной бумаге в чашке Петри по времени, рекомендованном в методе [3]. По соотношению процентного содержания водоустойчивых агрегатов к доле структурных отдельностей диаметром 3.15–5 мм рассчитывали критерий водоустойчивости ( $A$ ).

Цвет почвенных образцов в сухом состоянии определяли по шкале Манселла [42]. Для определения содержания органического вещества использовали метод И.В. Тюрина (в модификации ЦИНАО). В почвенных образцах определяли:  $CO_2$  карбонатов – ацидометрическим методом, рН водной вытяжки – потенциометрическим методом, общий азот титриметрическим методом (ГОСТ Р 58596-19), подвижный фосфор и обменный калий – по методу Мачигина (ГОСТ 26205-91), подвижные соединения меди – по методу Крупского и Александровой (ГОСТ Р 50683-94), подвижные соединения бора – по методу Бергера и Труога (ГОСТ Р 50688-94).

*Валовой анализ* в порошковых пробах почв и пород проводили по методике измерений массовой доли химических элементов на вакуумном волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре “Спектроскан Макс-GV”. Количественную калибровку проводили с использованием комплекта государственных стандартных образцов состава почв. Наиболее информативные геохимические коэффициенты для диагностики агрогенной трансформации почв обоснованы в ряде специальных работ [10, 13]. Использовали формулы расчета коэффициента элювирования:  $K_3 = Al_2O_3 / (MnO + CaO + K_2O + MgO + Na_2O)$  [41] и коэффициента подвижности химических элементов:  $K_p = \sum (Na, K, Mg, Zn) / SiO_2$  [12], а также индекс потенциального почвенного плодородия:  $FI = (CaO + MgO + 10P_2O_5) / SiO_2$  [47] и формулу для расчета коэффициента качества почв [12], кото-

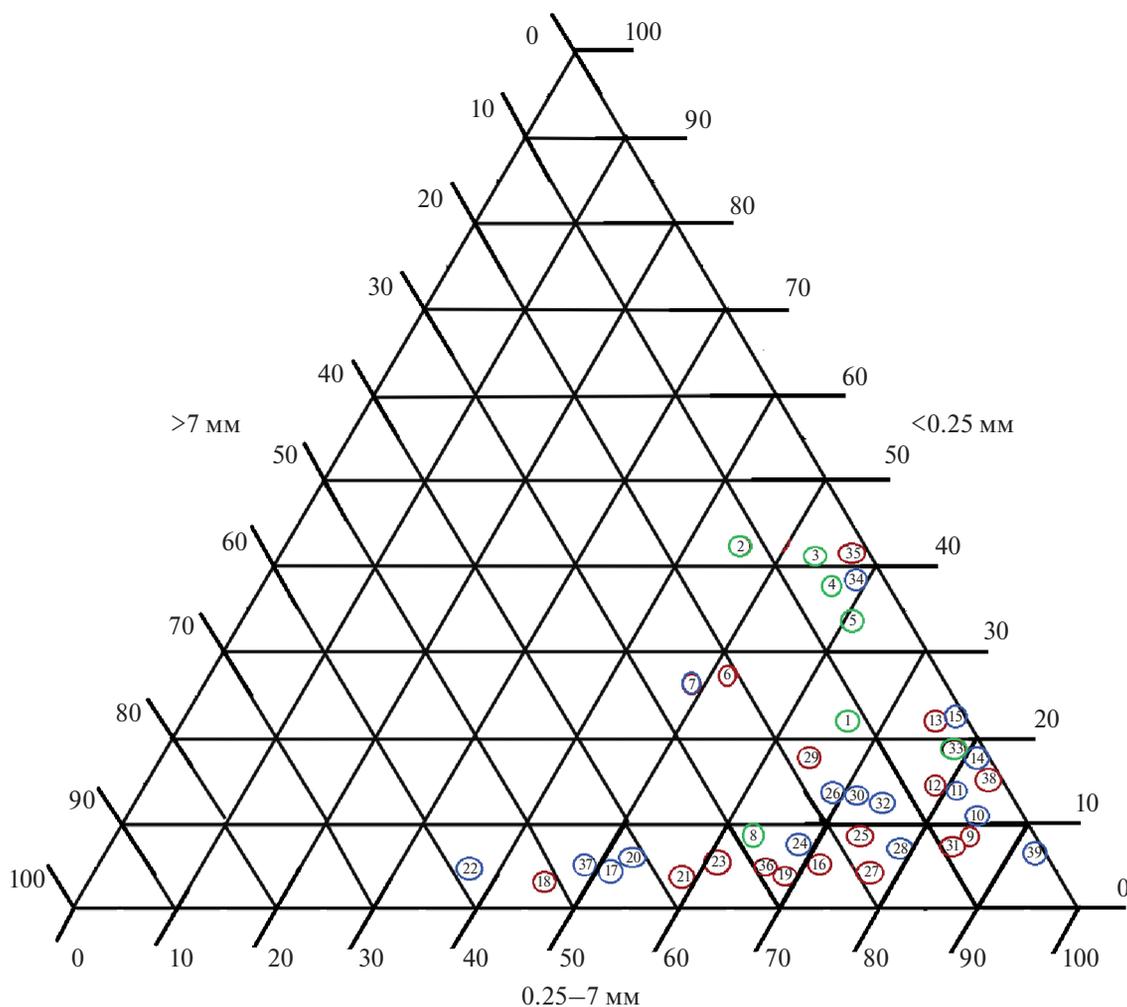
рую адаптировали по данным [15] для виноградного растения:  $SQ = (P_2O_5 \cdot K_2O \cdot CaO \cdot Zn \cdot Fe_2O_3 \cdot MgO)^{1/6}$ .

Для определения химического состава золы пробоподготовку растительного вещества из виноградного куста проводили путем озоления в фарфоровых тиглях в муфельной печи при 450°C.

Статистическую обработку проводили стандартными методами в программах Excel и Statistica 10.0. При определении наиболее информативных геохимических показателей использовали коэффициент вариации ( $V, \%$ ). Классификационное сходство объектов (почв, пород) определяли путем интерпретации результатов кластерного анализа в программном продукте Statistica 10.0, используя метод многомерного кластерного анализа (алгоритм древовидной кластеризации методом Уорда в квадрате Евклидова расстояния по нормированным значениям).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Агрофизическое состояние почв.** Виноградное растение относительно толерантно относится к условиям произрастания на щебенчатых почвах. Для почв, содержащих грубоскелетный материал, разработана классификация почв по каменистости применительно к культуре винограда, которая показывает, что насаждения винограда на слабо- и среднескелетных почвах (частиц размером >3 мм от 1 до 30%) долговечны и дают высокие урожаи хорошего качества [15]. Ранее показано [38], что в противоположность природному почвообразованию, приводящему к дивергенции почвенных свойств, агропедогенез приводит к их конвергенции. В этой связи важно отметить, что технология античного виноградарства предполагала проведение плантажной обработки, поэтому все почвы под виноградниками в исторических районах виноградарства Крыма в стартовых условиях агропедогенеза характеризовались гомогенизацией верхнего корнеобитаемого слоя. Известно, что античные виноградари крупные камни складировали на границе земельного массива под многолетние насаждения как это отмечено у мыса Ойрат [21], или укладывали в плантажные стены шириной и высотой 1 м [25]. Как установлено ранее при изучении античных виноградников в наделах III–II вв. до н. э. сельской округи Херсонеса при сплошном плантаже закладывали траншею глубиной 0.70–0.80 м, а сохранившаяся глубина древнего плантажа 0.50–0.80 м [25], и это турбированный горизонт с определенными агротехнологическими характеристиками. Например, если карбонатный элювий у целинной почвы содержит 34% частиц размером >3 мм (сильноскелетный), то в сопоставимом по глубине плантажированном горизонте античного виноградника у Калос–Лимена выборкой камней был достигнут



**Рис. 2.** Определение различий почвенной структуры (горизонт А) с помощью треугольника Ферре (номера объекта соответствуют рис. 1): красные значки – образцы в ряду виноградника, синие значки – образцы в междурядье виноградника, зеленые значки – образцы на постантичных залежах.

