

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 634.8:631.459.2:528.7

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-3-202-222

Методика автоматизированной оценки водной эрозии почвы на виноградниках с применением спектральных индексов спутниковых снимков

Виталий Александрович Орлов¹, Алексей Александрович Лукьянов²

^{1, 2}Анапская зональная опытная станция виноградарства и виноделия – филиал Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства и виноделия, Анапа, Российская Федерация

¹vitorl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3337-2970>

²azos@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7317-9150>

Аннотация. Цель: разработка автоматизированного метода оценки водной эрозии почв виноградников на основе спектральных индексов спутниковых снимков для оптимизации почвозащитных мер. **Материалы и методы.** Для оценки потерь почвы применены четыре модели: RUSLE, ORUSCAL, индексная модель и полевые измерения. Индексная модель реализована в среде Google Earth Engine и включает расчет нормализованных спектральных индексов NDVI, BSI и эмпирического индекса эрозии (ELI). Автоматизированное выявление эрозионных форм выполнено с помощью машинного обучения (Random Forest) на основе обучающей выборки из 256 снимков и 1200 размещенных участков. Потери почвы (т/га/год) определяются по шкале от 10 до 74, нормализованной по средним значениям полевых измерений. Учет схемы посадки (вдоль/поперек склона) реализован через понижающий коэффициент (0,85). **Результаты.** Выявлены ключевые факторы водной эрозии: топография склонов (уклоны 5–10°), почвенные характеристики (снижение гумуса ниже 2 %) и климатические условия (интенсивные ливни). Разработана адаптированная методика, включающая динамический С-фактор и учет агротехнических особенностей (схема посадки, возраст кустов). Для снижения эрозии предложены меры: расположение рядов поперек склона (> 5°), террасирование и мониторинг с использованием Sentinel-2. Наибольшую точность показала индексная модель (28,8 т/га/год), тогда как классическая RUSLE (44,5 т/га/год) и ORUSCAL (59,3 т/га/год) демонстрировали завышенные значения из-за ограничений в расчете С-фактора. Интеграция спутниковых данных и машинного обучения позволила автоматизировать распознавание типа эрозии (линейная, плоскостная, нет эрозии) с точностью 89 %. **Выводы.** Исследование подтверждает эффективность сочетания дистанционного мониторинга с адаптированными моделями, что сокращает прогнозные потери почвы на 30–50 %. Методика позволяет сократить трудовые и финансовые затраты на полевые исследования, оперативно выявлять участки с высоким эрозионным риском.

Ключевые слова: водная эрозия почв, виноградники, Sentinel-2, RUSLE, ORUSCAL, GEE (google earth engine), спектральные индексы, ГИС, цифровая модель местности

Финансирование: работа финансировалась в рамках Государственного задания по теме: FGRE-2022-0004.08 «Разработка методов и алгоритмов оценки продуктивности ампелоценозов по агрофизическим, агрохимическим характеристикам почв и морфометрическим параметрам терруаров», регистрационный номер НИОКР: 122050400048-2.

Для цитирования: Орлов В. А., Лукьянов А. А. Методика автоматизированной оценки водной эрозии почвы на виноградниках с применением спектральных индексов спутниковых снимков // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 3. С. 202–222. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-202-222>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

A method for automated evaluation of water erosion of soil in vineyards using spectral indices of satellite imagery

Vitaly A. Orlov¹, Alexey A. Lukyanov²

^{1, 2}Anapa Zonal Experimental Station of Viticulture and Winemaking – branch of the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, Anapa, Russian Federation

¹vitorl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3337-2970>

²azos@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7317-9150>

Abstract. Purpose: to develop an automated method for assessing water erosion of vineyard soils based on spectral indices of satellite images for the optimization of soil conservation measures. **Materials and methods.** Four models: RUSLE, ORUSCAL, an index model, and field measurements were used to assess soil loss. The index model is implemented in the Google Earth Engine environment and includes the calculation of normalized spectral indices NDVI, BSI, and the empirical erosion index (ELI). Automated detection of erosion forms was performed using machine learning (Random Forest) based on a training set of 256 images and 1200 marked plots. Soil loss (t/ha/year) is determined on a scale from 10 to 74, normalized by the average values of field measurements. The planting pattern (along/across the slope) is implemented through a reduction coefficient (0.85). **Results.** Key factors of water erosion: slope topography (slopes of 5–10°), soil characteristics (humus content below 2 %), and climatic conditions (heavy rainfall) were identified. An adapted methodology incorporating a dynamic C-factor and agronomic features (planting pattern, bush age) consideration was developed. The following measures were proposed to reduce erosion: placing rows across the slope (> 5°), terracing, and monitoring using Sentinel-2. The index model demonstrated the highest accuracy (28.8 t/ha/year), while the classical RUSLE (44.5 t/ha/year) and ORUSCAL (59.3 t/ha/year) showed overestimated values due to limitations in the calculation of the C-factor. The integration of satellite data and machine learning made it possible to automate the recognition of erosion types (linear, sheet, no erosion) with an accuracy of 89 %. **Conclusions.** The study confirms the effectiveness of combining remote sensing with adapted models, which reduces predicted soil loss by 30–50 %. This method reduces labor and financial costs for field research and the prompt identification of areas with a high erosion risk.

Keywords: water erosion, vineyards, Sentinel-2, RUSLE, ORUS-CAL, GEE (Google Earth Engine), spectral indices, GIS, digital terrain model

Funding: the work was funded within the framework of the State Assignment on the theme: FGRE-2022-0004.08 “Development of Methods and Algorithms for Assessing the Ampelocenoses Productivity Based on the Soil Agrophysical and Agrochemical Characteristics and the Terroir Morphometric Parameters”, registration number NIOKTR is: 122050400048-2.

For citation: Orlov V. A., Lukyanov A. A. A method for automated evaluation of water erosion of soil in vineyards using spectral indices of satellite imagery. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(3):202–222. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-202-222>.

