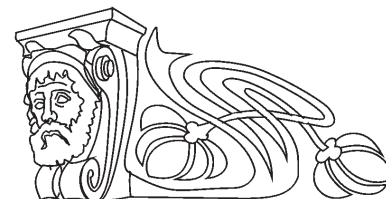




Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 21–33
Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 21–33
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-21-33>, EDN: CPUKEM

Научная статья
УДК 544.45.454.542.943-92



Фотодеградация ксенобиотиков и их смесей

М. Н. Устинова ✉, К. А. Золотухина, М. В. Короленко

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

Устинова Мария Николаевна, кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии института фармации, химии и биологии, ustinova@bsuedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5739-5339>

Золотухина Ксения Андреевна, магистрант Института фармации, химии и биологии, 1389050@bsuedu.ru

Короленко Марина Викторовна, магистрант Института фармации, химии и биологии, 990486@bsuedu.ru

Аннотация. Загрязнение окружающей среды продуктами человеческой деятельности в настоящее время является серьезной экологической проблемой. Органические ксенобиотики подвергаются биодеградации медленно и накапливаются в объектах окружающей среды: регулярный мониторинг не только подтверждает наличие различных загрязнителей в реках, почвах и атмосфере, но и указывает на их рост. Несмотря на то что предложено множество методов инактивации химических реагентов и очистки от загрязнителей, до сих пор нет универсального, применимого к различным классам ксенобиотиков метода, который можно было бы использовать для создания локальных высокоэффективных очистных сооружений. Целью работы являлось изучение деградации модельных систем ксенобиотиков различной природы, а также их смесей. Методом деструкции было выбрано УФ-облучение. Изучали деструкцию модельных веществ: двух красителей, трех фармацевтических препаратов и трех нитропроизводных фенола, а также деструктивные процессы модельных систем различных загрязнителей. Показано, что изученные субстраты уже в течение первого часа подвергаются фотодеструкции. Рассчитаны кинетические характеристики данных процессов. Изучено взаимное влияние субстратов на процесс деструкции. Показано влияние pH растворов на процесс деградации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что УФ-облучение можно рассматривать как перспективный метод инактивации различных загрязнителей и их смесей.

Ключевые слова: деградация, ксенобиотики, УФ-облучение, pH

Для цитирования: Устинова М. Н., Золотухина К. А., Короленко М. В. Фотодеградация ксенобиотиков и их смесей // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 21–33. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-21-33>, EDN: CPUKEM

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Photodegradation of xenobiotics and their mixtures

М. N. Ustinova ✉, К. A. Zolotukhina, М. V. Korolenko

Belgorod State University, 85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

Maria N. Ustinova, ustinova@bsu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5739-5339>

Kseniya A. Zolotukhina, 1389050@bsu.edu.ru

Marina V. Korolenko, 990486@bsuedu.ru

Abstract. Environmental pollution from human activities is currently a serious environmental problem. Organic xenobiotics are slowly biodegraded and accumulate in the environment: regular monitoring not only confirms the presence of various pollutants in rivers, soils, and the atmosphere, but also indicates their growth. Despite the fact that many methods have been proposed for the inactivation of chemical reagents and the removal of pollutants, there is still no universal method that can be applied to various classes of xenobiotics and used to create local, highly efficient wastewater treatment facilities. The purpose of this work was to study the destructive processes of model systems of xenobiotics of various types and their mixtures. UV irradiation was used as a method of destruction. The work has studied the destruction of model substances: two dyes, three pharmaceuticals, and three nitro derivatives of phenol. The destructive processes of model systems of various pollutants have been studied. It has been shown that the studied substrates undergo photodestruction within the first hour. The kinetic characteristics of these processes have been calculated. The mutual influence of substrates on the destruction process has been studied. The effect of pH on the degradation process has been shown. The results obtained indicate that UV irradiation can be considered as a promising method for inactivating various pollutants and their mixtures.

Keywords: degradation, xenobiotics, UV irradiation, pH

For citation: Ustinova M. N., Zolotukhina K. A., Korolenko M. V. Photodegradation of xenobiotics and their mixtures. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 21–33 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-21-33>, EDN: CPUKEM

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)



Введение

Человек в своей повседневной деятельности постоянно использует множество химических веществ в промышленности, сельском хозяйстве, медицине, попадающих в огромном количестве в экосистему [1]. На сегодняшний день проблема загрязнения окружающей среды выбросами отходов различных производств весьма актуальна [2–4].

Широкое применение фармацевтических препаратов, средств личной гигиены, косметической продукции, бытовой химии, дезинфицирующих средств и пестицидов напрямую отражается на концентрации ксенобиотиков в водной среде и приводит к тому, что эти химические компоненты и продукты их трансформации обнаруживаются уже не только в поверхностных, но и в подземных водах.