уровень средней скелетности (доля щебня  $>3$  мм составляла от 18% (0–63 см) до 23% (63–84 см)).

При агрономической оценке почвы большое значение имеет ее структура и водоустойчивость. В агрономическом отношении наиболее ценными являются агрегаты диаметром от 0.25 до 7 мм [18]. Бесструктурные распыленные агрегаты ( $<0.25$  мм) и глыбистые агрегаты ( $>7$  мм [18]) обладают плохой водо- и воздухопроницаемостью, уплотненностью [27].

Анализ данных (рис. 2) показал, что без учета современных залежей, данные по которым сильно различаются, в большинстве случаев лучшей структурностью обладают почвы, образцы которых были отобраны в рядах современных виноградников по сравнению с их междурядьями, испытывающими регулярные механические обработки. Используя критерий существенности разности для двух выборок (почвы в ряду и в междурядье виноградника) по содержанию агроно-

мически ценных агрегатов (0.25–7 мм), определено, что  $t_{\text{факт}} > t_{05} < t_{01}$ , то есть разность существенна на 5%-ном уровне значимости, но на 1%-ном уровне – образцы почвы относятся к одной совокупности. В рядах виноградников после первичного плантажа почвы отсутствуют турбации за время, соответствующее возрасту виноградника. Однако в междурядьях виноградников снижение доли агрономически ценных агрегатов обусловлено большим содержанием глыбистых форм ( $>7$  мм) за счет плантажной обработки и последующей культивации почвы при обработке междурядий (4–6 раз в год на глубину 10–12 см) при традиционной агротехнологии.

Величины коэффициента водоустойчивости значительно больше на постантичных и современных залежах ( $>85\%$ ) в отличие от современных виноградников (40–60%), почвы которых характеризуются большей выпашанностью (табл. S1). В современных виноградниках средневзвешенный по

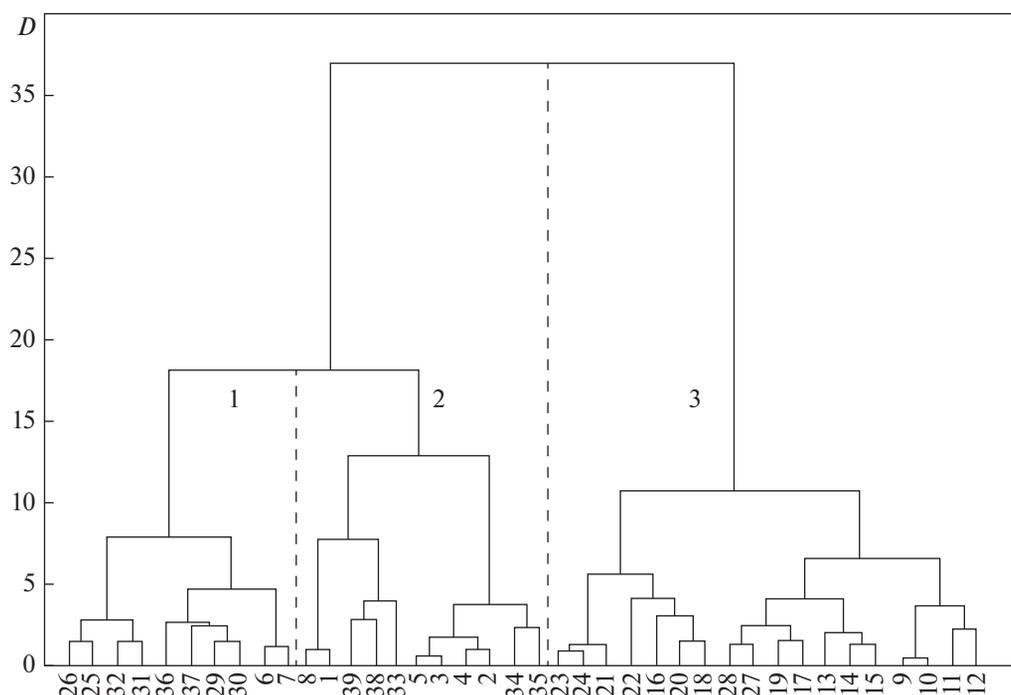


Рис. 3. Дендрограмма кластерного анализа по 39 почвам под виноградниками Крымского п-ова по показателям их структурного состояния ( $D$  – расстояние объединения).

трем градациям показатель  $d_w$  (водоустойчивость агрегатов диаметром от 1 до 5 мм) показал различия величин для почв в ряду и междурядье. Если почвы в ряду имели среднее значение  $d_w$  46.9%, то из-за регулярных турбаций в междурядьях величина  $d_w$  была вдвое ниже – 20.8%, что определяет структуру почвы как неудовлетворительную.

Режим залежи позволяет восстановить структурное состояние почв в диапазоне размерностей 0.25–7 мм, при этом реликтовые признаки механической обработки сохраняются в пылевой фракции (<0.25 мм). Это отмечено как для постантичных залежных почв (объекты 1–5), так и для постагрогенных почв текущего этапа освоения на Керченском п-ове (объекты 34–35).

Для группировки исследованных объектов по доле мезо- и микроагрегатов, а также по величинам агрофизических показателей почв (табл. S1) выполнен кластерный анализ, с помощью нормирования значений показателей по среднеквадратическому отклонению. Анализ рис. 3 показал, что почвы под виноградниками по своему агрофизическому состоянию могут быть классифицированы с использованием величины порогового расстояния ( $D$ ), на три основные группы. К первой группе в основном относятся почвы современных виноградников, расположенные в Юго-Западном (объекты 29–32) и Северо-Западном (объекты 36, 37) Крыму. Их объединяют близкие величины коэффициента дефляционной опасности (значения находятся в пределах 50–70%), пока-

зателя водоустойчивости (3.15–5 мм) – 40–60%, критерия водоустойчивости, значения которого входят в диапазон от 40 до 60. Ко второй группе относятся постантичные залежи Восточного Крыма (объекты 1–5, 8) и современные залежи Юго-Западного (33–35) и Северо-Западного (объекты 38, 39) Крыма. Агрегатное состояние почв 1-й и 2-й группы варьирует в пределах 0.6–1.2, что соответствует категории удовлетворительной структуры. В группе 1 отмечается самое большое по сравнению с другими группами среднее содержание агрономически ценных агрегатов – 82.8%. Величины коэффициента водоустойчивости значительно больше на постантичных и современных залежах (>85%) в отличие от современных виноградников (40–60%), что характеризует степень выпханности их почв. При этом в группе 2 наблюдается увеличение содержания фракции <0.25 мм, которое составляет около 30–40%. Это свидетельствует о том, что структурные отдельности из агрономически ценных в результате агрогенеза превратились в пылеватые формы, то есть установлены остаточные (после длительного залежного режима) признаки выпханности почв.

К группе 3, которая обособляется на высоком уровне иерархической классификации, относятся современные виноградники ЮБК (объекты 13–24) и залежи нового времени в предгорном Крыму (объекты 27, 28). На более высоком уровне объединения с этой группой ассоциируются почвы из виноградника института “Мага-

рач” (объекты 11, 12) и оставленного виноградника на Керченском п-ове (объекты 9, 10).

Отличием группы 3 (от групп 1 и 2) является значительная величина коэффициента структурности, что позволяет оценить структуру как хорошую ( $K_{стр} > 1.5$ ). При этом агрономически ценными агрегатами в должной мере обладают не все объекты: преобладание глыбистой фракции ( $>7$  мм) наблюдается в междурядьях современных виноградников в п. Гурзуф (29.8%), г. Алушта (37.5%) и Судак (53.3%). Показатель водоустойчивости также имеет отличия. Там, где отбор проводили в ряду современного виноградника, коэффициент является одним из самых низких — в среднем 37% при том, что в междурядье (из-за регулярных турбаций) водоустойчивость вдвое меньше — 19%, что определяет структуру почвы как неудовлетворительную. На современных залежах, напротив, средняя величина коэффициента водоустойчивости имеет высокое значение — около 93%. Результаты оценки агрофизического состояния почв под виноградниками подтверждают ведущую роль географического фактора в их типологии даже при различиях истории освоения и интенсивности агрогенных трансформаций.