Введение. Проблеме изучения эрозии почв на виноградниках в южных регионах России на протяжении многих лет уделяется повышенное

внимание. В Краснодарском крае, где значительные территории заняты виноградными насаждениями, проблема эрозии почв приобретает особую остроту. Длительное возделывание виноградников приводит к ухудшению структурного состояния почвы, развитию водной и ветровой эрозий. Эрозионные процессы ведут к снижению плодородия почв, ухудшению их структуры: увеличивается каменистость, возрастает содержание активных карбонатов, уменьшается мощность гумусового слоя [1, 2]. В связи с этим изучение и разработка методов мониторинга эрозии почвы являются важной задачей промышленного виноградарства. В России, как и во других странах с промышленным виноградарством, развиваются исследования, направленные на изучение эрозионных процессов с использованием технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных систем (ГИС). Цифровые методы работы с большими объемами данных позволяют не только оценить текущее состояние почвенного покрова, но и прогнозировать развитие эрозионных процессов на основе ГИС-анализа рельефа, климатических условий и антропогенной нагрузки. Водная эрозия приводит к снижению содержания гумуса и глинистых фракций в почве, что влияет на ее спектральные характеристики и позволяет использовать мультиспектральные данные дистанционного зондирования для распознавания эродированных участков и оценки степени их деградации [3]. В условиях предгорий Кавказа виноградники расположены на участках между горами с уклонами от пологих ($2\text{--}3^\circ$) до покатых ($3\text{--}5^\circ$) и крутых ($5\text{--}10^\circ$). Почвенный покров исследованных участков представлен в основном черноземами южными. Установлено, что эрозия почвы наблюдается на всех участках, но в большей мере на участках с покатыми и крутymi склонами, где смыто до 20 % почвы, а в нижней части склона наблюдается аккумуляция наносов до 30 % [4]. Эрозия и смыв гумуса варьируют в зависимости от уклонов поверхности почвы и географического расположения рядов виноградников.

Важным направлением исследований является также оценка эрозионного потенциала территорий с использованием методов моделирования, таких, как RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Он позволяет моделировать сценарии эрозии на основе изменений в режиме выпадения осадков, методах обработки почвы, свойствах почвы и растительном покрове. Учеными КубГАУ на основе ГИС-технологий, ДДЗ методами RUSLE была проведена оценка эрозии в Кубанском гидрографическом бассейне, выявлены районы с наиболее высокими значениями потерь почвы, которую оценили в 18,1 т/га/год [5]. Развиваются подходы к оценке эрозионной опасности агроландшафтов с использованием геоинформационного моделирования, которые учитывают уклоны местности, экспозицию склонов, что позволяет более точно выделить эрозионно опасные территории [6]. Водная эрозия почвы представляет собой серьезную проблему для виноградарства, особенно в регионах с холмистым рельефом и интенсивными осадками. Виноградники часто подвергаются значительным потерям почвы из-за крутизны склонов, частых обработок и агротехнических методов, которые способствуют разуплотнению поверхностного слоя. Средняя скорость эрозии на виноградниках, измеренная с помощью водосборных площадок, может достигать $77,6 \text{ г/м}^2\cdot\text{ч}$ и составляет 2,4 т/га за один конкретный дождевой/орошаемый период, а средние совокупные потери почвы от всех типов эрозии составляют до 9,3 т/га/год [7, 8]. В условиях изменения климата, когда наблюдаются увеличение частоты экстремальных осадков и продолжительных засух, риск деградации почвы усиливается. Средняя потеря почвы на виноградниках, растущих на разных типах почв, может составлять и более 9,8 т/га/год [9]. Средняя скорость эрозии почв в Европейском Союзе (ЕС) оценивается в 2,45 т/га/год. Примерно на 25 % территории ЕС скорость эрозии превышает рекомендуемый устойчивый порог (2 т/га/год), а более 6 % сельскохозяйственных земель страдают от сильной эрозии (11 т/га/год) [10]. Виноградники часто располагаются на склонах,

что усиливает риски водной эрозии из-за стока осадков. На виноградниках в Италии скорость эрозии может достигать значения 44 т/га/год, что значительно превышает максимальный порог эрозии почвы, установленный в ЕС в размере 1,4 т/га/год [11].

Технологии дистанционного зондирования, ГИС и методы машинного обучения позволяют значительно улучшить оценку факторов эрозии. Например, использование спутниковых снимков высокого разрешения и вегетационных индексов (NDVI) для определения растительного покрова (C-фактор) демонстрирует высокую эффективность в полузасушливых и горных регионах [12, 13]. Кроме того, методы фотограмметрии и лазерного сканирования (LiDAR) обеспечивают детальное изучение процессов почвенной эрозии [14], но необходимо дальнейшее совершенствование подходов при моделировании почвенной эрозии на виноградниках [15].

С помощью спектральных индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation) Index, BSI (Bare Soil Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), TPI (Topographic Position Index), ELI (Erosion Load Index) выявляют участки с повышенной эрозионной деградацией [16]. BSI позволяет идентифицировать открытую почву и признаки плоскостной эрозии, например, при значении $BSI > 0,2$ – участок с высокой вероятностью эрозии, а при значении $< 0,1$ определяет наличие растительного покрова [17]. В композиции с NDVI BSI помогает оценить густоту растительности, что важно при определении устойчивости почвы к водной эрозии. Участки с $NDVI < 0,3$ характеризуются слабой растительностью и соответственно повышенным риском эрозии. NDWI используется для оценки влажности почвы, что также влияет на эрозионные процессы. Значения $NDWI < 0,1$ указывают на низкую влажность и повышенный риск эрозии. TPI помогает выделить овраги и промоины. Значения $TPI > 0,1$ характерны для линейных форм рельефа, подверженных эрозии. Высокие значения ELI ($> 1,5$) указывают на сильную эрозионную нагрузку, на низкий растительный покров ($NDVI < 0,2$),

высокую долю открытой почвы, а низкие значения ELI ($< 0,5$) характерны для участков с хорошим растительным покровом и стабильными почвенными условиями [18]. Использование цифровых моделей рельефа и данных о почвенном составе позволяет повысить точность прогнозирования зон эрозионного риска. В последние годы особое внимание уделяется разработке интегрированных моделей, комбинирующих спутниковые данные и наземные измерения. Геоинформационные системы (ГИС) в сочетании с методами машинного обучения позволяют автоматизировать процесс картирования эрозионных участков, что снижает затраты на полевые исследования и повышает оперативность оценки. Линейная и плоскостная водная эрозия особенно характерна для виноградников на склонах и в районах с неравномерным распределением осадков. Для оценки и прогнозирования водной эрозии почвы широко применяется модель «Универсальное уравнение потери почвы» (RUSLE) и его модификации. Эта модель учитывает факторы эрозии, включая интенсивность осадков (R -фактор), эродированность почв (K -фактор), длину и уклон склона (LS -фактор), методы управления растительным почвенным покровом (C -фактор) и меры по сохранению почвы (P -фактор). Однако их точность во многом зависит от качества входных данных и методов калибровки [19]. Современные ГИС-модели водной эрозии, такие, как SAGA GIS, QGIS и GEE, позволяют проводить комплексный анализ эрозионных процессов на основе пространственных данных и модели. Использование ГИС-подходов позволяет создавать карты риска эрозии почвы, выявлять наиболее уязвимые участки и разрабатывать методы их защиты. Включение данных о рельефе, почвенных характеристиках и спектральных индексах значительно увеличивает точность оценки и прогнозирования эрозионных процессов. В последние годы особое внимание уделяется разработке интегрированных моделей, комбинирующих спутниковые данные и наземные измерения. Например, метод SUM (Surface Uncovering Method), используемый для оценки эрозии на виноградниках,

был усовершенствован в метод ISUM (Improved Surface Uncovering Method), что позволило повысить точность измерений на 14,2–37,8 % [20]. Современные модели, такие, как RUSLE и WEPP (Water Erosion Prediction Project), позволяют учитывать топографические особенности, почвенные характеристики и агротехнические практики для прогноза потерь почвы в результате эрозии.