Значительным источником поступления ксенобиотиков в водную среду являются сточные воды лакокрасочных и текстильных, фармацевтических и химических производств. Данные токсиканты способны наносить ущерб объектам окружающей среды, отрицательно влиять на водную биоту, почвы и экосистему в целом [5–9]. Поэтому объектами данного исследования были выбраны модельные растворы красителей, фармацевтические препараты и пестициды.

Создание локальных очистных сооружений требует изучения массива экспериментальных данных по возможности применимости того или иного метода деструкции на различного рода загрязнителях [10–15], который впоследствии может быть положен в основу технологии очистки. Поскольку сточные воды богаты множеством загрязнителей, то изучение деструктивных особенностей загрязнителей различного класса, а также влияние концентрации, pH, совместного присутствия необходимо для формирования единого кластера данных для детального изучения механизма реакции.

Ранее нами была изучена деструкция некоторых азокрасителей, тетрациклинов и нитропроизводных фенола под действием УФ-облучения при pH близком к нейтральному (pH 5) [16], а также их смесей [17]. Целью данной работы являлось изучение влияния pH на деструктивные процессы изучаемых модельных систем ксенобиотиков. Также в данной работе изучали влияние pH на деструктивные процессы смесей ксенобиотиков: интерес представляло

исследование взаимного влияния субстратов на процесс деструкции многокомпонентной смеси, так как в природных объектах они накапливаются совместно. В качестве метода деструкции применяли УФ-облучение.

Материалы и методы

Объектами исследования в работе являлись модельные вещества различного назначения: красители, лекарственные препараты и пестициды [16, 18, 19].

Из красителей было выбрано два металлохромных индикатора: эриохром чёрный Т (ЭХЧТ / ЕВТ) и эриохром синий (ЭС / ЕВ) классификации ЧДА, общая информация о которых сведена в табл. 1.

Из лекарственных препаратов были выбраны тетрациклин (Т / Т), доксициклин (Д / D) и фурацилин (Ф / F).

Из пестицидов были выбраны 4-нитрофенол (НФ / NPh), 2,4-динитрофенол (2,4-ДНФ / 2.4dNPh) и 2,6-динитрофенол (2,6-ДНФ / 2.6dNPh), реактивы классификации ЧДА, характеристики даны в табл. 1.

Во всех экспериментах изучена деструкция водных растворов субстратов при постоянной температуре 20°C.

За изменением концентрации субстратов следили спектрофотометрическим методом на спектрофотометре Specord Plus 210 в диапазоне волн от 190 до 600 нм с шагом 1 нм. Концентрация всех исследуемых веществ была одинакова и составляла 0,08 ммоль/л.

Для изучения взаимного влияния субстратов изучали смеси краситель – субстрат, взятых в соотношении 1:1, при средних изученных значениях концентраций 0,08 мМ. Для количественного определения субстратов в двухкомпонентной смеси использовали метод спектрофотометрии с наложением спектров поглощения, основанный на законе аддитивности оптической плотности. Поскольку спектры поглощения перекрываются частично, использовали максимум поглощения длинноволнового диапазона для определения содержания красителя, при котором нет поглощения света другим компонентом, а длину волны, при которой поглощают свет оба компонента смеси, использовали для расчета вклада субстрата с вычитанием красителя, определенного по градуировочному графику (рис. 1–3). Градуировочные графики красителей при pH 5 представлены в работе [17].



Таблица 1 / Table 1

**Исследуемые вещества
Compounds under study**

| Название исследуемого образца / Name of the reagents | Структурная формула / Structural formula | λ_{\max} , нм / nm | |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------|-------------------|
| | | pH 2 | pH 10 |
| Эриохром чёрный Т / Eriochrome black T | | 530 | 540 |
| Эриохром синий / Eriochrome blue | | 320 540 | 325 570 |
| Тетрациклин «Биосинтез», таблетки / Tetracycline, "Biosynthesis", tablets | | 225 280 365 | 280 340 450 |
| Доксициклин «Велфарм», капсулы / Doxycycline "Velpharm", capsules | | 270 350 | 245 290 380 |
| Фурацилин «Южфарм», таблетки / Furaciline "Ugfarm", tablets | | 260, 380 | 295 457 |
| 4-нитрофенол / 4-nitrophenol | | 230 330 | 410 |
| 2,4-динитрофенол / 2,4-dinitrophenol | | 270 300 | 270 365 400 |
| 2,6-динитрофенол / 2,6-dinitrophenol | | 260 360 | 270 440 |

