



DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-2-107-117

EDN: XBMVEB


УДК 556.53

Научная статья / Research article

## Разработка методики обследования загрязненных территорий на основе применения прямого спектрального зондирования с внедрением индексов состояния

Т.В. Бердникова  

*Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация*

 [tatyana.berdnikova.98@mail.ru](mailto:tatyana.berdnikova.98@mail.ru)

**Аннотация.** Приводится описание процесса обследования загрязненных территорий с использованием контактного спектрального зондирования. Рассматриваются основные этапы обследования, включая подготовку к работе, сбор данных, их обработку и анализ, а также интерпретацию полученной информации. Контактное спектральное зондирование позволяет получать данные для расчета почвенных индексов состояния, по значениям которых появляется возможность определения степени загрязнения почв. В результате данный подход обеспечивает более полное понимание загрязненности территорий и может быть использован в целях определения и управления экологическими рисками.

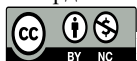
**Ключевые слова:** спектральное зондирование, спектральные характеристики, индексы состояния, мониторинг почв

**История статьи:** поступила в редакцию 26.11.2023; доработана после рецензирования 12.12.2023; принята к публикации 15.01.2024.

**Для цитирования:** Бердникова Т.В. Разработка методики обследования загрязненных территорий на основе применения прямого спектрального зондирования с внедрением индексов состояния // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 2. С. 107–117. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-2-107-117>

---

© Бердникова Т.В., 2024




This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

# Development of a methodology for assessment of contaminated territories based on the utilization of direct spectral probing with the implementation of state indices

Tatyana V. Berdnikova  

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

tatyana.berdnikova.98@mail.ru

**Abstract.** The study describes the process of survey of contaminated territories using contact spectral sounding. The main stages of the survey are considered, including preparation for work, data collection, their processing and analysis, as well as interpretation of the obtained information. Contact spectral sounding allows obtaining data for calculation of soil condition indices, which values make it possible to determine the degree of soil contamination. As a result, this approach provides a more complete understanding of the contamination of territories and can be used to identify and manage environmental risks.

**Keywords:** spectral sensing, spectral characteristics, condition indices, soil monitoring

**Article history:** received 26.11.2023; revised 12.12.2023; accepted 15.01.2024.

**For citation:** Berdnikova TV. Development of a methodology for assessment of contaminated territories based on the utilization of direct spectral probing with the implementation of state indices. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(2):107–117. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-2-107-117>

## Введение

Загрязнение почв является одной из наиболее серьезных экологических проблем современности, оказывающей негативное влияние на здоровье человека и окружающую среду. Данные Глобального мониторингового отчета о загрязнении почв подтверждают, что каждый третий почвенный участок в мире содержит загрязнители, превышающие допустимые нормы. Более того, около 23 % почвенных участков классифицируются как сильно загрязненные<sup>1</sup>.

Особое внимание следует уделить динамике роста площадей загрязненных почв. По данным отчета ФАО, в последние десятилетия наблюдался значительный рост загрязненных территорий<sup>2</sup>. Это особенно отчетливо видно в интенсивно развивающихся странах, где деятельность промышленности и сельского хозяйства оказывает значительное воздействие на окружающую среду. Каждый год мир теряет не менее 100 миллионов гектаров здоровых и плодородных земель [1].

Причины загрязнения почв разнообразны и связаны с неконтролируемым использованием химических удобрений и пестицидов в сельском хозяйстве,

<sup>1</sup> Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2022 году. Обнинск: НПО «Тайфун», 2023. С. 13.

<sup>2</sup> Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций: официальный сайт. – URL: <https://www.fao.org/> (дата обращения: 10.12.2023 г.).

неправильным управлением промышленными и бытовыми отходами, а также другими факторами.

Для решения проблемы загрязнения в первую очередь необходима разработка эффективных методов мониторинга состояния почв. Мониторинг включает обследование загрязненных участков с выявления характеристик загрязнения и определения уровня риска для человека и экосистем.

