

УДК 528.8:504.06

МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ ЗЕМЕЛЬНОГО ПОКРОВА
В РЕГИОНЕ ШИРАК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ
СПУТНИКА SENTINEL-2 (2015–2025 гг.)

А. Т. ГРИГОРЯН *, С. К. ТЕРТЕРЯН **

Chair of General Geography, YSU, Armenia

Исследование проводилось с целью анализа пространственно-временной деградации земель в Ширакском регионе Армении за период 2015–2025 гг. с использованием спутниковых снимков Sentinel-2. В работе применены нормализованный относительный индекс растительности (NDVI) и почвенно-вегетационный индекс (SAVI). Анализ, проведенный в среде геоинформационной системы QGIS, показывает, что динамика растительного покрова имеет нестабильный характер. Это говорит о том, что годовые колебания значений индексов NDVI и SAVI в значительной степени обусловлены количественными изменениями атмосферных осадков (климатический фактор), а не стабильным качественным улучшением или деградацией почв. Применение индекса SAVI, благодаря включению специального коэффициента коррекции яркости почвы ($L = 0,5$), позволило снизить влияние почвенного фона и получить более точные данные для территорий с разреженной растительностью. Выявлено, что юго-западная часть области (община Ани) является наиболее уязвимой: наблюдаемые здесь интенсивные эрозионные процессы совпадают со стабильно низкими значениями индекса SAVI, что свидетельствует о тенденциях глубокой деградации почв.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2026.60.2.260>

Keywords: soil degradation, Sentinel-2, NDVI, SAVI, Shirak Region, spatiotemporal analysis, erosion, QGIS.

Введение. Деградация земель – одна из важнейших проблем современного мира. Деградация земель – это снижение или потеря биологической или экономической продуктивности и сложности богарных, орошаемых пахотных земель или пастбищ, лугов, лесов и лесных массивов в засушливых, полужасушливых и сухих субгумидных районах [1]. В глобальном масштабе деградированные земли составляют около 25% от общей площади земель [2], и если не будут приняты меры, это число будет продолжать расти. Предотвращение, сокращение и восстановление деградации земель необходимы для обеспечения продовольственной безопасности нынешнего и будущих поколений, сохранения биоразнообразия и достижения климатических целей [3].

* E-mail: arsengrigoryan@ysu.am

** E-mail: terteryan.sona@ysu.am

Эта проблема особенно остро стоит для Республики Армения. Около 70% земель Армении находятся под угрозой опустынивания. Это тревожная ситуация, которая привела к резкому сокращению земель, пригодных для сельского хозяйства, в последние годы [4].

Ширакский регион имеет ключевое значение для обеспечения сельского хозяйства и продовольственной безопасности в РА, являясь одним из крупнейших аграрных регионов республики, где сосредоточены значительные массы горных черноземов. Однако сельскохозяйственные земли региона крайне уязвимы как к природным, так и к антропогенным факторам.

Согласно Четвертому национальному сообщению об изменении климата (2020 г.), повышение температуры и неравномерное распределение осадков, наблюдаемые на Ширакской равнине, приводят к дефициту почвенной влаги и усилению испарения [5]. Это, в сочетании с чрезмерным выпасом скота и неэффективными методами ведения сельского хозяйства, ускоряет эрозионные процессы и истончение растительного покрова.

Ширакский регион, являясь одним из важнейших сельскохозяйственных регионов Армении, требует постоянного и точного мониторинга состояния земельного покрова. Целью данного исследования является анализ пространственно-временной динамики почв региона в период 2015–2025 гг. с использованием спутниковых данных Sentinel-2 и индексов NDVI (нормализованный относительный индекс растительности) и SAVI (почвенно-вегетационный индекс), выявление тенденций деградации и содействие разработке стратегий устойчивого землепользования.

Область исследования и данные. Ширакский регион расположен на северо-западе республики и занимает площадь 2680 км². Регион расположен на высоте 1500–2200 м н.у.м. Центральную часть региона занимает Ширакская равнина, известная своими мощными горными черноземами. Благодаря высокой плодородности почвы это один из основных регионов Армении по выращиванию зерновых культур.