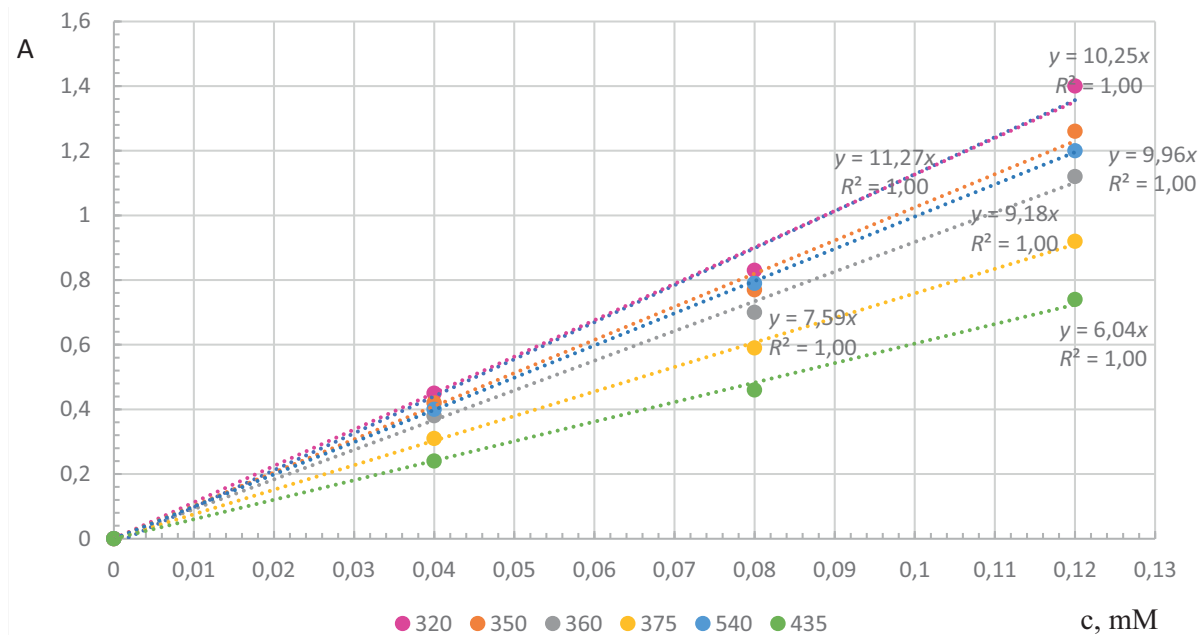


Рис. 1. Зависимость концентрации от оптической плотности эриохрома чёрного Т при разных длинах волн при рН 2 и рН 10 (цвет онлайн)

Fig. 1. Concentration dependence on the optical density of black T eriochrome at different wavelengths for pH 2 and pH 10 (color online)

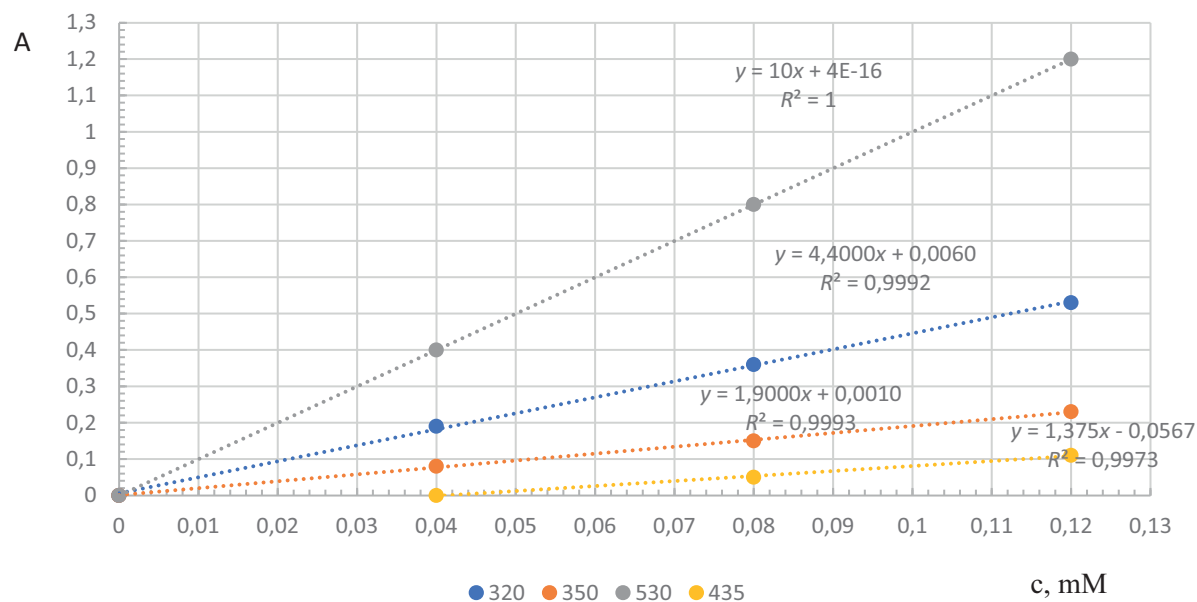


Рис. 2. Зависимость концентрации от оптической плотности эриохрома синего при разных длинах волн при рН 2 (цвет онлайн)