Цель исследования – разработка автоматизированного метода оценки водной эрозии почв виноградников на основе спектральных индексов спутниковых снимков для оптимизации почвозащитных мер.

Задачи исследования.

1 Изучить цифровые данные топографии (уклон, экспозиция склонов), почвенных характеристик (тип, содержание гумуса) и климатических условий в моделировании эрозионных процессов.

2 Модифицировать классические модели (RUSLE, ORUSCAL) с учетом специфики виноградников (схема посадки, возраст насаждений).

3 Разработать модель на основе комбинации спектральных индексов (NDVI, BSI, ELI).

4 Сравнить точность моделей (RUSLE, ORUSCAL, индексная) с полевыми данными. Оценить расхождение результатов и выявить оптимальный метод для условий виноградников.

Материалы и методы. Исследование проводилось на виноградниках Краснодарского края (участки у п. Веселовка, Темрюкского района) с использованием данных дистанционного зондирования Sentinel-2 за период 2021–2024 гг. Для оценки эрозионных процессов применялись модели: RUSLE (Universal Soil Loss Equation) – стандартная эмпирическая модель и ORUSCAL (Orchard RUSle CALibration) с калибровкой коэффициентов RUSLE по спутниковым данным о виноградниках, выращиваемых на склонах с постоянным уклоном. Для определения участков виноградников с наиболее вероятным формированием эрозионных борозд при высокой

интенсивности дождя мультиспектральные растровые изображения группировались с цифровой моделью местности (ЦММ). GEE (Google Earth Engine) использовалась как основная среда моделирования и анализа эрозионных потерь почвы. В качестве источника использованы открытые данные цифровых коллекций и библиотек (таблица 1).

Таблица 1 – Открытые данные цифровых коллекций и библиотек
Table 1 – Open data from digital collections and libraries

Наименование источника	Тип данных	Назначение в модели	Ссылка
Sentinel-2 SR (HARMONIZED)	Спектральные спутниковые ссылки	Расчет индексов (NDVI, NDWI, BSI, ELI), построение индексной модели эрозии, классификация эрозионных форм	
CHIRPS Daily Precipitation	Климатические данные (осадки)	Расчет <i>R</i> -фактора для моделей RUSLE, ORUS-CAL	
NASADEM HGT	Цифровая модель рельефа	Расчет уклона и LS-фактора (топографического)	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED
OpenLandMap – Soil Texture Class	Почвенные данные	Расчет <i>K</i> -фактора (эродируемость почвы)	
OpenLandMap – Organic Carbon	Почвенные данные	Уточнение <i>K</i> -фактора через содержание органического вещества	
HydroSHEDS Flow Accumulation	Гидрологические данные	Оценка накопления стока для моделей WATEM/SEDEM	
Векторные геометрии	Локальные полигональные и линейные объекты	Определение границ виноградника, обучение моделей по линейной и плоскостной эрозии	Добавлены вручную по данным кадастра и полевых исследований

Дополнительно использовались текстурные признаки для классификации эрозии алгоритмом машинного обучения методом случайного леса (англ. Random Forest). Рассчитывалась плотность эрозионных линий (м/га) для оценки интенсивности процессов. Расчет различий между темпами эрозионно-аккумулятивных процессов проводился вычитанием растров поклеточного расчета потерь по сетке с ячейкой 100 × 100 м. Зоны смыва и

аккумуляции моделировали по интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов методом машинного обучения по мультиспектральным индексам. Точность автоматизированного выявления эрозионных форм была получена при решении задач бинарной классификации: эрозия есть/эрозии нет; распознавание типа эрозии (линейная/плоскостная) на основе методов машинного обучения (Random Forest). Модель была обучена на 1200 размеченных участках и валидирована на отдельной тестовой выборке (30 % данных). Для оценки точности предсказания количественных почвенных потерь (в т/га/год) использовался коэффициент детерминации R^2 .

Результаты и обсуждение. Проведенное исследование подтвердило высокую подверженность виноградников эрозионным процессам в условиях холмистого рельефа. На участке 43 га (п. Веселовка, Темрюкский район) на спутниковом снимке высокого разрешения от 18.11.2021 визуально выявлены эрозионные борозды общей протяженностью ~ 3179 м, средняя длина которых составляет 300 м. Линейная эрозия охватывает $\sim 3,5$ га, или 14,8 % территории виноградника в основном на участках с уклонами 5–7° и южной экспозицией склонов (рисунок 1а).

Для автоматизированного распознавания эрозионных форм методом машинного обучения разработан скрипт на основе обучающей выборки снимков Sentinel 2 с 2021 по 2024 г. При расчете динамического C -фактора, использовался комбинированный индекс из трех индексов – NDVI, BSI, ELI по формуле (1):

$$C\text{-фактор} = 1 - \text{NDVI} \cdot \exp((\text{ELI} - \text{BSI}) / (\text{BSI} + \text{ELI})), \quad (1)$$

