



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 94–101

Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 94–101

<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2026-26-2-94-101>, EDN: FJGEWS

Научная статья

УДК 631.459:528.88

Определение спектральных индикаторов эрозии почв по данным полевой спектрометрии (на примере Чувашской Республики)



Д. Н. Якимович¹✉, С. В. Васюков², В. В. Сироткин³, О. А. Васильев¹

¹Чувашский государственный аграрный университет, Россия, 428003, г. Чебоксары, ул. Карла Маркса, д. 29

²Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии по Чувашской Республике, Россия, 428009, г. Чебоксары, ул. Эльмена, д. 4а

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420097, г. Казань, ул. Товарищеская, д. 5

Якимович Дмитрий Николаевич, старший преподаватель кафедры землеустройства, кадастров и экологии, yakimovich11@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0802-8521>

Васюков Сергей Владимирович, кандидат географических наук, заместитель руководителя, vasyukovsv@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7458-7508>

Сироткин Вячеслав Владимирович, доктор географических наук, профессор кафедры ландшафтной экологии, sirotkin67@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8636-6112>

Васильев Олег Александрович, доктор биологических наук, профессор кафедры землеустройства, кадастров и экологии, vasiloleg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5269-7335>

Аннотация. Цель исследования – выявить связи между агрохимическими показателями пахотного слоя (содержание гумуса, подвижного фосфора, обменного калия, значениями pH обменной кислотности), полевой влажностью и спектральными характеристиками почв для оценки степени эродированности в условиях Чувашской Республики. Исследования выполнены на 5 полигонах (14 точек) с дерново-подзолистыми, серыми лесными почвами и выщелоченными черноземами и их эродированными разновидностями. Агрохимические параметры определяли стандартными методами по ГОСТ 26213-91, подвижные фосфор и калий по ГОСТ Р 54650-2011, pH обменной кислотности по ГОСТ 26483-85, спектрограммы регистрировали портативным спектрорадиометром «FieldSpec Hand Held 2» на открытой распаханной поверхности. Для определения достоверности результатов применены корреляционный и регрессионный анализы. Показано, что с увеличением степени эродированности почв уменьшаются содержание гумуса и показатели pH(KCl). На спектрограммах выделяются два устойчивых максимума; их отношение R1/R2 статистически значимо связано с гумусом и показателями обменной кислотности pH(KCl) и может рассматриваться как экспресс-индикатор эрозионных преобразований при совместной интерпретации с яркостью R2 и положением в рельефе. Полученные зависимости требуют верификации на расширенной выборке.

Ключевые слова: агрохимические показатели почв, гумус, полевая влажность, спектрометрия, спектральные индексы, эрозия почв

Благодарности. Авторы признательны сотрудникам Испытательного лабораторного центра при ФГБОУ ВО «Чувашский аграрный университет» за выполнение лабораторных анализов почвы.

Для цитирования: Якимович Д. Н., Васюков С. В., Сироткин В. В., Васильев О. А. Определение спектральных индикаторов эрозии почв по данным полевой спектрометрии (на примере Чувашской Республики) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 94–101. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2026-26-2-94-101>, EDN: FJGEWS

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Identification of spectral indicators of soil erosion based on field spectrometry data (A case study of the Chuvash Republic)

D. N. Iakimovich¹✉, S. V. Vasyukov², V. V. Sirotkin³, O. A. Vasiliev¹

¹Chuvash State Agrarian University, 29 K. Marksa St., Cheboksary 428003, Russia

²Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography for the Chuvash Republic, 4a Elmenya St., Cheboksary 428009, Russia

³Kazan Federal University, 5 Tovarishcheskaya St., Kazan 420097, Russia

Dmitrii N. Iakimovich, yakimovich11@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0802-8521>

Sergey V. Vasyukov, vasyukovsv@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7458-7508>

Vyacheslav V. Sirotkin, sirotkin67@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8636-6112>

Oleg A. Vasiliev, vasiloleg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5269-7335>

