

Оригинальная научная статья

УДК 504.5: 631.453 (497.11)

<https://doi.org/10.26897/2949-4710-2025-3-4-1-05>



Агроэкологическая оценка базального дыхания почвы склонового агроландшафта Автономного края Воеводина Республики Сербия

Валерия Вячеславовна Габечая, Ирина Викторовна Андреева,
Дмитрий Владимирович Морев, Иван Иванович Васенев, Евгений Борисович Таллер

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ирина Викторовна Андреева,
i.andreeva@rgau-msha.ru

Аннотация

В условиях интенсификации сельского хозяйства оценка экологического состояния почв, особенно в уязвимых агроландшафтах – таких, как склоновые виноградники, приобретает особую актуальность. Целью исследований являлась агроэкологическая оценка функционального состояния почв виноградника интенсивного типа и прилегающих территорий в пределах склоновых катен в горном ландшафте Автономного края Воеводина Республики Сербия на основе базального дыхания. Скорость базального дыхания определялась методом газовой хроматографии, содержание органического вещества – спектрофотометрически, корреляционный анализ применялся для выявления взаимосвязи рассматриваемых показателей. Агроэкологическое состояние почв виноградника, технологической колеи и залежной почвы под луговой растительностью характеризовалось значительной пространственной неоднородностью, которая была детерминирована комплексом разнонаправленно действующих факторов: положением в мезорельефе, агроклиматическими факторами, интенсивностью агрогенной нагрузки. Обнаружены признаки многолетнего периодического эрозионно-аккумулятивного перераспределения мелкозема пахотного горизонта почвы под виноградниками по склонам катен, приводящее к обеднению поверхностных горизонтов органическим веществом до глубины 15 см и его накоплением в горизонте 15-30 см. Наиболее высокая скорость базального дыхания установлена в постагрогенной почве ($0.893 \text{ мкг CO}_2\text{-C г}^{-1}\text{почвы} \cdot \text{ч}^{-1}$) со снижением в почве виноградников в 1.2-2.0 раза. Скорость базального дыхания почвы на склоне южной экспозиции оказалась в 1.2-1.5 раза выше, чем в северной, – вероятно, в силу частичной компенсации негативного влияния плоскостной эрозии более благоприятным температурно-влажностным режимом. Наиболее стрессовые условия для функционирования почвенной микробиоты обнаружены в технологических колеях, где скорость базального дыхания ($0.219 \text{ мкг CO}_2\text{-C} \cdot \text{г}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}$) была в 4.1 раза ниже по сравнению с залежной почвой. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о существенной депрессии почвенной микробиоты в наиболее нарушенных элементах агроландшафта и подчеркивают необходимость адаптации применяемых агротехнологий для склоновых земель. Определение биологической активности почвы, оцениваемой по скорости базального дыхания, полезно в качестве интегрального диагностического параметра как для оценки текущего функционального состояния почвенной экосистемы, так и для прогноза возникновения проблемных экологических ситуаций в результате многолетней эксплуатации склоновых агроландшафтов в будущем.

Ключевые слова

Базальное дыхание, органическое вещество почвы, виноградник, склон, катена, биологическая активность почвы, бурые лесные почвы, Eutric Cambisols, Фрушка Гора, Сербия

Для цитирования

Габечая В.В., Андреева И.В., Морев Д.В. и др. Агроэкологическая оценка базального дыхания почвы склонового ландшафта Автономного края Воеводина Республики Сербия. *Тимирязевский биологический журнал*. 2025;3(4):105. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2025-3-4-1-05>

Research article

<https://doi.org/10.26897/2949-4710-2025-3-4-1-05>



Agroecological assessment of the basal soil respiration in the slope agrolandscape of the Autonomous Province of Vojvodina, Republic of Serbia

Valeriya V. Gabechaya, Irina V. Andreeva, Dmitriy V. Morev,
Ivan I. Vasenev, Evgeniy B. Taller

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russia

Corresponding author: Irina V. Andreeva, i.andreeva@rgau-msha.ru

Abstract

In conditions of intensified agriculture, assessing the ecological status of soils, especially in vulnerable agrolandscapes such as slope vineyards, is becoming increasingly important. This study aimed to perform an agroecological assessment of the functional state of soils in an intensive vineyard and adjacent areas within slope catenas in the mountain landscape of the Autonomous Province of Vojvodina, Republic of Serbia, based on basal soil respiration. Basal respiration rate was determined by gas chromatography, soil organic matter content was measured by spectrophotometry, and correlation analysis was used to identify relationships between the studied parameters. The agroecological state of the vineyard soil, the wheel track soil, and the fallow soil under meadow vegetation was characterized by significant spatial heterogeneity, determined by a complex of multidirectional factors: position in the mesorelief, agroclimatic factors, and the intensity of agrogenic load. Signs of long-term periodic erosion-accumulative redistribution of the topsoil (loamy fine earth) under vineyards along the catena slopes were identified. This leads to the depletion of organic matter in the surface horizons down to 15 cm depth and its accumulation in the 15-30 cm horizon. The highest basal respiration rate was found in the post-agrogenic (fallow) soil ($0.893 \mu\text{g CO}_2\text{-C} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), with a 1.2-2.0-fold decrease in vineyard soils. The basal respiration rate on the south-facing slope was 1.2-1.5 times higher than on the north-facing one, probably due to the partial compensation of the negative impact of sheet erosion by a more favorable thermal-moisture regime. The most stressful conditions for soil microbiota functioning were found in the wheel tracks, where the basal respiration rate ($0.219 \mu\text{g CO}_2\text{-C} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) was 4.1 times lower compared to the fallow soil. Thus, the obtained data indicate a significant depression of soil microbiota in the most disturbed elements of the agrolandscape and underscore the need to adapt applied agrotechnologies for slope lands. Determining soil biological activity, assessed via basal respiration rate, is useful as an integrative diagnostic parameter for both evaluating the current functional state of the soil ecosystem and for forecasting potential environmental problems resulting from the long-term use of slope agrolandscapes in the future.