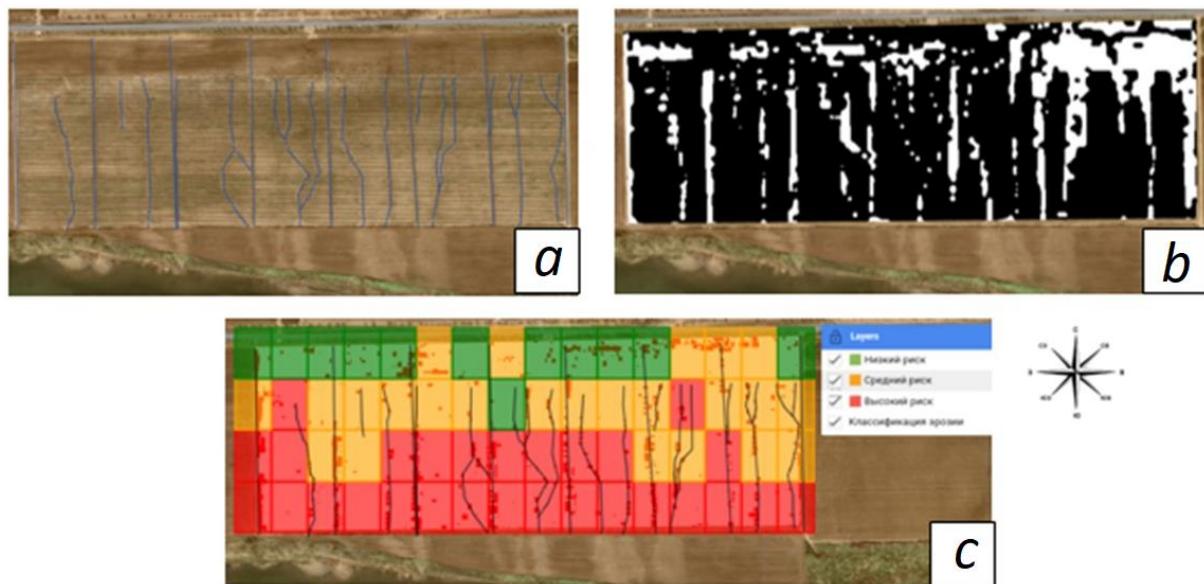
где NDVI – индекс, который оценивает растительность;

BSI – индекс, который оценивает оголенность почвы;

ELI – индекс, который оценивает эрозионную нагрузку.

Остальные индексы не оказали значимого влияния на вариативность C -фактора. В результате машинной обработки 256 снимков Sentinel-2 за четырехлетний период в автоматизированном режиме были выявлены

участки виноградника с линейными и плоскостными видами водной эрозии (рисунок 1*b*). С учетом высот и уклонов весь участок по сетке 100 × 100 м был классифицирован на зоны низкого, среднего и высокого эрозионного риска (рисунок 1*c*).



a – эрозионные борозды, выделенные визуально по RGB космоснимку;
b – программное распознавание плоскостной и линейной эрозии по спектральным индексам спутниковых снимков; *c* – классификация виноградника по зонам эрозионного риска: зеленый – низкий, оранжевый – средний, красный – высокий
a – erosion furrows visually identified by an RGB satellite image; *b* – software recognition of sheet and rill erosion based on spectral indices of satellite images; *c* – vineyard classification by erosion risk zones: green – low, orange – medium, red – high

Рисунок 1 – Эрозионные формы на виноградниках

Figure 1 – Erosion patterns in vineyards

Для классификации участков насаждения с эрозией использован метод машинного обучения Random Forest по обучающей выборке снимков с входными признаками: NDVI, BSI, ELI, буферизации эрозионных линий (2 м) и междурядья (шириной 9 м). Для учета агротехнических особенностей виноградного насаждения введены два специализированных параметра. *P*-фактор (0,2–0,8) учитывает схему посадки: 0,2 – контурная посадка поперек склона, 0,8 – вдоль склона; *AgeFactor* (0,8–1,4) корректирует риск в зависимости от возраста кустов: 1,4 – молодые насаждения (1–3 года), 1,0 – зрелые (4–15 лет), 0,8 – старые (> 15 лет).

В результате автоматизированного анализа многолетних данных дистанционного зондирования с использованием ГИС-моделирования ЦММ установлено, что ключевыми причинами эрозионных процессов на данном винограднике являются: склон 5–7° и его южная экспозиция (приводят к максимальной интенсивности смыва в 40,6 т/га и более); почвенные характеристики (супесчаные черноземы теряют на 80 % больше материала, чем глинистые разновидности при одинаковом уклоне). Особенно критично снижение содержания гумуса ниже 2 %, что увеличивает эрозию на 40 %.

Потеря органической и минеральной части почвы на винограднике была рассчитана по трем моделям: RUSLE, ORUSCAL, Index model и по данным полевых исследований (таблица 2).

Таблица 2 – Потери органической и минеральной части почвы в результате эрозии

Table 2 – Organic and mineral soil component losses due to erosion

Модель	Сред.	Мин.	Макс.	Стандартное отклонение	Сред. потери на кустоместо (4,5 м ²)	Особенность
	т/га/год					
1	2	3	4	5	6	7
RUSLE	44,5	9,2	87,0	19,4	20,0	RUSLE = $R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$. Расчет факторов R (осадковая эрозионная энергия), K (эрориуемость почвы), LS (уклон и длина склона). Использование DEM (цифровой модели высот), использование NDVI для оценки растительности C -фактор и меры по сохранению почвы P -фактор
ORUS-CAL	59,3	10,3	127,3	29,1	26,7	Расширяет RUSLE за счет модификации C -фактор: $C = (1 - NDVI) \cdot (1 + Slope / 10)$. Более чувствительна к расположению кустов на склонах

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

1	2	3	4	5	6	7
Index_model	28,8	10,1	40,6	3,4	8,6 (4,6–22,5)	Комбинация NDVI, BSI, ELI и композиции формул. Преобразуется в шкалу потерь: от 10 до 74 т/га/год. Преимущество – адаптивность под оптические признаки оголенности и деградации. Чувствительна к структуре почвы и схеме посадки
Полевые расчеты потерь	74,0	10	–	–	–	Оценивает потери от линейной эрозии: по длине каналов, типу почвы, уклону, плотности почвы и геометрии промоин (ширина, глубина). Расчет массы и преобразование в т/га с учетом коэффициентов

На основе репрезентативных полевых измерений эрозии на тестовых участках, охватывающих весь диапазон эрозионной активности (от минимальной до максимальной), была установлена эмпирическая зависимость. Минимальное (10 т/га/год) и максимальное (74 т/га/год) значения потерь почвы, полученные в ходе полевых исследований, были использованы в качестве реперных точек для линейного преобразования по формуле (2):

$$\text{Потери_почвы (т/га/год)} = \text{MIN} + (\text{Index_Value} - \text{Index_Min}) \times \\ \times (\text{MAX} - \text{MIN}) / (\text{Index_Max} - \text{Index_Min}), \quad (2)$$

где MIN = 10 т/га/год и MAX = 74 т/га/год – минимальное и максимальное значения полевых измерений;