Abstract. The aim of the study is to identify relationships between the agrochemical indicators of the arable layer (humus content, mobile phosphorus, exchangeable potassium, and pH values of exchangeable acidity), field moisture, and spectral characteristics of soils in order to assess the degree of erosion under the conditions of the Chuvash Republic. The studies were carried out at five test sites (14 sampling points)



on sod-podzolic soils, gray forest soils, leached chernozems, and their eroded varieties. Agrochemical parameters were determined according to GOST 26213-91, mobile phosphorus and potassium according to GOST R 54650-2011, and the pH of exchangeable acidity according to GOST 26483-85; spectrograms were recorded with a portable FieldSpec Hand Held 2 spectroradiometer on an open, ploughed surface. Correlation and regression analyses were used to assess the reliability of the results. It was shown that humus content and pH(KCl) values decrease with increasing degree of soil erosion. Two stable maxima are distinguished in the spectrograms; their ratio R1/R2 is statistically significantly related to humus and exchangeable acidity pH(KCl) and can be considered a rapid indicator of erosional transformations when interpreted jointly with the brightness of R2 and the position in the relief. The obtained relationships need to be verified on an extended sample.

Keywords: agrochemical soil properties, field moisture, spectrometry, soil degradation, spectral indices, soil erosion

Acknowledgments. The authors sincerely thank the personnel of the Testing Laboratory Center at Chuvash State Agrarian University for their support in carrying out the laboratory analyses.

For citation: Iakimovich D. N., Vasyukov S. V., Sirotkin V. V., Vasiliev O. A. Identification of spectral indicators of soil erosion based on field spectrometry data (A case study of the Chuvash Republic). *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 94–101 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2026-26-2-94-101>, EDN: FJGEWS

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Земли сельскохозяйственного назначения Чувашской Республики относятся к числу наиболее эродированных в России: более 80% пашни подвержено водной эрозии. Распашка склонов и недостаточная доля многолетних трав в севообороте усиливают деградацию почв, а почвенно-эрозионное картирование, выполненное в 1990-х гг., требует актуализации. В этих условиях перспективны спектральные подходы к диагностике состояния пахотного слоя. К ним относятся как дистанционные методы (спутниковые данные, БПЛА), так и полевые спектрометрические измерения. В настоящей работе использована именно полевая спектрометрия, которая позволяет оперативнее уточнять почвенно-эрозионные контуры.

Практическая значимость спектральных методов связана с тем, что оценка состояния сельскохозяйственных земель опирается на агрохимические индикаторы плодородия (pH(KCl), содержание гумуса, обеспеченность подвижными формами P и K и др.), которые изменяются в зависимости от рельефа и степени смытости. По данным исследований, спектральные характеристики пахотного слоя могут отражать такие изменения и использоваться для уточнения почвенно-эрозионных карт [1]. В руководстве ФАО спектроскопия в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах рассматривается как быстрый, экономичный и неразрушающий метод анализа почв, позволяющий оценивать ряд их физических и химических свойств. Это подтверждает перспективность применения спектральных методов для диагностики эрозионно обусловленных изменений пахотного слоя¹.

Обзор литературы

Использование методов дистанционного зондирования на территории Чувашской Респуб-

лики для решения проблемы эрозии почв стало применяться сравнительно недавно, во второй половине 2000-х гг., и имеются определенные успехи в развитии данного направления. Применение спектрограмм для изучения интенсивности водной эрозии почв на территории Чувашской Республики было отмечено впервые в 2010 г., и полученные результаты были сопоставлены с результатами детальных почвенно-агрохимических параметров [2, 3].

Уровни содержания гумуса, фосфора, калия и показателя pH(KCl) в пахотном слое почв изменяются в зависимости от типа почвообразовательных процессов, окультуренности, строения профиля и степени эродированности и могут являться индикаторами эрозионных процессов. Рельеф – основная причина водной эрозии и варьирования агрохимических показателей в эродированных разновидностях почв на интенсивно обрабатываемом земельном участке [4], особенно гумуса [5, 6]. Изменчивость характеристик рельефа оказывает большое влияние на урожайность [4–9] и четко отображается с помощью цифровых моделей рельефа [10]. Как показано в [11], спектрометрические характеристики почв восточной части Русской равнины, включая исследуемый регион, демонстрируют четкую зависимость от степени их эродированности, что полностью согласуется с полученными в нашем исследовании данными. «Методика полевой спектрометрии», ранее применявшаяся для оценки почвенных параметров [12], подтвердила свою эффективность и в условиях Чувашской Республики, что подчёркивает универсальность данного подхода.

