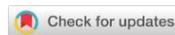


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-122-174-193



Ссылки для цитирования:

Савин И.Ю., Терехов А.Г., Мухамедиев Р.И. Концепция линии почв и ее использование для картографирования и мониторинга почв (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 122. С. 174-193. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-122-174-193

Cite this article as:

Savin I.Yu., Terekhov A.G., Mukhamediev R.I., Soil line concept and its use for soil mapping and monitoring (overview), Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 122, pp. 174-193, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-122-174-193

Благодарность:

Проект был поддержан комитетом науки, министерство науки и высшего образования Республики Казахстан, грант № BR 24992908, “Agroscope”.

Acknowledgments:

This research has been funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992908; “Agroscope”).

Концепция линии почв и ее использование для картографирования и мониторинга почв (обзор)

© 2025 г. И. Ю. Савин^{1*}, А. Г. Терехов², Р. И. Мухамедиев³

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

* <https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

²Институт информационных и вычислительных технологий МОН,
050010, Алматы, Казахстан.

³Казахский Научно-Исследовательский Технический Университет
им. К.И. Сатпаева, Казахстан,
050000, Алматы, ул. Сатпаева 22.

Поступила в редакцию 06.06.2024, после доработки 23.07.2025,
принята к публикации 18.02.2025

Резюме: Концепция линии почв предложена в 1977 г. С тех пор она достаточно широко используется для спутникового мониторинга растительности, наземного покрова и почв. Проведен критический обзор научных публикаций по использованию концепции линии почв в

дистанционном зондировании. Обзор базируется на анализе публикаций, проиндексированных в наукометрических базах данных РИНЦ и Scopus. Поиск осуществлен по терминам “линия почв” и “soil AND line AND spectral AND reflection” в названиях статей, в ключевых словах и в абстрактах публикаций за все имеющиеся годы. В выборку включены следующие типы публикаций: статьи в научных журналах, обзорные статьи, главы в книгах, статьи в сборниках докладов конференций. Всего проанализировано 104 статьи. Установлено, что наиболее широко концепция линии почв используется при создании вегетационных спектральных индексов для мониторинга растительного покрова. Кроме того, она применяется для оценки состояния наземного покрова и при мониторинге почв. Лидерами по количеству публикаций в данной области знаний являются специалисты из Китая. Вместе со специалистами из США и России они опубликовали около половины всех работ. По аффилиации первого автора преобладают публикации Китайской академии наук и Почвенного института им. В.В. Докучаева (Россия). Концепция линии почв является перспективной для картографирования и мониторинга отдельных групп свойств почв, реже – отдельных свойств почв по характеру изображения их открытой поверхности. Для ее более широкого использования необходимы дополнительные исследования влияния отдельных свойств разных почв на их спектральную отражательную способность в видимом и БИК диапазонах спектра. Гипотеза о возможности спутникового картографирования и мониторинга типов (или других классификационных выделов) почв на основе концепции почвенной линии требует большого экспериментального подтверждения.

Ключевые слова: дешифрирование почв; спектральная отражательная способность почв; спектральные индексы.

Soil line concept and its use for soil mapping and monitoring (overview)

© 2025 I. Yu. Savin^{1*}, A. G. Terekhov², R. I. Mukhamediev³

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
[*https://orcid.org/0000-0002-8739-5441](https://orcid.org/0000-0002-8739-5441), e-mail: savin_iyu@esoil.ru.*

²*Institute of Information and Computing Technologies MES,
Almaty 050010, Kazakhstan.*

³*Satbayev University,
22 Satbaev street, Almaty 050000, Kazakhstan.*

Received 06.06.2024, Revised 23.07.2025, Accepted 18.02.2025

Abstract: The soil line concept was proposed in 1977. Since then, it has been widely used for satellite monitoring of vegetation, land cover and soils. A critical review of scientific publications on the use of the soil line concept in remote sensing is carried out. The review is based on the analysis of publications indexed in the scientific databases RISC and Scopus. The search was performed using the terms “soil line” and “soil AND line AND spectral AND reflection” in the titles of articles, in keywords and in abstracts of publications for all available years. The following types of publications were included in the sample: articles in scientific journals, review articles, book chapters, and articles in conference proceedings. A total of 104 articles were analyzed. It was found that the soil line concept is most widely used in the creation of vegetation spectral indices for monitoring vegetation cover. It is also used to assess the state of land cover and in soil monitoring. The leader in the number of publications in this field of knowledge are specialists from China. Together with specialists from the USA and Russia, they have published about half of all publications. By affiliation of the first author, publications of the Chinese Academy of Sciences and the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (Russia) prevail. The concept of soil line is promising for mapping and monitoring of separate groups of soil properties, less often - separate soil properties by the character of their open surface image. For its wider use, additional studies of the influence of individual properties of different soils on their spectral reflectivity in the visible and NIR spectral ranges are needed. The hypothesis about the possibility of satellite mapping and monitoring of soil types (or other classification divisions) based on the soil line concept requires extensive experimental confirmation.