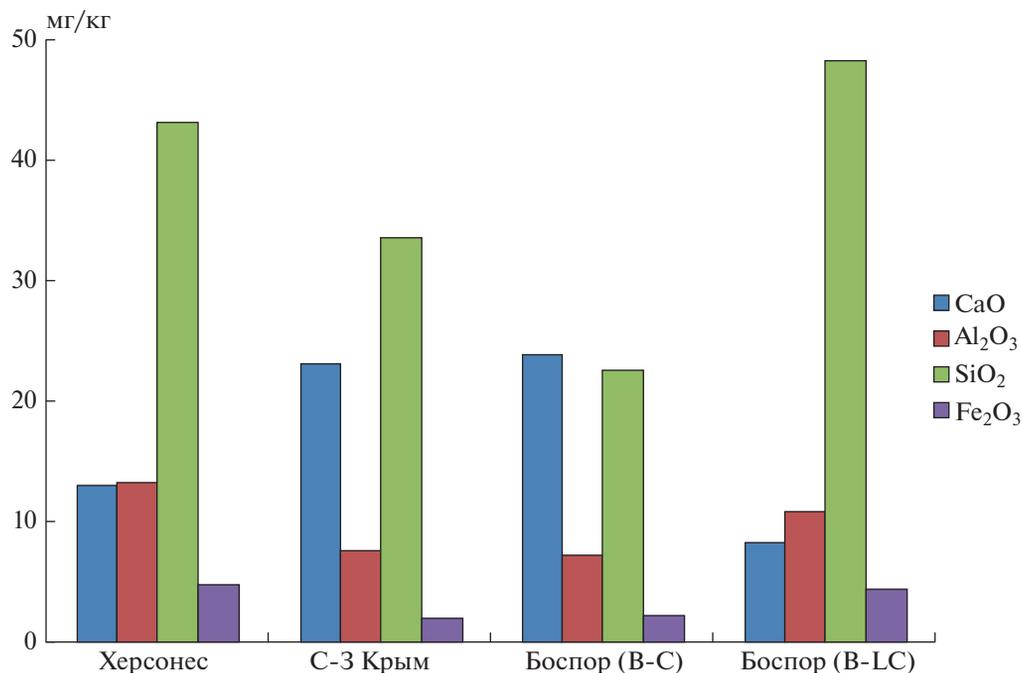
**Геохимия почв в исторических районах виноградарства.** Статистическая обработка всего массива геохимических данных ( $n = 153$ ) по изученным объектам (табл. S3) показала значительную изменчивость всех химических элементов (по величинам коэффициентов вариации от 19 до 120%), то есть их высокую информативность для определения внутрирегиональных (порайонных) различий. Однако, используя подход, основанный на сравнении величин стандартного отклонения и коэффициента вариации для различных вариантов разброса значений при увеличении средней величины [32], удалось установить среди 22 макро- и микроэлементов узкий перечень диагностических показателей, которые в наибольшей степени могут отразить почвенные различия между тремя историческими регионами виноградарства Крыма. В частности, среди 10 макроэлементов, в выборке которых отмечено относительное постоянство величин стандартного отклонения, определены (при величинах коэффициента вариации более 28%) четыре диагностических макроэлемента (оксида): CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> (рис. 4), а среди 12 микроэлементов четыре (Pb, As, Rb, Zn) (рис. 5) могут быть признаны наиболее информативными для идентификации почв географических районов.

При сравнении содержания в почве 22 макро- и микроэлементов в трех исторических районах виноградарства, ни один элемент не был исключен при использовании выбранного критерия — величин соотношений в отдельных парах объектов более или менее 20%. Сравнение трех районов античного виноградарства (табл. S3) показало,

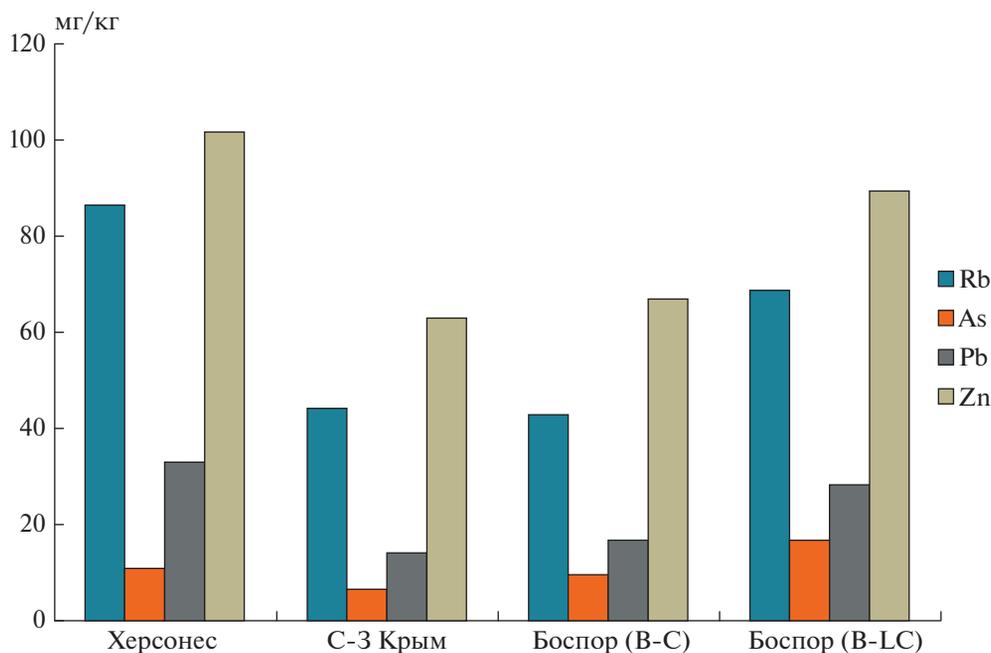
что наибольшие различия при попарном сравнении отмечаются по содержанию в горизонте А таких макроэлементов в оксидной форме, как CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, MnO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, а по содержанию микроэлементов — Sr, а также Rb и As. Среди исторических районов наибольшими различиями (по содержанию 19 химических элементов) характеризуются почвы на одной территории — Керченском п-ове, но сформированные на различных материнских породах — карбонатном элювии и тяжелых суглинках. Значительным своеобразием отличаются почвы сельской округи Херсонеса (Гераклейский п-ов), при сравнении с карбонатными почвами как Северо-Западного Крыма (прежде всего, по большему содержанию (из 17 элементов) железа, свинца, рубидия, алюминия и по более низкому содержанию натрия и стронция), так и античного Боспора (прежде всего, по большему содержанию (из 16 элементов) Fe, Rb, Pb, Si, Al, V и по более низкому содержанию Sr, Na и P). По особенностям геохимического состава почв наиболее близкими оказались почвы под виноградниками в залежах Северо-Западного Крыма и Боспора, сформированные на карбонатных породах и плантажированные в древности. Из 22 макро- и микроэлементов только по девяти элементам эти два района имеют отличия, причем наиболее существенные лишь по содержанию Mg и Sr.

Почвы виноградников у античных усадеб Северо-Западного Крыма отличаются высокой карбонатностью, что сильно сближает их с почвами на элювии известняков Восточного Крыма, которые лишь по содержанию Са имели преимущество перед почвами на глинах того же района (округа Китея). Успешному опыту виноградарства на юге Керченского п-ова за время существования античного Китея (V в. до н. э.—V в. н. э.) [26] очевидно благоприятствовали особенности местных почв, которые отличались от карбонатных аналогов склоновых виноградников п-ова Казантипа и усадьбы у Октябрьского большим содержанием (в 1.3–2.1 раза) элементов, полезных для виноградных растений: Si, Fe, K, Rb, Mg, Mn.

