

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

^{1,2}Саченко Д.А., ¹Туманян К.

¹*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
119049, Москва, Россия*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт труда, 105043, Москва, Россия
e-mail: ave.daniil@yandex.ru*

Использование данных дистанционного спутникового зондирования позволяет производить решения множества прикладных задач в рамках различных наук и имеет преимущества перед рядом традиционных методов исследований. Отдельно выделяются получаемые посредством расчетов показатели вегетационных индексов, они подходят для мониторинга экологической, пожарной, геологической, сельскохозяйственной ситуации в изучаемых регионах. Однако применение комплексов, состоящих из нескольких вегетационных индексов в основном используется в геологических и сельскохозяйственных исследованиях, в экологических изысканиях данная методология встречается значительно реже, не смотря на ее эффективность. В статье приводится обоснование и систематизация применения комплекса из нескольких вегетационных индексов в рамках осуществления ряда экологических исследований. Приведенные экологические задачи и подходы к их решению на основе вегетационных индексов позволяют проводить, как прямые исследования, так и осуществлять валидацию данных, получаемых иными методами.

Ключевые слова: экология, дистанционное спутниковое зондирование, вегетационные индексы, экологический мониторинг, совершенствование методологии.

JUSTIFICATION OF THE USE OF VEGETATION INDEX COMPLEXES FOR ENVIRONMENTAL MONITORING TASKS

^{1,2}Sachenok D.A., ¹Tumanian C.

¹*National University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russia*

²*All-Russian Research Institute of Labor, 105043, Moscow, Russia*

The use of remote satellite sensing data allows the solution of many applications in various sciences and has advantages over a number of traditional research methods. Indicators of vegetation indices obtained through calculations are separately distinguished, they are suitable for monitoring the ecological, fire, geological, agricultural situation in the studied regions. However, the use of complexes consisting of several vegetation indices is mainly used in geological and agricultural research, in environmental surveys this methodology is much less common, despite its effectiveness. The article provides justification and systematization of the use of a complex of several vegetation indices as part of a number of environmental studies. The given environmental problems and approaches to their solution on the basis of vegetation indices make it possible to conduct both direct research and validate data obtained by other methods.

Keywords: ecology, remote satellite sensing, vegetation indices, environmental monitoring, methodology improvement.

Введение

Дистанционное спутниковое зондирование является одним из передовых инструментов различных исследований Земли, находящимся на пересечении наук. Получаемыми данными посредством данного метода являются снимки и видеозаписи высокого разрешения. Конечным продуктом обработки снимков является построение различного рода карт и расчет вегетационных индексов (ВИ).

Вегетационные индексы применяются в мире при решении спектра задач, связанных с сельским хозяйством, геологией, геодезией, экологией, природоохранными мероприятиями. В экологических исследованиях в данный момент, методы, использующие вегетационные индексы представлены в наименьшей степени, однако их эффективность остается на высоком уровне.

В структуре и математическом смысле каждого отдельно взятого индекса существуют различного

рода параметры отклонения (атмосферные помехи, влажность, особенности растительности) и фокусировка под один конкретный вид задачи (оценивание состояния низкорослой растительности, леса, оценивание состояние водных объектов, оценивание эффективности сельскохозяйственных мероприятий). В этой связи показатели одного вегетационного индекса могут показывать неточности, особенно, если задача, решаемая посредством подобных расчетов многоуровневая.

Целью исследования является обоснование применения комплексов вегетационных индексов для проведения специфических видов экологических исследований.

Задачами исследования, необходимыми для достижения поставленной цели являются:

– Формулирование основных экологических задач, решаемых посредством метода комплексного применения вегетационных индексов.

- Анализ преимуществ применения вегетационных индексов совокупно с существующими методами мониторинга в экологии.

- Анализ критериев выбора вегетационных индексов для различного рода задач экологического мониторинга.

- Приведение вариантов комплексов вегетационных индексов и рассмотрение их прикладных возможностей.