Keywords

Basal respiration, soil organic matter, vineyard, slope, catena, soil biological activity, brown forest soil, Eutric Cambisols, Fruška Gora, Serbia

For citation

Gabechaya V.V., Andreeva I.V., Morev D.V. et al. Agroecological assessment of the basal soil respiration in the slope agrolandscape of the Autonomous Province of Vojvodina, Republic of Serbia. *Timiryazev Biological Journal*. 2025;3(4):105. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2025-3-4-1-05>

Введение

Introduction

Интенсификация сельскохозяйственного производства, являясь ответом на растущие продовольственные потребности, сопряжена с существенным увеличением нагрузки на почвенные экосистемы. Виноградарство, как одна из наиболее ресурсоемких и экономически значимых отраслей, не является исключением. Почвы винодельческих регионов, формирующие основу концепции

терруара и определяющие уникальные качества конечной продукции, характеризуются повышенной уязвимостью по отношению к процессам деградации, эрозии, к потере биоразнообразия и химическому загрязнению, обусловленному многолетним применением пестицидов и минеральных удобрений [1, 2]. В условиях склонового рельефа, типичного для многих премиальных виноградников, эти риски многократно усиливаются под воздействием эрозионных процессов и пространственной неоднородности факторов среды [3-5]. В данном

контексте мониторинг и оценка экологического состояния почв ампелоценозов приобретают характер императива для обеспечения устойчивого развития виноградарско-винодельческой отрасли. При этом традиционные физико-химические методы анализа зачастую недостаточно оперативно и чутко отражают начальные стадии нарушений почвенного гомеостаза. В связи с этим интегральные биологические показатели, в частности, параметры метаболической активности почвенной микробиоты, рассматриваются как высокочувствительные и информативные индикаторы антропогенного и агрогенного пресса [6].

Базальное дыхание (БД) – скорость выделения CO_2 активным микробным сообществом – является прямым отражением интенсивности метаболических процессов и общего состояния почвенной биоты [7]. БД интегрирует в себе информацию о доступности органического субстрата, условиях аэрации, термическом и водном режимах, а также о наличии стрессовых факторов – таких, как загрязнение пестицидами или механическое уплотнение [8]. Исследование пространственного распределения БД в пределах выраженного мезорельефа территории виноградников позволяет выявить закономерности воздействия как природных (экспозиция, позиция в рельефе), так и антропогенных факторов, на функциональное состояние почвы.

Цель исследований: агроэкологическая оценка состояния почвы виноградника интенсивного типа на основе анализа параметров базального дыхания в различных элементах склоновых катен в районе г. Сремски-Карловцы Республики Сербия. Для достижения данной цели ставились задачи оценить пространственную вариабельность интегральной биологической активности почвы

виноградника и выявить наличие взаимосвязей базального дыхания, содержания в почве органического вещества, положения на склонах разной формы и экспозиции и уровня антропогенной нагрузки на почву.

Методика исследований

Research method

В качестве объекта исследований служила почва склоновых катен южной и северной экспозиции под виноградником интенсивного типа около поселения Добриловац, расположенным в восточной части горной гряды Фрушка Гора Автономного края Воеводина Республики Сербия (рис. 1).

Катенарные участки исследуемого агроландшафта с перепадом высот около 10 м и общей протяженностью 340 м располагались параллельно водораздельной линии и поперек склона водораздела западной экспозиции (рис. 2).

Образцы почвы отбирались на различных элементах мезорельефа: на водораздельной части, склонах южной и северной экспозиции (приводораздельной, транзитной и приподошвенной частях) и подошве склонов согласно схеме, представленной на рисунке 3. На подошве склонов как северной, так и южной экспозиции, а также на водораздельной части располагались технологические колеи, разделяющие виноградник на отдельные клетки. Ряды винограда располагались вдоль линии катен.

На винограднике возрастом 40 лет выращивался местный автохтонный сорт Сила. Применяемые агротехнические мероприятия соответствовали промышленному винограднику интенсивного типа включая вспашку междурядий, применение



Рисунок 1. Картосхема расположения рассматриваемого агроландшафта (QGIS3.34, scale: 1:200000).

Figure 1. Cartographic scheme of the studied agrolandscape location (QGIS3.34, scale: 1:200,000).

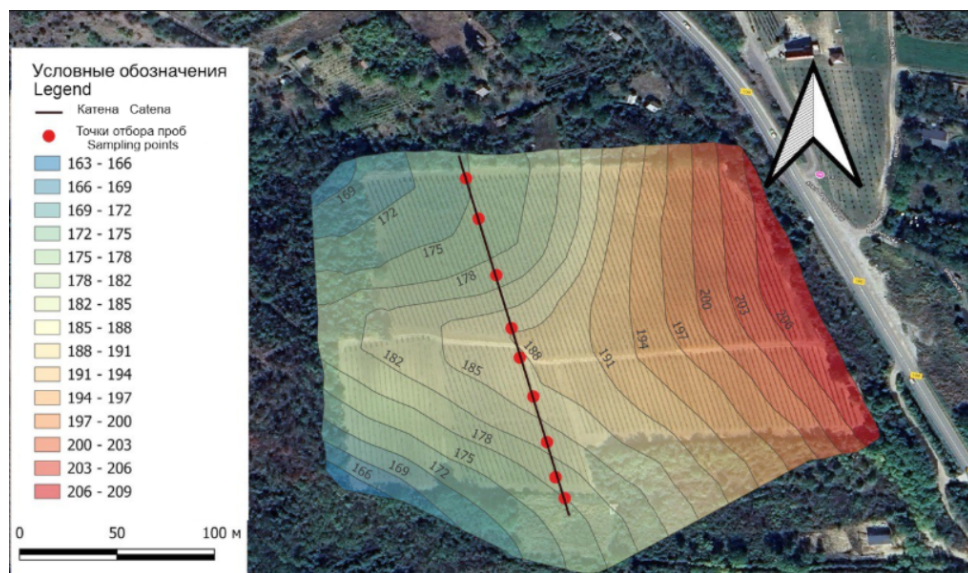


Рисунок 2. Схема расположения точек отбора проб почвы в пределах катен склонов южной и северной экспозиции.

Figure 2. Diagram of soil sampling points within the catenas of southern and northern exposure slopes.

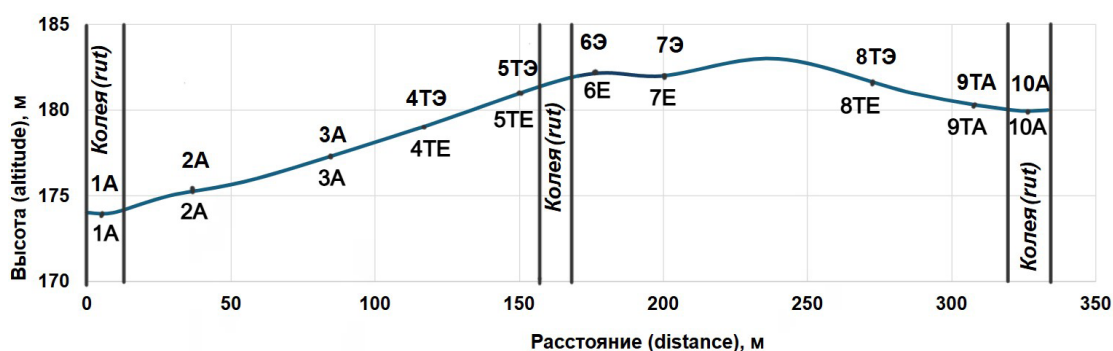


Рисунок 3. Вертикальный профиль катен южной и северной экспозиции склонового агроландшафта.