В последние годы в связи с развитием оптико-аналитических систем наблюдается рост интереса к применению контактного спектрального зондирования в области экологии и оценки загрязненных территорий. Контактное спектральное зондирование представляет собой метод, основанный на анализе интенсивности отраженного света на различных длинах волн от загрязненных поверхностей [2]. Этот метод позволяет получать спектральный отклик и на его основе определить характер и интенсивность загрязнения. За счет высокой скорости анализа возможно его многократное повторение в полевых условиях и оценка распространения загрязнения по площади.

Оперативный характер контактного спектрального зондирования является одним из преимуществ этого метода. Благодаря ему все измерения и анализ производятся непосредственно на месте исследования без необходимости забора проб или выезда в лабораторию. Такой подход существенно сокращает время и затраты, связанные с проведением обследования, а также улучшает возможность оперативного реагирования на обнаруженные загрязнения.

За счет высокой скорости анализа контактное спектральное зондирование может быть многократно повторено в полевых условиях. Это позволяет оценить распространение загрязнения по площади и следить за его динамикой.

**Целью исследования** является описание порядка обследования загрязненных территорий с применением контактного спектрального зондирования. В работе будут рассмотрены основные этапы обследования, а также предложены подходы к интерпретации полученных данных. Порядок обследования территорий с применением контактного спектрального зондирования может быть полезен для экологов и других специалистов, занимающихся проблемами загрязнения территорий и оценкой экологического состояния.

### Материалы и методы

Для проведения обследования загрязненных территорий предлагается использовать метод прямого спектрального зондирования с внедрением индексов состояния. Этот метод представляет собой эффективный подход к исследованию территорий и контролю качества почв. Ранее авторами были рассмотрены особенности индексирования спектров при контактном зондировании [3].

Полевые исследования осуществляются с использованием естественного или искусственного источника света. Регистрация интенсивности отражения

проводится спектрометром, работающим в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Полученная информация далее обрабатывается на компьютере, и производится расчет почвенного индекса [4], который отражает относительное содержание компонентов в почвенном слое. Важно отметить, что получение абсолютных значений содержания загрязнителей оказывается недоступным из-за различий в условиях получения спектра и базовом составе почвы.

Для определения состава почвы во множестве точек на исследуемой пробной площадке с сохранением условия ее однородности проводится калибровка, построенная в формате «спектральный индекс состояния – концентрация». Для этого необходимо выполнить количественный химический анализ двух почвенных проб, которые отбираются из точек с принципиально различными значениями индексов (минимальным и максимальным). Такой подход позволяет интерполировать значения индексов для определения состава для других точек на выбранном участке.

Процесс обследования загрязненных территорий с использованием контактного спектрального зондирования состоит из следующих этапов:

1. Подготовка оборудования и выбор контрольных точек.
2. Проведение измерений.
3. Обработка полученных данных и расчет почвенного индекса.
4. Построение калибровочной зависимости «почвенный индекс – концен».
5. Анализ результатов.

В настоящей работе был использован спектрометр, имеющий рабочий диапазон на участке длин волн 650–1100 нм и волоконно-оптический зонд отражения/обратного рассеивания. В качестве источника света применяется компактная галогеновая лампа. В случае работы с естественным освещением вместо зонда используется коллиматор.

При подключении спектрометра необходимо провести настройку базовых уровней отражения. Наивысший уровень отражения достигается, когда количество света, падающего на объект, равно количеству света, отражаемому от него, а самый минимальный уровень отражения – когда свет полностью поглощается. Для получения максимального уровня отражения используют стандартный образец (например, один из образцов комплекта мер диффузного отражения ОДО-4) со спектральным коэффициентом диффузного отражения выше 0,5. Время интегрирования спектрометра для стандартного образца исследования выбирается исходя из степени освещенности исследуемой поверхности и отражательной способности изучаемой почвы. Получаемая спектральная кривая эталона должна быть приближена к максимуму яркости, регистрируемой спектрометром. Для фиксации фонового спектра, вызванного «шумом» оборудования в качестве «черного» образца, используют крышку коллиматора или крышку зонда отражения при выключенном источнике света.