Новизна работы состоит в том, что для нескольких распространённых в регионе типов почв проведено сопоставление параметров спектрограмм с агрохимическими показателями и положением на склоне в едином полевом дизайне

¹Руководство по анализу почв с использованием видимой и ближней инфракрасной (vis-NIR) и средней инфракрасной (MIR) спектроскопии / Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. Рим : ФАО, 2022. 31 с. <https://doi.org/10.4060/cb9005ru>



(5 полигонов, $n = 14$). Это позволяет сформулировать простые интерпретационные ориентиры для экспресс-оценки состояния пахотного слоя и выбора участков для детального обследования.

Цель исследования – выявить связи между агрохимическими показателями пахотного слоя (гумус, $\text{pH}(\text{KCl})$, P , K), полевой влажностью и параметрами спектрограмм (в том числе индексом $R1/R2$) в эродированных разновидностях основных типов почв Чувашской Республики для экспресс-оценки эродированности почв.

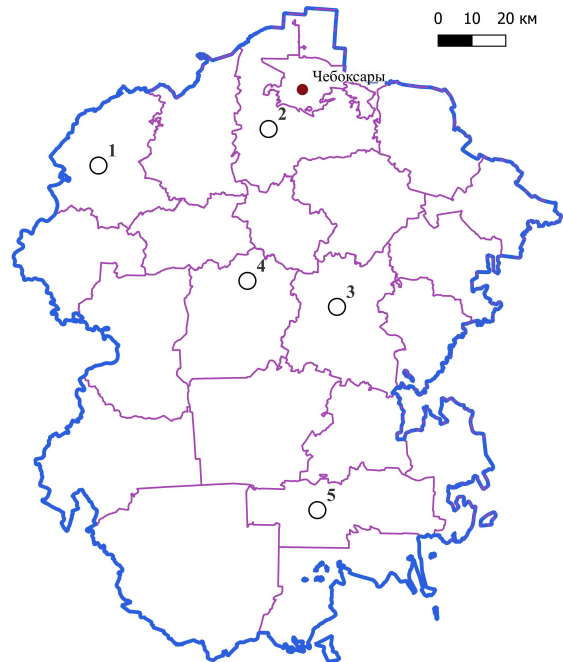
Материалы и методы

Классификацию степени эродированности, основанную на изменении мощности подпахотных горизонтов, выполняли по С. С. Соболеву [13], а изменения содержания в пахотном слое гумуса – по М. Н. Заславскому [14]. Почвенные пробы отбирали с глубины 0–40 см. Гумус определяли по ГОСТ 26213-91², подвижные фосфор и калий – по ГОСТ Р 54650-2011³; показатели pH обменной кислотности (далее – $\text{pH}(\text{KCl})$) измеряли на pH -метре по ГОСТ 26483-85⁴ (самостоятельно), влажность – гравиметрически – по ГОСТ 28268-89⁵ (самостоятельно).

Спектральные измерения выполняли портативным спектрометром «FieldSpec® HandHeld» 2 (ASD Inc., США), с калибровкой по белому референсу (1 калибровка на точку). Данный прибор относится к приборам видимого и ближнего инфракрасного диапазона VNIR (325–1075 нм; ± 1 нм; < 3 нм при 700 нм; поле зрения 25°). По спектрограммам выделяли два наиболее выраженных локальных максимума ($R1$ и $R2$), рассчитывали индекс формы $R1/R2$; яркость $R2$ (DN) использовали как характеристику общего уровня сигнала. Для сопоставимости спектральных кривых применяли нормирующее отношение $R1/R2$, уменьшающее влияние общей освещённости и масштаба сигнала.

Полевые исследования выполнены на 5 полигонах Чувашской Республики ($n = 14$): Моргаушский м. о. (дерново-подзолистые почвы, 3 точки), Чебоксарский м. о. (светло-серые лесные, 3 точки), Канашский м. о. (серые лесные, 3 точки), Вурнарский м. о. (тёмно-серые лесные, 2 точки), Батыревский м. о. (выщелоченные чернозёмы, 3 точки). В пределах каждого полигона точки располагали по профилю склона (приводораздел – средняя/нижняя часть), что позволило сопоставить спектральные и агрохимические показатели с рельефной позицией

и степени смытости. Полигоны на территории Чувашской Республике представлены на рис. 1.