Figure 3. Vertical profile of the southern and northern exposure catenas in the slope agrolandscape.

минеральных удобрений (N: P: K в соотношении 5:11:24) и средств защиты растений, в том числе гербицидов для подавления сорной растительности в междурядьях. Почва исследуемого участка – Eutric Cambisols согласно классификации FAO (1988). Современный морфогенетический профиль исследуемой почвы наиболее близок к типу коричневых, подтипу поверхностно-луговато-коричневых, роду слитых, виду малогумусных, с признаками многолетнего периодического эрозионно-аккумулятивного перераспределения мелкозема пахотного горизонта по сложно организованному склону крутизной от 3 до 6°.

Отбор почвенных образцов проводили почвенным буром по ГОСТ 17.4.3.01-2017 на различных элементах мезорельефа: верхней элювиальной части и аккумулятивных частей подошв склонов (технологические колеи), а также транзитных частей склонов северной и южной экспозиции под виноградником. Кроме того, отбирались образцы постагрогенной (залежной) почвы

под естественной луговой растительностью в 10 м от исследуемого виноградника, расположенного на выровненном участке основного склона западной экспозиции. Объединенная проба составлялась из 5 точечных проб, отобранных методом «конверта», из горизонтов 0-5, 5-15 и 15-30 см.

Показатель pH в водной вытяжке определяли потенциометрическим методом по ГОСТ 26423-85 на pH-метре Mettler Toledo SevenCompact s220, содержание органического вещества (C_{орг}) – фотометрическим методом по методу И.В. Тюрина, модифицированному по ЦИ-НАО (ГОСТ 26213-91) с окончанием на спектрофотометре Leki UV2107. Базальное дыхание (БД) определяли по методике EN ISO 16072:2011 «Soil quality – Laboratory methods for determination of microbial soil respiration» с инкубацией проб почвы в течение 24 ч при температуре 22±0.5°C в пятикратной повторности. Концентрацию CO₂ определяли с использованием газового хроматографа «Хроматэк Кристалл-2000».

Статистическую обработку данных (критерий Уилкоксона, корреляционный анализ) выполняли в программе RStudio с уровнем значимости $p \leq 0.05$.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Во всех исследуемых точках обнаружена щелочная реакция почвенного раствора с варьированием pH от 7.9 до 9.0 и тенденцией увеличения щелочности с глубиной, что связано с карбонатностью почвообразующих пород и, по всей видимости, подтягиванием капиллярной воды с растворенными солями кальция и магния из более глубоких горизонтов почвы в поверхностные в летний засушливый период (табл. 1).

Анализ накопления и латерального распределения органического вещества в верхних горизонтах почвы в пределах рассматриваемых катен позволяет установить интенсивность и направленность происходящих на склонах эрозионных процессов, способных оказать существенное влияние на пространственное варьирование ее основных агроэкологических показателей, в том числе биологических.

Содержание органического вещества в почве под виноградником варьировалось в широком диапазоне в зависимости от горизонта, положения в мезорельефе и типа землепользования. Максимальное накопление органического вещества установлено в залежной почве под луговой растительностью в горизонтах 0-5 и 15-30 см, или 4.69 и 5.98% соответственно, хотя в почве аккумулятивных частей катен как северной, так и южной экспозиции, а также в водораздельной части, в горизонте 15-30 см, зафиксировано близкое содержание органического вещества на уровне 5.12-5.18% (см. табл. 1). Наименьшее содержание органического вещества отмечалось в слое 0-15 см в почве технологической колеи как на северной, так и на южной части катены (1.30-2.06%), а также на глубине 5-15 см (0.87-1.79%) во всех исследуемых точках на склоне южной экспозиции и залежи.

Наиболее близкой к залежной почве по величине накопления гумуса (2.09-5.13%) была почва в точке 7Э, которая располагалась в ложбинообразном понижении выположенной части водораздела, и в точке 2А аккумулятивной части склона северной экспозиции (2.79-5.18% в зависимости от горизонта). При переходе от элювиальной к транзитным частям склонов показатель Сорг снижался, причем наиболее контрастные различия по показателю Сорг между горизонтами 0-15 и 15-30 см наблюдались в трансэлювиальной части склона южной экспозиции. Также сильное снижение показателя Сорг установлено в поверхностных горизонтах почвы под обеими технологическими колеями – до 1.30-2.06%,

где вследствие постоянного прохода техники происходило уплотнение почвы, нарушались ее водо-воздушный режим и процесс гумусообразования. Вследствие переуплотнения на поверхности почвы в пределах технологической колеи на данном винограднике нами наблюдался процесс создания «микрорусел» для стока воды после периода затяжных дождей (рис. 4).

Следует отметить, что в почве рассматриваемого виноградника распределение органического вещества в верхней части профиля носило инверсионный характер, отличающийся от классического распределения, подразумевающего убывание с глубиной. Согласно характеристике, данной рассматриваемому типу почв М.А. Глазовской [9], вырубка лесов и распашка почв склонов под закладку виноградников в исследуемом регионе сопровождались сильным развитием эрозионных процессов, который в результате длительной эксплуатации плантаций виноградников приводил к смывости верхнего рыхлого гумусового горизонта, и выходом на поверхность глинистого красновато-коричневого метаморфического горизонта. Следствием такого длительного перемещения материала пахотного горизонта по склону и может являться четкая дифференциация профиля расположенной в трансэлювиальной части склона почвы на верхний, частично облегченный и обедненный гумусом слой мощностью 0-15 см, и средний, хорошо сохранившийся метаморфический и обогащенный гумусом слой 15-30 см. Косвенным признаком подобного, сортируемого потоком по склону перераспределения фракций мелкозема, являются наблюдаемые в нижней части склона и в зоне перехода к балочно-гидрографической сети наносы темноокрашенного глинистого мелкозема.

Следует отметить, что описанное выше аномальное распределение органического вещества с накоплением в горизонте 15-30 см регистрировалось во всех частях изучаемых катен за исключением точки 6 на водораздельной части склона, где по всей верхней части профиля 0-30 см содержание органического вещества было низким и составляло 1.42-2.22%. Очевидно, в данной точке до глубины 30 см метаморфический горизонт не обнаруживался, и верхняя часть профиля почвы сформировалась из обедненного гумусом мелкозема, привнесенного из частей водораздела с более высоким гипсометрическим положением.