С ампелопедологической точки зрения обособован [2, 11, 15] ансамбль приоритетных элементов, оказывающих влияние на вкусовые качества виноматериалов (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni, Cu, Zn, Co, Rb). Поэтому почвы Гераклейского п-ова (сельская округа Херсонеса) выгодно отличаются от других районов античного виноградарства по большему содержанию Fe, Si, Mg, K, Rb. Педогенез на ЮБК из-за климатической стабильности факторов почвообразования, начиная с плиоцена мало отличался от современного [1]. Территория Гераклейского п-ова, которая входит в состав южнобережного умеренно-жаркого засушливого с очень мягкой зимой агроклиматического района с суммами температур 3400–3800°C за период  $>10^{\circ}\text{C}$  [39], существенно отличается от других историче-



**Рис. 4.** Распределение содержания диагностических макроэлементов (оксидная форма представления) в исторических районах виноградарства Крымского п-ова. Для Восточного Крыма почвы на элювии плотных пород и на плотных глинах обозначены В-С и В-LC соответственно.



**Рис. 5.** Распределение содержания диагностических микроэлементов в исторических районах виноградарства Крымского п-ова. Для Восточного Крыма почвы на элювии плотных пород и на плотных глинах обозначены В-С и В-LC соответственно.

ских районов виноградарства непрерывностью и интенсивностью почвообразовательных процессов, что можно диагностировать по показателю выветривания Rb/Sr, который отражает разницу в устойчивости слюд и калиевых полевых шпатов

по отношению к карбонатам, с которыми ассоциирован Sr [10]. В частности, карбонатные почвы Северо-Западного и Восточного Крыма по величинам показателя Rb/Sr уступают почвам Юго-Западного Крыма от 3 до 17 раз.

Херсонесское государство после создания в IV—III вв. до н. э. агрохозяйственной зоны для виноградарства и экспорта вина стало развивать на дальней округе (в Северо-Западном Крыму) зерновое хозяйство при второстепенной роли виноградарства. Биогеохимические различия как почв, так и материнских пород могли быть, наряду с климатом, существенной причиной разнокачественности вин в двух регионах Западного Крыма, что находит отражение в современных различиях виноградарства этих местностей, если использовать концепцию терруара [40]. Эти выводы согласуются с различной ролью виноделия в Юго-Западном и Северо-Западном Крыму для античной эпохи (экспортными поставками и местным потреблением соответственно), которую отмечают историки [5].

**Геохимия почв в современных районах виноградарства.** Роль микроэлементов в почве не менее важна для получения высококачественных урожаев винограда, чем основных элементов минерального питания: N, P, K, Ca, S и Mg [11, 29, 43]. Для определения наиболее информативных макро- и микроэлементов в почвах под виноградниками Крымского п-ова (табл. S2) был использован коэффициент вариации ( $V$ ). Химические элементы и соединения, которые по величинам  $V < 25\%$  можно рассматривать как фоновые ( $K_2O$ , Cr, MnO, Ba), из дальнейшего анализа были исключены. По данным о содержании 18-ти химических элементов выполнена классификация почв под виноградниками, используя метод многомерного кластерного анализа (рис. 6).

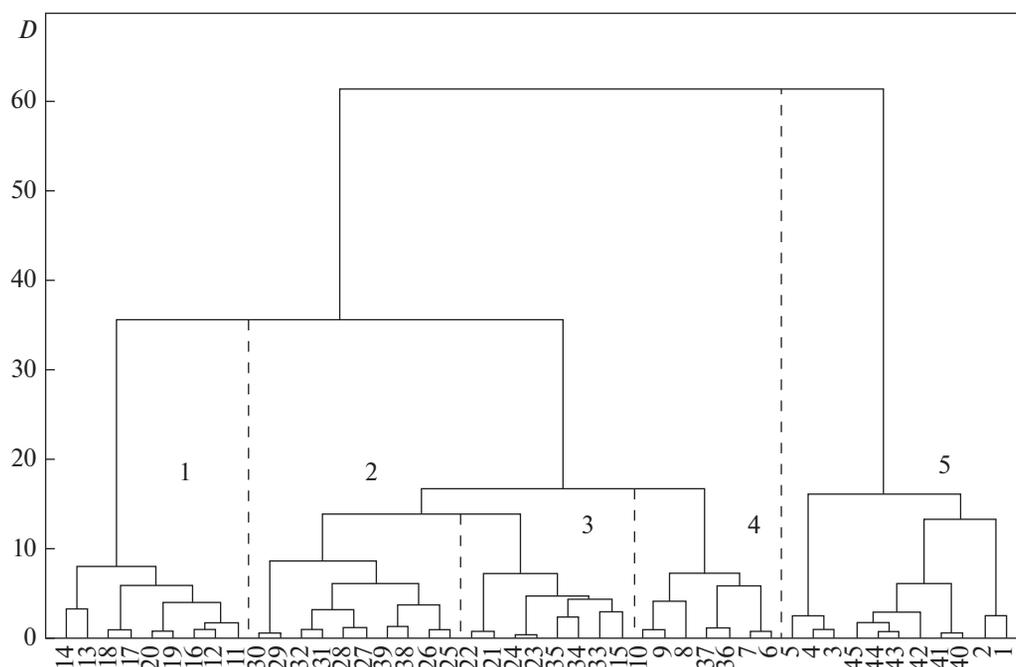
Результаты иерархической классификации показали, что почвы под виноградниками по биогеохимическим особенностям можно разделить на пять основных групп, но на высоком уровне порогового расстояния наиболее контрастные объекты в группах 1 и 5. Наиболее значительными различиями геохимического состава почв по сравнению с остальными объектами на территории полуострова характеризуются залежные почвы из античных виноградников Керченского п-ова и Северо-Западного Крыма (группа 5). Старозалежные почвы, которые чаще сформированы на элювии известняков и плантажированы в древности, отличаются большим содержанием CaO (25.1%), MgO (2.5%) и P (0.36%) и меньшим (почти в 2 раза) Al, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V, Cu, Pb. В группу 1 вошли объекты ЮБК, расположенные на коричневых горных преимущественно некарбонатных почвах. Сравнительно высокая концентрация Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6.01%) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (19.85%) в почвах этой группы подтверждается коричневой (10YR 5/3) и желтовато-коричневой (10YR 5/4) окраской. Главным отличием от остальных групп является низкое содержание CaO (в пределах от 0.6 до 1.8% в верхнем горизонте) и большее содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V, Cr, Co, Ni, Zn, Rb, Pb. В группы 2—4 вошли совре-

менные почвы под виноградниками Юго-Западного, предгорного, Северо-Западного и Восточного Крыма, которые при значительных различиях между собой все же формируют общий кластер. Группы 2 и 4 отличаются между собой по содержанию Co, Sr, Cu, As, Cr, Mn, Ni в 1.5—2 раза в пользу группы 4 (преимущественно, это суглинистые почвы виноградников Керченского п-ова). Группы 2 и 3 наиболее близки между собой — из 18 отобранных химических элементов отличия выявлены только по Cu, Ni и Co, что напрямую связано с различными подходами предприятий к применению агрохимикатов.

Геохимические соотношения и коэффициенты могут диагностировать результаты протекания процессов, которые связаны как с выветриванием материнских пород, так и с педогенезом. В настоящем исследовании наиболее информативными коэффициентами (между постантичными залежами и современными виноградниками) стали коэффициент потенциального почвенного плодородия ( $FI$ ) [47] и коэффициент элювиирования ( $K_e$ ) [41] (табл. 3).

Почвы под современными виноградниками (в междурядьях) отличаются от залежных почв античных виноградников высокими значениями как  $K_e$ , которые показывают превышение в 2.5—3 раза (за счет потери щелочных соединений), так и коэффициента выщелачивания (Ba/Sr). Также значительное превышение показал коэффициент выветривания ( $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + MgO + K_2O)$ ) — диапазон значений на почвах современных виноградников варьирует от 0.97 до 2.39, тогда как для почв античных виноградников значение коэффициента не превышает 0.69. Это характеризует более глубокие результаты процессов выветривания и выноса миграционно подвижных элементов, что связано с более длительным земледелием и большей интенсивностью геохимической трансформации почвообразующих пород и почв в прежних и нынешних климатических условиях.