Fig. 2. Concentration dependence of the optical density of Eriochrome Blue at different wavelengths for pH 2 (color online)

Для изучения влияния рН на процесс фотолиза изучаемых систем были выбраны три значения диапазона, соответствующие кислот (рН 2), близкой к нейтральной (рН 5) и щелочной средам (рН 10). Для создания необходимого рН изучаемых систем в раствор вносили гидроксид натрия 0,1М или соляную

кислоту 0,1М, реактивы классификации ЧДА, до достижения нужного значения. рН систем фиксировали с помощью рН-метра Mettler Toledo на протяжении всего процесса и поддерживали постоянным.

Фотолиз растворов проводили в фотолизной камере Вольта ФК-12М, оснащенной

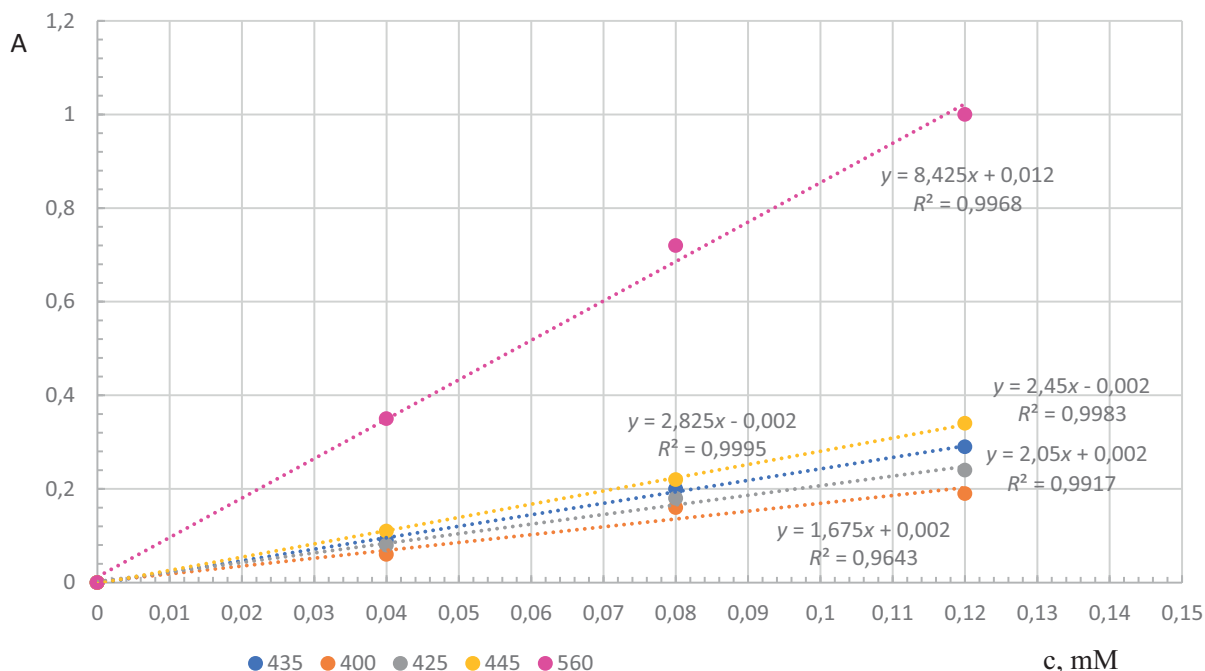


Рис. 3. Зависимость концентрации от оптической плотности эриохрома синего при разных длинах волн при pH 10 (цвет онлайн)

Fig. 3. Concentration dependence of the optical density of Eriochrome Blue at different wavelengths for pH 10 (color online)

ртутной лампой ДРТ-1000 мощностью 1000 Вт, с лучистым потоком 128 Вт. Поток излучения лампы лежит в области спектра 240–320 нм. Фотолиз проводили в течение часа [16].

Результаты и их обсуждение

Для изучения взаимного влияния субстратов в смесях предварительно необходимо

изучить деструкцию каждого реагента отдельно. Поэтому изначально изучали деструкцию чистых компонентов. Исследование деструкции каждого образца при pH 2 и pH 10 представлено в табл. 2. Деструкция образцов при pH 5 проводилась ранее [16].

Для наглядного сравнения влияния pH на степень деструкции изучаемых субстратов построены диаграммы (рис. 4, 5).