Условные обозначения

- | | |
|----------------------------------|--------------------------|
| ○ Полигоны исследования | Административные границы |
| ● Столица (Чувашская Республика) | ■ Региональные |
| | ■ Районные |

Рис. 1. Карта-схема расположения полигонов исследований на территории Чувашской Республики: 1 – Моргаушский, 2 – Чебоксарский, 3 – Канашский, 4 – Вурнарский, 5 – Батыревский муниципальные округа

Результаты и их обсуждение

На выбранных земельных участках с различными типами почв и их эродированными разновидностями и использованием спектральной съемки были проведены почвенно-агрохимические исследования, включающие уточняющую диагностику и отбор почвенных проб. Информация о земельных участках и результаты исследований представлена в табл. 1.

Данные, приведенные в табл. 1, показывают ожидаемые различия между типами почв и позициями рельефа: в более эродированных вариантах наблюдается тенденция к снижению содержания гумуса и изменению $\text{pH}(\text{KCl})$, тогда как влажность отражает текущие условия увлажнения и может варьировать внутри полигона. Эти

²ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. Введ. 01.01.93. М.: Изд-во стандартов, 1992. 8 с.

³ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Введ. 01.01.2013. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

⁴ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. Введ. 01.07.86. М.: Изд-во стандартов, 1986. 7 с.

⁵ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. Введ. 01.06.90. М.: Изд-во стандартов, 1990. 12 с.



Таблица 1

Результаты данных влажности и агрохимических обследований исследуемых участков

№ п/п	Тип почв	Точки пробоотбора	Экспозиция склона	Гумус, %	Фосфор, мг/кг	Калий, мг/кг	pH (KCl)	Влажность, %
1	Дерново-подзолистая	Приводораздел	Юго-Западная	1.7	27	45	4.4	15.3
2	Дерново-подзолистая слабосмытая	Склоновый участок	Юго-Западная	1.7	38	68	4.3	12.3
3	Дерново-подзолистая среднесмытая	Склоновый участок	Юго-Западная	1.6	64	55	4	10.8
4	Светло-серая лесная	Приводораздел	Юго-Западная	1.4	25	54	5	15.8
5	Светло-серая лесная намытая	Склоновый участок	Юго-Западная	1.4	39	79	4.5	13.0
6	Светло-серая лесная намытая	Склоновый участок	Юго-Западная	1.5	149	71	3.9	11.8
7	Типично-серая лесная слабосмытая	Приводораздел	Юго-Восточная	2.4	66	185	5.8	14.6
8	Типично-серая лесная слабосмытая	Склоновый участок	Юго-Восточная	2.3	71	187	4.6	14.5
9	Типично-серая лесная сильносмытая	Склоновый участок	Юго-Восточная	2.3	168	168	4.2	13.0
10	Темно-серая лесная грунтово-глееватая	Приводораздел	Юго-Западная	4.6	144	384	5.7	16.0
11	Темно-серая лесная грунтово-глееватая слабосмытая	Склоновый участок	Юго-Западная	3.5	83	193	5.7	14.5
12	Чернозем выщелоченный	Приводораздел	Юго-Западная	7.6	1000	1786	6.5	20.3
13	Чернозем выщелоченный слабосмытый	Склоновый участок	Юго-Западная	6.1	759	424	6.4	17.0
14	Чернозем выщелоченный слабосмытый	Склоновый участок	Юго-Западная	2.9	596	745	6.1	14.5

закономерности использованы далее для сопоставления с параметрами спектрограмм.

В полевых условиях выполнялись спектрометрические измерения открытой поверхности почвы с использованием портативного спектрометра; в результате были построены спектрографические кривые по каждому исследуемому участку. Результаты представлены на рис. 2 (по оси абсцисс – длина волны, нм, по оси ординат – спектральная яркость, DN). В спектрограмме каждого типа почв имеются спектральные линии не эродированной и эродированных разновидностей изучаемых типов почв, представленных параллельными спектрографическими кривыми: в большинстве графиков подтверждается, что эродированность почвы увеличивается со снижением яркости.

Анализ спектрограмм (см. рис. 2) показал наличие двух устойчивых максимумов спектральной яркости и различия между типами почв и их эродированными разновидностями. В целом при увеличении гумусированности почв и снижения их степени смытости наблюдается снижение

яркости и изменение формы кривых, что отражает состояние пахотного слоя.