В залежной почве была установлена наибольшая величина скорости базального дыхания для всех изучаемых горизонтов с максимальным значением в горизонте 0-5 см на уровне $0.893 \text{ мкг CO}_2\text{-C} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ (см. табл. 1). Во всех других частях обеих катен базальное дыхание оказалось в 2-4 раза ниже указанных выше значений в залежи, что соответствует агрогенному характеру землепользования.

Таблица 1. Показатели pH, содержание органического вещества и скорость базального дыхания ($\mu\text{kg CO}_2\text{-C g}^{-1}\text{почвы} \cdot \text{ч}^{-1}$) в почве ампелоценоза на различных элементах склоновых катен.

Table 1. pH values, soil organic matter content and basal respiration rate ($\mu\text{g CO}_2\text{-C} \cdot \text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) in the ampelocenosis at different elements of the slope catenas.

Объект <i>Object</i>	Элемент склоновой катены <i>Slope catena element</i>	Номер точки отбора <i>Sampling point number</i>	Глубина отбора, см <i>Sampling depth, cm</i>	pH, ед. <i>pH, units</i>	Сорг, % <i>SOM, %</i>	Скорость базального дыхания <i>Basal respiration rate</i>
Технологическая колея <i>Wheel track</i>	Аккумулятивная (нижняя) часть катены северной экспозиции <i>Accumulative (lower) part of the northern exposure catena</i>	1А 1А	0-5	8.8 ± 0.1	1.30 ± 0.16	0.290 ± 0.057
			5-15	8.5 ± 0.1	1.48 ± 0.22	0.219 ± 0.055
			15-30	8.9 ± 0.2	4.11 ± 0.57	0.234 ± 0.097
Виноградник <i>Vineyard</i>	Аккумулятивная (нижняя) часть катены северной экспозиции <i>Accumulative (lower) part of the northern exposure catena</i>	2А 2А	0-5	8.3 ± 0.1	3.08 ± 0.40	0.414 ± 0.033
			5-15	8.4 ± 0.1	2.79 ± 0.42	0.366 ± 0.010
			15-30	8.4 ± 0.1	5.18 ± 0.82	0.422 ± 0.026
Виноградник <i>Vineyard</i>	Трансаккумулятивная (приподошвенная) часть катены северной экспозиции <i>Transaccumulative (footslope) part of the northern exposure catena</i>	3ТА 3ТА	0-5	8.9 ± 0.2	2.39 ± 0.36	0.496 ± 0.063
			5-15	8.9 ± 0.1	3.96 ± 0.44	0.342 ± 0.013
			15-30	8.9 ± 0.1	4.99 ± 0.65	0.325 ± 0.060
Виноградник <i>Vineyard</i>	Трансэлювиальная часть катены северной экспозиции <i>Transeluvial part of the northern exposure catena</i>	4ТЭ 4ТЕ	0-5	8.6 ± 0.1	1.67 ± 0.18	0.450 ± 0.078
			5-15	8.7 ± 0.1	2.61 ± 0.31	0.405 ± 0.037
			15-30	8.6 ± 0.1	4.97 ± 0.69	0.339 ± 0.056
Виноградник <i>Vineyard</i>	Трансэлювиальная (приводораздельная) часть катены северной экспозиции <i>Transeluvial (upper slope) part of the northern exposure catena</i>	5ТЭ 5ТЕ	0-5	8.6 ± 0.2	1.34 ± 0.16	0.374 ± 0.039
			5-15	8.7 ± 0.1	1.26 ± 0.20	0.283 ± 0.028
			15-30	8.4 ± 0.1	3.66 ± 0.51	0.260 ± 0.024
Виноградник <i>Vineyard</i>	Элювиальная (водораздельная) часть катены <i>Eluvial (watershed) part of the catena</i>	6Э 6Е	0-5	8.6 ± 0.2	2.22 ± 0.24	0.674 ± 0.045
			5-15	7.9 ± 0.1	2.05 ± 0.25	0.669 ± 0.188
			15-30	8.3 ± 0.1	1.42 ± 0.18	0.554 ± 0.093
		7Э 7Е	0-5	8.8 ± 0.2	3.95 ± 0.59	0.808 ± 0.035
			5-15	8.8 ± 0.1	2.09 ± 0.27	0.529 ± 0.119
			15-30	9.0 ± 0.2	5.13 ± 0.77	0.555 ± 0.169
Виноградник <i>Vineyard</i>	Трансэлювиальная часть катены южной экспозиции <i>Transeluvial part of the southern exposure catena</i>	8ТЭ 8ТЕ	0-5	8.7 ± 0.1	1.52 ± 0.20	0.426 ± 0.026
			5-15	8.4 ± 0.1	0.87 ± 0.10	0.424 ± 0.062
			15-30	8.6 ± 0.1	4.17 ± 0.63	0.548 ± 0.042

Объект <i>Object</i>	Элемент склоновой катены <i>Slope catena element</i>	Номер точки отбора <i>Sampling point number</i>	Глубина отбора, см <i>Sampling depth, cm</i>	pH, ед. <i>pH, units</i>	Сорг, % <i>SOM, %</i>	Скорость базального дыхания <i>Basal respiration rate</i>
Виноградник <i>Vineyard</i>	Трансаккумулятивная (приподошвенная) часть катены южной экспозиции <i>Transaccumulative (footslope) part of the southern exposure catena</i>	9ТА 9ТА	0-5	8.0 ± 0.1	2.89 ± 0.38	0.628 ± 0.029
			5-15	8.2 ± 0.1	1.79 ± 0.25	0.627 ± 0.157
			15-30	8.5 ± 0.1	4.98 ± 0.65	0.485 ± 0.132
Технологическая колея <i>Wheel track</i>	Аккумулятивная (нижняя) часть катены южной экспозиции <i>Accumulative (lower) part of the southern exposure catena</i>	10А 10А	0-5	8.7 ± 0.1	2.06 ± 0.25	0.408 ± 0.026
			5-15	8.7 ± 0.2	1.68 ± 0.18	0.510 ± 0.037
			15-30	8.6 ± 0.1	5.12 ± 0.72	0.515 ± 0.018
Залежь под луговой растительностью <i>Fallow under meadow vegetation</i>	Трансэлювиальная часть основного склона западной экспозиции <i>Transeluvial part of the main western exposure slope</i>	11ТЭ 11ТЕ	0-5	8.7 ± 0.1	4.69 ± 0.56	0.893 ± 0.098
			5-15	8.7 ± 0.1	1.41 ± 0.16	0.695 ± 0.124
			15-30	8.7 ± 0.2	5.98 ± 0.90	0.723 ± 0.231



Рисунок 4. Мелкоструйчатый размыв почвы на технологической колее виноградника в Автономном крае Воеводина Республики Сербия после продолжительных ливневых осадков.

Figure 4. Fine-stream soil erosion on a wheel track in the vineyard of the Autonomous Province of Vojvodina, Republic of Serbia, following prolonged heavy rainfall.