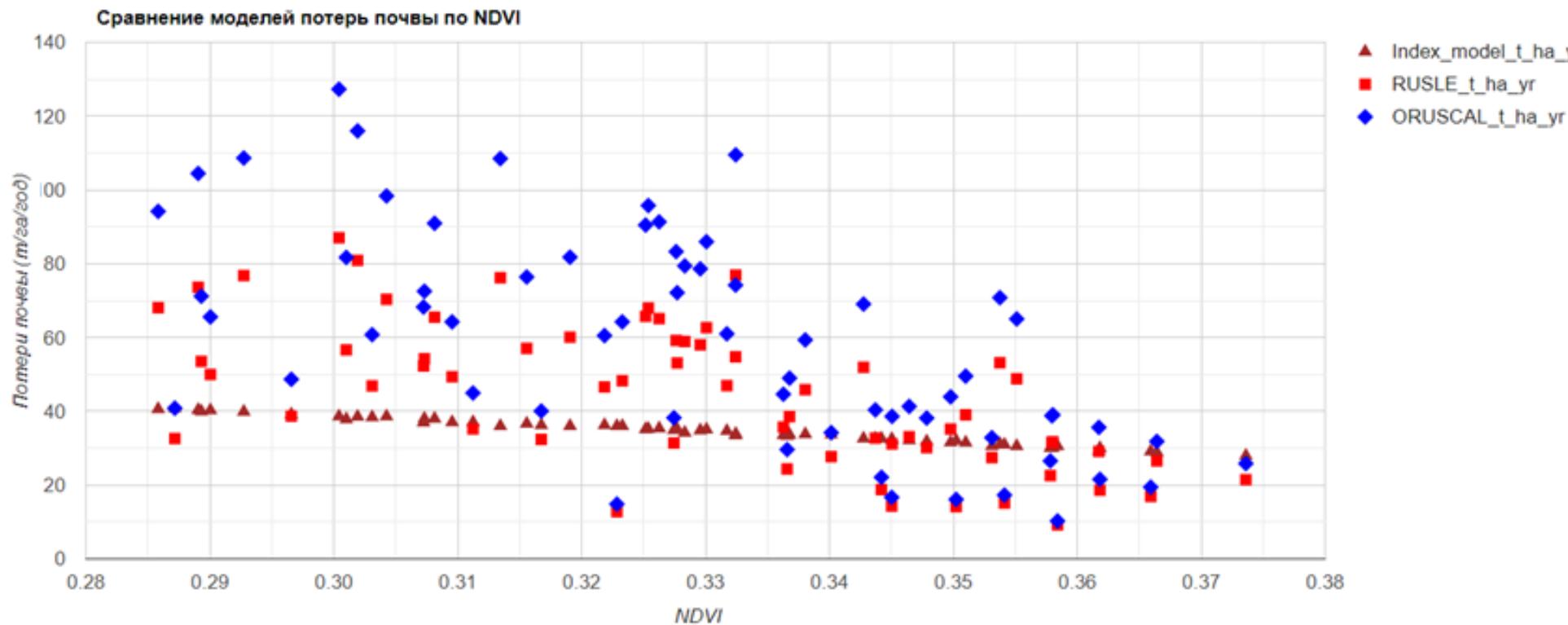
Index_Value – расчетное значение индексной модели для конкретного пикселя;

Index_Min, Index_Max – минимальное и максимальное значения индексной модели по всей территории исследования.

Все промежуточные значения индекса линейно интерполируются в этом диапазоне. Данный подход позволяет «калибровать» модель под конкретные условия региона и переводит абстрактные цифры индекса в понятные и верифицируемые величины.

Проведенное сравнение четырех методов оценки эрозии почвы (RUSLE, ORUSCAL, Index_model и полевые расчеты) выявило существенные различия в их прогнозных способностях и точности. Наибольшие средние значения потерь почвы демонстрируют модели ORUSCAL (59,3 т/га/год) и RUSLE (44,5 т/га/год), что превышает показатель индексной модели (28,8 т/га/год) в 2,1 и 1,5 раза соответственно. Наибольший разброс значений наблюдается у модели ORUSCAL (от 10,3 до 127,3 т/га/год) с амплитудой 117 т/га/год, что указывает на ее высокую чувствительность к локальным условиям. Индексная модель демонстрирует наименьший разброс значений (от 10,1 до 40,6 т/га/год) с амплитудой всего 30,5 т/га/год, что свидетельствует о ее стабильности и устойчивости прогнозов. Значения стандартного отклонения подтверждают высокую вариабельность моделей RUSLE (19,4 т/га/год) и ORUSCAL (29,1 т/га/год). Индексная модель характеризуется минимальным стандартным отклонением (3,4 т/га/год), что в 5,7–8,6 раза меньше, чем у других моделей, и подтверждает ее статистическую надежность. При пересчете на уровень отдельных кусто-мест ($4,5\text{ м}^2$) индексная модель показывает средние потери 8,6 кг (диапазон 4,6–22,5 кг), что существенно ниже показателей RUSLE (20,0 кг) и ORUSCAL (26,7 кг). Это указывает на более дифференцированный подход индексной модели к учету локальных условий произрастания виноградных кустов.

Эти значения позволяют понять, насколько каждая модель оценивает потери: например, ORUSCAL завышает, RUSLE ближе к индексу. Средняя абсолютная ошибка между моделями RUSLE/ORUSCAL имеет значение 17,3 т/га/год относительно индексной. Среднеквадратичная ошибка со значением 21,8 т/га/год говорит о том, что есть участки, где модели показывают значительное расхождение. Графики рассеяния подтверждают высокую дисперсию значений в RUSLE/ORUSCAL относительно индексной модели. Зависимость потерь почвы от значений индекса NDVI (рисунок 2). Точечный график с регрессией: ось X – NDVI, ось Y – потери почвы (т/га/год).



Тренды: отрицательная корреляция для всех моделей (чем выше NDVI, тем ниже эрозия). ORUSCAL/Index model показывают резкий рост потерь при $NDVI < 0,3$, т. е. модель ORUSCAL, учитывающая экспозицию склонов, и Index model, учитывающая морфометрию линейной эрозии, чувствительны к оголенности почвы на уклонах $> 5^\circ$.

Автоматизированная идентификация и классификация по композиции спектральных индексов самого факта и тип эрозии получены с точностью в 89 %. Коэффициент детерминации (R^2) точности предсказания объема почвенных потерь (в т/га/год) составил 0,65, и это означает, что индексная модель (Index model) объясняет 65 % вариативности в данных о потерях почвы. Данный результат был верифицирован путем сравнения предсказанных моделью значений с данными полевых измерений на ключевых участках. Оставшиеся 35 % вариативности могут быть связаны с локальными факторами, не полностью учтенными в модели (например, микрорельеф, агротехнические мероприятия).

Большинство кусто-мест (51120) имеют потери почвы более чем 10,0 кг/куст ($> 22,2$ т/га/год) и только 3729 кусто-мест виноградника имеют потери менее 10,0 кг/куст (рисунок 3).