Положение максимумов варьирует между типами почв: для дерново-подзолистых и светло-серых лесных почв пики наблюдались примерно в области 540 и 720 нм, для типично-серых – около 580 и 720 нм, для темно-серых – около 600 и 740 нм, для выщелоченных чернозёмов – в диапазонах 540–580 и ~760 нм. В более светлых (слабогумусированных) почвах второй пик часто доминирует над первым, тогда как в более темных почвах соотношение максимумов может быть обратным. Следует учитывать, что на абсолютный уровень яркости (DN) существенно влияют влажность поверхности, агрегатное состояние, количество мелкозёма и растительных остатков. Поэтому в интерпретации объединяли два подхода: индексы формы (R1/R2), менее чувствительные к амплитуде, и яркость R2, отражающую общий уровень сигнала. Совместный анализ позволяет отличать изменения, связанные преимущественно с «потемнением» почвы (рост гумуса, увлажнение), от изменений формы спектра, которые могут быть связаны с перераспре-

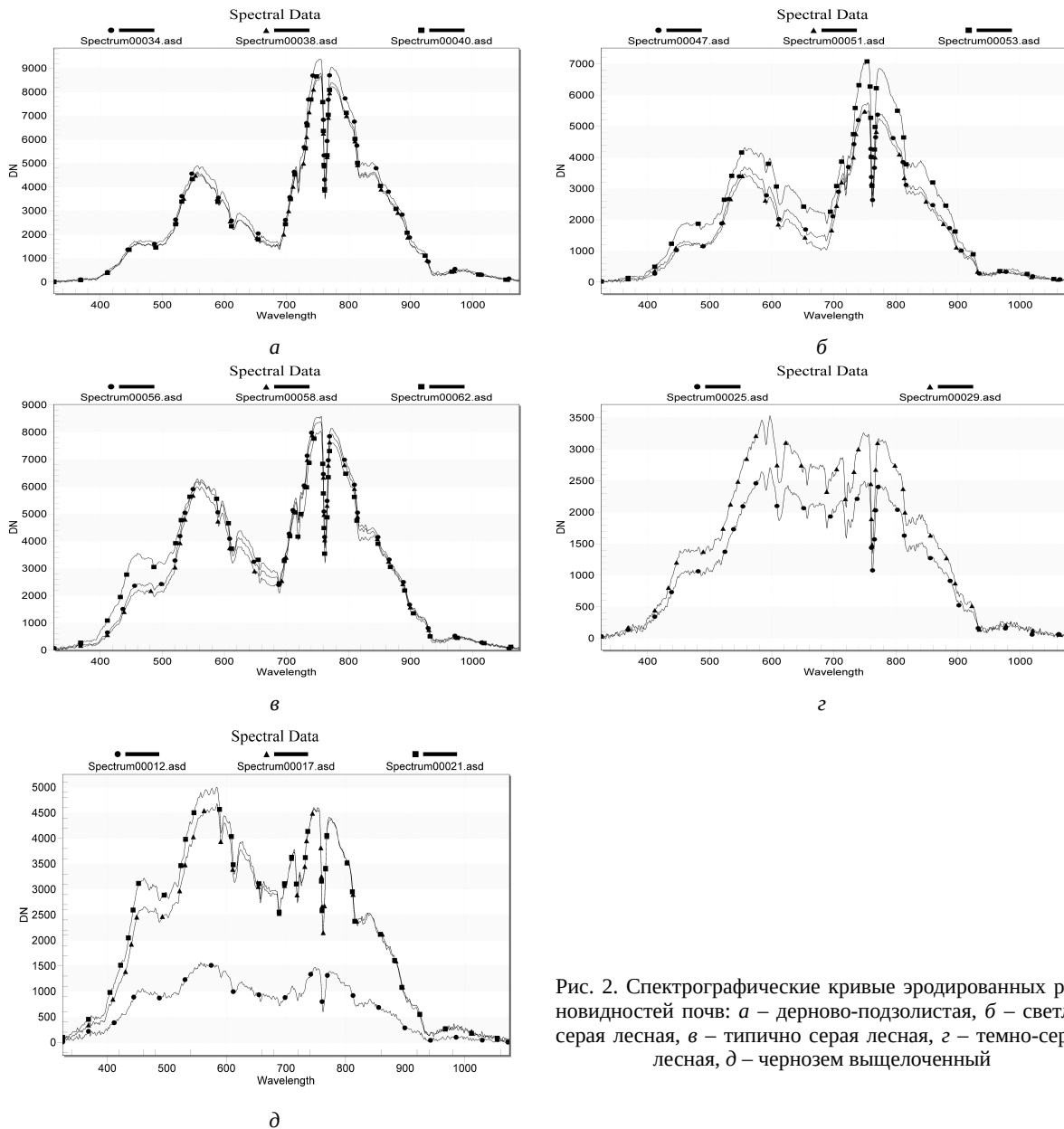


Рис. 2. Спектрографические кривые эродированных разновидностей почв: а – дерново-подзолистая, б – светло-серая лесная, в – типично серая лесная, г – темно-серая лесная, д – чернозем выщелоченный

делением в ней частиц мелкозема, органических остатков и агрохимических показателей.