Обладает диагностическими возможностями показатель потенциального плодородия почвы  $FI$  [47], который определяется по соотношению суммы общего фосфора и оксидов кальция, магния к кремнию. Показатель  $FI$  на залежных почвах античных виноградников имеет значения от 0.41 до 1.40, тогда как для почв современных виноградников  $FI < 0.20$ . Величины коэффициента подвижности химических элементов ( $K_n$ ), который определяется по соотношению суммы четырех подвижных элементов к содержанию оксида кремния [12], больше у постантичных залежных почв, что характеризует их меньшую степень выщелоченности такими элементами, как Na, K, Mg, Zn по сравнению с почвами современных виноградников.



**Рис. 6.** Дендрограмма кластерного анализа 45 образцов из горизонтов А и АВ почв под виноградниками Крымского п-ова по содержанию 18 химических элементов (метод Уорда, Евклидово расстояние, значения показателей нормированы по среднеквадратическому отклонению).

Для определения бонитета почв был адаптирован коэффициент качества почв  $SQ$  [12] для виноградного растения по шести химическим соединениям ( $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $Zn$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ), которые наиболее необходимы для его роста и развития [15]. Сравнение величин коэффициента  $SQ$ , рассчитываемого как среднее геометрическое значение содержания указанных элементов, показало, что наиболее плодородными являются залежные

почвы, где содержание полезных химических элементов значительно выше (в 1.2–1.5 раз), чем у современных почв вод виноградниками. При этом следует особо выделить район предгорного Крыма, где значение  $SQ$  (3.87) приближено к показателям залежных земель, что может доказывать высокую почвенно-генетическую перспективность развития данной территории под виноградарство. Превышение значений коэффициента биологиче-

**Таблица 3.** Геохимические соотношения и коэффициенты ( $X \pm Sx$ ) по пяти агроклиматическим районам Крымского п-ова

Соотношения и коэффициенты*	1		2		3	4	5		V, %
	пз	св	пз	св	св	св	пз	св	
$FI$	$1.2 \pm 0.1$	$0.2 \pm 0.02$	$0.4 \pm 0.03$	$0.2 \pm 0.02$	$0.2 \pm 0.01$	$0.14 \pm 0.02$	$1.4 \pm 0.3$	$0.14 \pm 0.02$	87
$(CaO + MgO)/Al_2O_3$	$4.0 \pm 0.2$	$0.7 \pm 0.1$	$1.2 \pm 0.1$	$0.8 \pm 0.04$	$0.6 \pm 0.03$	$0.4 \pm 0.1$	$2.9 \pm 0.5$	$0.5 \pm 0.01$	77
$Al_2O_3/(CaO + Na_2O + MgO + K_2O)$	$0.23 \pm 0.01$	$1.2 \pm 0.1$	$0.7 \pm 0.1$	$0.9 \pm 0.04$	$1.18 \pm 0.04$	$2.4 \pm 0.2$	$0.5 \pm 0.1$	$1.4 \pm 0.02$	63
$Ca + Mg + K$	$30.7 \pm 0.9$	$9.1 \pm 0.6$	$17.0 \pm 0.8$	$10.4 \pm 0.8$	$9.7 \pm 0.5$	$7.5 \pm 0.7$	$22.0 \pm 2.8$	$6.1 \pm 0.1$	59
$K_3$	$0.8 \pm 0.1$	$5.7 \pm 0.4$	$2.3 \pm 0.1$	$4.7 \pm 0.4$	$4.8 \pm 0.2$	$7.2 \pm 0.5$	$2.0 \pm 0.4$	$5.6 \pm 0.1$	53
$MnO/Sr$	$3.1 \pm 0.2$	$9.7 \pm 0.4$	$6.9 \pm 1.1$	$8.8 \pm 0.9$	$7.2 \pm 0.2$	$9.1 \pm 0.7$	$2.0 \pm 0.5$	$11.6 \pm 0.4$	45
$Ba/Sr$	$1.2 \pm 0.1$	$3.8 \pm 0.1$	$3.9 \pm 0.2$	$4.1 \pm 0.1$	$3.5 \pm 0.04$	$3.6 \pm 0.2$	$1.1 \pm 0.2$	$4.5 \pm 0.1$	40
$(K_2O + Na_2O)/Al_2O_3$	$0.5 \pm 0.03$	$0.2 \pm 0.01$	$0.3 \pm 0.004$	$0.3 \pm 0.01$	$0.2 \pm 0.01$	$0.2 \pm 0.01$	$0.5 \pm 0.04$	$0.2 \pm 0.01$	37
$K_n$	$2.6 \pm 0.1$	$1.6 \pm 0.1$	$2.9 \pm 0.4$	$1.6 \pm 0.1$	$1.8 \pm 0.1$	$2.3 \pm 0.2$	$3.3 \pm 0.5$	$1.6 \pm 0.1$	29
$TiO_2/Zr$	$24.0 \pm 0.8$	$28.1 \pm 0.8$	$39.4 \pm 1.9$	$37.5 \pm 2.4$	$36.7 \pm 1.2$	$40.7 \pm 1.5$	$27.7 \pm 1.2$	$25.8 \pm 0.8$	21
$SQ$	$3.6 \pm 0.1$	$3.2 \pm 0.1$	$3.8 \pm 0.2$	$2.6 \pm 0.1$	$3.9 \pm 0.1$	$3.2 \pm 0.1$	$4.1 \pm 0.1$	$2.2 \pm 0.1$	17
$(Fe_2O_3 + MnO)/Al_2O_3$	$0.3 \pm 0.01$	$0.4 \pm 0.01$	$0.4 \pm 0.01$	$0.4 \pm 0.02$	$0.4 \pm 0.01$	$0.3 \pm 0.01$	$0.4 \pm 0.02$	$0.3 \pm 0.003$	14

Примечание. 1 – Северо-Западный Крым, 2 – Юго-Западный Крым, 3 – предгорный Крым, 4 – Южный берег Крыма, 5 – Восточный Крым, пз – постантичные залежи, св – современные виноградники.

\*  $FI$  – коэффициент потенциального почвенного плодородия [47],  $K_3$  – коэффициент элювиирования [41],  $K_n$  – коэффициент подвижности химических элементов [12],  $SQ$  – коэффициент качества почв [12];  $V$  – коэффициент вариации.

Таблица 4. Агрохимические свойства почв в оставленных и современных виноградниках

№	Слой, см	Цвет сухой почвы (Манселл)	CO <sub>2</sub> , %	рН Н <sub>2</sub> O	C <sub>орг</sub>	N <sub>общ</sub>	C/N	P <sub>подв</sub>	K <sub>подв</sub>	B <sub>подв</sub>	Cu <sub>подв</sub>	
												%
Восточный Крым												
6	св	2–13	10YR 4/3	0.47	8.11	1.8	0.16	11.25	16	367	1.59	0.139
		13–24	10YR 4/3	0.55	8.16	1.76	0.18	9.78	7	307	1.25	0.093
Южный берег Крыма												
19	св	0–14	10YR 6/2	0.23	8.08	1.50	0.54	4.63	35	240	1.03	0.188
		14–25	10YR 6/2	0.15	8.14	1.26	0.44	5.15	17	129	1.00	0.212
21	св	0–17	10YR 6/1.5	0.85	8.00	1.53	–	–	16	224	2.13	0.079
		17–28	10YR 6/1.5	0.93	8.06	1.17	–	–	23	222	2.44	0.085
Предгорный Крым												
28	сз	0–13	10YR 5/2.5	3.29	7.99	1.54	0.4	3.85	18	491	1.98	0.421
		13–26	10YR 5/2.5	2.97	7.83	1.86	0.26	7.14	8	339	2.15	0.243
Юго-Западный Крым												
29	св	0–18	10YR 6/3.5	4.29	8.13	1.99	–	–	33	447	1.67	0.440
		18–32	10YR 5/4	4.51	8.06	1.69	–	–	8	252	1.14	0.410
31	св	0–14	10YR 4/4	4.47	8.05	1.53	0.26	13.56	32	510	1.96	0.382
		14–26	10YR 4/4.5	5.11	8.01	1.28	0.20	16.42	29	546	1.94	0.465
Северо-Западный Крым												
36	св	0–16	7.5YR 5/4	3.85	8.04	1.85	0.24	11.89	10	520	2.33	0.084
		16–34	7.5YR 4/4	4.07	8.10	1.16	0.20	15.82	8	352	2.14	0.050
39	сз	0–16	7.5YR 5/4	5.83	8.12	1.32	–	–	29	542	–	–
		0–21	10YR 5/3	19.48	8.06	1.53	–	–	9	221	–	–

Примечание. Прочерк – нет данных; сз – современные залежи, св – современные виноградники.

