

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА Г. СУРГУТА: ИНТЕГРАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ SENTINEL-5P И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Алексеев К.С., Ильченко А.А.

ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», 119991, Москва, Россия
e-mail: ilchenko.a@gubkin.ru

Работа посвящена оценке качества атмосферного воздуха в г. Сургуте – крупнейшем центре нефтегазовой промышленности Западной Сибири. Исходными данными служат измерения тропосферного содержания диоксида азота (NO_2), полученные спектрометром TROPOMI (спутник Sentinel-5P), и метеорологические параметры модели ERA5 за период 2019-2024 гг. Для решения проблемы неполноты спутниковых рядов, вызванной высокой облачностью и сезонным недостатком освещенности в высоких широтах, применена методика восстановления концентраций с использованием алгоритмов машинного обучения (Random Forest). В модель внедрены физически обоснованные предикторы: «индекс застоя» (Stagnation Index) и показатель отопительной нагрузки, позволяющие учитывать влияние метеорологического потенциала атмосферы и сезонной эмиссии от объектов теплоэнергетики. Результаты моделирования ($R^2 \approx 0.40$) показали, что пиковые концентрации NO_2 в Сургуте формируются преимущественно в холодный период при сочетании интенсивной работы ТЭЦ и неблагоприятных метеоусловий («эффект зимней ловушки»). Вклад лесных пожаров (через аэрозольный индекс) оценен как второстепенный по сравнению с локальными техногенными источниками. Предложенный подход позволяет проводить непрерывную оценку загрязнения в период с февраля по ноябрь, существенно дополняя данные наземных наблюдений.

Ключевые слова: геоэкологический мониторинг, загрязнение атмосферы, Сургут, машинное обучение, Random Forest, Sentinel-5P, TROPOMI, диоксид азота, ERA5.

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC AIR QUALITY IN SURGUT: INTEGRATION OF SENTINEL-5P SATELLITE DATA AND METEOROLOGICAL PARAMETERS

Alekseev K.S., Il'chenko A.A.

National University of Oil and Gas «Gubkin University», 119991, Moscow, Russia

This study assesses atmospheric air quality in Surgut, the largest oil and gas industrial center in Western Siberia. The initial data consist of tropospheric nitrogen dioxide (NO_2) measurements from the TROPOMI spectrometer (Sentinel-5P satellite) and meteorological parameters from the ERA5 reanalysis model for the period 2019-2024. To address the issue of fragmented satellite data due to high cloud cover and seasonal lack of illumination at high latitudes, a concentration reconstruction methodology based on machine learning algorithms (Random Forest) was applied. Physically meaningful predictors were integrated into the model: a «Stagnation Index» and a heating demand indicator, which account for the influence of atmospheric meteorological potential and seasonal emissions from thermal power facilities. The modeling results ($R^2 \approx 0.40$) demonstrate that peak NO_2 concentrations in Surgut primarily occur during the cold season, driven by the combined effect of intense thermal power plant operation and unfavorable meteorological conditions (the «winter trap» effect). The contribution of wildfires, assessed via the aerosol index, was found to be secondary compared to local anthropogenic sources. The proposed approach enables continuous pollution assessment from February to November, significantly supplementing ground-based observation data. **Keywords:** cryogenic processes, decryption features, automated classification, remote monitoring, and detection of cryogenic processes.

Keywords: geoeological monitoring, air pollution, Surgut, machine learning, Random Forest, Sentinel-5P, TROPOMI, nitrogen dioxide, ERA5.

Введение

Качество атмосферного воздуха в нефтегазодобывающих регионах Западной Сибири определяет экологическую безопасность населения [1]. Сургут испытывает антропогенную нагрузку от ГРЭС-1, ГРЭС-2 и транспорта, усугубляемую климатическими условиями застоя. Наземный мониторинг ограничен стационарными постами. ДЗЗ обеспечивает региональный охват зон загрязнения [2]. В настоящее время наиболее информативным инструментом для оценки концентраций газов, включая диоксид азота (NO_2), является спектрометр TROPOMI (спут-

ник Sentinel-5P). Успешный опыт использования этого прибора для анализа воздуха в промышленных центрах России описан в ряде недавних исследований [3,4]. В частности, в работах [5] была проведена детальная оценка качества воздуха в городах Севера и выявлены основные сезонные закономерности.