Для количественной интерпретации спектрограмм по каждому образцу определяли значения в двух наиболее выраженных локальных максимумах (R1 и R2) и рассчитывали производные индексы. В качестве основного индекса использовали отношение R1/R2, поскольку оно характеризует форму спектра и частично нивелирует различия в амплитуде, связанные с освещённостью и общим уровнем отражения. Величины отношений R2/R1 и $\text{Пик}_{\min}/\text{Пик}_{\max}$ применяются как дополнительные контролирующие показатели. Сопоставленные результаты полевых и лабораторных работ приведены в табл. 2.

Статистическую обработку выполняли в виде корреляционного и регрессионного анализа. Для оценки линейной связи между спектральными индексами (R1/R2) и агрохимическими показателями рассчитывали коэффициент корреляции Пирсона и соответствующие p -значения (уровень значимости $p < 0.05$). Для визуализации зависимостей и оценки доли объяснённой вариации строили линейные модели вида $y = a \cdot x + b$ и приводили коэффициент детерминации R^2 .

По 14 наблюдениям построены линейные зависимости агрохимических показателей от индекса R1/R2. Наиболее выраженные связи получены для рН(KCl) ($R^2 = 0.6946$) и гумуса ($R^2 = 0.6984$). Для влажности, фосфора и калия связь положительная, но менее устойчивая



Таблица 2

Значения яркости в первом и втором максимумах спектрограммы (R1, R2; DN) и производные индексы (R1/R2)

№ пробоотбора	Код спектрограммы	R1	R2	R1/R2
1	38	4600	8700	0.5287
2	40	4700	8900	0.5281
3	34	4800	9400	0.5106
4	53	4300	7200	0.5972
5	47	3600	5800	0.6207
6	51	3500	5500	0.6364
7	62	6000	8300	0.7229
8	56	6300	8600	0.7326
9	58	6200	8000	0.7750
10	29	3500	3250	1.0769
11	25	2700	2500	1.0800
12	17	4700	4550	1.0330
13	12	1550	1450	1.0690
14	21	5000	4600	1.0870

($R^2 \approx 0.41-0.43$), что указывает на вклад локальной неоднородности и сопутствующих факторов. Уравнения линейной аппроксимации имеют вид: рН(KCl) = $3.4298 \cdot (R1/R2) + 2.4301$ ($R^2 = 0.6946$); гумус = $7.119 \cdot (R1/R2) - 2.556$ ($R^2 = 0.6984$); влажность = $6.9812 \cdot (R1/R2) + 9.1434$ ($R^2 = 0.4289$); калий = $1192.3 \cdot (R1/R2) - 595.54$ ($R^2 = 0.3434$); фосфор = $896.17 \cdot (R1/R2) - 460.77$ ($R^2 = 0.4185$). Таким образом, R1/R2 объясняет значимую долю вариации рН(KCl) и гумуса, а для элементов питания и влажности связь остается умеренной. При прикладной интерпретации индекс R1/R2 целесообразно рассматривать совместно с яркостью второго максимума R2 (DN) и положением точки в рельефе: в транзитных позициях чаще наблюдаются более упорядоченные тренды, тогда как в аккумулятивных возможны локальные аномалии, связанные с переувлажнением или перераспределением мелкозёма. Зависимость между спектрографическими кривыми и соответствующими агрохимическими показателями хорошо выражается нахождением коэффициента корреляции (r) (табл. 3). Корреля-

ции рассчитаны с использованием коэффициента Пирсона.