Keywords: soil detection; soil spectral reflection; spectral indexes.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция линии почв была предложена Ричардсоном и Вигандом в 1977 г. (Richardson, Wiegand, 1977) для учета влияния почвенного фона на вегетационные спектральные индексы, рассчитываемые по спутниковым данным для мониторинга состояния растительности. На основе концепции почвенной линии были предложены квазиинвариантные к почвенному фону вегетационные спектральные индексы (наиболее известные из которых PVI (Richardson, Wiegand, 1977), TSAVI (Baret et al., 1989), ATSAVI (Baret, Guyot, 1991), которые в настоящее время достаточно широко используются при спутниковом мониторинге как естественной,

так и сельскохозяйственной растительности. Также с учетом почвенной линии оценивается проективное покрытие растительности (Gitelson et al., 2002), присутствие на поверхности пахотных почв стерни (Thoma et al., 2004). Реже концепция почвенной линии используется для предварительной обработки исходных спутниковых данных с целью улучшения точности мониторинга растительности (Jaishanker et al., 2006).

Существуют также исследования в области использования концепции почвенной линии и для решения обратной задачи: оценки свойств и состояния почв, а не растительности (Galvaio, Vitorello, 1998; Fox, Sabbagh, 2002; Fox, Metla, 2005). Но исследований в данном направлении до сих пор достаточно мало.

Почвенная линия представляет собой соотношение отражения открытой поверхности почв (или образца почв) в красной и ближней инфракрасной (БИК) областях спектра электромагнитных волн (Fox et al., 2004). Обычно она представляется прямой линией в координатах отражения в видимой и ближней инфракрасной областях и может быть охарактеризована наклоном этой линии и местом ее пересечения с осью У (отражение в БИК) (интерсептом) (рис. 1).

Многие авторы полагают, что линия почв универсальна и принимают ее единой для всех почв мира (Huete et al., 1984). Но в классических работах в этой области знаний (см., например, Varet et al., 1993) указывается на то, что специфика линии почв зависит от типа почвы (soil type) и каждый тип почвы характеризуется своей почвенной линией.

Положение точки отражения почвы на линии почв определяется ее влажностью, шероховатостью поверхности и другими свойствами почв, которые не влияют на ее цвет (отражение света в видимой и БИК области спектра), а предопределяют лишь его интенсивность (Жирянова, Савин, 2011).

Таким образом, концепция линии почв в настоящее время широко используется в системах дистанционного зондирования земной поверхности и обладает большим потенциалом для ее использования в дистанционном мониторинге почв.

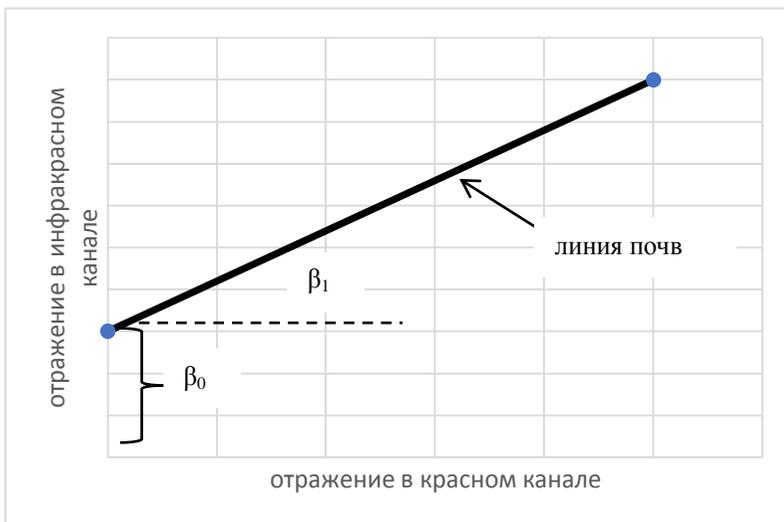


Рис. 1. Схематичное графическое представление линии почв (β_0 – интерсепт; β_1 – угол наклона).

Fig. 1. Schematic graphical representation of the soil line (β_0 – intercept; β_1 – slope angle).

Целью настоящей статьи является обзор научной литературы в области концепции линии почв для определения состояния и основных трендов данного научного направления в мировой науке.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследований использована выборка научных публикаций, сформированная в результате поискового запроса. С целью получения информации не только об отечественных публикациях, но и зарубежных, поиск публикаций осуществлен в наукометрических базах данных РИНЦ и Scopus. В обеих базах данных поиск осуществлен по терминам “линия почв” и “soil AND line AND spectral AND reflection” в названиях статей, в ключевых словах и в абстрактах публикаций за все имеющиеся

годы. В выборку включены следующие типы публикаций: статьи в научных журналах, обзорные статьи, главы в книгах, статьи в сборниках докладов конференций.