ской активности (MnO/Sr) наблюдается в районах современного виноградарства, что связано с вовлечением MnO в процессы биогенного накопления и миграции. Величина отношения TiO<sub>2</sub>/Zr в пяти географических районах Крымского п-ова имеет свое индивидуальное значение, характерное для каждого района, что свидетельствует о литологической и геохимической неоднородности почв.

На почвах под современными виноградниками Крымского п-ова выявлено повышенное содержание таких химических элементов, как Cu, Cr, Ni, Pb, V. Эти элементы относятся к тяжелым металлам, которые свидетельствуют как о геохимической специфике региона, так и о загрязнении изучаемой территории. Результаты расчета суммарного накопления в почве тяжелых металлов и металлоидов относительно фоновых концентраций (показатель Z<sub>c</sub> [6]) для пяти географических районов виноградарства Крыма показали, что наибольшие величины показателя Z<sub>c</sub> по восьми химическим элементам (Ni, Cr, Cu, Pb, Zn, V, Co, As) отмечены в горизонте А почв на ЮБК (10.7) и в Юго-Западном Крыму (10.0). Для ЮБК, как важного рекреационного района, где виноградниками занято 35% площади сельскохозяйственных земель, своевременно ставится задача развития органического виноградарства, предполагающего отказ от применения пестицидов и минеральных удобрений [24].

**Агрохимические свойства почв под виноградниками.** В целях определения агрогенной трансформации проведен детальный анализ ключевых агрохимических свойств для почв оставленных и современных виноградников (табл. 4). Сравнение почв по пяти географическим районам показывает, что необходимые питательные вещества в комплексе (N, P, K) выше на ЮБК (N = 0.49%, P = 34.8 мг/кг, K = 286 мг/кг), а также в Юго-Западном Крыму (N = 0.23%, P = 25.5 мг/кг, K = 438 мг/кг), то есть в традиционных районах виноградарства и виноделия. Привлеченные данные по содержанию C<sub>орг</sub> в постагрогенных горизонтах почв показали, что у возделываемых почв под виноградниками уровень дегумификации в два раза больше. Показателем, характеризующим качество гумуса, является соотношение C/N, которое указывает на обогащенность гумуса азотом [17]. По сравнению с другими географическими районами наибольшей обогащенностью гумуса обладают почвы предгорного Крыма (5.5) и ЮБК (4.9).

Для виноградников наилучшими почвами будут нейтральные или слабощелочные. Этому критерию соответствуют почвы предгорного Крыма, где величина рН в среднем равна 7.9 (слабощелочные почвы). На всех других объектах исследования рН > 8, что соответствует средне- (8–8.5) и сильнощелочным (>8.5) условиям. Из-за этого

**Таблица 5.** Концентрация химических элементов в золе ягод винограда и почве (горизонт В) современных виноградников Крымского п-ова

ХЭ*	Единицы измерения	В золе ягод винограда					В почве горизонта В (>70 см)				
		район исследования**									
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
CaO	%	3.1	2.9	8.7	3.1	2.3	7.9	14.0	14.3	6.5	3.6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		2.2	2.1	3.5	2.5	2.7	0.1	0.3	0.3	0.2	0.1
Na <sub>2</sub> O		0.7	1.5	1.4	—	2.0	0.9	1.3	1.1	2.1	0.9
K <sub>2</sub> O		10.5	8.3	11.1	8.7	3.7	1.7	1.8	1.5	2.9	1.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	11.4	10.2	9.2	18.4	9.8
MgO		0.5	0.4	1.3	0.3	0.8	1.7	1.3	1.1	1.9	1.1
TiO <sub>2</sub>		0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.78	0.62	0.52	0.47	0.84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.4	0.2	0.2	0.6	0.01	5.0	3.9	3.8	5.3	3.2
SiO <sub>2</sub>		3.1	2.8	3.3	2.8	2.2	51.6	44.2	41.6	47.3	40.5
Co	мг/кг	39.3	41.3	2.9	73.5	27.3	9.0	1.8	0.7	13.5	14.6
Rb		64.0	51.2	66.9	38.1	39.5	88.3	64.8	57.4	140	68.9
Ni		8.2	8.3	8.3	7.4	8.4	53.3	42.5	34.5	77.6	53.0
Cu		—	—	—	—	—	27.7	52.1	56.2	45.6	31.1
Zr		—	—	—	—	—	276	199	151	209	320
MnO		0.01	0.01	0.01	0.02	—	0.12	0.12	0.06	0.13	0.13
Zn		81.0	121.0	68.0	108.0	79.0	81.2	87.1	103	120	62.5
Sr		157	112	350	102	121	182	179	157	136	108
As		—	—	—	—	—	9.1	10.9	9.1	12.3	7.4
Ba		23.5	34.0	10.0	35.0	28.0	543	393	332	432	490
Pb		10.9	9.7	9.5	9.9	10.1	21.8	17.0	17.0	25.1	21.6
Cr		—	—	—	20.6	—	93.1	91.7	67.7	109	103
V		—	—	0.34	—	—	100	80	66	96	89

\* ХЭ – химические элементы.

\*\* 1 – Северо-Западный Крым, 2 – Юго-Западный Крым, 3 – предгорный Крым, 4 – Южный берег Крыма, 5 – Восточный Крым. Примечание. Результаты получены в повторностях, обеспечивающих допустимую погрешность. Прочерк – значения ниже предела обнаружения.

растение может недополучить необходимые питательные элементы из почвы. Такая обратная взаимосвязь прослеживается с подвижной формой бора. При значениях pH < 8 наблюдается повышенное содержание В<sub>подв</sub> (объекты 21, 28, 36).

Ранее показано [14], что на ЮБК отмечается наиболее значительное превышение концентрации меди на листьях винограда, обусловленное интенсивной и длительной обработкой виноградников этого региона медьсодержащими препаратами. Регрессионный анализ связи между содержанием в почве Cu<sub>вал</sub> и Cu<sub>подв</sub> в пяти географических районах Крымского п-ова показал, что при увеличении в почве содержания Cu<sub>вал</sub> меди в 2 раза содержание подвижной формы возрастает в 3.3 раза.

**Результаты транслокации в системе почва–растение.** Для сопряженной геохимической характеристики почвы и виноградного растения исследованы ключевые участки земледелия в пределах крупных современных винодельческих предприятий для четырех районов Крымского п-ова. Пятый район – земли предгорного Крыма – по резерву

пригодных земель и агроклиматическому потенциалу может рассматриваться как один из приоритетных для возрождения винодельческой отрасли. В этой связи исследован виноградник совхоза-завода “Предгорье”, который не обрабатывался с 2010 г. Сопряженное сравнение геохимического состава золы ягод из возрастных виноградников, имеющих развитую корневую систему, с почвами (горизонт В) (табл. 5) указывает на избирательное поглощение химических элементов виноградным растением. Во всех пяти исследуемых районах Крымского п-ова наблюдается акропетальный характер распределения элементов, то есть наибольшая концентрация химических элементов содержится в корнях виноградного растения [14]. В ягодах винограда аккумулируются в первую очередь полезные элементы P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO. Повышенные концентрации таких тяжелых металлов, как Co и Sr, обнаружены во всех районах исследования, а Zn – на ЮБК, в Юго-Западном и Восточном Крыму. Это связано с антропогенным воздействием на почву и виноградники (применение гербицидов и фунгицидов). Концентрация других тяжелых ме-

таллов (Cr, As, V, Cu, Zr), напротив, при больших значениях в почве, оказывается низкой в ягодах винограда.