Задачи экологического мониторинга, решаемые посредством комплексного применения вегетационных индексов

Основной задачей экомониторинга является оценивание различных форм антропогенного воздействия на окружающую среду. В рамках проводимого исследования основное внимание следует уделить конечному результату этого оценивания, под который подбирается инструментарий. Этот результат может быть, как четко сформированной исследовательской задачей, так и валидацией уже имеющихся данных посредством дополнительных исследований.

Валидацию следует рассматривать в сочетании с имеющимися данными, в таком случае она будет разделена на валидацию, подтверждающую количественные данные и валидацию, подтверждающую качественные данные.

В первом случае метод дистанционного зондирования будет связан с численными показателями, в имеющихся условиях эти показатели получаются посредством замеров и лабораторных методов. Нормирование показателей указывается в нормативных правовых актах Российской Федерации. Валидация предельных показателей (ПДУ, ПДК, ПДС) посредством вегетационных индексов заключается в оценивании реакции растительности на подтвержденное антропогенное воздействие, что является основным принципом метода биоиндикации [1]. В данном случае работает взаимосвязь: считывание качественного состояния растительности посредством ВИ – сравнение с численными показателями. Взаимосвязь позволяет утверждать о соответствии или не соответствии антропогенного воздействия нормативам.

Во втором случае, вегетационные индексы выполняют валидирующую функцию в связи со значительно большими масштабами территории, которые возможно изучить [2]. Как правило качественные показатели состояния окружающей среды собираются методами различного наблюдения. В случае прямого наблюдения человеком, любая гипотеза наблюдателя за ограниченным пространством может быть подтверждена с другого масштаба, а в случае наблюдения посредством съемки с высоты, в том числе с орбиты, но без обработки ВИ, метод позволяет подтвердить или опровергнуть сделанные выводы.

Задачами прямых исследований посредством

ВИ в экологии являются наблюдения за состоянием экосистем и аспектами фенологических циклов. Помимо представленных широких задач, следует затронуть и более узкие, к которым относятся исследования процессов рекультивации и эффективности природоохранных мер [3].

За счет широкого охвата территории и возможности сверки наблюдений между годами и сезонами, карты, созданные на основе вегетационных индексов, позволяют с высокой точностью определить особенности состояния растительности. Данная особенность полезна при проведении исследований, связанных с оцениванием масштаба подтвержденных случаев антропогенного воздействия на окружающую среду, при этом виды антропогенного воздействия могут быть, как в виде прямого непосредственного ущерба растительности (незаконные вырубки, поджоги, аварии с выбросами вредных веществ в атмосферу), так и в виде косвенного ущерба (загрязнение грунтовых вод и атмосферы в ходе стандартной хозяйственной деятельности [4].

Обозначив основные задачи, следует обратить внимание на существующий инструментарий в области мониторинга посредством вегетационных индексов.

Критерии подбора вегетационных индексов для комплексных изысканий в экологии

Определив требуемую практическую задачу в области экологических изысканий следует перейти к подбору вегетационных индексов для ее решения. Отдельно следует добавить дополнительный фактор, необходимый для метода – доступность данных ВИ. Доступность данных затрагивает, как возможности космических аппаратов и их оборудования для подготовки снимков, так и наличие доступа к зарубежным базам данных. Вегетационные индексы, применяемые в рамках указанных задач должны быть доступны для расчетов и соответствовать условиям исследуемой территории.

Каждый отдельно взятый вегетационный индекс рассчитывается посредством параметров оборудования для дистанционной фотосъемки и зависит от пространственного разрешения и спектрального разрешения. Следует отметить, что наблюдения посредством наиболее старых ВИ ведутся более 30 лет, что позволяет использовать значительную базу данных для ретроспективного анализа в рамках экологических изысканий. Как правило вегетационные индексы с базами данных длительного наблюдения просты в расчетах и считываются большим количеством аппаратов, к ним относятся такие ВИ, как: NDVI, EVI, NDWI, SAVI, DVI, GNDVI [5,6,7,8].

Передовыми и более сложными вегетационными индексами следует считать: PRI, PVI, TSAVI, GEMI, вегетационные индексы аппарата MERIS и ряд других. Они отличаются значительно более сложной формулой, что в свою очередь ужесточает

требования к оборудованию на борту спутника, и особыми корректировками предварительной обработки снимка.