Выборки из обеих баз данных были просмотрены визуально, и из них были удалены повторяющиеся публикации и ошибочно включенные в выборку при поиске. После этого была получена объединенная выборка.

В результате в выборке оказалось 104 публикации. Из них 15 публикаций из наукометрической базы РИНЦ на русском языке и 89 публикаций из наукометрической базы данных Scopus на английском языке.

Тематически все публикации были разбиты на несколько групп:

1. использование концепции линии почв для мониторинга растительности (удаление влияния почвенного фона);
2. использование концепции линии почв для мониторинга наземного покрова и состояния поверхности;
3. использование концепции линии почв для предварительной обработки спутниковых данных и их подготовки к прикладному анализу;
4. усовершенствование процедуры расчета спектральных индексов и линии почв;
5. использование концепции линии почв для детектирования свойств почв и их мониторинга.

Дополнительно анализировалась общая многолетняя динамика количества публикаций и динамика по тематическим группам. Оценивалось распределение публикаций по источникам, странам и организациям (по первому автору). Выделены самые цитируемые публикации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общее количество публикаций в год по анализируемой теме не велико. В среднем за последние десятилетия оно составляет 4–6 статей в год (рис. 2).

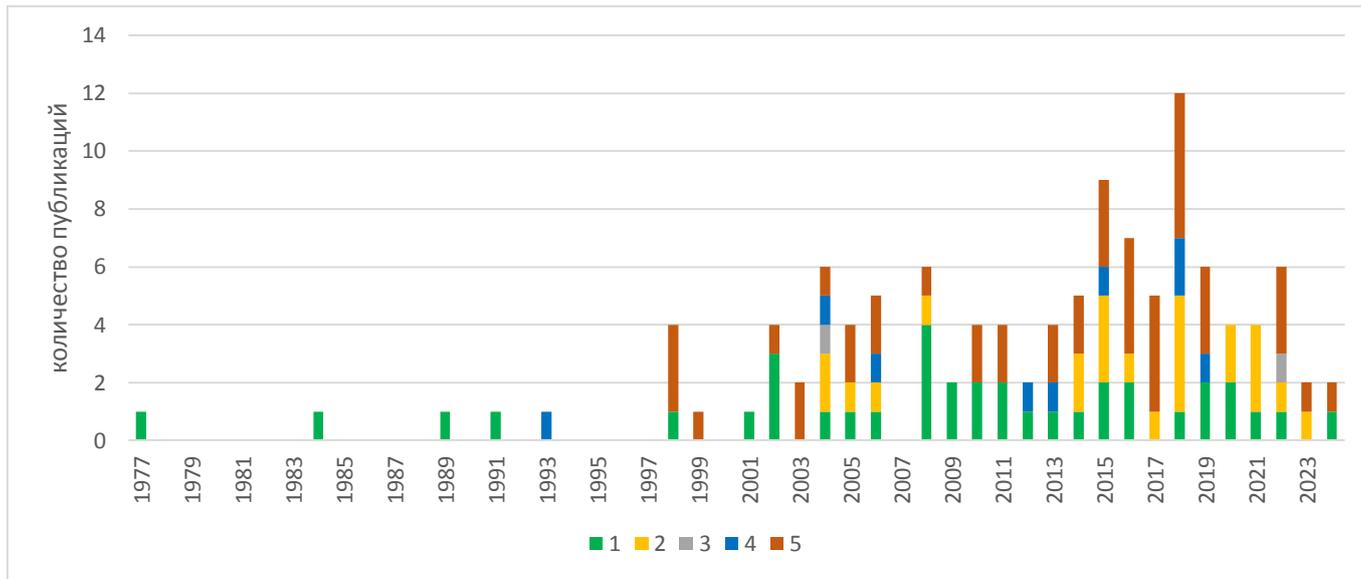


Рис. 2. Динамика количества публикаций с учетом тематических групп (номер тематической группы соответствует тексту).

Fig. 2. Dynamics of the number of publications regarding thematic groups (the number of the thematic group corresponds to the text).

Интересно отметить, что на такой уровень публикаций кривая выходит лишь спустя несколько десятков лет после появления первой публикации. Пик публикаций отмечается в период с 2015 по 2020 гг., после чего наблюдается спад их количества. Скорее всего, это связано с тем, что после периода активного использования концепции для создания новых индексов для мониторинга растительности, наступил период их активной апробации и использования. И в публикациях этого периода термин “линия почв” уже может и не упоминаться, так как упоминаются названия самих индексов.

Преобладают публикации, посвященные созданию новых и уточнению существующих методов мониторинга растительности с учетом влияния почвенного фона, а также выделения элементов наземного покрова с растительностью или без нее (Украинский, Землякова, 2014; Королева и др., 2017). Особенности отражения света открытой поверхностью почв даже при сильно сомкнутом почвенном покрове могут значительно влиять на отражательную способность растительного покрова, особенно посевов сельскохозяйственных культур (Prudnikova et al., 2019; Jiang et al., 2023). Учет такого влияния может существенно повысить качество спутникового мониторинга посевов и других типов растительности, что и является основной причиной появления подобных публикаций.