Зарубежные исследования отмечают ограничения спутниковых данных в высоких широтах: высокая облачность и полярная ночь вызывают до 50% пропусков в данных по городам Западной Сибири, особенно в периоды накопления загрязнений [6]. Для восстановления предлагается интеграция

спутниковых снимков TROPOMI с метеоданными ERA5 и машинным обучением. [7]. Цель работы – разработать методику оценки качества воздуха в Сургуте, объединив спутниковые данные и метеорологические параметры. Это позволит восстановить пропущенные из-за облачности значения и обеспечить непрерывный мониторинг в период с февраля по ноябрь.

Материалы и методы

Мониторинг загрязнения воздуха на высоких широтах крайне актуален, но сталкивается с ограничениями: частая облачность, низкий угол солнца и шум от снежного покрова, искажающий оптические измерения. Для апробации метода выбран г. Сургут – типичный нефтегазовый центр с суровым климатом и высокой антропогенной нагрузкой от ТЭЦ, промышленности и транспорта.

Обработка данных проводилась в Google Earth Engine (GEE), что позволило агрегировать спутниковые снимки, отфильтровать их и подготовить временные ряды для модели [8]. Информационную базу составили спутниковые данные продукта уровня обработки Level-3 (L3) спектрометра TROPOMI на борту спутника Sentinel-5P [9,10], содержащие сведения о плотности диоксида азота в тропосфере, а также аэрозольный индекс (AAI). Метеорологические данные получены из глобального реанализа ERA5 (ECMWF) и включали параметры приземного слоя атмосферы: температуру воздуха, атмосферное давление, а также векторные составляющие ветра [11].

В работе использовался продукт уровня L3 из коллекции COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO₂, так как он удобен для анализа изменений NO₂ за длительный период с 2019 по 2024 год. [12] Данный продукт содержит усредненные суточные данные по всей территории Земли на регулярной сетке, поэтому с ним проще работать и сравнивать значения за разные даты. Для данных L3 TROPOMI недо-

ступен стандартный показатель качества qa_value (есть только в L2), поэтому создан комбинированный фильтр: облачность <50% и солнечный зенитный угол <80°. Среднесуточная концентрация NO₂ рассчитывалась как среднее по всем валидным пикселям в границах города [13,14]. Метеорологические параметры преобразованы в индексы: HDD (градусо-сутки отопления), Stagnation Index (P/скорость ветра) и Winter Stagnation (HDD×Stagnation) с лагами за сутки. Для восстановления полей NO₂ применён Random Forest – устойчивый к шуму алгоритм с оценкой важности факторов загрязнения [15]. Валидация проводилась по схеме временного разделения: обучение на данных 2019-2023 гг., тестирование на независимой выборке 2024 года.

Результаты и обсуждения

Первый этап анализа подтвердил нехватку спутниковых данных по NO₂ в Сургуте – около 50% измерений недоступны, особенно осенью (валидность всего 42%). Для решения проблемы создали модель машинного обучения на данных 2019-2023 гг. (677 дней). Она прогнозирует NO₂ даже без спутников. Тестировали на данных 2024 г.: базовая модель дала R²=0.28, улучшенная (с метео-индексами и лагами) – R²=0.38 при ошибке 11.5 мкмоль/м². График (рис. 1) показывает, что модель точно ловит сезонные пики и тренды.

Одним из ключевых результатов работы стало ранжирование факторов, влияющих на качество воздуха в Сургуте. Анализ важности признаков (Feature Importance) подтвердил высокую физическую интерпретируемость предложенной модели (таблица 1).

Наиболее значимым фактором стал разработанный Winter Stagnation Index (13.3%), подтвердивший основную гипотезу исследования: максимальные концентрации NO₂ в Сургуте формируются при синергии экстремально низких температур и условий атмосферного застоя. Второе место