При выборе контрольных точек для анализа загрязненной территории следует учитывать несколько факторов. Прежде всего, необходимо рассмотреть историю и динамику загрязнения, чтобы для предположения о наиболее загрязненных участках и включения этих точек в план съемки. Далее, важно подобрать контрольные точки таким образом, чтобы они охватывали различные области исследуемой территории, а также учитывали пространственное распределение загрязнений. Выбор контрольных точек должен быть репрезентативным для общего состояния загрязненной зоны, учитывая особенности (уклон, растительность и т.д.) конкретного района и характеристики фонового уровня загрязнений. Это позволит получить более точные и достоверные данные о загрязненности территории. Для первичной оценки состояния участка могут быть использованы данные дистанционного зондирования с низким пространственным разрешением без четкой привязки к типу загрязнителя, но демонстрирующие на снимках различия в состоянии почвенного покрова [5].

Спектрометр с коллиматором закрепляется на высоте до 30 см над уровнем земли в зависимости от освещенности и рельефа изучаемой поверхности на любой вид подвижной платформы для фиксации интенсивности отраженного света от почвы. Высота съемки фиксируется для всех точек съемки. При использовании оптико-волоконного зонда его выходное окно может напрямую контактировать с выбранным участком почвы, но следует содержать его в чистоте после каждого измерения. При съемке рекомендуется выбирать ровные участки почвы без камней и растений. Это помогает предотвратить возможные искажения результатов из-за неровностей поверхности или наличия посторонних объектов.

Получение спектра отражения почвы производится с установленным временем интегрирования, которое задается на этапе подготовки [6]. Если спектральная кривая выходит за пределы диапазона между максимумом от стандартного образца и минимумом при отсутствии доступа света к спектрометру, то проводится повторная подготовка спектрометра к работе. Количество повторных измерений спектра в одной точке задается при настройке спектрометра, но не может составлять менее трех повторений. Это позволяет учесть возможные вариации в измерениях и повысить точность результатов.

Данные полевой съемки собираются в накопителе или сразу передаются на ЭВМ в зависимости от модели спектрометра, где открываются через специальное, установленное ранее, программное обеспечение и выводятся в виде спектральных кривых. На основе полученных данных рассчитывается почвенный индекс в каждой точке, характеризующий содержание какого-либо компонента почвы. Пример карты-схемы обследованного участка представлен на рис. 1.

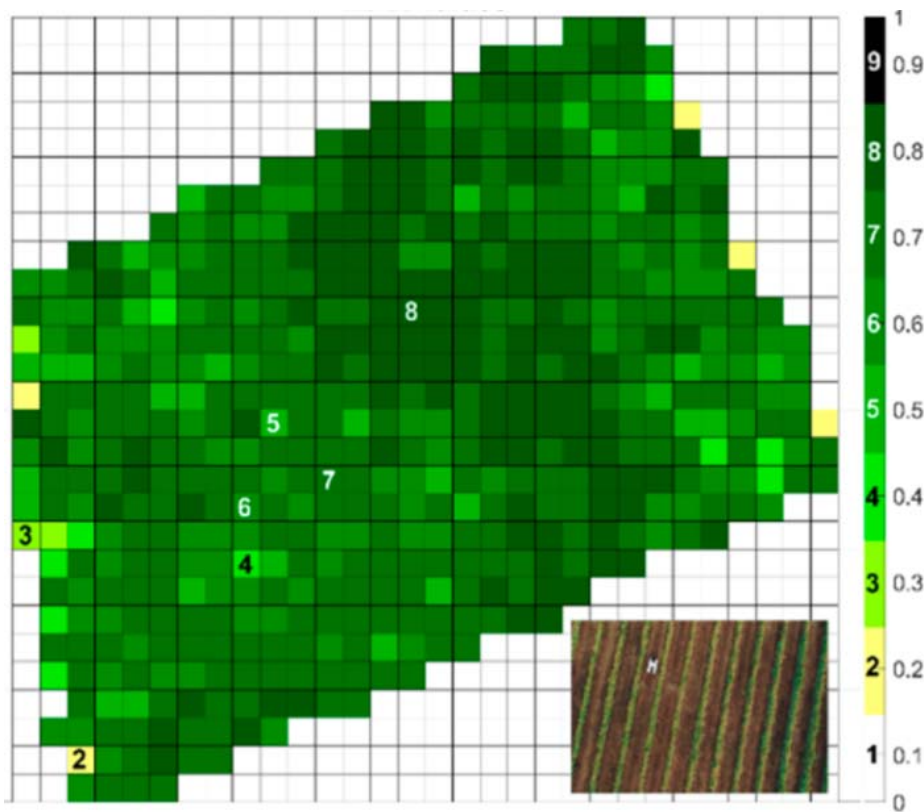


Рис. 1. Карта-схема участка после обследования с указанием значения спектрального индекса загрязнения