Немного меньше публикаций, содержащих результаты исследований по использованию линии почв для детектирования отдельных свойств почв и их мониторинга на основе спутниковых данных. В большинстве случаев речь идет о поисках новых индикаторов, основанных на концепции линии почв, получаемой на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения (Chen et al., 2018; Demattê et al., 2018), или же на анализе кривых спектральной отражательной особенности почв, полученных в лабораторных условиях (Liu et al., 2019; Shoshany et al., 2022).

Работы в области использования концепции линии почв для предварительной обработки спутниковых данных и в области усовершенствования методов получения информации о линии почв за весь период анализа единичны (Qin et al., 2012; Wu, Xu, 2019).

Лидером по количеству публикаций в данной области знаний являются специалисты из Китая (табл. 1). Вместе со специалистами США и России они опубликовали около половины всех публикаций.

По аффилиации первого автора преобладают публикации Китайской академии наук и Почвенного института им. В.В. Докучаева (Россия) (по 8 публикаций от каждой организации). У 7 публикаций в качестве аффилиации первого автора указан Университет Сан-Паулу (Бразилия), у 6 – Гавайский университет (США).

Таблица 1. Доля публикаций в области концепции линии почв специалистами разных стран мира

Table 1. Percentage of publications on soil line concept by specialists from around the world

страна	доля публикаций (%)
Китай	25.9
США	14.7
Россия	12.9
Бразилия	7.8
Япония	6.0
Франция	5.2
Австралия	5.2
Испания	4.3
Израиль	4.3
Канада	4.3
Марокко	3.4
Мексика	2.6
Иран	2.6
Индия	2.6
Нидерланды	1.7
Италия	1.7
Азербайджан	1.7

В таблице 2 приведен список научных журналов, в которых опубликована большая часть публикаций. Из таблицы 2 следует, что это в основном журналы, публикующие статьи в области дистанционного зондирования. Из почвенных журналов в нем лишь журнал “Почвоведение” (МАИК “Наука”, Россия).

Наиболее цитируемыми в анализируемой предметной области являются следующие публикации:

1. Deng et al., 2018 (289 ссылок)
2. Wang et al., 2015 (237 ссылок)
3. Gilabert et al., 2002 (235 ссылок)
4. Gitelson et al., 2002 (213 ссылок)
5. Demattê et al., 2004 (185 ссылок)

Все указанные выше цитирования – из базы данных Scopus.

Необходимо отметить, что большая часть этих публикаций посвящена разработке новых методов спутникового мониторинга растительности путем элиминации влияния почвенного фона. С точки зрения картографирования и мониторинга почв, концепция линии почв также имеет большой потенциал для использования, что показано во многих публикациях.

Таблица 2. Доля публикаций в области концепции линии почв по журналам

Table 2. Percentage of publications in the field of soil line concept in journals

источник	доля публикаций (%)
Remote Sensing of Environment	10.3
Spectroscopy and Spectral Analysis	7.8
Remote Sensing	6.9
International Journal of Remote Sensing	6.9
Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering	5.2
Почвоведение	5.2
Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering	4.3

При мониторинге растительности и использовании вегетационных индексов многие авторы опираются на глобальную линию почв. На основе этого предположения были предложены многие спектральные вегетационные индексы. Это нашло отражение и в толковых словарях (см., например, определение понятия “soil line” в Оксфордском словаре (Soil line..., 2024)). Но, с точки зрения знаний о почвах, глобальность (уникальность) почвенной линии может быть принята лишь в самом грубом приближении. Именно это, по нашему мнению, является одним из источников ошибок при спутниковом мониторинге растительности с использованием вегетационных спектральных индексов, о чем пишут в своей работе, например, Nakalembe et al. (2021). Принятие глобальности почвенной линии ведет к выводу о ее никчемности для детектирования свойств почв.

В работе F. Baret (1993) на основе лабораторных экспериментов было показано, что линия почв не является глобальной и зависит от типа почв (soil types).

Позднее было высказано предположение, что линия почв зависит от сочетания их свойств, а не от положения почвы в той или иной классификации (Кирьянова, Савин, 2011; Prudnikova, Savin, 2018). Это предположение базируется на том, что можно выделить две группы свойств почв: влияющие на цвет почвы (тип и содержание гумуса, минералогический состав) и влияющие лишь на изменение интенсивности цвета почвы, а не на сам цвет (влажность, шероховатость поверхности, грансостав) (Савин, 1990). Таким образом, тип и содержание гумуса, и минералогический состав будут предопределять наклон и интерсепт линии почв, а влажность, шероховатость поверхности и грансостав будут определять положение точки почвы на линии почв. То есть одинаковая линия почв должна быть у таковых с одинаковым типом и количеством гумуса и одинаковым минералогическим составом. Отсюда следует, что любой тип (или другой классификационный выдел почв) не может характеризоваться одной и той же линией почв. Поэтому привязка единой линии почв к одному почвенно-картографическому (или классификационному) выделу почв, как это делается, например, в работе Koroleva et al. (2018), является достаточно сильным огрублением. Один выдел почв в большин-