Проведенная оценка ампелопедологических условий Крымского п-ова показала, что благоприятным биогеохимическим потенциалом обладают территории Юго-Западного и предгорного Крыма, где содержание питательных элементов для растений (CaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O) имеет превышение в 1.5–2 раза по сравнению с другими районами. К самой загрязненной территории, где превышены концентрации тяжелых металлов в верхнем горизонте виноградной почвы по Co, Ni, Zn, Pb, V и Cr, отнесены земли предприятия ООО “Массандра” (ЮБК). По результатам исследования обоснованы критерии, по которым можно идентифицировать географические районы виноградарства Крымского п-ова. В частности, для Юго-Западного Крыма отмечено повышенное содержание в золе ягод винограда Zn, а для Восточного Крыма – Ni. В предгорном Крыму наблюдается высокая концентрация в ягодах MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO, Sr, K<sub>2</sub>O, а также Rb – более чем в 2 раза. В почве и золе ягод Северо-Западного Крыма отмечено более активное накопление Fe и Pb. Для ЮБК геохимическими маркерами территории произрастания винограда выступают такие химические элементы как Cr, Co, Ba. Полученные критерии могут помочь в идентификации географической принадлежности производимой в Крыму винодельческой продукции для защиты ее от фальсификата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первоначально плантажированные почвы за несколько десятилетий функционирования виноградников приобретают значительные различия структурного состояния и водоустойчивости агрегатов в рядах виноградников и в их междурядьях за счет регулярных культиваций (4–6 раз в год). Особенно это отражается в уменьшении доли агрономически ценных агрегатов (0.25–7 мм) на 16% и показателя водоустойчивости агрегатов диаметром от 1 до 5 мм на 26% в почвах междурядий по сравнению с почвами в рядах виноградников. При классификации почв под виноградниками по набору агрофизических показателей определена ведущая роль географического фактора несмотря на различия истории освоения и интенсивности агрогенных трансформаций почв. Особенно это отражается в отношении самобытности почв субсредиземноморья на ЮБК по сравнению с четырьмя другими районами современного виноградарства.

При сопоставлении геохимических особенностей почв из трех основных районов античного виноградарства Крыма (на северо-западе, юго-западе полуострова и на Керченском п-ове) уста-

новлено, что в постагрогенном горизонте наибольшие различия определялись содержанием таких макроэлементов, как Ca, Al, Si, Mg и K, а среди микроэлементов – содержанием Sr, Rb, As и Pb.

Сравнение почв под современными виноградниками по совокупности 18 диагностических элементов и оксидов показало принципиальное отличие геохимической обстановки в пяти географических районах Крыма, что обусловлено территориальными различиями генезиса и особенностей почв, которые потенциально могут сказываться на качестве виноматериалов, получаемых в этих регионах. Наиболее благоприятным биогеохимическим потенциалом обладают почвы Юго-Западного и предгорного Крыма, для которых установлено превышение в 1.5–2 раза по сравнению с другими районами содержания ряда питательных элементов для растений (Ca, P, K). Анализ причин геохимических различий почв из основных районов виноградарства, которые установлены путем иерархической классификации объектов изучения, показал, что особенности почв под виноградниками ЮБК диагностируют такие химические элементы, как Cr, Co, Ba.

Потенциал почвенного и климатического разнообразия территории Крымского п-ова (51 почвенный вид почв в составе 17 генетических групп, согласно Классификации и диагностике почв СССР [19, с. 17], и 20 агроклиматических районов) создает перспективы для дальнейших исследований – применения ампелопедологического подхода для обоснования агропроизводственных групп почв, которые могут обеспечить получение высококачественной продукции с яркой индивидуальностью, и формирования широкого спектра терруаров для всего региона.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят д. ист. н. Т.Н. Смекалову и сотрудников ее группы за помощь в организации исследований в исторических районах виноградарства.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица S1. Содержание макроагрегатов и показатели структурного состояния почв.

Таблица S2. Геохимические особенности почв (горизонтов A и AB) в исторических и современных районах виноградарства.

Таблица S3. Результаты валового анализа залежных почв (горизонт A) из районов античного виноградарства Крыма.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агаджанова Н.В., Изосимова Ю.Г., Костенко И.В., Красильников П.В. Индикаторы почвообразовательных процессов в красноцветных глинистых почвах заповедника мыс Мартьян, южный Крым // Почвоведение. 2021. № 1. С. 3–16.
2. Акимцев В.В. Почвы и качество вин // Почвоведение. 1950. № 5. С. 296–302.
3. Андрианов П.И. О прочности почвенного комка и методах ее определения // Почвоведение. 1947. № 2. С. 96–101.
4. Борисов А.В., Коробов Д.С. Древнее и средневековое земледелие в Кисловодской котловине: итоги почвенно-археологических исследований. М.: Таус, 2013. 272 с.
5. Винокуров Н.И. Виноградарство и виноделие античных государств Северного Причерноморья // Боспорские исследования. Симферополь–Керчь: АДФУ-Украина, 2007. 456 с.
6. Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т. Загрязнение тяжелыми металлами. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. 306 с.
7. Ганцев В.К. Производственные мощности средневековых скальных виноградодавлен юго-западного Крыма // Ученые записки Крымского федерального ун-та им. В.И. Вернадского. Исторические науки. 2021. Т. 7 (73). № 2. С. 53–65.
8. Дьяков В.Н. Древняя Таврика до римской оккупации // Вестник древней истории. 1939. № 3. С. 72–86.
9. Иванченко В.И., Тимофеев Р.Г., Баранова Н.В. Оценка агроэкологических ресурсов местности в контексте эффективности размещения сортов винограда // Виноградарство и виноделие. 2009. № 39. С. 35–38.
10. Калинин П.И., Алексеев А.О. Геохимическая характеристика лёссово-почвенных комплексов Терско-Кумской равнины и Азово-Кубанской низменности // Почвоведение. 2011. № 12. С. 1436–1453.
11. Кирилюк В.П. Микроэлементы в компонентах биосферы Молдовы. Ch: Pontos, 2006. 156 с.
12. Лисецкий Ф.Н., Маринина О.А., Бурак Ж.А. Геоархеологические исследования исторических ландшафтов Крыма. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2017. 432 с.
13. Лисецкий Ф.Н., Смекалова Т.Н., Маринина О.А. Биогеохимические особенности разновременных залежей в степной зоне // Сибирский экологический журнал. 2016. № 3. С. 436–448. <https://doi.org/10.15372/SEJ20160314>
14. Лопина Е.М., Зеленская Е.Я. Геохимические особенности транслокации элементов в системе “почва-растение” по результатам изучения географических районов виноградарства Крыма // Региональные геосистемы. 2021. Т. 45. № 3. С. 431–440. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2021-45-3-431-440>
15. Негруль А.М., Крылатов А.К. Подбор земель и сортов для виноградников. М.: Колос, 1964. 219 с.
16. Николаенко Г.М. Херсонес Таврический и его хора // Вестник древней истории. 1999. № 1. С. 97–120.
17. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
18. Ревут И.Б. Физика почв. Л.: Колос, 1972. 366 с.
19. Почвы Крымской области. Симферополь: Крым, 1969. 88 с.
20. Республика Крым в цифрах 2020. Статистический сборник. Симферополь, 2021. 226 с.
21. Смекалова Т.Н. Еще раз об античном наделе у мыса Ойрат в Северо-Западном Крыму // Вестник древней истории. 2013. № 2. С. 127–147.
22. Смекалова Т.Н., Кутайсов В.А., Кецо Р.С. Новые данные о хоре Калос Лимена // Проблемы истории, филологии, культуры. 2015. № 3. С. 140–159.
23. Смекалова Т.Н., Терехин Э.А., Пасуманский Е.А., Лисецкий Ф.Н. Использование исторической картографии, данных дистанционного зондирования и ГИС для изучения античного размежевания Херсонеса Таврического // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26. № 4. С. 177–187.
24. Странишевская Е.П., Волков Я.А., Волкова М.В., Матвейкина Е.А., Шадура Н.И., Володин В.А. Система защиты и технологические аспекты производства органического винограда в условиях южного берега Крыма // Магарач. Виноградарство и виноделие. 2020. Т. 22. № 4(114). С. 336–343. <https://doi.org/10.35547/IM.2020.97.47.009>
25. Стржелецкий С.Ф. Клеры Херсонеса Таврического. Симферополь, 1961. 247 с.
26. Чендев Ю.Г. Почвы в окрестностях античного города Китей (Керченский полуостров) // Почвоведение. 2005. № 8. С. 945–954.
27. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 430 с.
28. Янушевич З.В. Культурные растения Северного Причерноморья (палеоботанические исследования). Кишинев: Штиинца, 1986. 91 с.
29. Važon I., Bakić H., Romić M. Soil geochemistry as a component of terroir of the wine-growing station Jazbina, Zagreb // Agriculturae Conspectus Scientificus. 2013. № 78. P. 95–106.
30. Coggins S., Malone B.P., Stockmann U., Possell M., McBratney A.B. Towards meaningful geographical indications: Validating terroirs on a 200 km<sup>2</sup> scale in australia’s lower hunter valley // Geoderma Regional. 2019. V. 16. P. e00209. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00209>
31. Cordova C. Crimea and the Black Sea: An environmental history. London, N.Y.: I. B. Tauris, 2016. 235 p.
32. Ehrenberg A.S.C. The problem of numeracy // The American Statistician. 1981. V. 35(2). P. 67–71.
33. Hill R. Aptitude or adaptation: What lies at the root of terroir? // Geographical J. 2020. V. 186(3). P. 346–350.
34. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports 106. FAO, Rome. 2014. 203 p.
35. Jiménez-Ballesta R., Bravo S., Amorós J.A., Pérez-de-los-Reyes C., García-Pradas J., Sánchez M., García-Navarro F.J. An environmental approach to understanding the expansion of future vineyards: Case study of soil developed on alluvial sediments // Environments. 2021. V. 8(9). P. 96.
36. Jiménez-Ballesta R., Bravo S., Amorós J.A., Pérez-de-los-Reyes C., García-Pradas J., Sánchez M., García-Navarro F.J. Soil genesis and suitability for viticulture in