Источник: составлено автором /

Figure 1. Schematic map of the site after the survey indicating the value of the spectral contamination index

Source: compiled by the author.

Для дальнейшего определения содержания почвенных компонентов проводится калибровка в формате «спектральный индекс – концентрация» по двум почвенным образцам, отобраным из точек с максимально отличающимися значениями индексов (рис. 2). Путем подстановки значений спектральных индексов в уравнение калибровочной кривой получают значения концентраций фосфора для каждой из точек на исследуемом участке.

## Результаты

Предложенный метод исследования загрязненных территорий с использованием прямого спектрального зондирования является эффективным и оперативным способом получения информации о состоянии почв на больших территориях. В процессе исследования был рассмотрен участок площадью 1 гектар, на котором были осуществлены замеры в точках, располагающиеся через каждые 10 м по сетке.

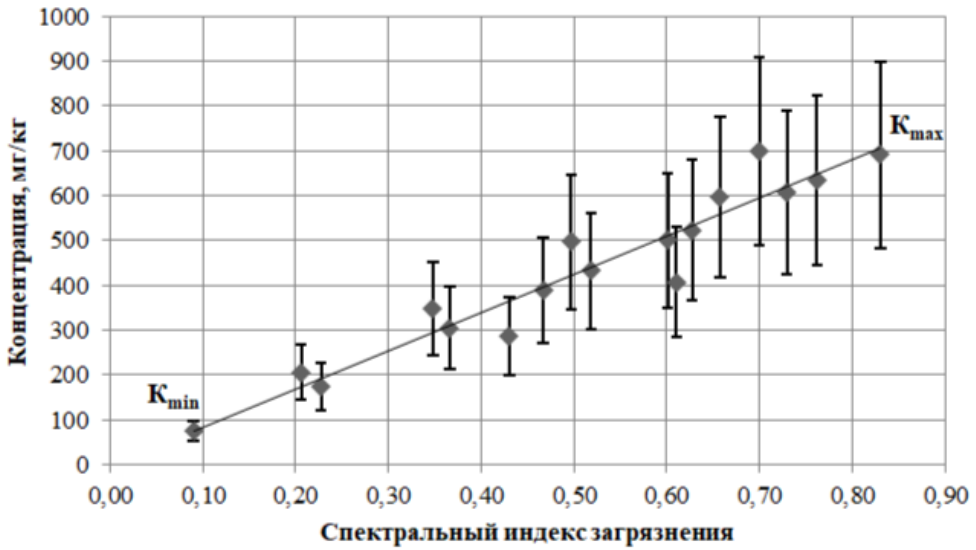


Рис. 2. Калибровочный график зависимости «спектральный индекс загрязнения – концентрация»  
 Источник: составлено автором.