Таблица 2 / Table 2

Кинетические характеристики изучаемых систем
Kinetic characteristics of the studied systems

| Субстрат / The substrate (S) | Степень деструкции, час % / Degree of destruction, hour % | | Начальная скорость деструкции, мкмоль/л×мин / Initial destruction rate, mkmol/l×min | |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| | pH 2 | pH 10 | pH 2 | pH 10 |
| ЭС / EB | 98,08 | 98,04 | 0,60 | 2,00 |
| ЭХЧТ / EBТ | 97,73 | 97,44 | 1,00 | 13,30 |
| Т / Т | 61,11 | 81,08 | 0,50 | 5,60 |
| Д / D | 71,26 | 81,08 | 2,56 | 5,60 |
| Ф / F | 98,36 | 99,17 | 10,60 | 5,90 |
| 4НФ / NPh | 97,59 | 93,75 | 3,10 | 1,90 |
| 2,4-ДНФ / 2.4dNPh | 94,12 | 92,31 | 2,50 | 2,00 |
| 2,6-ДНФ / 2.6dNPh | 73,68 | 89,09 | 0,80 | 1,20 |

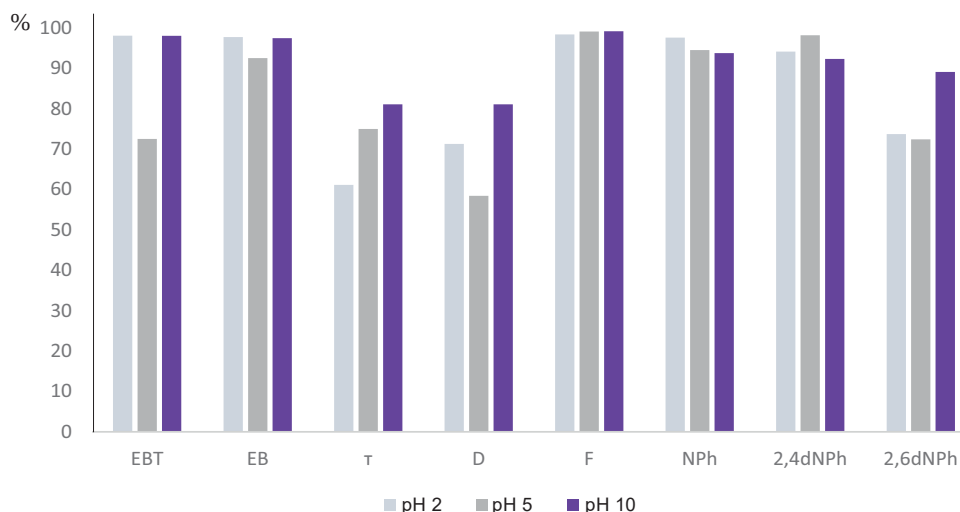


Рис. 4. Эффективность деструкции субстратов при трех значениях pH, % (цвет онлайн)
Fig. 4. The efficiency of substrate degradation at three pH values, % (color online)

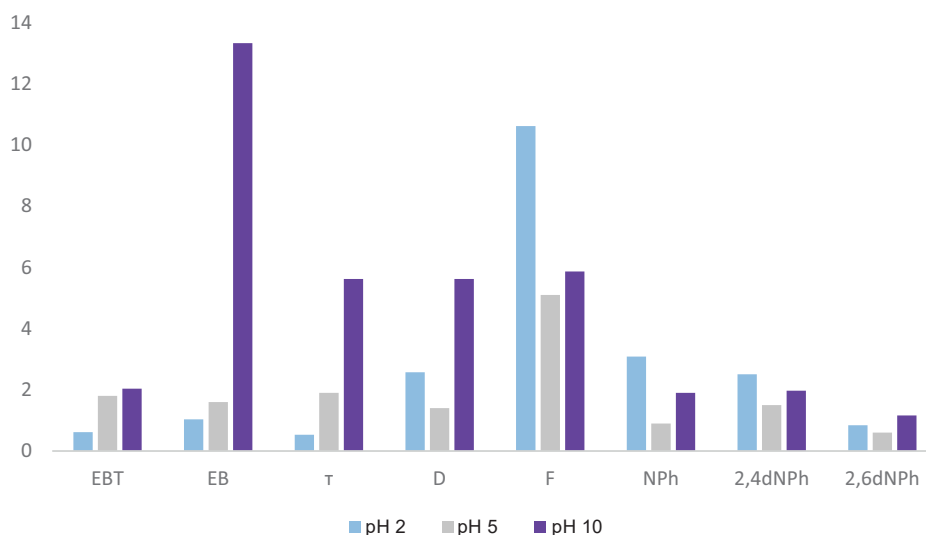


Рис. 5. Начальные скорости деструкции субстратов при трех значениях pH, мкмоль/л×мин (цвет онлайн)
Fig. 5. Initial rates of substrate degradation at three pH values, mkmol/l×min (color online)

По росту способности к деструкции можно составить ряды:

pH 2: T<D<2,6-ДНФ<2,4ДНФ<ПНФ<ЭС<ЭХЧТ<Ф;
pH 5: 2,6-ДНФ<ЭХЧТ<Д<Т<ЭС<ПНФ<2,4-ДНФ<Ф;
pH 10: T<Д<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<ПНФ<ЭС<ЭХЧТ<Ф.