Снимки со спутника Sentinel-2 использовались для пространственно-временного анализа деградации почв, предназначенных для предоставления данных службам Copernicus. Sentinel-2 оснащен рядом технологий, таких как многоспектральные устройства визуализации для мониторинга суши, океана и атмосферы. Он обеспечивает оптические изображения высокого разрешения для мониторинга суши, реагирования на чрезвычайные ситуации и служб безопасности. Многоспектральное устройство визуализации спутника предоставляет полный набор из 13 спектральных диапазонов, охватывающих видимый и ближний инфракрасный диапазоны до коротковолнового инфракрасного [6]. Обработка данных, расчет спектральных индексов (NDVI, SAVI) и картографирование проводились в программной среде QGIS, что позволило проводить точный анализ изображений и выявлять изменения в землепользовании [7].

Материалы и методы исследования. Методология основана на использовании спутниковых снимков Sentinel-2A, оснащенных многоспектральным датчиком высокого разрешения, называемым C-MSI (Capteur-Multi-Spectral Instrument). Этот датчик собирает данные в различных спектральных диапазонах, от видимого до ближнего инфракрасного, с пространственным разрешением

от 10 до 60 м в зависимости от спектрального диапазона. Наиболее часто используемые диапазоны, такие как красный, зеленый и синий, имеют разрешение 10 м, в то время как ближние инфракрасные диапазоны имеют разрешение 10 и 20 м. Используемые изображения имеют разрешение 10 м и охватывают период с июля–августа 2015 г. по 2025 г. [8].

Пространственно-временной анализ деградации земель проводился с использованием спектрального индекса NDVI. Этот индекс рассчитывается на основе того, как растения отражают и поглощают различные длины волн света [6]:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED},$$

где NIR – ближний инфракрасный диапазон, RED – красный диапазон.

Поскольку юго-западная часть региона Ширак (община Ани) характеризуется редким растительным покровом и открытыми почвами, для уменьшения возможных спектральных отклонений индекса NDVI также использовался индекс SAVI. Он позволяет учитывать влияние фоновой отражательной способности почвы по следующей формуле [9]:

$$SAVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED+0,5}(1+L),$$

где L – коэффициент коррекции влияния почвенного фона, который в данном исследовании был принят равным 0,5, что соответствует районам со средней плотностью растительного покрова.

Для обеспечения сопоставимости разновременных данных и нивелирования визуальных различий автоматических легенд карт, нами была разработана единая качественная шкала классификации значений NDVI/SAVI: < 0,00 – невегетационный класс (вода, тени); 0,00–0,25 – критическая деградация (оголенная почва); 0,25–0,45 – низкий потенциал (разреженная растительность); 0,45–0,60 – средний/стабильный покров; 0,61–1,00 – интенсивная вегетация (густой покров) [10].

Результаты исследования и их обсуждение. Спутниковые снимки Sentinel-2A за 2015–2025 гг. были использованы для анализа деградации земельного покрова в регионе Ширак, в результате чего были получены 10-летние карты распределения NDVI растительного покрова в регионе Ширак (2015–2025 гг.) (рис. 1).

Результаты проведенного анализа показывают, что плотность растительного покрова в сообществах региона претерпела значительные пространственные и временные колебания. Несмотря на общее увеличение индекса NDVI, зафиксированное в конце наблюдаемого периода, процессы деградации земель продолжают оставаться серьезной проблемой для устойчивого сельскохозяйственного развития региона.

Для детальной оценки этой динамики верификация полученных данных проводилась на основе метода зональной статистики (Zonal Statistics). Сводные расчетные показатели средних значений вегетационных индексов по укрупненным общинам Ширакской области за 2015–2025 гг. распределены в соответствии с разработанной единой шкалой (см. таблицу).



Рис. 1. Индексы NDVI растительного покрова в Ширакском регионе за 2015–2025 гг.