Несмотря на различия между исследуемыми горизонтами почвы по содержанию органического вещества, статистически достоверной зависимости между этим показателем и биологической активностью почвы, определяемой по показателю базального дыхания, обнаружено не было. В то же время между склоном северной и южной экспозиции

в почве под виноградными насаждениями наблюдались существенные отличия по величине базального дыхания.

Как в транзитной, так и в трансаккумулятивной и аккумулятивной частях склона южной экспозиции, скорость базального дыхания была в 1.2-1.5 раза выше по сравнению с аналогичными

показателями на склоне северной экспозиции (см. табл. 1, рис. 5) вследствие прежде всего более благоприятного температурного режима. По той же причине наибольшие показатели БД почвы наблюдались в элювиальной (водораздельной) части склона, которые в поверхностном горизонте достигали значений 0.674 и 0.808 мкг $\text{CO}_2\text{-C} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ в точках 6Э и 7Э соответственно (см. табл. 1). В почве точки 7Э создавались более благоприятные условия как для гумусонакопления, так и для биологической активности, – очевидно, вследствие ее нахождения в ложбинообразном понижении на водораздельной части в условиях благоприятного температурно-влажностного режима почвы.

В транзитных частях обеих катен показатели БД почвы в сравнении с водоразделом снижались в 1.4-1.6 раза, причем если на южном склоне это затрагивало преимущественно только горизонты 0-5 и 5-15 см, то на северном склоне – все изучаемые горизонты почвы. Это связано с тем, что в данных частях склона процессы переноса материала выражены особенно сильно, а дополнительная механическая обработка почвы в междурядьях винограда усугубляла эти негативные проявления.

Как правило, скорость базального дыхания убывала с глубиной, что связано с распределением органического вещества по профилю почвы. Однако в почве транзитного склона южной экспозиции максимальное значение БД было отмечено в горизонте 15-30 см (0.548 против 0.424-0.426 мкг $\text{CO}_2\text{-C} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ в вышележащих горизонтах), что может объясняться более благоприятным водным режимом на фоне высокой теплообеспеченности.

В почве трансаккумулятивных (приподошвенных) и аккумулятивных частей склонов скорость БД возрастала по сравнению с соответствующими транзитными элементами склонов, но все же была ниже, чем в элювиальных.

Самые низкие показатели скорости БД зафиксированы во всех рассматриваемых горизонтах почвы технологической колеи на подошве склона северной экспозиции, составив 0.219-0.290 мкг $\text{CO}_2\text{-C} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ (см. табл. 1, рис. 5), что связано с воздействием сельскохозяйственной техники и полным отсутствием напочвенного растительного покрова. В результате показатель БД здесь оказался более чем в 4 раза ниже значения для залежной почвы. Почва технологической колеи, расположенной в аналогичном элементе рельефа, но с южной стороны склона, характеризовалась в 1.4-2.3 раза более высокими показателями БД, хотя интенсивность антропогенной нагрузки здесь была схожей.

Результаты оценки достоверности взаимосвязи скорости БД и позиции в мезорельефе, визуализированные на рисунке 6а для южного склона, демонстрируют статистически значимые различия ($p < 0.05$) по рассматриваемому показателю между элювиальным (автономным) и трансэлювиальными элементами катены ($p < 0.001$), а также между трансэлювиальным и трансаккумулятивными элементами ($p = 0.003$).

Еще более отчетливые различия выявлены в пространственном распределении БД в мезорельефе для северного склона (рис. 6б). Статистический анализ подтвердил достоверность различий ($p < 0.05$) между автономным и трансэлювиальными ($p < 0.001$), а также между автономным и трансаккумулятивными ($p < 0.001$) элементами рельефа.

Таким образом, в обеих рассматриваемых катенах наблюдалось статистически значимое снижение микробиологической активности почвы, определяемое по величине БД, от элювиальных элементов мезорельефа к трансэлювиальным и аккумулятивным.

Статистический анализ по критерию Уилкоксона в разрезе укрупненных объектов

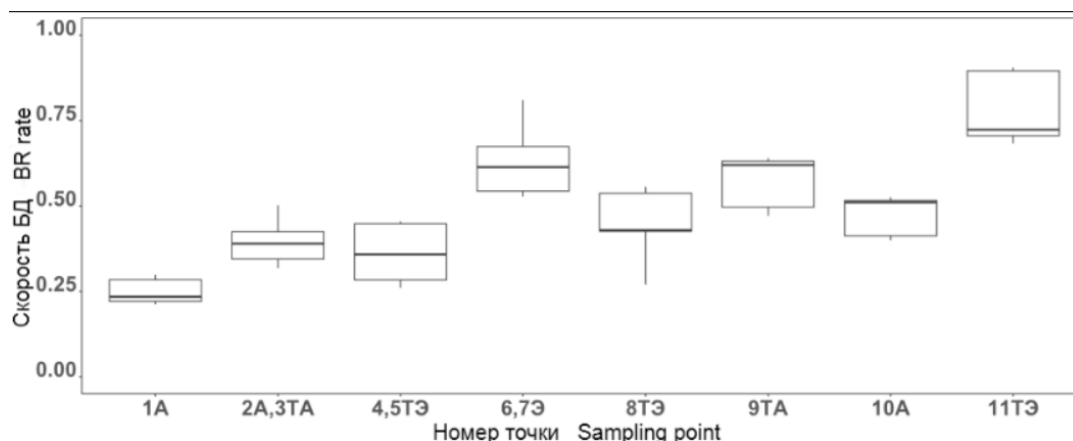


Рисунок 5. Зависимость средней скорости базального дыхания (мкг $\text{CO}_2\text{-C} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$) почвы от элемента мезорельефа.

Figure 5. Relationship between the mean soil basal respiration rate ($\mu\text{g CO}_2\text{-C} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$) and the mesorelief element.