По данным, приведенным в табл. 3, индекс R1/R2 наиболее тесно связан с рН(KCl) и содержанием гумуса, тогда как связи с фосфором и калием выражены умеренно. Это позволяет рассматривать R1/R2 как спектральный предиктор параметров, наиболее чувствительных к эрозийным преобразованиям пахотного слоя (прежде всего гумуса и кислотности). Содержание гумуса традиционно рассматривается как основной количественный показатель эродированности пахотных почв, поскольку смыв верхних горизонтов сопровождается уменьшением запасов органического вещества. В практических шкалах градаций для чернозёмов снижение гумуса в пахотном слое соответствует переходу к более высокой степени эродированности (в частности, для тяжёлосуглинистых чернозёмов значения < 5% относят к очень сильноэродированным). В этом контексте выявленная связь R1/R2 с гумусом и рН поддерживает использование спектральных индексов как экспресс-индикаторов состояния почвы. По шкале градаций выпашанности (эро-

Таблица 3

Корреляционный анализ соотношения пиков и агрохимических показателей почвы

	R1/R2	Гумус	Фосфор	Калий	рН(KCl)	Влажность
R1/R2	+1.0	+0.79	+0.67	+0.60	+0.85	+0.62
Гумус	+0.79	+1.0	+0.86	+0.82	+0.82	+0.83
Фосфор	+0.67	+0.86	+1.0	+0.88	+0.73	+0.71
Калий	+0.60	+0.82	+0.88	+1.0	+0.69	+0.76
рН(KCl)	+0.85	+0.82	+0.73	+0.69	+1.0	+0.81
Влажность	+0.62	+0.83	+0.71	+0.76	+0.81	+1.0



дированности) для типичных и выщелоченных черноземов по содержанию гумуса в пахотном слое для тяжелосуглинистых относятся к очень сильноэродированным при содержании менее 5%; к сильноэродированным – 5.0–5.9%; среднеэродированным – 5.9–6.9%; слабоэродированным – > 6.9%. В среднесуглинистых черноземах – к очень сильноэродированным – < 4.5%; сильноэродированным – 4.5–5.4%; среднеэродированным – 5.4–6.3%; слабоэродированным – более 6.3% [15].

Для калия и фосфора пространственная неоднородность усиливается агротехнологическими факторами (внесение удобрений, различия по обработке), поэтому спектральные индексы отражают эти элементы менее однозначно. В рамках методики их целесообразно использовать как второстепенные показатели, а основное внимание уделять связке «R1/R2 – гумус/ рН(KCl)» и рельефной позиции.

Ограничения исследования связаны с небольшим объемом выборки ($n = 14$), сезонной изменчивостью влажности и состояния поверхности, а также неоднородностью склоновых условий (микрорельеф, растительные остатки, локальная аккумуляция/эрозия). Для повышения устойчивости выводов необходимы расширение выборки и повторные измерения в разные периоды года с учётом типа почвы и позиции в рельефе.

При почвенно-эрозионной съёмке в условиях одного хозяйства с однородной почвообразующей породой однотипными агротехническими и агрохимическими приемами использование спектрометра позволит значительно уменьшить объем полевых работ и повысить точность установления почвенных контуров.

Заключение

1. Показано, что параметры спектрограмм в сочетании с агрохимическими показателями (прежде всего гумус и рН(KCl)) могут использоваться как индикаторы эрозионных преобразований пахотного слоя на территории Чувашской Республики.

2. Индекс формы R1/R2 демонстрирует статистически значимую положительную связь с рН(KCl) и содержанием гумуса и может применяться для их ориентировочной оценки в рамках исследованной выборки.

3. Наибольший прикладной потенциал R1/R2 проявляется при совместном анализе с яркостью R2 и привязкой к элементам рельефа, что позволяет отличать более однородные транзитные участки от зон возможной аккумуляции.

4. Использование спектрометрии целесообразно рассматривать как вспомогательный метод, дополняющий почвенно-агрохимические обследования и повышающий оперативность уточнения контуров смытых почв.

5. Для влажности калия и фосфора выявлены положительные, но менее устойчивые зависимости от R1/R2, что отражает вклад локальной неоднородности и сопутствующих факторов.

6. В склоновых условиях R1/R2 следует интерпретировать совместно с положением в рельефе и яркостью R2 (DN): в транзитных позициях чаще наблюдаются более упорядоченные тренды, а в аккумулятивных возможны локальные аномалии.

Полученные зависимости требуют верификации на расширенной выборке и при повторных измерениях в разные периоды года и могут быть использованы при планировании уточняющих почвенных обследований и выборе участков для детализации почвенно-эрозионных карт в пределах сельскохозяйственных предприятий.