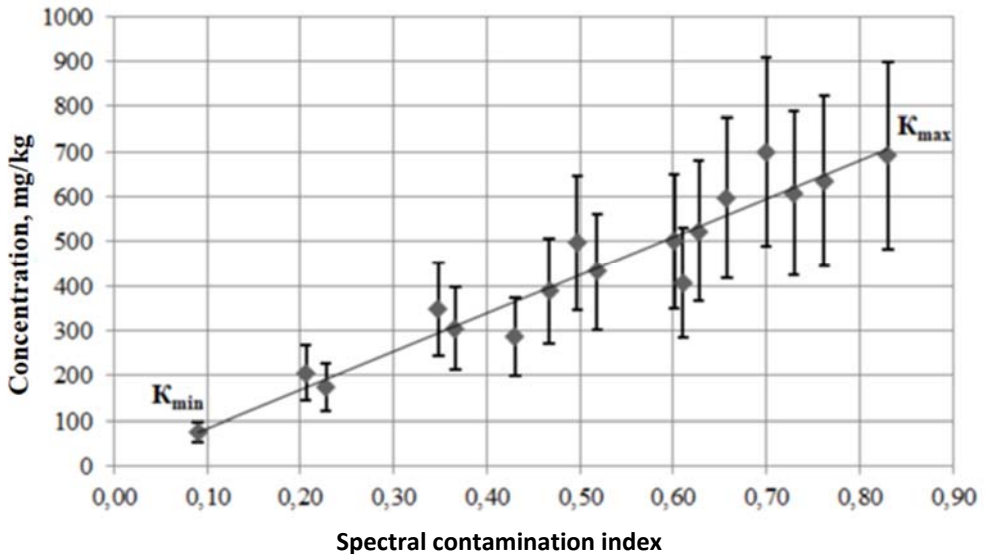


Figure 2. Calibration curve “Spectral contamination index – Concentration”  
 Source: compiled by the author.

Для каждой контрольной точки были получены спектральные данные, которые были использованы для расчета индексов состояния. Так, в общей сложности был найден состав 100 контрольных точек. Такой подход позволяет получить информацию о загрязненности почвы на каждой контрольной точке и составить полную картину состояния почвенного покрова на всей территории исследования.



Рис. 3. Схема съемки спектральных данных и отбора проб почвогрунтов  
Источник: составлено автором.



Figure 3. Survey of spectral data and soil sampling  
Source: compiled by the author.

Ранее был разработан индекс по определению фосфора в почве [3]. Была проведена валидация метода определения концентрации фосфора в почве по спектральным расчетным индексам в натуральных условиях. Расширенная неопределенность предлагаемого метода составила 31,91 % при  $k = 2$ . Для



лабораторных исследований расширенная неопределенность варьируется от 16 до 20 % в зависимости от метода проведения анализа. Следовательно, предлагаемый способ уступает лабораторным методам в точности определения, однако все равно является достаточно достоверным для полевого метода исследования.

В сравнении с традиционными методами исследования почв предложенный метод прямого спектрального зондирования обладает рядом преимуществ. В соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб» для участка площадью 1 га требуется отобрать не менее одной объединенной пробы, которая представляет собой смесь не менее двух точечных проб<sup>3</sup>. Обычно для отбора проб на пробной площадке используется метод «конверта» (5 точек – по углам площадки и в ее середине). Однако такой подход может оказаться недостаточным для полного описания степени загрязненности территории. В отличие от этого метод прямого спектрального зондирования позволяет провести замеры и расчеты для значительно большего числа точек, что способствует более полному и точному определению степени загрязнения почвы и составлению более детальной карты загрязненных участков.

Также следует отметить, что метод прямого спектрального зондирования предоставляет возможность по выявлению степени загрязнения конкретной части исследуемой местности и, следовательно, позволяет определить приоритетные участки для проведения работ по рекультивации и снизить затраты на обширные работы по очистке всей территории.

## Выводы

Таким образом, обследование территорий с использованием контактного спектрального зондирования предоставляет множество преимуществ перед традиционными методами исследования состава почвы. Этот современный подход позволяет быстро получать данные о составе почвы на месте без необходимости сбора образцов и их лабораторного анализа, позволяя экономить время и ресурсы, а также эффективно обследовать большие территории и оперативно получать результаты.

Кроме того, контактное спектральное зондирование дает возможность измерять свойства почвы без физического контакта с ней, что исключает риск повреждения или искажения данных. Благодаря этому методу мы можем получать более точные и надежные данные о составе почвы без влияния человеческого фактора или случайных внешних условий.

Также следует отметить, что использование контактного спектрального зондирования позволяет проводить долгосрочный мониторинг состояния

---

<sup>3</sup> ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200159508> (дата обращения: 01.12.2023 г.).

почвы и изменений, происходящих со временем. Это особенно важно для анализа влияния различных факторов, в частности таких, как антропогенная активность, на состав почвы. Благодаря такому подходу мы можем обнаруживать и анализировать тенденции изменения почвенного покрова, что является ценной информацией для планирования и прогнозирования мер по улучшению экологического состояния территории.