Практика современных экологических исследований показывает, что даже самый совершенный с точки зрения физической модели индекс редко способен дать исчерпывающую характеристику состояния экосистемы при изолированном применении. Каждый вегетационный индекс, независимо от сложности его расчета, по своей природе является редуцированным показателем, то есть сводит многомерную спектральную информацию к одному числовому значению. Это неизбежно влечет за собой потерю части данных и чувствительность к специфическим помехам.

В качестве примеров следует оценить преимущества и недостатки вегетационных индексов, имеющих широкое применение в исследованиях:

- NDVI демонстрирует высокую корреляцию с биомассой, но подвержен насыщению в сомкнутых лесах. Отдельно следует подчеркнуть значительные отклонения при расчетах в случае влажности почвы, наличия водных объектов и атмосферных помех.

- EVI успешно нивелирует атмосферные искажения и эффекты насыщения, однако менее чувствителен к небольшим изменениям в содержании влаги.

- NDWI полезен при оценке гидрологического стресса, но не позволяет делать выводы о продуктивности растительности.

- SIPI эффективен при оценке соотношения каротиноидов и хлорофилла, выступая маркером стресса и старения растительности. Его ключевое ограничение заключается в слабой чувствительности к изменению общей архитектуры полога и листовой поверхности, что делает его малоинформативным для оценки биомассы и структурных изменений фитоценоза.

- LCI точен эффективен в оценке хлорофилла с точностью до листа, но требует сложных расчетов и не имеет открытого доступа к базам данных.

- MSI эффективен для оценки содержания влаги в растительном покрове и выявления водного стресса, особенно в засушливых регионах. Однако он чувствителен к состоянию почвы и растительным остаткам, что может давать ложные сигналы на территориях с редким или неоднородным покровом/

- NDNI применяется для диагностики количества азота в экосистеме на основе спектральных характеристик в коротковолновой инфракрасной области. Данный индекс крайне чувствителен к водному стрессу и фоновому влиянию частей растений без хлорофилла, что требует обязательной калибровки по наземным данным и ограничивает его применение на гетерогенных природных территориях [9,10,11].

В связи с перечисленными примерами возника-

ет необходимость применять на практике не один, а несколько ВИ, в целях повышения точности и нивелирования ошибок, что уже осуществляется на практике в геологических и сельскохозяйственных исследованиях [12]. В области экологического мониторинга такой подход позволяет компенсировать ограничения отдельно взятых показателей и сформировать более объемное представление о происходящих процессах [13]. Следует отметить отсутствие единого механизма подбора вегетационных индексов в целях их комплексного применения. Как правило, дополнительные вегетационные индексы применяются, если в показателях, полученных предварительным анализом найдены помехи и неточности. На основе этого возможно сформировать базовые требования к вегетационным индексам, используемым вместе:

- Возможность корректировки одного ВИ данными другого ВИ;

- Наличие длительных наблюдений хотя бы по одному ВИ в целях оценивания закономерности экологических процессов в регионе наблюдения.

- Последовательное логическое решение основной задачи, если она комплексная и требует многофакторного подхода.

На основе вышеизложенного необходимо перейти к анализу возможных вариаций комплексов вегетационных индексов и их потенциальных возможностей в рамках экологического мониторинга.

Вариации комплексов вегетационных индексов и их прикладные возможности

Так как каждый вегетационный индекс имеет свои шкалы, расчетные диапазоны, особенности применения, совокупное использование нескольких различных ВИ с конкретной целью позволяют заложить фундамент для широких исследований в области экологической оценки.

Для систематизации исследований в области комплексного применения вегетационных индексов, следует ввести обозначения для каждого индекса в связке. Основным индексом будет считаться определяющий наличие или отсутствие какой-либо формы воздействия, дополнительным будет считаться определяющий уточняющие параметры, при уже подтвержденном воздействии на экологию.

При использовании нескольких вегетационных индексов следует основное внимание уделить решаемой задаче. Основным вегетационный индекс должен позволить подтвердить возможность применения дополнительных.