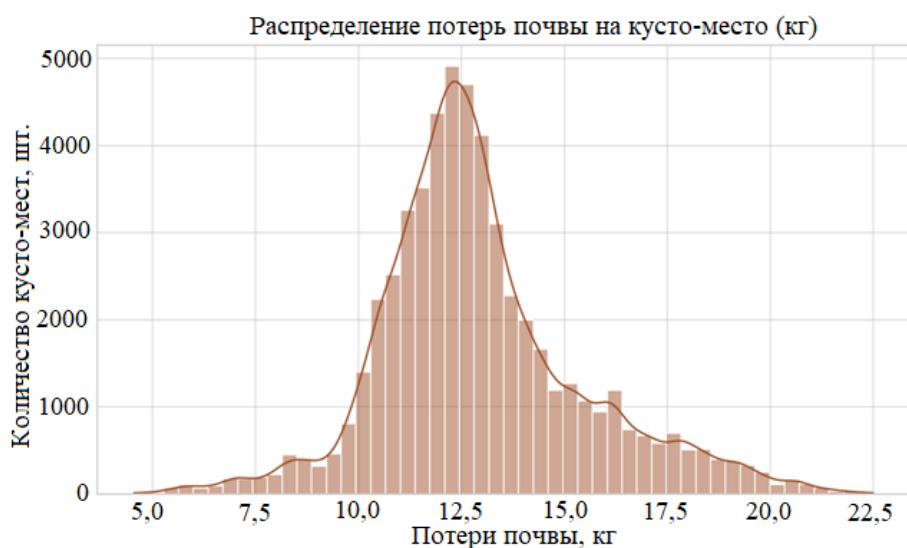


Рисунок 3 – Гистограмма распределения потерь почвы по количеству кусто-мест

Figure 3 – Histogram of soil loss distribution by number of bush sites

Наиболее значимые расхождения были выявлены на участках с высокой плотностью промоин (от 75 до 400 м/га) и пониженным растительным индексом NDVI ($< 0,3$), что указывает на необходимость существенной калибровки моделей RUSLE/ORUSCAL при оценке почвенной эрозии на виноградниках. Это может быть связано с тем, что классическая модель RUSLE не учитывает специфические особенности виноградников, такие, как направленность рядов, плотность кустов, а также фактическое распределение растительного покрова и возраст насаждения. Расхождения между моделями по потерям почвы на крутых склонах могут достигать 80–100 т/га/год. Завышенные значения потерь почвы в моделях RUSLE, ORUSCAL получаются из-за *C*-фактора, который рассчитывается только с использованием индекса NDVI и может переоценивать влияние низких значений на оголенных участках, например, если $NDVI \approx 0,1–0,2$, *C*-фактор получается близким к 1 вместо реальных 0,25–0,6. Это увеличивает итоговые значения в 2–4 раза. Также завышать потери почвы может *LS*-фактор, особенно на крутых уклонах из-за значительной длины склона более 100 м ($\lambda = 300$ м). *P*-фактор принимается равным 0,5, но его значение может быть и выше, если на участке обработка межрядных участков минимальная и используются покровные культуры. Для учета схемы посадки виноградного насаждения в формулу расчета потери почвы был добавлен поправочный коэффициент «*plantingFactor*», который уменьшает потери на 15 % при посадке поперек склона. Индексная модель дает умеренные и устойчивые оценки потери почвы на винограднике, а ORUSCAL и RUSLE более вариативны, полевые замеры показывают фиксированное значение по всей площади из-за измерения только нескольких эрозионных промоин. Из-за разрешения спутникового снимка в 10 м в индексной модели невозможно учесть точечные размывы, для учета которых требуется дистанционная съемка с разрешением менее 1 м/пк. Новый метод расчета *C*-фактора в индексной модели гораздо более устойчив к фоновым NDVI,

особенно при низкой растительности, а также снижает переоценку потерь на светлых участках с высокой отражательной способностью, но низким ELI. Индексная модель показывает наилучшую устойчивость и согласованность, особенно в условиях пространственной гетерогенности виноградников. Полевые оценки, основанные на линейной эрозии, дают завышенные значения, так как не отражают фоновые потери по всей площади. Индексная модель потерь почвы демонстрирует высокую адаптивность и реалистичность в условиях виноградников, особенно при недостатке локальных данных по осадкам и механическим свойствам почв.

Для целей мониторинга рекомендуется использовать индексную модель как основную, дополняя ее ORUSCAL на участках с уклонами $> 5^\circ$ и южной экспозицией склона. Для склонов крутизной $> 5^\circ$ поперечная схема посадки с плотностью 3000–4000 кустов/га позволит снизить потери почвы на 56 %. На участках с LS-фактором > 2 необходимо террасирование или мульчирование.

На основе анализа вариабельности и устойчивости прогнозов можно заключить, что индексная модель демонстрирует наилучшие статистические характеристики с минимальным разбросом значений и стандартным отклонением. Модели RUSLE и ORUSCAL, несмотря на их широкое распространение, показывают значительно большую вариабельность результатов, что снижает их прогностическую ценность для виноградников.

Выводы. Исследование подтвердило высокую эффективность сочетания дистанционного автоматизированного мониторинга с адаптированными моделями оценки эрозии. Индексная модель представляет собой новый этап в мониторинге эрозии почвы виноградников, сочетая физическую обоснованность RUSLE, оперативность дистанционных методов, учет специфики виноградарства. Предложенная модель позволяет не только выявлять критические участки, но и прогнозировать потери почвы при изменении климатических условий. Внедрение рекомендаций может сократить

эрозионные потери почвы на 30–50 %, при минимальных затратах на защитные мероприятия, что особенно важно для устойчивого развития виноградарства в регионе. Модель предсказывает рост эрозии на 20–30 % при увеличении интенсивности ливней. Модель адаптирована к условиям юга России и может служить основой для цифрового мониторинга эрозионных процессов на поверхности почвы виноградных насаждений.