стве случаев может быть охарактеризован лишь некой средней линией почв, которая будет индивидуальной для каждого выдела. Еще более грубыми выглядят оценки на основе единой линии почв (или окрестности линии почв) для отдельных спутниковых сцен (Куляница и др., 2016). На каждую сцену попадает большое разнообразие индивидуальных линий почв, осреднение которых приводит к значительному сглаживанию и к потере информации о почвах и их динамичности, а также к несопоставимости получаемых результатов даже для соседних сцен.

Полученные результаты анализа позволяют сделать заключение, что концепция линии почв является перспективной для картографирования и мониторинга отдельных групп свойств почв, реже – отдельных свойств почв по характеру изображения их открытой поверхности. Для ее более широкого использования необходимы дополнительные исследования влияния отдельных свойств разных почв на их спеткральную отражательную способность в видимом и БИК диапазонах спектра, как это было сделано на примере отдельных свойств несколько десятилетий назад F. Varet (1993).

Гипотеза о возможности спутникового картографирования и мониторинга типов (или других классификационных выделов) почв на основе концепции почвенной линии требует большого экспериментального подтверждения. В настоящее время она во многом противоречит имеющимся данным о связи спектральной отражательной способности поверхности почв со свойствами их профиля и, соответственно, с классификационным положением почв (Савин, 2020).

Дополнительно необходимо отметить, что полученные результаты анализа зависят от особенностей поиска публикаций в базе данных Scopus. Так, например, использование в поисковом запросе только двух слов (“soil” и “line”) приводит к результату из нескольких тысяч публикаций, но большая часть из них не имеет отношения к рассматриваемой предметной области. Использованная нами комбинация терминов позволила получить выборку, где подавляющее большинство публикаций относится именно к ней. Но, вполне возможно, что часть публикаций при таком поиске все же не удалось проанализировать.

Другой особенностью, которая могла повлиять на результаты, является то, что часть анализа проведена лишь для первого автора (страна, организация), хотя многие публикации, особенно за последние годы, являются интернациональными, в соавторы которых входят представители разных стран и организаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концепция линии почв послужила надежным основанием для разработки методов спутникового мониторинга растительности, наземного покрова и почв.

Лидером по количеству публикаций в данной области знаний являются специалисты из Китая. Вместе со специалистами США и России они опубликовали около половины всех работ.

По аффилиации первого автора преобладают публикации Китайской академии наук и Почвенного института им. В.В. Докучаева (Россия).

Концепция линии почв является перспективной для картографирования и мониторинга отдельных групп свойств почв, реже отдельных свойств почв, по характеру изображения их открытой поверхности. Для ее более широкого использования необходимы дополнительные исследования влияния отдельных свойств разных почв на их спеткральную отражательную способность в видимом и БИК диапазонах спектра.

Гипотеза о возможности спутникового картографирования и мониторинга типов (или других классификационных выделов) почв на основе концепции почвенной линии требует большого экспериментального подтверждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кириянова Е.Ю., Савин И.Ю.* Линия почв как индикатор неоднородностей почвенного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 310–318.
2. *Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С.* Местоположение открытой поверхности почвы и линии почвы в спектральном пространстве RED-NIR // Почвоведение. 2017. № 12. С.

1435–1446.

3. Куляница А.Л., Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Симакова М.С. Построение карт коэффициентов “а” и “б” линий почв, рассчитанных по 34 разновременным кадрам LANDSAT // Информация и космос. 2016. № 1. С. 100–114.

4. Савин И.Ю. Дешифрование почвенного покрова центрально-черноземных областей по среднемасштабным космическим снимкам: Дисс. ... канд. геогр. наук. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1990. 300 с.

5. Савин И.Ю. Пространственные аспекты прикладного почвоведения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18>.

6. Украинский П.А., Землякова А.В. Определение параметров почвенной линии для автоматизированного распознавания открытой поверхности почвы на космических снимках // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 9–1. С. 140–144.

7. Baret F., Jacquemoud S., Hanocq J.F. About the soil line concept in remote-sensing // Adv. Space Res. 1993. Vol. 13. P. 281–284.

8. Baret F., Guyot G. Potentials and limits of vegetation indexes for LAI and APAR assessment // Remote Sens. Environ. 1991. Vol. 35. P. 161–173.

9. Baret F., Guyot G., Major D. TSAVI – A Vegetation Index which Minimizes Soil Brightness Effects on LAI and APAR Estimation // Proc. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and 1989 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'89: Vancouver, 1989. P. 1355–1358.