Исходя из всего вышесказанного, обследование территорий с использованием контактного спектрального зондирования является эффективным и современным методом исследования состава почвы, позволяющим быстро получать данные, обеспечивает точность измерений и дает возможность проводить долгосрочный мониторинг изменений в почвенном покрове.

### Список литературы

- [1] Сизов О.С., Соромотин А.В., Лоботросова С.А., Лобжанидзе Н.Е., Приходько Н.В. Нарушенность почвенно-растительного покрова на севере Западной Сибири: пространственное распространение и способы рекультивации // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2022. № 4 (307). С. 40–46.
- [2] Бурин Д.А., Смирнов А. А. Обзор технических средств неинвазивного мониторинга состояния растений, использующих методы гиперспектральной визуализации // Электротехнологии и электрооборудование в АПАК. 2021. № 2 (43). С. 54–61
- [3] Бердникова Т.В., Бран А.А., Ермаков В.В. Разработка техники индексирования при прямом спектральном зондировании почв для цели мониторинга// Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2023. № 5 (314). С. 10–18.
- [4] Коротков А.А., Астанов А.Ю. Вегетационный индекс NDVI для мониторинга растительности // Наука и образование. 2020. № 3. С. 131.
- [5] Полухина В.С., Цораева Э.Н. Использование современных информационных технологий в проведении мониторинга земель сельскохозяйственного назначения // Сборник материалов II Международной научно-практической конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Математическое моделирование и информационные технологии при исследовании явлений и процессов в различных сферах деятельности». Краснодар, 2022. С. 230–233.
- [6] Корец М.А., Рыжкова В.А., Данилова И.В., Сулейманова Ж.Р. Опыт и методы картографирования состояния растительности в зонах воздействия промышленных предприятий // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. Севастополь, 2021. С. 687.

### References

- [1] Sizov OS, Soromotin AV, Lobotrosova SA, Lobzhanidze NE, Prikhodko NV. Disturbance of soil and vegetation cover in the north of Western Siberia: spatial distribution and methods of reclamation. *Environmental protection in oil and gas complex*. 2022;4(307):40–46. (In Russ.)
- [2] Burin DA, Smirnov AA. Review of technical means of non-invasive monitoring of plant condition using hyperspectral visualization methods. *Electrotechnologies and electrical equipment in APAC*. 2021;2(43):54–61. (In Russ.).

- [3] Berdnikova TV, Bran AA, Ermakov V.V. Development of indexing techniques for direct spectral sensing of soils for monitoring purposes. *Environmental protection in the oil and gas complex*. 2023;5:10–18. (In Russ.)
- [4] Korotkov AA, Astapov AYu. Vegetation index NDVI for vegetation monitoring. *Science and Education*. 2020;3:131. (In Russ.)
- [5] Polukhina VS, Tsoraeva EN. Use of modern information technologies in monitoring of agricultural land. *Collection of materials of the II International Scientific and Practical Conference of students, undergraduates and graduate students «Mathematical modeling and information technology in the study of phenomena and processes in various spheres of activity»*. 2022:230–233. (In Russ.)
- [6] Korets MA, Ryzhkova VA, Danilova IV, Suleymanova JR. Experience and methods of mapping the state of vegetation in the zones of impact of industrial enterprises. *Environmental, industrial and energy security – 2021. Collection of articles on the materials of the international scientific-practical conference*. 2021:687. (In Russ.)

### **Сведения об авторах:**

*Бердникова Татьяна Владимировна*, аспирант кафедры «Химическая технология и промышленная экология», Самарский государственный технический университет, Российская Федерация, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244. ORCID: 0000-0002-5441-4853, SPIN-код: 9007-8672. E-mail: tatyana.berdnikova.98@mail.ru

### **Bio note:**

*Tatyana V. Berdnikova*, a graduate student at the Department of Chemical Technology and Industrial Ecology, Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya St, 443100, Samara, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-5441-4853, SPIN-код: 9007-8672. E-mail: tatyana.berdnikova.98@mail.ru.