- zones under Mediterranean environment // *Eurasian Soil Sci.* 2021. V. 54 (8). P. 1152–1160.  
<https://doi.org/10.1134/S106422932108007X>
37. *Korobov D.S., Borisov A.V.* The origins of terraced field agriculture in the Caucasus: new discoveries in the Kislovodsk basin // *Antiquity.* 2013. V. 87 (338). P. 1086–1103.
  38. *Kuzyakov Y., Zamanian K.* Reviews and syntheses: Agropedogenesis – humankind as the sixth soil-forming factor and attractors of agricultural soil degradation // *Biogeosciences.* 2019. V. 16(24). P. 4783–4803.  
<https://doi.org/10.5194/bg-16-4783-2019>
  39. *Lisetskii F.N., Stolba V.F., Pichura V.I.* Late-Holocene palaeoenvironments of Southern Crimea: Soils, soil-climate relationship and human impact // *The Holocene.* 2017. V. 27(12). P. 1859–1875.  
<https://doi.org/10.1177/0959683617708448>
  40. *Lisetskii F., Zelenskaya E., Rodionova M.* Geochemical features of fallow land in ancient plots in the chora of Chersonesos // *Geosciences (Switzerland).* 2018. V. 8(11). P. 410.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences8110410>
  41. *Liu G., Li L., Wu L., Wang G., Zhou Z., Du S.* Determination of soil loss tolerance of an Entisol in Southwest China // *Soil Science Soc. Am. J.* 2009. V. 73(2). P. 412–417.
  42. *Munsell Soil Color Charts: year 2000 revised washable edition.* New Windsor: GretagMacbeth, 2000.
  43. *Navarro F.J., Amorós Ortiz-Villajos J.A., Sánchez Jiménez C.J., Jiménez Ballesta R.* Red soil geochemistry in a semiarid Mediterranean environment and its suitability for vineyards // *Environ. Geochem. Health.* 2011. V. 33 (3). P. 279–289.
  44. *Seguin G.* ‘Terroirs’ and pedology of wine growing // *Experientia.* 1986. V. 42. P. 861–873.  
<https://doi.org/10.1007/bf01941763>
  45. *Shimizu H., Akamatsu F., Kamada A., Koyama K., Iwashita K., Goto-Yamamoto N.* Effects of variety and vintage on the minerals of grape juice from a single vineyard // *J. Food Composition Analysis.* 2022. V. 107. P. 104377.
  46. *Smekalova T.N., Bevan B.W., Chudin A.V., Garipov A.S.* The discovery of an ancient Greek vineyard // *Archaeological Prospection.* 2016. V. 23(1). P. 15–26.
  47. *Taylor G., Pain C.F., Ryan P.J.* *Geology, geomorphology and regolith. Guidelines for surveying soil and land resources.* Melbourne: Csiro Publishing, 2008. P. 45–60.
  48. *Van Leeuwen, C., Barbe, J.-C., Darriet, P., Geffroy O., Gomès E., Guillaumie S., Helwi P. et al.* Recent advancements in understanding the terroir effect on aromas in grapes and wines // *Oeno One.* 2020. V. 54(4). P. 985–1006.
  49. *Van Leeuwen C., Roby J.-P., de Ressaiguier L.* Understanding and managing wine production from different terroirs. In *Proceedings of the 11th International Terroir Congress / Eds G.V. Jones, N. Doran.* Ashland: Southern Oregon University, 2016. P. 388–393.
  50. *White R.E.* The value of soil knowledge in understanding wine terroir // *Frontiers Environ. Sci.* 2020. V. 8. Art. 12.  
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00012>

## Ampelopedological Peculiarities of Geographical Areas of Crimea Viticulture

F. N. Lisetskii<sup>1, 2, \*</sup> and E. Ya. Zelenskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belgorod State National Research University, Belgorod, 308015 Russia

<sup>2</sup>Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

\*e-mail: [liset@bsu.edu.ru](mailto:liset@bsu.edu.ru)

The large landscape diversity of the territory of the Crimean Peninsula, which is formed by 20 agro-climatic regions and 17 genetic soil groups, contributes to the formation of local terroirs for viticulture, which can ensure the creation of a wide range of wine products with organoleptic individuality. The purpose of the study was a comparative analysis of the physicochemical and biogeochemical characteristics of regional soils in three historical and five modern geographical regions of viticulture. A soil genetic and biogeochemical approach has been used to comprehensively study vineyard soils, which has made it possible to identify unique combinations of soil parameters for viticulture areas, which, interacting with local ecological conditions, form key components for applying the concept of terroir at the regional level. Pairwise comparison of the total composition of postagrogenic soils from three regions of ancient viticulture (North-Western, South-Western and Piedmont Crimea) revealed that the greatest differences are noted in the content of such macroelements (oxides) as CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, MnO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, as well as trace elements (Sr, Rb, As). Comparison of grape soils showed that the leading role of the geographical factor was established both in their classification according to agrophysical indicators, and when comparing the content of 18 chemical elements. The soils of the Southwestern and Piedmont Crimea have a favorable biogeochemical potential, since the content of a number of essential elements (Ca, P, K) was found to be 1.5–2 times higher than in other regions. The geochemical features of the vineyard soils of the southern coast of Crimea are diagnosed by such elements as Cr, Co, Ba. Elevated levels of heavy metals such as Cu, Cr, Ni, Pb and V have been found in soils under modern vineyards. The expansion of vineyard areas stimulates the use of the ampelopedological approach to assess the potential of agro-productive soil groups that can provide high-quality products (bouquet of wine) with a bright personality, and the formation of a system of intra-regional terroirs will help identify the geographical origin of wines in order to protect products.

**Keywords:** Haplic Chernozems, Cambisols, terroir, soil biogeochemistry, physical and chemical properties of soil