В таблице 1 приведены комплексы вегетационных индексов, применяемые в ходе решения задачи экологического мониторинга и получаемые качественные показатели.

Приведенные в таблице вегетационные индексы, указанные в комплексах первыми, имеют основную задачу в виде фиксации деградации

Таблица 1

Варианты комплексов вегетационных индексов и решаемые задачи при их использовании

Комплексы вегетационных индексов	Решаемые задачи	Получаемые качественные показатели
NDVI + EVI + NBR	Комплексный мониторинг нарушений в лесных экосистемах	Общее здоровье растительности. Превышение в экосистеме концентраций соединений серы, хлора.
GCI + MTCI + NDVI	Мониторинг состояния хлорофилла	Раннее выявление превышений тяжелых металлов, соединений фтора и хлора в экосистеме
NDVI + ARVI + MSI	Мониторинг зеленой растительности по параметрам засухи	Состояние экосистемы, с параметрами влажности, вне зависимости от погодных условий
NDVI + PRI + SIPI	Оценка фотосинтетического стресса	Общее здоровье растительности. Показатели превышения в экосистеме азотистых соединений и соединений серы
VCI + PRI	Оценка фотосинтетического стресса в привязке к ксантофилловым циклам	Показатели засухи или чрезмерного увлажнения растительности. Отклонение от фенологических циклов
NDVI + NDRE	Оценка фотосинтетического стресса и хлорофилла	Общее здоровье растительности. Оценка объема биомассы
GCI + PRI + SIPI	Оценка процессов деградации или рекультивации на изучаемой территории. Оценка фотосинтетического стресса	Общее здоровье растительности. Показатели превышения в экосистеме азотистых соединений и соединений серы
NDVI+SIPI+NDNI	Оценка фотосинтетического стресса. Оценка процессов сукцессии. Оценка антропогенного воздействия	Общее здоровье растительности. Показатели превышения в экосистеме азотистых соединений или тяжелых металлов

окружающей среды. Наиболее подходящими основными вегетационными индексами являются NDVI, GCI, VCI, NDWI (если исследование затрагивает территории с водными объектами). Последующие вегетационные индексы в комплексах имеют уже более специальное назначение в рамках задачи. Комплекс может состоять и из большего количества ВИ, чем те, что приводятся в таблице.

Каждый вегетационный индекс из указанных имеет свое специальное значение, что позволяет составлять большое количество комплексов ВИ для решения конкретных задач. Ограничения этого механизма связаны только с:

- Недостатком архивных данных;
- Отсутствием данных прошлых лет (позволяющих утверждать об изменениях в экологических показателях);
- Отсутствием требуемых параметров оборудования у спутников, осуществляющих мониторинг.

В качестве примера следует привести сравнение снимка поля посредством NDVI и NDRE на рисунке 1. Заметно отличается внешний вид обработанной площади в связи с тем, что вегетационный индекс NDVI в рамках сельскохозяйственного исследования показывает густоту растительности и позволяет оценить ее здоровье, при этом индекс NDRE наиболее эффективен при проведении анализа растительности в поздние стадии созревания. Таким образом исследователи воспользовались комплексным подходом и извлекли преимущества обоих ВИ в рамках своей задачи [14].

Основной эффект от совокупного применения вегетационных индексов проявляется в экономии

времени и денежных средств, при этом мониторинг может осуществляться и на удаленных территориях. Методы мониторинга с использованием комплекса ВИ наиболее эффективны в том числе с выполнением исследований больших территорий, недоступных к быстрому изучению стандартными методами. Особенно следует подчеркнуть возможность решения структурно сложных задач мониторинга, в том числе с задействованием иных методов и показателей, позволяющих валидировать и уточнять получаемые показатели.

Заключение

В результате проведенного исследования обоснована целесообразность применения комплексов вегетационных индексов для задач экологического мониторинга. Показано, что изолированное использование одного вегетационного индекса, способно привести к потере информации и снижению достоверности выводов из-за присущих каждому индексу ограничений, сформированных в математическом аппарате каждого ВИ. Отмечается уже существующее комплексное применение ВИ в других отраслях науки, где демонстрируется высокая эффективность метода.