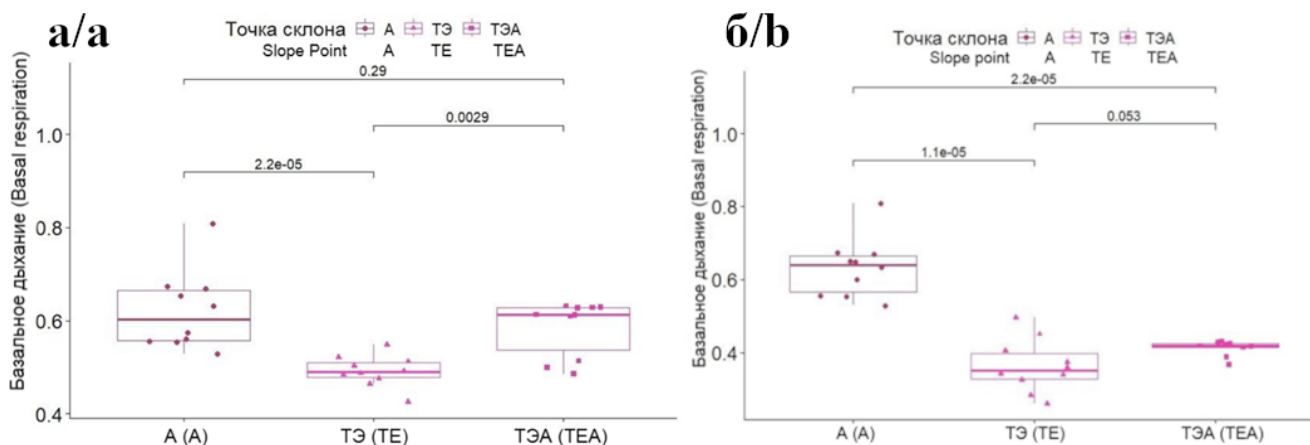


Рисунок 6. Зависимость скорости базального дыхания (мкг CO₂-C г⁻¹ почвы · ч⁻¹) в почве ампелоценоза от элемента рельефа на склоне южной (а) и северной (б) экспозиции (А – автономная (элювиальная) часть склона, ТЭ – трансэлювиальная (транзитная) часть склона, ТЭА – трансэлювиально-аккумулятивная часть склона).

Figure 6. Relationship between the basal respiration rate ($\mu\text{g CO}_2\text{-C}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) in the ampelocenos soil and the relief element on the southern (a) and northern (b) exposure slopes (A – autonomous (eluvial) slope part, TE – transeluvial (transit) slope part, TEA – transaccumulative slope part).

исследования убедительно подтвердил достоверность различий между большинством исследуемых объектов, расположенных в разных частях склонов и имеющих различный режим использования (табл. 2).

Отсутствие достоверных отличий было установлено лишь между показателями БД для южного склона и прилегающей к нему технологической колеи ($p = 0.097$). Это косвенно свидетельствует о том, что на склоне южной экспозиции особенности микроклиматических условий, и прежде всего

благоприятного температурного режима, оказывают более выраженное влияние на биологическую активность почвы по сравнению с агрогенными факторами, в какой-то степени нивелируя негативное воздействие последних.

Рельеф является одним из важнейших компонентов ландшафта, определяя основные закономерности его функционирования и устойчивость в целом. Количественные (крутизна, длина склона) и качественные (форма и экспозиция склона) характеристики мезорельефа относятся к основным

Таблица 2. Результаты сравнения (p-level) скорости базального дыхания в почве в зависимости от элемента мезорельефа и типа землепользования по критерию Уилкоксона.

Table 2. Wilcoxon test results for differences in soil basal respiration rate as a function of mesorelief element and land use type (p-value).

Объекты исследования <i>Research objects</i>	Технологическая колея (север) <i>Wheel track (north)</i>	Технологическая колея (юг) <i>Wheel track (south)</i>	Залежь <i>Fallow</i>	Склон северной экспозиции <i>North-facing slope</i>	Склон южной экспозиции <i>South-facing slope</i>
Технологическая колея (юг) <i>Wheel track (south)</i>	< 0.001				
Залежь <i>Fallow</i>	< 0.001	< 0.001			
Склон северной экспозиции <i>North-facing slope</i>	< 0.001	< 0.001	< 0.001		
Склон южной экспозиции <i>South-facing slope</i>	< 0.001	0.097	< 0.001	< 0.001	
Водораздел <i>Watershed</i>	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.009

диагностическим параметрам в системе агроэкологического мониторинга [10]. Мезорельеф выполняет важные структурно-экологические функции, являясь фактором перераспределения агроклиматических ресурсов и формирования микроклимата, каркасом геохимического ландшафта, определяющим направленность и интенсивность геохимических процессов, а также фактором пространственной неоднородности почвенного покрова [11, 12].

Условия функционирования ландшафтов резко изменяются под воздействием как природных, так и антропогенных процессов. Результаты наших исследований выявили различные эффекты комбинаторного воздействия природных геоморфологических и агрогенных факторов на экологическое состояние почвенной микробиоты агроландшафта виноградника и прилегающих к нему территорий:

1. *Положение в мезорельефе.* Элювиальные элементы склона, характеризующиеся благоприятным температурным режимом, хорошим дренажом и аэрацией, способны поддерживать более высокую микробиологическую активность, особенно после дождей, когда достаточное количество доступной влаги снимает главный лимитирующий фактор на водораздельных участках. Об этом свидетельствует усиление активности почвенной микробиоты в точке 8Э, расположенной на водораздельном участке в ложбинообразном понижении, в условиях достаточного количества влаги. В точке 6, несмотря на отмеченное выше низкое содержание органического вещества, биологическая активность тем не менее поддерживалась на достаточно высоком уровне относительно постагрогенной почвы.

Транзитные элементы агроландшафта характеризовались самыми низкими показателями БД в пределах действующего виноградника, возможно, вследствие склоновых эрозионных процессов. На общую деградированность почвы на этих участках указывало низкое содержание органического вещества в поверхностных горизонтах. При этом в горизонте 15-30 см даже на транзитных участках величина БД находилась на уровне элювиальных и аккумулятивных элементов склона, – по-видимому, вследствие отсутствия вовлеченности этого слоя в эрозионные процессы, более высокого содержания гумуса и благоприятных условий увлажнения.

2. *Морфология и экспозиция склона.* Склон северной экспозиции имел большую крутизну и протяженность, тогда как южный был более пологим и менее протяженным. Судя по содержанию органического вещества, в транзитных трансэлювиальных и трансаккумулятивных частях склона северной экспозиции создавались более благоприятные условия гумусонакопления по сравнению с южным склоном, в котором повышенные температуры способствовали не только более интенсивному смыву на транзитной части склона, но и ускоренной минерализации

органического вещества. На северном склоне вогнутой формы наиболее сильно деграционные процессы проявились в верхней (приводораздельной) части трансэлювиального элемента, а на южном склоне – в средней части трансэлювиального элемента мезорельефа.

Выявленные достоверные различия в скорости базального дыхания на склонах южной и северной экспозиции обусловлены комплексом взаимосвязанных факторов, но главный из них – неравномерное поступление солнечной энергии. Южный склон, получающий большее ее количество, демонстрировал более высокую биологическую активность почвы, чем северный, где дефицит тепла и избыточное увлажнение создавали менее благоприятные условия для микроорганизмов. В результате даже в обедненной Сорг почве верхних горизонтов транзитного участка склона южной экспозиции биологическая активность была на уровне аналогичной позиции на северном склоне. Необходимо отметить силу проявления данного фактора даже в условиях схожей интенсивной агрогенной нагрузки на почву в пределах технологической колеи, биологическая активность которой на южной подошве склона была на 30% выше, чем на северной.