Видно, что в кислой и щелочной среде получен одинаковый ряд деградации субстратов. Фотодеградация фурацилина при всех изученных pH имеет максимальную степень деструкции.

Можно отметить, что инактивация исследуемых веществ высока, процесс фотолиза можно считать эффективным для поллютантов различного строения и назначения.

Далее изучали деструкцию смесей ксенобиотиков состава краситель – субстрат. В табл. 3 приведено сравнение степени деструкции чистого субстрата под действием УФ-облучения и субстрата в смеси с красителем при pH 5.

По росту способности к фотодеструкции субстратов при pH 5 можно составить ряд: в присутствии ЭС: 2,4-ДНФ<ПНФ<2,6-ДНФ<Д<Т<Ф; в присутствии ЭХЧТ: ПНФ<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<Т<Д<Ф.

Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии доксициклина. Видно, что фотодеградация фурацилина в смесях также имеет наибольшее значение степени деструкции.



Таблица 3 / Table 3

Кинетические характеристики изучаемых систем при pH 5
Kinetic characteristics of the studied systems for pH 5

| Система / System | Степень деструкции, ч % / Degree of destruction, hour % | | | Начальная скорость деструкции, мкмоль/л×мин / Initial destruction rate, mkmol/l×min | | |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| | Субстрат / The substrate (S) | Краситель / The dye (C) | Смесь / Mixture S:C | Субстрат / The substrate (S) | Краситель / The dye (C) | Смесь / mixture S:C |
| Смеси с эриохромом синим / Mixtures with Eriochrome Blue | | | | | | |
| T / T | 74,98 | 92,50 | 58,35 / 65,06 | 1,9 | 1,6 | 1,6 / 3,1 |
| Д / D | 58,42 | | 49,99 / 37,65 | 1,4 | | 1,6 / 1,3 |
| Ф / F | 99,08 | | 84,52 / 95,18 | 5,1 | | 4,4 / 1,5 |
| 4НФ / NPh | 94,50 | | 38,77 / 52,38 | 0,9 | | 1,3 / 0,8 |
| 2,4-ДНФ / 2.4dNPh | 98,15 | | 34,16 / 60,24 | 1,5 | | 0,3 / 1,3 |
| 2,6-ДНФ / 2.6dNPh | 72,41 | | 48,76 / 67,86 | 0,5 | | 0,7 / 1,5 |
| Смеси с эриохромом чёрным Т / Mixtures with Eriochrome Black T | | | | | | |
| T / T | 74,98 | 72,50 | 37,16 / 26,56 | 1,9 | 1,8 | 1,1 / 1,0 |
| Д / D | 58,42 | | 42,1 / 24,24 | 1,4 | | 1,4 / 1,2 |
| Ф / F | 99,08 | | 49,58 / 39,39 | 5,1 | | 3,9 / 1,0 |
| 4НФ / NPh | 94,5 | | 21,51 / 43,75 | 0,9 | | 0,3 / 1,8 |
| 2,4-ДНФ / 2.4dNPh | 98,15 | | 36,72 / 38,03 | 1,5 | | 0,5 / 1,1 |
| 2,6-ДНФ / 2.6dNPh | 72,41 | | 28,7 / 34,67 | 0,5 | | 0,2 / 1,5 |

Аналогично проведены эксперименты при pH 2 и pH 10. Результаты представлены в табл. 4.

По росту способности к деструкции субстратов можно составить ряд при pH 2: в присутствии ЭС: Т<2,4-ДНФ<ПНФ<Д<Ф<2,6-ДНФ (рис. 6, а). Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии тетрациклина и доксициклина при pH 2 (рис. 7).

В присутствии ЭХЧТ: 2,4-ДНФ<2,6-ДНФ<Т<Д<ПНФ<Ф (рис. 8, а).

Аналогично, по росту способности к деструкции субстратов можно составить ряд при pH 10: в присутствии ЭС: Д<Т<ПНФ<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<Ф (см. рис. 6. б); в присутствии ЭХЧТ: Д<2,4-ДНФ <Т<ПНФ <Ф <2,6-ДНФ (см. рис. 8, б).

Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии тетрациклина, доксициклина и фурацилина при pH 10 (рис. 9).