На основе анализа специфики применения ВИ сформулированы две группы экологических задач, решаемых с помощью комплексов ВИ:

- валидационные для подтверждения или опровержения данных иных методов;
- прямые исследования, как оценка состояния экосистем, фенологических циклов, процессов рекультивации и последствий антропогенного воздействия.



Рис. 1. Обработанные снимки ВИ NDVI и NDRE

Особое внимание уделяется сложности подбора ВИ под конкретные задачи и предложены подходы к формированию комплексов, учитывающие критерии доступности данных, длительности ретроспективных наблюдений, взаимную компенсацию недостатков индексов и последовательное решение многофакторных задач. Введено функциональное разделение на базовый и дополнительные индексы.

Практическая значимость работы заключается в обосновании экономии ресурсов, повышения точности мониторинга посредством спутникового

зондирования, валидации уже имеющихся знаний об окружающей среде, а также в возможности ретроспективного анализа экологических нарушений по спутниковым архивам.

Отмечается высокая перспективность метода комплексного использования вегетационных индексов в связи с увеличением количества спутниковых аппаратов с задачами дистанционного зондирования и нарастающей важностью природоохранных мероприятий в экологическом развитии России.

Список литературы

1. Рассадина Е.В. Биоиндикация и ее место в системе мониторинга окружающей среды // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2007. №2(5). С. 48-53.
2. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли. Учеб. пособие. Иркутск. Изд-во ИГУ. 2013. С. 124-139.
3. Саченок Д.А. Анализ возможностей спутниковых систем в области экологического мониторинга особо охраняемых природных территорий.
4. Саченок Д.А., Саченок А.И., Цирин И.В. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2025. №3(173). С. 23-35. DOI 10.71536/vd.2025.3c173.3. EDN ZVZWZX.
5. Маневич П.П. Анализ пространственных данных и применение риск-ориентированного подхода с использованием методов дистанционного зондирования для мониторинга вегетационного состояния на угледобывающих территориях / П.П. Маневич // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 11-15 ноября 2024 года. Москва: Институт космических исследований Российской академии наук. 2024. С. 191. EDN ZAONIY.
6. Bayarsaikhan U. et al. Early validation study of the photochemical reflectance index (PRI) and the normalized difference vegetation index (NDVI) derived from the GCOM-C satellite in Mongolian grasslands. International Journal of Remote Sensing. 2022. V. 43. No. 14. Pp. 5145-5172.
7. Gobron N. et al. The MERIS Global Vegetation Index (MGVI): description and preliminary application. International Journal of Remote Sensing. 1999. V. 20. No. 9. Pp. 1917-1927.
8. Zambrano F. et al. Sixteen years of agricultural drought assessment of the BioBio region in Chile using a 250 m resolution Vegetation Condition Index (VCI). Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 6. Pp. 530.
9. Костеша В.А. Формирование региональных планов вовлечения сельскохозяйственных земель в оборот по данным дистанционного зондирования Земли / В.А. Костеша, Л.Г. Евстратова, А.О. Андрейченко, Е.А. Щукина // Мониторинг. Наука и технологии. 2025. №4(66). С. 6-14. DOI 10.25714/MNT.2025.66.001. EDN RDYXAU.
10. Sims D.A. et al. On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2006. V. 111. No. G4.
11. Krishnan V. Development of a multidimensional living conditions index (LCI). Social Indicators Research. 2015. V. 120. No. 2. Pp. 455-481.
12. Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote sensing of environment. 1988. V. 25. No. 3. Pp. 295-309.
13. Даукаев Р.А., Сулейманов Р.А. Эколого-гигиеническая оценка влияния предприятий черной металлургии на окружающую среду территорий Башкирского Зауралья // Экология человека. 2008. №7. С. 9-13.
14. EOS Data Analytics. Individual Stand Monitoring. EOSDA Forest Monitoring Guide. 2023. URL: <https://eos.com/user-guide/forest-monitoring/individual-stands/>.