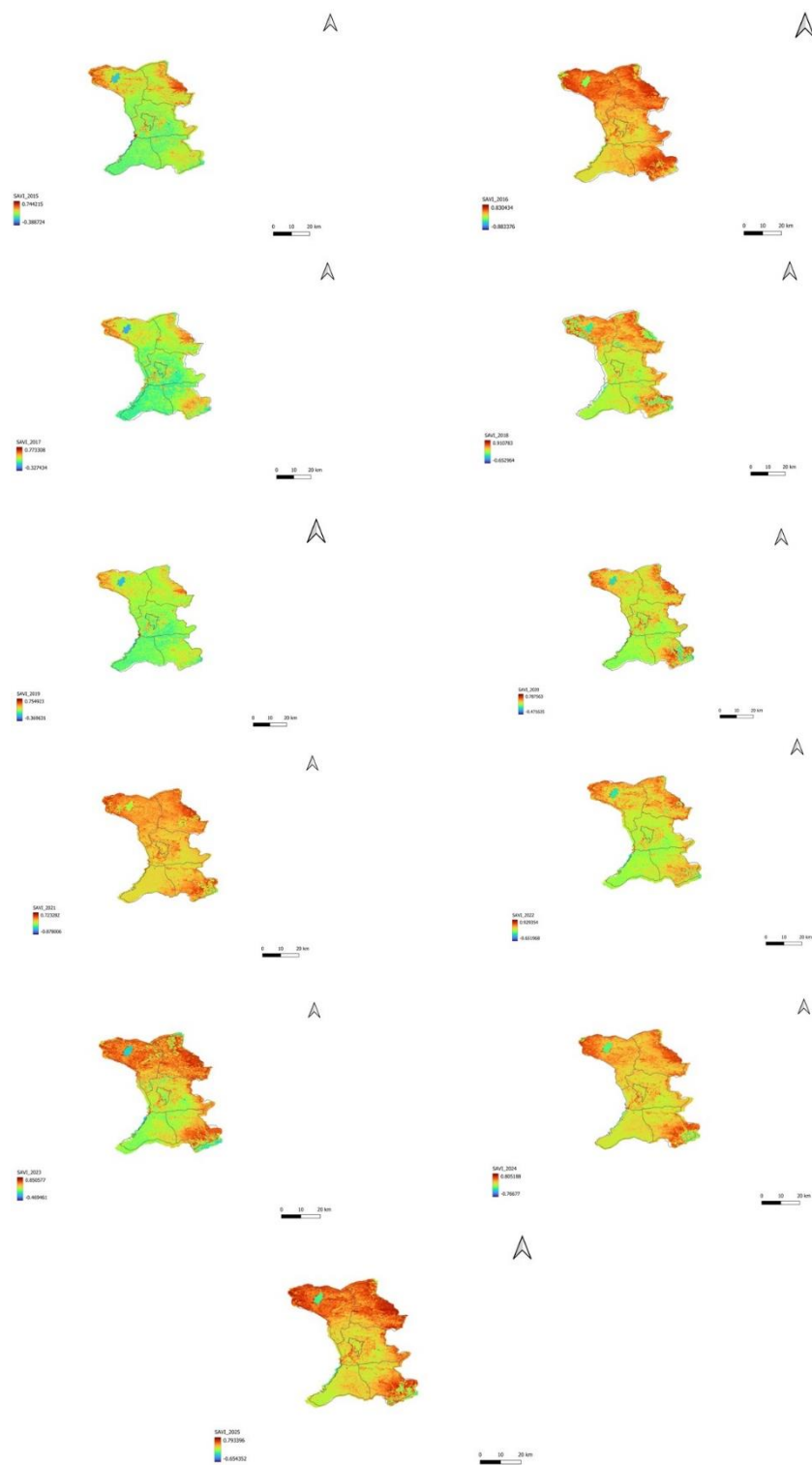


Рис. 2. Индексы SAVI землепользования в Ширакской области за 2015–2025 гг.

Анализ данных показывает, что колебания NDVI в большей степени обусловлены количеством годовых осадков, чем качественными изменениями почв. В частности, 2023 г. является аномальным, когда во всех сообществах было зафиксировано резкое увеличение индекса растительного покрова (например, в сообществе Артик – с 0,29 до 0,53, в Ашоцке – с 0,40 до 0,72). Это говорит о том, что потенциал продуктивности почв высок, но реализуется только при благоприятных условиях влажности.

Анализ карт SAVI (2015–2025 гг.) (рис. 2), полученных на основе данных Sentinel-2, показал, что SAVI более точно отражает степень деградации почв, особенно в эродированных районах сообщества Ани. Пространственно-временной анализ индекса SAVI подтверждает тезис, полученный с помощью NDVI, о том, что динамика растительного покрова сильно зависит от количества годовых осадков, но SAVI обеспечивает более высокую точность, раскрывая истинную картину деградации почв.