3. *Агрогенная нагрузка.* Влияние совокупности агротехнологических приемов на винограднике хорошо иллюстрирует сравнение показателей микробиологической активности почвы в рядах винограда и в постагрогенной почве под луговым биоценозом. Общее снижение скорости базального дыхания в 1.2-2.0 раза отмечалось для всех точек в пределах виноградника по сравнению с залежью независимо от позиции в мезорельефе, что отмечалось многими авторами [13, 14], причем в нашей работе это были не только почвы под виноградными насаждениями, но и прилегающие технологические колеи, которые используются для перемещения техники и других хозяйственных целей. На неблагоприятные физические свойства почв в результате многократных проходов техники на виноградниках указывали Capello et al. [15].

Величина базального дыхания в поверхностных горизонтах технологической колеи, расположенной на подошве северного склона катены, была самой низкой среди всех изученных участков. При этом достоверных различий по величине БД в почве технологической колеи, трансэлювиального и трансаккумулятивного элементов склона южной экспозиции в отличие от северной обнаружено не было, что указывает на то, что в пределах данного склона благоприятные агроклиматические условия сгладили негативные проявления агрогенной нагрузки на почвенную микробиоту. Это можно рассматривать как проявление известного эффекта частичного замещения (компенсации) экологических факторов, когда один или несколько

благоприятных факторов окружающей среды ослабляют негативное воздействие стрессового (лимитирующего) фактора, что является определенным стабилизирующим механизмом в агроэкосистемах. В то же время необходимо отметить, что в случае продолжительного воздействия агрогенного фактора на ампелоэко систему (интенсивная механическая обработка, пестициды, подавление биоразнообразия и т.д.) компенсаторные способности почвы, поддерживаемые климатическим фактором, могут быть исчерпаны, что приведет к резкому усилению деградационных процессов с трудноисправимыми последствиями.

Таким образом, при проведении агроэкологического мониторинга показатель базального дыхания будет полезен в качестве интегрального диагностического параметра как для оценки текущего функционального состояния почвенной экосистемы, так и для вероятности возникновения проблемных экологических ситуаций в результате многолетней эксплуатации склоновых агроландшафтов в будущем.

Выводы

Conclusions

1. Агроэкологическое состояние луговато-коричневой почвы виноградника интенсивного типа в условиях горного ландшафта региона Фрушка Гора Автономного края Воеводина Республики Сербия характеризовалось значительной пространственной неоднородностью, обусловленной

разнонаправленным сочетанием природных эдафических, орографических и антропогенных факторов. Обнаружено аномальное распределение органического вещества в верхней части почвенного профиля с обеднением горизонта 0-15 см и накоплением в горизонте 15-30 см, связанное с периодическим эрозионно-аккумулятивным перераспределением мелкозема пахотного горизонта по склонам длительно эксплуатируемого агроландшафта под виноградником.

2. Интегральная биологическая активность почвы под виноградными насаждениями, оцениваемая по скорости базального дыхания, во всех элементах мезорельефа снизилась в 1.2-2.0 раза по сравнению с залежной почвой под естественной луговой растительностью. Скорость базального дыхания почвы на склоне южной экспозиции оказалась в 1.2-1.5 раза выше, чем в северной, вероятно, в силу частичной компенсации поверхностных эрозионных процессов более благоприятными агроклиматическими условиями.

3. Максимальное снижение скорости базального дыхания (в 4.1 раза относительно залежной почвы) зафиксировано в наиболее нарушенных элементах рассматриваемого агроландшафта – технологических колеях, где комплексное воздействие механического уплотнения, переувлажнения, отсутствия напочвенного растительного покрова и низкой гумусированности создавало стрессовые условия для функционирования почвенной микробиоты.

Список источников

1. Visconti F., López R., Olego M.A. The Health of Vineyard Soils: Towards a Sustainable Viticulture. *Horticulturae*. 2024;10(2):154. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020154>
2. 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.
3. Pijl A., Wang W., Straffelini E., Tarolli P. Soil and Water Conservation in Terraced and Non-terraced Cultivations a Massive Comparison of 50 Vineyards. *Land Degradation & Development*. 2022;33(4):596-610. <https://doi.org/10.1002/ldr.4170>
4. Prosdocimi M., Cerdà A., Tarolli P. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review. *Catena*. 2016;141:1-21. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.010>
5. Unamunzaga O., Besga G., Castellón A. et al. Spatial and Vertical Analysis of Soil Properties

References

1. Visconti F., López R., Olego M.A. The Health of Vineyard Soils: Towards a Sustainable Viticulture. *Horticulturae*. 2024;10(2):154. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020154>
2. Andreeva I.V., Gabechaya V.V., Morev D.V. et al. Ecological and Geochemical Assessment of Heavy Metal Accumulation in Soil of Different-Aged Ampelocoenoses in the Slope Landscape of the Fruška Gora Mountain Range, Republic of Serbia. *Timiryazev Biological Journal*. 2023;1(3):13-28. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-3-13-28>
3. Pijl A., Wang W., Straffelini E., Tarolli P. Soil and Water Conservation in Terraced and Non-terraced Cultivations a Massive Comparison of 50 Vineyards. *Land Degradation & Development*. 2022;33(4):596-610. <https://doi.org/10.1002/ldr.4170>
4. Prosdocimi M., Cerdà A., Tarolli P. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review. *Catena*. 2016;141:1-21. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.010>
5. Unamunzaga O., Besga G., Castellón A. et al. Spatial and Vertical Analysis of Soil Properties