10. Chen S.-M., Zou S.-Q., Mao Y.-L., Liang W.-X., Ding H. Inversion of Soil Organic Matter Content in Wetland Using Multispectral Data Based on Soil Spectral Reconstruction // Spectroscopy and Spectral Analysis. 2018. Vol. 38 (3). P. 912–917. DOI: [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2018\)03-0912-06](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2018)03-0912-06).

11. Demattê J.A.M., Campos R.C., Alves M.C., Fiorio P.R., Nanni M.R. Visible-NIR reflectance: A new approach on soil evaluation // Geoderma. 2004. Vol. 121(1–2). P. 95–112.

12. Demattê J.A.M., Fongaro C.T., Rizzo R., Safanelli J.L. Geospatial Soil Sensing System (GEOS3): A powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 212. P. 161–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.047>.

13. Deng L., Mao Z., Li X., .. Duan F., Yan Y. UAV-based multi-spectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. Vol. 146. P. 124–136.

14. *Fox G.A., Sabbagh G.J.* Estimation of soil organic matter from red and near-infrared remotely sensed data using a soil line Euclidean distance technique // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2002. Vol. 66. P. 1922–1929.
15. *Fox G.A., Sabbagh G.J., Searcy S.W., Yang C.* An automated soil line identification routine for remotely sensed images // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2004. Vol. 68. P. 1326–1331.
16. *Fox G.A., Metla R.* Soil property analysis using principal components analysis, soil line, and regression models // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2005. Vol. 69. P. 1782–1788.
17. *Galvao L.S., Vitorello I.* Variability of laboratory measured soil lines of soils from southeastern Brazil // *Remote Sens. Environ.* 1998. Vol. 63. P. 166–181.
18. *Gilabert M.A., González-Piqueras J., García-Haro F.J., Meliá J.* A generalized soil-adjusted vegetation index // *Remote Sensing of Environment.* 2002. Vol. 82(2–3), pp. 303–310.
19. *Gitelson A.A., Stark R., Grits U., Rundquist D., Kaufman Y., Derry D.* Vegetation and soil lines in visible spectral space: A concept and technique for remote estimation of vegetation fraction // *Int. J. Remote Sens.* 2002. Vol. 23. P. 2537–2562.
20. *Huete A.R., Post D.F., Jackson R.D.* Soil spectral effects on 4-space vegetation discrimination // *Remote Sens. Environ.* 1984. Vol. 15. Issue 2. P. 155–165. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90043-9).
21. *Jaishanker R., Thomaskutty A.V., Senthivel T., Sridhar V.N.* Soil line transformation based relative radiometric normalization // *Int. J. Remote Sens.* 2006. Vol. 27. P. 5103–5108.
22. *Jiang H., Wei X., Chen Z., Zhu M., Yao Y., Zhang X., Jia K.* Influence of different soil reflectance schemes on the retrieval of vegetation LAI and FVC from PROSAIL in agriculture region // *Computers and Electronics in Agriculture.* 2023. Vol. 212. Art. no. 108165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108165>.
23. *Koroleva P.V., Rukhovich D.I., Kalinina N.V., Simakova M.S., Kulyanitsa A.L., Rukhovich A.D., Rukhovich D.D., Trubnikov A.V.* Characterization of soil types and subtypes in n-dimensional space of multitemporal (empirical) soil line // *Eurasian Soil Science.* 2018. Vol. 51. No. 9. P. 1021–1033.
24. *Liu H.-J., Meng X.-T., Wang X., Bao Y.-L., Yu Z.-Y., Zhang X.-L.* Soil Classification Model Based on the Characteristics of Soil Reflectance Spectrum // *Spectroscopy and Spectral Analysis.* Vol. 39(8). P. 2481–2485. DOI: [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2019\)08-2481-05](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2019)08-2481-05).
25. *Nakalembe C., Becker-Reshef I., Bonifacio R., Hu G., Humber M.L., Justice C.J., Keniston J., Mwangi K., Rembold F., Shukla S., Urbano F.,*

Whitcraft A.C., Li Y., Zappacosta M., Jarvis I., Sanchez A. A review of satellite-based global agricultural monitoring systems available for Africa // Global Food Security. 2021. Vol. 29. Article 100543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100543>.

26. Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu. The possibilities of soil line concept application for the detection of soil properties // GlobalSoilMap: Digital Soil Mapping from Country to Globe. Proc. of the GlobalSoilMap 2017 Conference. 2018. P. 97–102.

27. Prudnikova E., Savin I., Vindeker G., Grubina P., Shishkonakova E., Sharychev D. Influence of Soil Background on Spectral Reflectance of Winter Wheat Crop Canopy // Remote Sensing. 2019 Vol. 11(16). Art. no. 1932. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11161932>.

28. Qin Q., You L., Zhao Y., Zhao S., Yao Y. Soil line automatic identification algorithm based on two-dimensional feature space // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2012. Vol. 28(3). P. 167–171. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2012.03.029>.