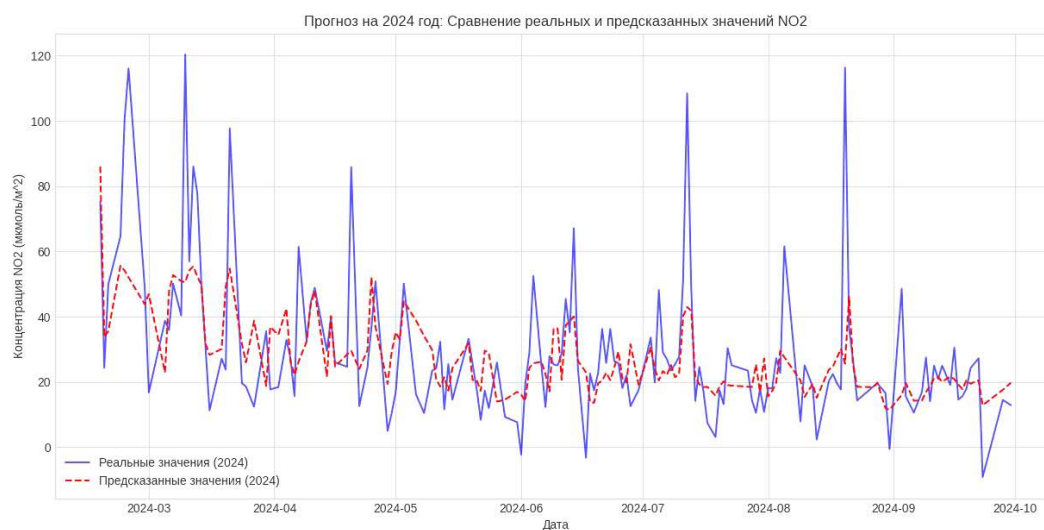


Рис. 1. Линейный график: Временной ряд NO₂ (2024)

Таблица 1

Важность признаков для модели

№	признак	важность
1	winter_stagnation	0.133099
2	pressure_hpa	0.104385
3	stagnation_index	0.084120
4	wind_direction	0.063655
5	no2_lag_1	0.062631
6	no2_roll_mean_7	0.058233
7	no2_roll_mean_3	0.055760
8	temperature_lag_1	0.053903
9	wind)speed	0.051855
10	aai_lag_1	0.050425

по важности заняло атмосферное давление (10.4%), третье – Stagnation Index (8.4%). Их совокупный эффект указывает на роль антициклонов, блокирующих вертикальное рассеивание загрязнителей. Направление ветра (6.3%) оказалось важнее скорости ветра (5.1%), что объясняется геометрией переноса выбросов от промышленных источников ГРЭС-1 и ГРЭС-2 к жилым зонам города. Группа признаков, описывающих предысторию загрязнения (лаг за 1 день no2_lag_1 и скользящие средние за 3-7 дней), суммарно вносит существенный вклад в прогноз, что подтверждает накопительный характер загрязнения в периоды неблагоприятных метеорологических условий. Аэрозольный индекс ААИ и его лаговые значения заняли промежуточные позиции по значимости, обеспечив вклад около 4-5%. Это указывает на то, что трансграничный перенос продуктов горения при лесных пожарах оказывает заметное, но не определяющее влияние по сравнению с локальной техногенной нагрузкой и метеорологическими условиями холодного периода.

Анализ восстановленных рядов NO₂ за 2024 г. выявил сезонную цикличность загрязнения Сургута с максимумами в холодный период (ноябрь-март), обусловленными отопительной нагрузкой (HDD), и летними минимумами (июнь-август) за счет турбулентного рассеивания. Экстремальные пики (рисунок 1) формируются при синергии Winter Stagnation и антициклонов. Летние всплески связаны с трансграничным переносом дыма лесных пожаров (ААИ), но их амплитуда существенно ниже зимних техногенных максимумов.

Верификация результатов модели

Для подтверждения физической интерпретируемости модели была проведена точечная верификация прогнозов на контрастных метеорологических ситуациях. Анализ проводился для двух сезонов: зимнего и летнего. Представлены результаты моделирования для двух дат апреля 2024 года с принципиально разными метеорологическими условиями (таблица 2).

При морозе (-13.45°C), слабом ветре и давлении 1020 гПа индекс Winter Stagnation достиг ~14000. Модель точно спрогнозировала NO₂ (47.83 мкмоль/м³, MAE=1.00). После потепления (+0.9°C) и усиления ветра (4.9 м/с) индекс снизился в 4 раза, прогноз 24.68 мкмоль/м³ также подтвердился. В отопительный сезон модель эффективно описывает синергию эмиссий ТЭЦ и застоя.

В летний период (таблица 3) зависимость от отопления исчезает, и качество прогноза зависит от иных факторов.

Модель точно спрогнозировала фоновое состояние 30 августа при сильном ветре и умеренной температуре, обеспечивающих эффективное рассеивание примесей.

Экстремальное расхождение наблюдалось 20 августа при почти полном штиле на фоне теплой погоды: низкий Winter Stagnation Index привел к недооценке накопления техногенных эмиссий в условиях высокого Stagnation Index.