*Динамика средних значений вегетационных индексов (NDVI / SAVI)
по общинам Ширакской области (2015–2025 гг.)*

Диапазон значений (NDVI / SAVI)	Качественный класс состояния покрова	Экологическая и хозяйственная интерпретация применительно к общинам
<0,00	невегетационный класс	водные объекты (например, оз. Арпи), облачность, глубокие топографические тени
0,00–0,25	критическая деградация / оголенная почва	хроническая эрозия, выбитые пастбища, скальные выходы. Сюда стабильно относятся аридные территории общины Ани
0,25–0,45	низкий / уязвимый потенциал	разреженная растительность, сухие степи, деградирующие пастбища. Характерно для урбанизированных и засушливых зон (Гюмри, Артик, Ахурян в маловодные годы)
0,45–0,60	средний / стабильный покров	нормальное состояние агроценозов (зерновые, кормовые культуры) и умеренно-увлажненных лугов. Характерно для общин Амасия и Ашоцк в переходные периоды
0,61–1,00	высокий / интенсивная вегетация	густой покров, здоровые альпийские и субальпийские луга, пик сельскохозяйственной вегетации. Стабильно фиксируется в высокогорном Ашоцке (до 0,723)

В частности, в 2023 г., который характеризовался как аномально благоприятный год с точки зрения осадков, значения SAVI также зафиксировали резкое увеличение (например, с 0,21 до 0,48 в сообществе Артик и с 0,35 до 0,68 в Ашоцке). Однако, в отличие от NDVI, SAVI показывает, что даже в условиях этого аномального роста значение индекса в некоторых частях сообщества Ани не превысило пороговое значение 0,30. Это доказывает, что деградация земель в этих районах настолько глубока, что даже обильные осадки не приводят к полному восстановлению растительного покрова.

Сравнивая данные за 2015–2025 гг., можно заключить, что индекс SAVI более объективно отражает потенциал продуктивности земель, отфильтровывая

спектральное влияние почвенного фона. Это позволяет утверждать, что качественные изменения в земельном покрове Ширакской области не являются устойчивыми, а любые зафиксированные положительные изменения носят временный характер и обусловлены исключительно краткосрочными агроклиматическими факторами.

Различные административные районы региона демонстрируют разную степень уязвимости.

- *Анийская община (Анийское плато).* Применение индекса SAVI в этом районе позволило снизить спектральное влияние открытой поверхности земли, в результате чего были зафиксированы более низкие и реалистичные значения (от 0,12 до 0,28). Это подтверждает тот факт, что несколько высокие показатели NDVI были обусловлены не наличием растительности, а отражением от почвы. Стабильно низкая динамика SAVI за 10-летний период доказывает, что деградация почв на Анийском плато носит глубокий характер, а потенциал самовосстановления растительного покрова практически исчерпан.

- *Ашоцкие и Амасийские общины (горная зона).* В отличие от низменных зон, индекс SAVI в этих общинах показал высокую стабильность ($> 0,45$), что типично для районов с густым растительным покровом. Однако минимальная разница между значениями SAVI и NDVI доказывает, что влияние почвенного фона здесь незначительно. Тем не менее, в 2017 и 2024 гг. локальные вариации, наблюдаемые на изображениях SAVI (даже при высоких значениях NDVI), могут указывать на качественное снижение растительного покрова и недостаток почвенной влаги, что является дополнительным свидетельством тенденций деградации, вызванных чрезмерным выпасом скота.

Заключение. Проведя пространственно-временной анализ деградации почв Ширакского региона, мы пришли к выводу, что процессы, не зависящие от сезонных климатических факторов, обусловлены антропогенной нагрузкой и имеют устойчивую пространственную локализацию. Была доказана эффективность комбинированного использования спутниковых снимков Sentinel-2A, мультиспектральных индексов (NDVI, SAVI) и метода зональной статистики. SAVI обеспечил более высокую точность мониторинга территорий с эродированными и размытыми почвами, что позволило отделить естественные колебания от антропогенной деградации.

На основе полученных выводов были сделаны следующие рекомендации:

1. *Защита почвы:* в общине Ани и других районах, подверженных риску эрозии, где значения SAVI постоянно низкие, необходимо высаживать лесные ярусы для защиты почвы и применять нетрадиционные (беспашотные) методы обработки почвы для снижения эрозии.

2. *Системы орошения:* повышение эффективности орошения путем внедрения систем капельного орошения, особенно в районах Ани и Гюмри, чтобы значения индекса растительности стабилизировались и не зависели только от количества осадков.

3. *Управление пастбищами:* в населенных пунктах Ашоцк и Амасия, где индекс NDVI высок, но динамика SAVI указывает на качественные изменения

растительного покрова, следует проводить периодический мониторинг пастбищ и применять схемы севооборота для предотвращения чрезмерного выпаса скота.