Список источников

1. Власенко В. П., Быкова М. В. Динамика структуры почвенного покрова земельных участков Анапского района как фактор определения их виноградопригодности // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2024. № 112. С. 90–94. DOI: 10.21515/1999-1703-112-90-94. EDN: IVPYHM.
2. Основные направления научных исследований на кафедре эрозии и охраны почв: современное состояние и перспективы развития / О. А. Макаров, М. С. Кузнецов, В. В. Демидов, Д. В. Карпова, П. С. Шульга, Д. Р. Абдулханова, Е. Н. Есафова, Е. Н. Кубарев // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. № 4. С. 70–82. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-4-70-82. EDN: DGCDSJ.
3. Дитц Л. Ю., Катункина Е. В. Использование данных дистанционного зондирования при исследовании почвенно-эрзационных процессов // Естественные и математические науки в современном мире. 2015. № 33. С. 58–64. EDN: UDLOQF.
4. Балакай Г. Т., Кулаева Я. И. Эрозионные процессы на землях сельхозназначения, занятых виноградниками в ООО «Абрау-Дюрсо» Краснодарского края // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2020. № 3(79). С. 32–38. EDN: PIAOLM.
5. Риверос К. А., Кузнецов Е. В. Оценка потенциала водной эрозии методами RUSLE, ГИС и дистанционного зондирования в Кубанском гидрографическом бассейне // Устойчивое развитие науки и образования. 2019. № 3. С. 227–232. EDN: MLITND.
6. Сухановский Ю. П., Прущик А. В. Моделирование водной эрозии почв: монография. Курск: Курский ФАНЦ, 2023. 175 с. EDN: LCIFCJ.
7. Prosdocimi M., Cerdà A., Tarolli P. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review // Catena. 2016. Vol. 141. P. 1–21. DOI: 10.1016/j.catena.2016.02.010.
8. Updated measurements in vineyards improves accuracy of soil erosion rates / J. Rodrigo-Comino, J. Davis, S. D. Keesstra, A. Cerdà // Agronomy Journal. 2018. Vol. 110, iss. 1. P. 411–417. DOI: 10.2134/agronj2017.07.0414.
9. Singh R. Impact of climate and land use land cover changes on soil erosion // In book: Soil and Water Conservation Structures Design. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 415–441. DOI: 10.1007/978-981-19-8665-9_14.
10. Effect of plot size and precipitation magnitudes on the activation of soil erosion processes using simulated rainfall experiments in vineyards / M. Neumann, P. Kavka, J. Devátý, J. Stašek, L. Strouhal, A. Tejkl, R. Kubínová, J. Rodrigo-Comino // Frontiers in Environmental Science. 2022. Vol. 10. Article number: 949774. DOI: 10.3389/fenvs.2022.949774. EDN: GDYNWC.
11. Visconti F., López R., Olego M. Á. The Health of Vineyard Soils: Towards a Sustainable Viticulture // Horticulturae. 2024. Vol. 10, no. 2. Article number: 154. DOI: 10.3390/horticulturae10020154. EDN: XGYLLQ.
12. Определение степени эрозии почвы с использованием ГИС и ДЗЗ в верховьях реки Нарын / Э. С. Дуулатов, С. К. Аламанов, У. С. Абыжапар, С. С. Кожокулов,

Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 3. С. 202–222.
Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2025. Vol. 15, no. 3. P. 202–222.

Г. Т. Таалайбекова // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2023. Т. 23, № 8. С. 132–137. DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-8-132-137. EDN: XQSKBE.

13. Use of remotely sensed data for the evaluation of inter-row cover intensity in vineyards / F. Palazzi, M. Biddoccu, E. C. Borgogno Mondino, E. Cavallo // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, no. 1. Article number: 41. DOI: 10.3390/rs15010041.

14. A review on the possibilities and challenges of today's soil and soil surface assessment techniques in the context of process-based soil erosion models / L. Epple, A. Kaiser, M. Schindewolf, A. Bienert, J. Lenz, A. Eltner // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, no. 10. Article number: 2468. DOI: 10.3390/rs14102468. EDN: IGCKEL.

15. Lazcano C., Decock C., Wilson S. G. Defining and Managing for Healthy Vineyard Soils, Intersections With the Concept of Terroir // Frontiers in Environmental Science. 2020. Vol. 8. Article number: 68. DOI: 10.3389/fenvs.2020.00068. EDN: SRMTCW.

16. Sahu K. K., Kar S., Rout S. Satellite-Based Soil Erosion Mapping // In book: Sustainable Agriculture: Technical Progressions and Transitions. 2022. P. 225–252. DOI: 10.1007/978-3-030-83066-3_13.

17. Kumar S., Kalambukattu J. G. Modeling and monitoring soil erosion by water using remote sensing satellite data and GIS // In book: Anthropogeomorphology: A Geospatial Technology Based Approach. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2022. P. 273–304. DOI: 10.1007/978-3-030-77572-8_14.

18. Advances in modeling soil erosion risk [Electronic resource] / S. Panda, D. Misra, D. Amatya, A. Thompson. 2024. URL: https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/2024/ja_2024_amatya_003.pdf. (date of access: 27.08.2025).

19. Evaluation of soil erosion risk and identification of soil cover and management factor (C) for RUSLE in European vineyards with different soil management / M. Biddoccu, G. Guzman, G. Capello, T. Thielke, P. Strauss, S. Winter, J. G. Zaller, A. Nicolai, D. Cluzeau, D. Popescu, C. Bunea, A. Hoble, E. Cavallo, J. A. Gómez // International Soil and Water Conservation Research. 2020. Vol. 8, no. 4. P. 337–353. DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.07.003. EDN: TUBSWS.

20. Comino J. R., Keesstra S. D., Cerdà A. Connectivity assessment in Mediterranean vineyards using improved stock unearthing method, LiDAR and soil erosion field surveys // Earth Surface Processes and Landforms. 2018. Vol. 43, iss. 10. P. 2193–2206. DOI: 10.1002/esp.4385.

References

1. Vlasenko V.P., Bykova M.V., 2024. *Dinamika struktury pochvennogo pokrova zemel'nykh uchastkov Anapskogo rayona kak faktor opredeleniya ikh vinogradoprigodnosti* [Dynamics of the soil cover structure of land plots in Anapa district as a factor in determining their grape suitability]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceed. of Kuban State Agrarian University], no. 112, pp. 90-94, DOI: 10.21515/1999-1703-112-90-94, EDN: IVPYHM. (In Russian).

2. Makarov O.A., Kuznetsov M.S., Demidov V.V., Karpova D.V., Shul'ga P.S., Abdulkhanova D.R., Esafova E.N., Kubarev E.N., 2023. *Osnovnye napravleniya nauchnykh issledovaniy na kafedre erozii i okhrany pochv: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Main areas of scientific research at the Department of Soil Erosion and Conservation: current state and development prospects]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie* [Bulletin of Moscow University. Series 17: Soil Science], no. 4, pp. 70-82, DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-4-70-82, EDN: DGCDSJ. (In Russian).

3. Dietz L.Yu., Katunkina E.V., 2015. *Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya pri issledovanii pochvenno-erozionnykh protsessov* [Data usage of remote probing while investigating soil erosion processes]. *Yestestvennye i matematicheskie nauki v sov-*

remennom mire [Natural and Mathematical Sciences in the Modern World], no. 33, pp. 58-64, EDN: UDLOQF. (In Russian).

4. Balakai G.T., Kulaeva Ya.I., 2020. *Erozionnye protsessy na zemlyakh sel'khoz-naznacheniya, zanyatykh vinogradnikami v OOO «Abrau-Dyurso» Krasnodarskogo kraya* [Erosion processes on agricultural lands undervineyards in Abrau-Dyurso LLC, Krasnodar Territory]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 3(79), pp. 32-38, EDN: PIAOLM. (In Russian).