Разработанный подход эффективен для прогнозирования системного зимнего загрязнения от теплоэнергетики и чувствителен к синоптическим

Таблица 2

Верификация модели в зимний период

Сезон	Зимний	
Дата	11.04.2024	16.04.2024
Температура	-13.45°C	0.9°C
Скорость ветра	2.37 м/с	4.9 м/с
Давление	1020 гПа	1012 гПа
Winter Stagnation	13971.58	3478.58
Stagnation Index	439.41	182.45
Реальный NO ₂	48.83 мкмоль/м ³	26.00 мкмоль/м ³
Прогноз модели	47.83 мкмоль/м ³	24.68 мкмоль/м ³
Ошибка (MAE)	1.00	1.32

Верификация модели в летний период

Сезон	Летний	
Дата	20.08.2024	30.08.2024
Температура	15.8°C	11.2°C
Скорость ветра	1.25 м/с	4.75 м/с
Давление	1000 гПа	1006 гПа
Winter Stagnation	1870.96	1684.30
Stagnation Index	930.58	261.36
Реальный NO ₂	116.34 мкмоль/м ³	16.55 мкмоль/м ³
Прогноз модели	25.54 мкмоль/м ³	11.89 мкмоль/м ³
Ошибка (MAE)	90.80	4.67

изменениям, однако требует дополнения предикторами промышленной активности для учета летних аномалий

Выводы

В ходе исследования разработана методика геоэкологической оценки качества воздуха в Сургуте на основе интеграции спутниковых данных TROPOMI/Sentinel-5P, метеопараметров ERA5 и алгоритмов машинного обучения. Установлена метеозависимость NO₂: зимние пики обусловлены «ловушкой» от ТЭЦ-выбросов в условиях застоя и антициклонов; летние эпизоды – трансграничным переносом дыма пожаров (AAI, меньший вклад).

Методика обеспечивает непрерывный мониторинг (февраль-ноябрь), дополняя наземные станции, с ограничениями по полярной ночи, снежному шуму и разрешению моделей.

Основной результат – разработанная прогностическая модель Random Forest ($R^2 \approx 0.40$) для восстановления пропусков спутниковых данных NO₂ с предикторами: индекс застоя и HDD. Модель интерпретируема и воспроизводит сезонную динамику. Перспективы дальнейшего развития – применение градиентного бустинга, учет локальных промышленных факторов и адаптация для других арктических промышленных центров.

Список литературы

1. Мартынович А.А. Теория и методы обеспечения экологической безопасности технологических объектов и территорий в целях устойчивого природопользования на примере Западной Сибири: автореферат дис. ... доктора технических наук: 25.00.36 / Моск. гос. ун-т геодезии и картографии. Москва. 2003. 40 с.
2. Бондур В.Г. Космический мониторинг антропогенных воздействий на воздушную среду // Исследование Земли из космоса. 2021. №1. С. 3-21. DOI: 10.31857/S0205961421010036.
3. Морозова А.Э., Сизов О.С., Миронова М.А. Дистанционная оценка качества атмосферного воздуха в пределах крупнейших месторождений нефти и газа России (2019-2023) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. №1. С. 285-300. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-285-300.
4. Морозова А.Э., Сизов О.С., Миронова М.А., Лобжанидзе Н.Е. Дистанционная оценка качества атмосферного воздуха в населенных пунктах нефтегазовой специализации Ямало-Ненецкого автономного округа // Геодезия и картография. 2023. №11. С. 31-42. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1001-11-31-42.
5. Морозова А.Э., Сизов О.С., Елагин П.О., Агзамов Н.А. Интегральная оценка качества атмосферного воздуха в крупнейших городах России на основе данных TROPOMI (Sentinel-5P) за 2019-2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. №4. С. 23-39. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39.
6. Kaplan G., Avdan Z.Y. Space-borne air pollution observation from Sentinel-5P TROPOMI: Relationship between pollutants, geographical and demographic data. International Journal of Engineering and Geosciences. 2020. Vol. 5. No. 3. Pp. 130-137. DOI: 10.26833/ijeg.644089.
7. Дубнов Ю.А., Полищук В.Ю., Попков Ю.С. [и др.] Метод энтропийно-рандомизированного восстановления пропущенных данных // Автоматика и телемеханика. 2021. №4. С. 140-160. DOI 10.31857/S0005231021040061. EDN KDPJBJ.
8. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. Pp. 18-27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
9. Veefkind J.P., Aben I., McMullan K. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 120. Pp. 70-83. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.027.
10. Гусев А.П., Флерко Т.Г. Дистанционный индикатор риска загрязнения атмосферы, TROPOMI Air Quality Index, при мониторинге трансграничных воздействий // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2025. Т. 11 (77). №2. С. 120-129.
11. Константинова А.М., Бриль А.А., Лупян Е.А. Оценки выбросов диоксида азота по данным прибора TROPOMI и с учетом метеословесий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. №6. С. 153-167. DOI 10.21046/2070-7401-2025-22-6-153-167.
12. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. No. 730. Pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
13. NASA. Algorithm Overview [Электронный ресурс]. URL: <https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/products/daily/algorithm-overview> (дата обращения: 14.04.2026).
14. Chan K.L., Khorsandi E., Liu S., Baier F., Valks P. Estimation of surface NO₂ concentrations over Germany from TROPOMI satellite observations using a machine learning method. Remote Sensing. 2021. Vol. 13. No. 5. Art. 969. DOI 10.3390/rs13050969.
15. Коптев С.В., Алабдуллахалхасно Х. Применение алгоритма Random Forest для анализа динамики таежно-тундровых лесных экосистем // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2025. №2. С. 210-218.