- in a Mediterranean Vineyard Soil. *Soil Use and Management*. 2014;30(2):285-296. <https://doi.org/10.1111/sum.12110>
6. Andrés P., Doblas-Miranda E., Silva-Sánchez A. et al. Physical, Chemical, and Biological Indicators of Soil Quality in Mediterranean Vineyards under Contrasting Farming Schemes. *Agronomy*. 2022;12(11):2643. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112643>
 7. Amaral H., Ozinaldo J., Sena A. et al. Carbono e respiração microbiana do solo em videira convencional, orgânica e em comparação com floresta adjacente. *Semina: Ciências Agrárias*. 2012;33(2):437-448. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n2p437>
 8. Soler-Rovira P., Fernández-Calviño D., Arias-Estévez M. et al. Respiration Parameters Determined by the ISO-17155 Method as Potential Indicators of Copper Pollution in Vineyard Soils after Long-term Fungicide Treatment. *Science of the total environment*. 2013;447:25-31. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.077>
 9. Глазовская М.А. Почвы зарубежных стран. География и сельскохозяйственное использование. Москва: Мысль, 1975:352.
 10. Andreeva I., Gabechaya V., Morev D. et al. How Landscapes and History Shape Copper in Vineyard Soils: Example of Fruška Gora Region, Serbia. *Land*. 2025;14(1):96. <https://doi.org/10.3390/land14010096>
 11. Яшин И.М., Когут Л.П., Васенев И.И. и др. Генезис и миграция веществ в почвах на двучленных породах ЦЛГПБЗ Тверской области. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2014;(3):5-20.
 12. Тихонова М.В., Таллер Е.Б., Бузылев А.В. Экологическая оценка пространственно-временного варьирования органических веществ в дерново-подзолистой почве на различных вариантах мезорельефа территории городского леса в г. Москва // *Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021:110-113.
 13. Dobrovol'skaya T., Zvyagintsev D., Chernov I. et al. The role of microorganisms in the ecological functions of soils. *Eurasian Soil Science*. 2015;48:959-967. <https://doi.org/10.1134/S1064229315090033>
 14. Габечая В.В., Андреева И.В., Морев Д.В. Сравнительный анализ лимитирующих функционирование почвенного микробиома факторов при культивировании винограда в условиях Южного берега Крыма и Автономного края Воеводина Республики Сербия. *АгроЭкоИнфо*. 2023;(6(60)):9.
 15. Capello G., Biddoccu M., Ferraris S., Cavallo E. Effects of Tractor Passes on Hydrological and Soil Erosion Processes in Tilled and Grassed Vineyards. *Water*. 2019;11(10):2118. <https://doi.org/10.3390/w11102118>
 6. Andrés P., Doblas-Miranda E., Silva-Sánchez A. et al. Physical, Chemical, and Biological Indicators of Soil Quality in Mediterranean Vineyards under Contrasting Farming Schemes. *Agronomy*. 2022;12(11):2643. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112643>
 7. Amaral H., Ozinaldo J., Sena A., Diva S. et al. Carbon and soil microbial respiration in soil from conventional, organic vineyards and comparison with an adjacent forest. *Semina: Ciências Agrárias*. 2012;33(2):437-448. (In Port.) <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n2p437>
 8. Soler-Rovira P., Fernández-Calviño D., Arias-Estévez M. et al. Respiration Parameters Determined by the ISO-17155 Method as Potential Indicators of Copper Pollution in Vineyard Soils after Long-term Fungicide Treatment. *Science of the total environment*. 2013;447:25-31. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.077>
 9. Glazovskaya M.A. *Soils of foreign countries*. Moscow, USSR: Mysl, 1975;352. (In Russ.)
 10. Andreeva I., Gabechaya V., Morev D. et al. How Landscapes and History Shape Copper in Vineyard Soils: Example of Fruška Gora Region, Serbia. *Land*. 2025;14(1):96. <https://doi.org/10.3390/land14010096>
 11. Yashin I.M., Kogut L.P., Vasenev I.I. et al. Genesis and migration of substances in soils formed on binomial parental rocks in central forest biosphere reserve in Tver Region. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2014;(3):5-20. (In Russ.)
 12. Tikhonova M.V., Taller E.B., Buzlylyov A.V. Ecological assessment of spatiotemporal variation of organic substances in soddy podzolic soil on various variants of the mesorelief of the urban forest territory in Moscow. *Vserossiyskaya shkola-seminar, posvyashchennaya pamyati N.F. Reymersa i F.R. Shtilmarka 'Ekologicheskaya bezopasnost v usloviyakh antropogennoy transformatsii prirodnoy sredy'*. April 22-23, 2021. Perm, Russia: Perm State University, 2021:110-113. (In Russ.)
 13. Dobrovol'skaya T., Zvyagintsev D., Chernov I. et al. The role of microorganisms in the ecological functions of soils. *Eurasian Soil Science*. 2015;48:959-967. <https://doi.org/10.1134/S1064229315090033>
 14. Gabechaya V.V., Andreeva I.V., Morev D.V. Comparative analysis of factors limiting the functioning of soil microbiome in grape cultivation in the conditions of the South Coast of Crimea and the Autonomous Province of Vojvodina of the Republic of Serbia. *AgroEcolInfo*. 2023;(6(60)):9. (In Russ.) <https://doi.org/10.51419/202136628>
 15. Capello G., Biddoccu M., Ferraris S., Cavallo E. Effects of Tractor Passes on Hydrological and Soil Erosion Processes in Tilled and Grassed Vineyards. *Water*. 2019;11(10):2118. <https://doi.org/10.3390/w11102118>

Сведения об авторах

Валерия Вячеславовна Габечая, старший преподаватель кафедры экологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: gabechaya@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5621-6308>

Ирина Викторовна Андреева, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры экологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: i.andreeva@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0760-665X>

Дмитрий Владимирович Морев, канд. биол. наук, доцент кафедры экологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: dmorev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2482-1949>

Иван Иванович Васенев, доктор биол. наук, профессор, профессор кафедры экологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: vasenev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9127-9569>

Евгений Борисович Таллер, канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры экологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: etallereb@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8372-2209>

Вклад авторов

В.В. Габечая – методология, выполнение лабораторных анализов, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация, статистическая обработка данных.
И.В. Андреева – концептуализация, методология, проведение полевых исследований, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация.
Д.В. Морев – проведение полевых исследований, визуализация, статистическая обработка данных.
И.И. Васенев – концептуализация, методология.
Е.Б. Таллер – методология, создание черновика рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.10.2025
Одобрена после рецензирования 14.12.2025
Принята к публикации 14.12.2025

Information about the authors

Valeriya V. Gabechaya, Senior Lecturer at the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49; gabechaya@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5621-6308>

Irina V. Andreeva, CSc (Bio), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49; i.andreeva@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0760-665X>

Dmitriy V. Morev, CSc (Bio), Associate Professor at the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49; dmorev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2482-1949>

Ivan I. Vasenev, DSc (Bio), Professor, Professor at the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49; vasenev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9127-9569>

Evgeniy B. Taller, CSc (Ag), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49; etallereb@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8372-2209>

Contribution of the authors

V.V. Gabechaya – methodology, performing laboratory analyses, writing – original draft, writing – review & editing, visualization, statistical processing of results.
I.V. Andreeva – conceptualization, methodology, conducting field research, writing – original draft, writing – review & editing; visualization.
D.V. Morev – conducting field research, visualization, statistical processing of results.
I.I. Vasenev – conceptualization, methodology.
E.B. Taller – methodology, writing – original draft.

Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interests.

The article was submitted to the editorial office October 21, 2025
Approved after reviewing December 14, 2025
Accepted for publication December 14, 2025