Для развития данного направления необходимо при подготовительных работах заранее определить новые полигоны и увеличить количество точек наблюдения для определения характера взаимосвязей между спектрографическими кривыми и различными параметрами изучаемых почв.

Библиографический список

1. Wang J., Yang J., Li Z., Ke L., Li Q., Fan J., Wang X. Research on Soil Erosion Based on Remote Sensing Technology: A Review // *Agriculture*. 2025. Vol. 15, № 1. Art. 18. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010018>, EDN: OCIXXX
2. Sirotkin V., Vasyukov S., Usmanov B. Spectrographic characteristics of Chuvash Republic zonal soils with different erosion degrees // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Conference proceedings (Albena, Bulgaria, 30 June – 06 July 2016). Albena, Bulgaria : STEF92 Technology Ltd., 2016. Vol. 2. P. 357–362. <https://doi.org/10.5593/SGEM2016/B32/S13.047>, EDN: ISVWXF
3. Vasyukov S. V., Sirotkin V. V., Usmanov B. M., Toguzov S. A., Iakimovich D. N., Akhmetzyanova L. G. Application of UAV and spectrometric survey results to determine agrochemical parameters of zonal soils used in agriculture (East of European Russia) // *Proc. SPIE 11856. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXIII*. 12 September 2021. Art. 118560Z. <https://doi.org/10.1117/12.2599772>, EDN: BAFJAK
4. Чекарев П. А., Коршунов А. П. Агрохимическая характеристика почв Чувашской Республики // *Земледелие*. 2020. № 8. С. 24–28. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10805>, EDN: GHRRPH
5. Самсонова В. П., Мешалкина Ю. Л. Оценка роли рельефа в пространственной изменчивости агрохимически важных почвенных свойств для интенсивно обрабатываемого сельскохозяйственного угодья // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2014. № 3. С. 36–44. EDN: SKIYSL
6. Кузякова И. Ф., Кузяков Я. В. Влияние микрорельефа на пространственное варьирование содержания



- гумуса в дерново-подзолистой почве в условиях длительного полевого опыта // Почвоведение. 1997. № 7. С. 25–33.
7. Kravchenko A. N., Bullock D. G. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties // Agr. J. 2000. Vol. 92. P. 75–83. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2000.92175X>, EDN: AVTYCX
 8. Buivydatie V. V., Mozgeris G. Digital land surface analysis: on possibilities of applications in soil survey // EuroSoil Conference : Proceedings, 2004. P. 9–11.
 9. Nolan S. C., Goddard T. W., Lohstraeter G., Coen G. M. Assessing management units on rolling topography // Proc. of Fifth Intern. Conf. on Prec. Agricult. (Bloomington, Minnesota, July 16–19, 2000). Madison, 2000. P. 16–20.
 10. Florinsky I. V., Manning G. R., Eilers R. G., Fuller L.G. Prediction of soil properties by digital terrain modelling // Modelling and Software. 2002. Vol. 17, № 3. P. 295–311. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00067-6), EDN: LHNHDX
 11. Сироткин В. В., Васюков С. В., Усманов Б. М. Изучение почвенных параметров на основе полевых спектрометрических данных // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2020. Т. 30, № 1. С. 71–82. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2020-30-1-71-82>, EDN: IWSIOP
 12. Нечаева Т. В., Смирнова Н. В., Гопп Н. В., Савенков О. А. Изменение агрохимических параметров плодородия пахотных почв склона на юге Западной Сибири // Плодородие. 2017. № 2 (95). С. 2–5. EDN: YKUZTB
 13. Соболев С. С. Защита почв от эрозии и повышение их плодородия. М. : Сельхозиздат, 1961. 231 с.
 14. Заславский М. Н. Некоторые вопросы эрозионной терминологии и классификации эрозионных процессов // Вопросы методики почвенно-эрозионного картирования : сб. М. : Изд-во ГИЗР, 1972. 457 с.
 15. Козут Б. М. Оценка уровней эродированности черноземов по относительной степени их гумусированности // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2015. № 78. С. 59–69. EDN: TRZJYF

Поступила в редакцию 11.03.2026; одобрена после рецензирования 12.03.2026;
принята к публикации 12.03.2026; опубликована 01.06.2026

The article was submitted 11.03.2026; approved after reviewing 12.03.2026;
accepted for publication 12.03.2026; published 01.06.2026