5. Riveros K.A., Kuznetsov E.V., 2019. *Otsenka potentsiala vodnoy erozii metodami RUSLE, GIS i distantsionnogo zondirovaniya v Kubanskom gidrograficheskem basseyne* [Evaluation of water erosion potential using RUSLE, GIS, and remote sensing methods in the Kuban hydrographic basin]. *Ustoychivoe razvitiye nauki i obrazovaniya* [Sustainable Development of Science and Education], no. 3, pp. 227-232, EDN: MLITND. (In Russian).

6. Sukhanovsky Yu.P., Prushchik A.V., 2023. *Modelirovanie vodnoy erozii pochv: monografiya* [Modeling of Soil Water Erosion: monograph]. Kursk, Kursk Federal Academy of Sciences, 175 p., EDN: LCIFCJ. (In Russian).

7. Prosdocimi M., Cerdà A., Tarolli P., 2016. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review. *Catena*, vol. 141, pp. 1-21, DOI: 10.1016/j.catena.2016.02.010.

8. Rodrigo-Comino J., Davis J., Keesstra S.D., Cerdà A., 2018. Updated measurements in vineyards improves accuracy of soil erosion rates. *Agronomy Journal*, vol. 110, iss. 1, pp. 411-417, DOI: 10.2134/agronj2017.07.0414.

9. Singh R., 2023. Impact of climate and land use land cover changes on soil erosion. In book: *Soil and Water Conservation Structures Design*. Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 415-441, DOI: 10.1007/978-981-19-8665-9_14.

10. Neumann M., Kavka P., Devátý J., Stašek Ja., Strouhal L., Tejkl A., Kubínová R., Rodrigo-Comino J., 2022. Effect of plot size and precipitation magnitudes on the activation of soil erosion processes using simulated rainfall experiments in vineyards. *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, article number: 949774, DOI: 10.3389/fenvs.2022.949774, EDN: GDYNWC.

11. Visconti F., López R., Olego M.Á., 2024. The Health of Vineyard Soils: Towards a Sustainable Viticulture. *Horticulturae*, vol. 10, no. 2, article number: 154, DOI: 10.3390/horticulturae10020154, EDN: XGYLLQ.

12. Duulatov E.S., Alamanov S.K., Abdyzhapar U.S., Kozhokulov S.S., Taalaibekova G.T., 2023. *Opredelenie stepeni erodirovannosti pochv s ispol'zovaniem geoinformatsionnykh sistem i distantsionnogo zondirovaniya v verkhov'yakh reki Naryn* [Determination of the degree of soil erosion using geoinformation systems and remote sensing in the upper reaches of the Naryn River]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta* [Bulletin of Kyrgyz-Russian Slavic University], vol. 23, no. 8, pp. 132-137, DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-8-132-137, EDN: XQSKBE.

13. Palazzi F., Biddoccu M., Borgogno Mondino E.C., Cavallo E., 2023. Use of remotely sensed data for the evaluation of inter-row cover intensity in vineyards. *Remote Sensing*, vol. 15, no. 1, article number: 41, DOI: 10.3390/rs15010041.

14. Epple L., Kaiser A., Schindewolf M., Bienert A., Lenz J., Eltner A., 2022. A review on the possibilities and challenges of today's soil and soil surface assessment techniques in the context of process-based soil erosion models. *Remote Sensing*, vol. 14, no. 10, article number: 2468, DOI: 10.3390/rs14102468, EDN: IGCKEL.

15. Lazcano C., Decock C., Wilson S.G., 2020. Defining and managing for healthy vineyard soils, intersections with the concept of terroir. *Frontiers in Environmental Science*, vol. 8, article number: 68, DOI: 10.3389/fenvs.2020.00068, EDN: SRMTCW.

16. Sahu K.K., Kar S., Rout S., 2022. Satellite-Based Soil Erosion Mapping. In book: *Sustainable Agriculture: Technical Progressions and Transitions*, pp. 225-252, DOI: 10.1007/978-3-030-83066-3_13.

17. Kumar S., Kalambukattu J.G., 2022. Modeling and monitoring soil erosion by water using remote sensing satellite data and GIS. In book: Anthropogeomorphology: A Geospatial Technology Based Approach. Cham: Springer Nature Switzerland AG, pp. 273-304, DOI: 10.1007/978-3-030-77572-8_14.
18. Panda S., Misra D., Amatya D., Thompson A., 2024. Advances in modeling soil erosion risk, available: https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/2024/ja_2024_amatya_003.pdf [accessed 27.08.2025].
19. Biddoccu M., Guzman G., Capello G., Thielke T., Strauss P., Winter S., Zaller J.G., Nicolai A., Cluzeau D., Popescu D., Bunea C., Hoble A., Cavallo E., Gómez J.A., 2020. Evaluation of soil erosion risk and identification of soil cover and management factor (C) for RUSLE in European vineyards with different soil management. International Soil and Water Conservation Research, vol. 8, no. 4, pp. 337-353, DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.07.003, EDN: TUBSWS.
20. Comino J.R., Keesstra S.D., Cerdà A., 2018. Connectivity assessment in Mediterranean vineyards using improved stock unearthing method, LiDAR and soil erosion field surveys. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 43, iss. 10, pp. 2193-2206, DOI: 10.1002/esp.4385.

Информация об авторах

В. А. Орлов – старший научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук, Анапская зональная опытная станция виноградарства и виноделия – филиал Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства и виноделия (353456, Краснодарский край, г. Анапа, Пионерский проспект, 36), vitorl@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3337-2970;

А. А. Лукьянов – старший научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук, Анапская зональная опытная станция виноградарства и виноделия – филиал Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства и виноделия (353456, Краснодарский край, г. Анапа, Пионерский проспект, 36), azos@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7317-9150.

Information about the authors

V. A. Orlov – Senior Researcher, Candidate of Agricultural Sciences, Anapa Zonal Experimental Station of Viticulture and Winemaking – branch of the Federal State Budget Scientific Institution North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making (353456, Krasnodar Region, Anapa, Pionersky Prospekt, 36), vitorl@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3337-2970;

A. A. Lukyanov – Senior Researcher, Candidate of Agricultural Sciences; Anapa Zonal Experimental Station of Viticulture and Winemaking – branch of the Federal State Budget Scientific Institution North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making (353456, Krasnodar Region, Anapa, Pionersky Prospekt, 36), azos@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7317-9150.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 09.09.2025; принята к публикации 26.09.2025.

The article was submitted 30.04.2025; approved after reviewing 09.09.2025; accepted for publication 26.09.2025.