References

1. Rassadina E.V. Bioindication and its place in the environmental monitoring system. Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2007. No. 2(5). Pp. 48-53.
2. Sutyryna E.N. Distantionnoye zondirovaniye Zemli [Remote sensing of the Earth]. Tutorial. Irkutsk, Publishing House of ISU. 2013. Pp. 124-139.

3. Sachenok D.A. Analysis of the capabilities of satellite systems in the field of environmental monitoring of specially protected natural areas.
4. Sachenok D.A., Sachenok A.I., Tsirin I.V. *Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2025. No. 3(173). Pp. 23-35. DOI 10.71536/vd.2025.3c173.3. EDN ZVZWZX.
5. Manevich P.P. *Analiz prostranstvennykh dannykh i primeneniye risk-oriyentirovannogo podkhoda s ispol'zovaniyem metodov distantsionnogo zondirovaniya dlya monitoringa vegetatsionnogo sostoyaniya na ugledobyvayushchikh territoriyakh* [Analysis of spatial data and the application of a risk-based approach using remote sensing methods to monitor the growing conditions in coal mining territories]. Materials of the 22nd International Conference «Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space». Moscow. November 11-15, 2024. Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences. 2024. Pp. 191. EDN ZAONIY.
6. Bayarsaikhan U. et al. Early validation study of the photochemical reflectance index (PRI) and the normalized difference vegetation index (NDVI) derived from the GCOM-C satellite in Mongolian grasslands. *International Journal of Remote Sensing*. 2022. V. 43. No. 14. Pp. 5145-5172.
7. Gobron N. et al. The MERIS Global Vegetation Index (MGVI): description and preliminary application. *International Journal of Remote Sensing*. 1999. V. 20. No. 9. Pp. 1917-1927.
8. Zambrano F. et al. Sixteen years of agricultural drought assessment of the BioBio region in Chile using a 250 m resolution Vegetation Condition Index (VCI). *Remote Sensing*. 2016. V. 8. No. 6. Pp. 530.
9. V.A. Koshesha, L.G. Evstratov, A.O. Andreichenko, E.A. Shchukin. Formation of regional plans for the involvement of agricultural land in circulation according to data from remote sensing of the Earth. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2025. No. 4(66). Pp. 6-14. DOI 10.25714/MNT.2025.66.001. EDN RDYXAU.
10. Sims D.A. et al. On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2006. V. 111. No. G4.
11. Krishnan V. Development of a multidimensional living conditions index (LCI). *Social Indicators Research*. 2015. V. 120. No. 2. Pp. 455-481.
12. Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*. 1988. V. 25. No. 3. Pp. 295-309.
13. Daukaev R.A., Suleymanov R.A. Ecological and hygienic assessment of the impact of ferrous metallurgy enterprises on the environment of the territories of the Bashkir Trans-Urals. *Ekologiya cheloveka*. 2008. No. 7. Pp. 9-13.
14. EOS Data Analytics. Individual Stand Monitoring. EOSDA Forest Monitoring Guide. 2023. URL: <https://eos.com/user-guide/forest-monitoring/individual-stands/>.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Саченок Даниил Алексеевич

аспирант кафедры безопасности и экологии горного производства Национального исследовательского технологического университета МИСИС, 119049, Москва, Россия; специалист центра исследований охраны труда ФГБУ «ВНИИ труда» Минтруда России, 105043, Москва, Россия

Туманян Камилла

аспирант кафедры безопасности и экологии горного производства Национального исследовательского технологического университета МИСИС, 119049, Москва, Россия

Information about authors
Affiliations

Sachenok Daniil Alekseevich

Postgraduate Student, Department of Safety and Ecology of Mining at the National Research Technological University «MISIS», 119049, Moscow, Russia; Specialist of the Labor Protection Research Department of the FSI ASRI for Occupational Safety and Labor Economics, 105043 Moscow, Russia

Tumanyan Camilla

Postgraduate Student, Department of Safety and Ecology of Mining at the National Research Technological University «MISIS», 119049, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 17.04.2026 г.