Поступила 09.06.2026

Получена с рецензии 21.06.2026

Утверждена 26.09.2026

ЛИТЕРАТУРА

1. *Land Degradation and Conflict Report*. GLTN (2025).
https://gltn.net/sites/default/files/2025-07/Land-Degradation-and-Conflict_Report.pdf
2. *Global Environment Facility (GEF). Annual Performance Report 2021* (2022).
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). *The Global Land Outlook*. Second Edition (2022).
<https://www.unccd.int/resources/global-land-outlook/global-land-outlook-second-edition>
4. <https://jam-news.net/land-desertification-in-armenia/>
5. <http://www.mnp.am/>
6. Nait-Taleb O., Elomari S., et al. Monitoring Soil Degradation Using Sentinel-2 Imagery and Statistical Analysis of Spectral Indices in a Semi-arid Watershed of the Moroccan High Atlas (2025).
7. Sentinel-Hub. (n.d.). *Sentinel-2 L2A*. Retrieved March 2, 2026 (2026).
<https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-2-l2a/>
8. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>
9. <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/savi/>
10. Huete A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25 (1988), 295–309.

Ա. Թ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ս. Կ. ՏԵՐՏԵՐՅԱՆ

ԾԻՐԱԿԻ ՄԱՐԶԻ ՀՈՂԱՅԻՆ ԾԱԾԿՈՒՅԹԻ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՄՈՆԻԹՈՐԻՆԳԸ SENTINEL-2 ԱՐԲԱՆՅԱԿԱՅԻՆ ՏՎՅԱԼՆԵՐՈՎ
(2015–2025 թթ.)

Ա մ փ ո փ ու մ

Հետազոտությունն իրականացվել է Հայաստանի Ծիրակի մարզի հողերի դեգրադացիայի տարածաժամանակային վերլուծության նպատակով 2015–2025 թվականների համար՝ օգտագործելով Sentinel-2 արբանյակային պատկերները: Աշխատանքում կիրառվել են բուսածածկույթի նորմալացված տարբերակված ինդեքսը (NDVI) և հողի գործակցով կարգավորված բուսականության ինդեքսը (SAVI): QGIS միջավայրում իրականացված վերլուծությունները ցույց են տալիս, որ բուսածածկույթի դինամիկան ունի անկայուն բնույթ: Սա թույլ է տալիս ենթադրել, որ ինդեքսների (NDVI, SAVI) արժեքների տարեկան տատանումները մեծապես պայմանավորված են մթնոլորտային

տեղումների քանակական փոփոխություններով (կլիմայական գործոնով), այլ ոչ թե հողերի որակական կայուն բարելավմամբ կամ դեգրադացիայով: SAVI ինդեքսի կիրառումը՝ հողի պայծառության շտկման հատուկ գործակցի ($L=0.5$) ներառման շնորհիվ, թույլ է տվել նվազեցնել հողային ֆոնի ազդեցությունը և ստանալ առավել ճշգրիտ տվյալներ նոսր բուսածածկույթով տարածքների համար: Բացահայտվել է, որ մարզի հարավարևմտյան հատվածը (Անի համայնք) ամենախոցելին է. այստեղ դիտվող էրոզիոն ինտենսիվ գործընթացները համընկնում են SAVI ինդեքսի կայուն ցածր արժեքների հետ, ինչը վկայում է հողերի խորը դեգրադացիայի միտումների մասին:

A. T. GRIGORYAN, S. K. TERTERYAN

MONITORING SOIL DEGRADATION IN SHIRAK REGION USING SENTINEL-2 SATELLITE DATA (2015–2025)

Summary

The study was conducted to analyze the spatiotemporal dynamics of land degradation in the Shirak Region of Armenia for the period 2015–2025 using Sentinel-2 satellite imagery. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) were applied in the research. Analyses performed within the QGIS geographic information system environment indicate that vegetation dynamics exhibit an unstable nature. This suggests that annual fluctuations in the index values (NDVI, SAVI) are largely driven by quantitative changes in atmospheric precipitation (climatic factor) rather than stable qualitative soil improvement or degradation. The application of the SAVI index, through the integration of a specific soil brightness correction factor ($L=0.5$), allowed mitigating the background soil effect and obtaining more accurate data for sparsely vegetated areas. It was revealed that the Southwestern part of the region (Ani community) is the most vulnerable: the intensive erosion processes observed here correspond with consistently low SAVI values, indicating deep soil degradation trends.