Также приведено сравнение начальных скоростей деструкции чистых субстратов и их смесей при разном значении pH (табл. 5).

Таким образом, в ходе длительных измерений различных растворов и их смесей, были выявлены различные закономерности инактивации субстратов. Окисление субстратов в смеси происходит медленнее, чем для чистых компонентов.

Создание локальных очистных сооружений требует изучение массива экспериментальных данных по возможности применимости того или иного метода деструкции на различного рода загрязнителях, который



Таблица 4 / Table 4

Кинетические характеристики изучаемых систем при pH 2 и pH 10
Kinetic characteristics of the studied systems for pH 2 and pH 10

| Система / System | Степень деструкции при pH 2, ч % / Degree of destruction, hour % | | | Степень деструкции при pH 10, ч % / Degree of destruction, hour % | | |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| | Субстрат / The substrate (S) | Краситель / The dye (C) | Смесь / Mixture S:C | Субстрат / The substrate (S) | Краситель / The dye (C) | Смесь / Mixture S:C |
| Смеси с эриохромом синим / Mixtures with Eriochrome Blue | | | | | | |
| T / T | 61,11 | 97,73 | 35,94:75,00 | 81,08 | 97,44 | 69,55:82,85 |
| Д / D | 71,26 | | 66,67:83,33 | 81,08 | | 54,69:87,50 |
| Ф / F | 98,36 | | 96,05:98,82 | 99,17 | | 97,48:78,70 |
| 4НФ / NPh | 97,59 | | 63,34:98,88 | 93,75 | | 77,51:98,65 |
| 2,4ДНФ / 2.4dNPh | 94,12 | | 42,40:98,86 | 92,31 | | 88,74:98,63 |
| 2,6-ДНФ / 2.6dNPh | 73,68 | | 96,37:98,73 | 98,08 | | 82,35:98,89 |
| Смеси с эриохромом чёрным Т / Mixtures with Eriochrome Black T | | | | | | |
| T / T | 61,11 | 98,08 | 55,55:55,00 | 81,08 | 98,04 | 52,55:67,86 |
| Д / D | 71,26 | | 53,49:46,67 | 81,08 | | 42,53:74,07 |
| Ф / F | 98,36 | | 94,13:93,44 | 99,17 | | 74,86:87,5 |
| 4НФ / NPh | 97,59 | | 61,10:90,48 | 93,75 | | 65,34:98,33 |
| 2,4-ДНФ / 2.4dNPh | 94,12 | | 29,53:80,00 | 92,31 | | 44,00:77,60 |
| 2,6-ДНФ / 2.6dNPh | 73,68 | | 32,17:95,00 | 98,08 | | 90,34:98,75 |

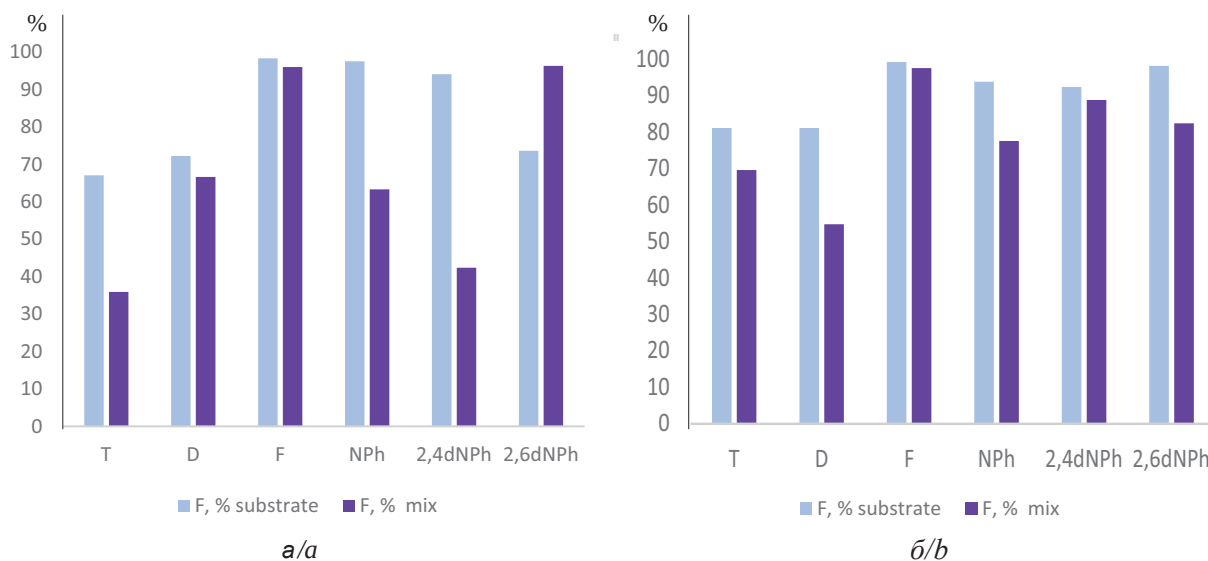


Рис. 6. Степень деструкции чистого субстрата и субстрата в смеси с красителем ЭС при pH 2 (а) и pH 10 (б), %