29. Richardson A.J., Wiegand C. Distinguishing vegetation from soil background information (by gray mapping of Landsat MSS data) // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1977. Vol. 43. P. 1541–1552.

30. Shoshany M., Roitberg E., Goldshleger N., Kizel F. Universal quadratic soil spectral reflectance line and its deviation patterns' relationships with chemical and textural properties: A global data base analysis // Remote Sensing of Environment. 2022. Vol. 280. Art. no. 113182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113182>.

31. “Soil line” A Dictionary of Earth Sciences. Retrieved May 16, 2024 from Encyclopedia.com. URL: <https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/soil-line>.

32. Thoma D., Gupta S., Bauer M. Evaluation of optical remote sensing models for crop residue cover assessment // J. Soil Water Conserv. 2004. Vol. 59. P. 224–233.

33. Wang X., Wang M., Wang S., Wu Y. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2015. Vol. 31(5). P. 152–159.

34. Wu X.-P., Xu H.-Q. Cross-Comparison between GF-2 PMS2 and ZY-3 MUX Sensor Data // Spectroscopy and Spectral Analysis. 2019. Vol. 39(1). P. 310–318. DOI: [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2019\)01-0310-09](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2019)01-0310-09).

REFERENCES

1. Kir'yanova E.Yu., Savin I.Yu., Liniya pochv kak indikator neodnorodnosti pochvenno go pokrova (Soil line as an indicator of soil cover

heterogeneities), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 310–318.

2. Koroleva P.V., Rukhovich D.I., Rukhovich A.D., Rukhovich D.D., Kulyanitsa A.L., Trubnikov A.V., Kalinina N.V., Simakova M.S. Mestopolozhenie otkrytoi poverkhnosti pochvy i linii pochvy v spektral'nom prostranstve RED-NIR (Location of the exposed soil surface and soil line in the RED-NIR spectral space), *Pochvovedenie*, 2017, No. 12, pp. 1435–1446.

3. Kulyanitsa A.L., Koroleva P.V., Rukhovich D.I., Rukhovich A.D., Rukhovich D.D., Simakova M.S., Postroenie kart koehffitsientov “a” i “b” linii pochv, rasschitannykh po 34 raznovremennym kadram LANDSAT (Construction of maps of coefficients “a” and “b” of soil lines calculated from 34 multi-temporal LANDSAT frames), *Informatsiya i kosmos*, 2016, No. 1, pp. 100–114.

4. Savin I.Yu., *Deshifirovaniye pochvennogo pokrova lesostepi Tsentral'no-Chernozemnogo rayona po srednemasshtabnym kosmicheskim snimkam: Dis. ... kand. geogr. nauk* (Detection of soil patterns of the forest-steppe of the Central Black Earth region based on medium-scale satellite imagery, Cand. geogr. sci. thesis), Moscow, 1990. 300 p.

5. Savin I.Yu., Spatial aspects of applied Soil Science, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 5–18, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18>.

6. Ukrainskii P.A., Zemlyakova A.V., Opredelenie parametrov pochvennoi linii dlya avtomatizirovannogo raspoznavaniya otkrytoi poverkhnosti pochvy na kosmicheskikh snimkakh (Determination of soil line parameters for automated recognition of open soil surface on space images), *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2014, No. 9–1, pp. 140–144.

7. Baret F., Jacquemoud S., Hanocq J.F., About the soil line concept in remote-sensing, *Adv. Space Res.*, 1993, Vol. 13, pp. 281–284.

8. Baret F., Guyot G., Potentials and limits of vegetation indexes for LAI and APAR assessment, *Remote Sens. Environ.*, 1991, Vol. 35, pp. 161–173.

9. Baret F., Guyot G., Major D., TSAVI – A Vegetation Index which Minimizes Soil Brightness Effects on LAI and APAR Estimation, In: *Proc. of 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and 1989 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IGARSS'89: Vancouver, 1989, pp. 1355–1358.

10. Chen S.-M., Zou S.-Q., Mao Y.-L., Liang W.-X., Ding H., Inversion of Soil Organic Matter Content in Wetland Using Multispectral Data Based on Soil Spectral Reconstruction, *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, Vol. 38(3), pp. 912–917, DOI: [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2018\)03-](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2018)03-)

[0912-06.](#)