References

1. Martynovich A.A. *Teoriya i metody obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti tekhnologicheskikh ob'yektov i territoriy v tselyakh ustoychivogo prirodopol'zovaniya na primere Zapadnoy Sibiri* [Theory and methods for ensuring environmental safety of technological facilities and territories for the purposes of sustainable nature management using the example of Western Siberia]. Abstract of the dissertation... Doctor of Technical Sciences: 25.00.36. Moscow State University of Geodesy and Cartography. Moscow. 2003. 40 p.
2. Bondur V.G. Space monitoring of anthropogenic impacts on the air environment. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2021. No. 1. Pp. 3-21. DOI: 10.31857/S0205961421010036.
3. Morozova A.E., Sizov O.S., Mironova M.A. Remote assessment of atmospheric air quality within the largest oil and gas fields in Russia (2019-2023). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2025. V. 22. No. 1. Pp. 285-300. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-285-300.
4. Morozova A.E., Sizov O.S., Mironova M.A., Lobzhanidze N.E. Remote assessment of atmospheric air quality in populated areas of the oil and gas specialization of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Geodeziya i kartografiya*. 2023. No. 11. Pp. 31-42. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1001-11-31-42.
5. Morozova A.E., Sizov O.S., Elagin P.O., Agzamov N.A. Integral assessment of atmospheric air quality in the largest cities of Russia based on TROPOMI (Sentinel-5P) data for 2019-2020. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. V. 19. No. 4. Pp. 23-39. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39.
6. Kaplan G., Avdan Z.Y. Space-borne air pollution observation from Sentinel-5P TROPOMI: Relationship between pollutants, geographical and demographic data. *International Journal of Engineering and Geosciences*. 2020. Vol. 5. No. 3. Pp. 130-137. DOI: 10.26833/ijeg.644089.
7. Dubnov Yu.A., Polischuk V.Yu., Popkov Yu.S. [et al.] Method of entropy-randomized recovery of missing data. *Avtomatika i telemekhanika*. 2021. No. 4. Pp. 140-160. DOI 10.31857/S0005231021040061. EDN KDPJBJ.
8. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. Pp. 18-27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
9. Veefkind J.P., Aben I., McMullan K. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. Pp. 70-83. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.027.
10. Gusev A.P., Flerko T.G. Remote indicator of air pollution risk, TROPOMI Air Quality Index, in monitoring transboundary impacts. *Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2025. V. 11(77). No. 2. Pp. 120-129.
11. Konstantinova A.M., Bril' A.A., Lupyan E.A. Estimates of nitrogen dioxide emissions based on TROPOMI instrument data and taking into account meteorological conditions. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2025. V. 22. No. 6. Pp. 153-167. DOI 10.21046/2070-7401-2025-22-6-153-167.
12. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146. No. 730. Pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
13. NASA. Algorithm Overview [Электронный ресурс]. URL: <https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/products/daily/algorithm-overview> (дата обращения: 14.04.2026).
14. Chan K.L., Khorsandi E., Liu S., Baier F., Valks P. Estimation of surface NO₂ concentrations over Germany from TROPOMI satellite observations using a machine learning method. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. No. 5. Art. 969. DOI 10.3390/rs13050969.
15. Koptev S.V., Alabdullahalkhasno H. Application of the Random Forest algorithm to analyze the dynamics of taiga-tundra forest ecosystems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*. 2025. No. 2. Pp. 210-218.

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Алексеев Кирилл Сергеевич

студент 4 курса кафедры геоэкологии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 119991, Москва, Россия

Ильченко Анжела Асхатовна

старший преподаватель кафедры геоэкологии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 119991, Москва, Россия

Information about authors Affiliations

Alekseev Kirill Sergeevich

4th year student of the Department of Geoecology National University of Oil and Gas «Gubkin University», 119991, Moscow, Russia

Il'chenko Anzhela Ashatovna

Senior Lecturer of the Department of Geoecology National University of Oil and Gas «Gubkin University», 119991, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 15.04.2026 г.