11. Demattê J.A.M., Campos R.C., Alves M.C., Fiorio P.R., Nanni M.R., Visible-NIR reflectance: A new approach on soil evaluation, *Geoderma*, 2004, Vol. 121(1–2), pp. 95–112.
12. Demattê J.A.M., Fongaro C.T., Rizzo R., Safanelli J.L., Geospatial Soil Sensing System (GEOS3): A powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 212, pp. 161–175, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.047>.
13. Deng L., Mao Z., Li X., ... Duan F., Yan Y., UAV-based multi-spectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, Vol. 146, pp. 124–136.
14. Fox G.A., Sabbagh G.J., Estimation of soil organic matter from red and near-infrared remotely sensed data using a soil line Euclidean distance technique, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, Vol. 66, pp. 1922–1929.
15. Fox G.A., Sabbagh G.J., Searcy S.W., Yang C., An automated soil line identification routine for remotely sensed images, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, Vol. 68, pp. 1326–1331.
16. Fox G.A., Metla R., Soil property analysis using principal components analysis, soil line, and regression models, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2005, Vol. 69, pp. 1782–1788.
17. Galvao L.S., Vitorello I., Variability of laboratory measured soil lines of soils from southeastern Brazil, *Remote Sens. Environ.*, 1998, Vol. 63, pp. 166–181.
18. Gilabert M.A., González-Piqueras J., García-Haro F.J., Meliá J., A generalized soil-adjusted vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 82(2–3), pp. 303–310.
19. Gitelson A.A., Stark R., Grits U., Rundquist D., Kaufman Y., Derry D., Vegetation and soil lines in visible spectral space: A concept and technique for remote estimation of vegetation fraction, *Int. J. Remote Sens.*, 2002, Vol. 23, pp. 2537–2562.
20. Huete A.R., Post D.F., Jackson R.D., Soil spectral effects on 4-space vegetation discrimination, *Remote Sens. Environ.*, 1984, Vol. 15, Iss. 2, pp. 155–165, DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90043-9).
21. Jaishanker R., Thomaskutty A.V., Senthivel T., Sridhar V.N., Soil line transformation based relative radiometric normalization, *Int. J. Remote Sens.*, 2006, Vol. 27, pp. 5103–5108.
22. Jiang H., Wei X., Chen Z., Zhu M., Yao Y., Zhang X., Jia K., Influence of different soil reflectance schemes on the retrieval of vegetation LAI and FVC from PROSAIL in agriculture region, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, Vol. 212, art. no. 108165, DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108165>.

23. Koroleva P.V., Rukhovich D.I., Kalinina N.V., Simakova M.S., Kulyanitsa A.L., Rukhovich A.D., Rukhovich D.D., Trubnikov A.V., Characterization of soil types and subtypes in n-dimensional space of multitemporal (empirical) soil line, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 9, pp. 1021–1033.

24. Liu H.-J., Meng X.-T., Wang X., Bao Y.-L., Yu Z.-Y., Zhang X.-L., Soil Classification Model Based on the Characteristics of Soil Reflectance Spectrum, *Spectroscopy and Spectral Analysis*, Vol. 39(8), pp. 2481–2485, DOI: [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2019\)08-2481-05](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2019)08-2481-05).

25. Nakalembe C., Becker-Reshef I., Bonifacio R., Hu G., Humber M.L., Justice C.J., Keniston J., Mwangi K., Rembold F., Shukla S., Urbano F., Whitcraft A.C., Li Y., Zappacosta M., Jarvis I., Sanchez A., A review of satellite-based global agricultural monitoring systems available for Africa, *Global Food Security*, 2021, Vol. 29, Art. no. 100543, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100543>.

26. Prudnikova E.Yu., Savin I.Yu., The possibilities of soil line concept application for the detection of soil properties, In: *GlobalSoilMap: Digital Soil Mapping from Country to Globe*, Proc. of the GlobalSoilMap 2017 Conference, 2018, pp. 97–102.

27. Prudnikova E., Savin I., Vindeker G., Grubina P., Shishkonakova E., Sharychev D., Influence of Soil Background on Spectral Reflectance of Winter Wheat Crop Canopy, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(16), Art. no. 1932, DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11161932>.

28. Qin Q., You L., Zhao Y., Zhao S., Yao Y., Soil line automatic identification algorithm based on two-dimensional feature space, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, Vol. 28(3), pp. 167–171, DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2012.03.029>.

29. Richardson A.J., Wiegand C., Distinguishing vegetation from soil background information (by gray mapping of Landsat MSS data), *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 1977, Vol. 43, pp. 1541–1552.

30. Shoshany M., Roitberg E., Goldshleger N., Kizel F., Universal quadratic soil spectral reflectance line and its deviation patterns' relationships with chemical and textural properties: A global data base analysis, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 280, art. no. 113182, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113182>.

31. “Soil line” A Dictionary of Earth Sciences. Retrieved May 16, 2024 from Encyclopedia.com: URL: <https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/soil-line>.

32. Thoma D., Gupta S., Bauer M., Evaluation of optical remote sensing models for crop residue cover assessment, *J. Soil Water Conserv.*, 2004, Vol.

59, pp. 224–233.

33. Wang X., Wang M., Wang S., Wu Y., Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, Vol. 31(5), pp. 152–159.

34. Wu X.-P., Xu H.-Q., Cross-Comparison between GF-2 PMS2 and ZY-3 MUX Sensor Data, *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, Vol. 39(1), pp. 310–318, DOI: [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2019\)01-0310-09](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2019)01-0310-09).