Fig. 6. Degree of destruction of pure substrate and substrate mixed with dye (EB) at pH 2 (a) and pH 10 (b), %



Таблица 5 / Table 5

Кинетические характеристики изучаемых систем при pH 2 и pH 10
Kinetic characteristics of the studied systems for pH 2 and pH 10

| Система / System | Начальная скорость деструкции при pH 2, мкмоль/л×мин / Initial destruction rate, mkmol/l×min | | | Начальная скорость деструкции при pH 10, мкмоль/л×мин / Initial destruction rate, mkmol/l×min | | |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| | Субстрат / The substrate (S) | Краситель / The dye (C) | Смесь / Mixture S:C | Субстрат / The substrate (S) | Краситель / The dye (C) | Смесь / Mixture S:C |
| Смеси с эриохромом синим // Mixtures with Eriochrome Blue | | | | | | |
| Т / T | 0,50 | 1,00 | 0,04:1,90 | 5,60 | 13,30 | 0,40:4,80 |
| Д / D | 2,60 | | 2,30:5,60 | 5,60 | | 1,40:2,70 |
| Ф / F | 10,60 | | 6,40:4,50 | 5,90 | | 5,00:11,22 |
| 4НФ / NPh | 3,10 | | 0,60:4,50 | 1,90 | | 0,80:10,60 |
| 2,4-ДНФ / 2.4dNPh | 2,50 | | 1,20:5,10 | 2,00 | | 0,20:11,80 |
| 2,6-ДНФ / 2.6dNPh | 0,80 | | 0,70:10,10 | 1,20 | | 2,50:4,30 |
| Смеси с эриохромом чёрным Т / Mixtures with Eriochrome Black T | | | | | | |
| Т / T | 0,50 | 0,60 | 0,90:1,30 | 5,60 | 2,00 | 0,06:1,60 |
| Д / D | 2,60 | | 1,60:1,90 | 5,60 | | 0,50:1,00 |
| Ф / F | 10,60 | | 11,20:5,00 | 5,90 | | 1,50:0,70 |
| 4НФ / NPh | 3,10 | | 0,90:4,10 | 1,90 | | 0,20:2,90 |
| 2,4-ДНФ / 2.4dNPh | 2,50 | | 0,06:1,30 | 2,00 | | 0,20:2,30 |
| 2,6-ДНФ / 2.6dNPh | 0,80 | | 0,20:0,80 | 1,20 | | 4,80:3,20 |

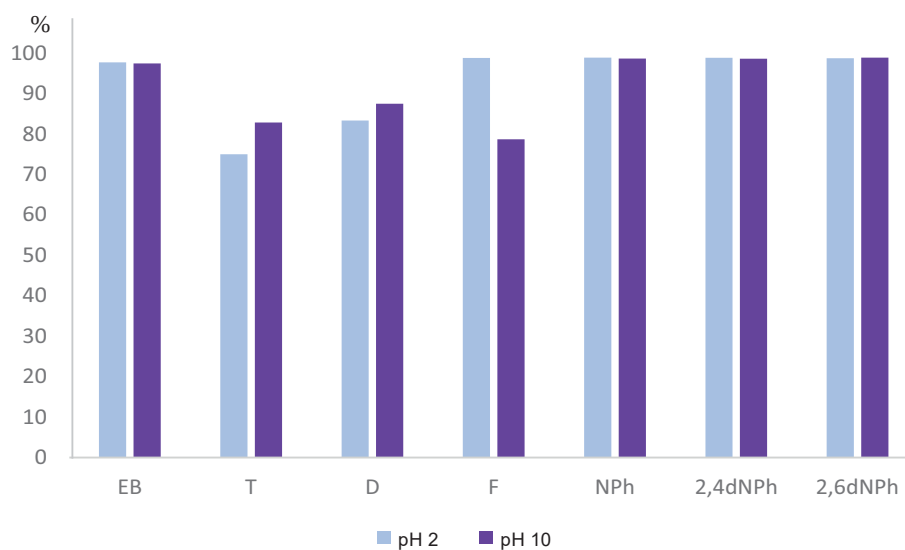


Рис. 7. Степень деструкции чистого красителя ЭС и красителя в смеси с субстратом при pH 2 и pH 10, %

Fig. 7. Degree of destruction of pure dye (EB) and dye mixed with substrate at pH 2 and pH 10, %

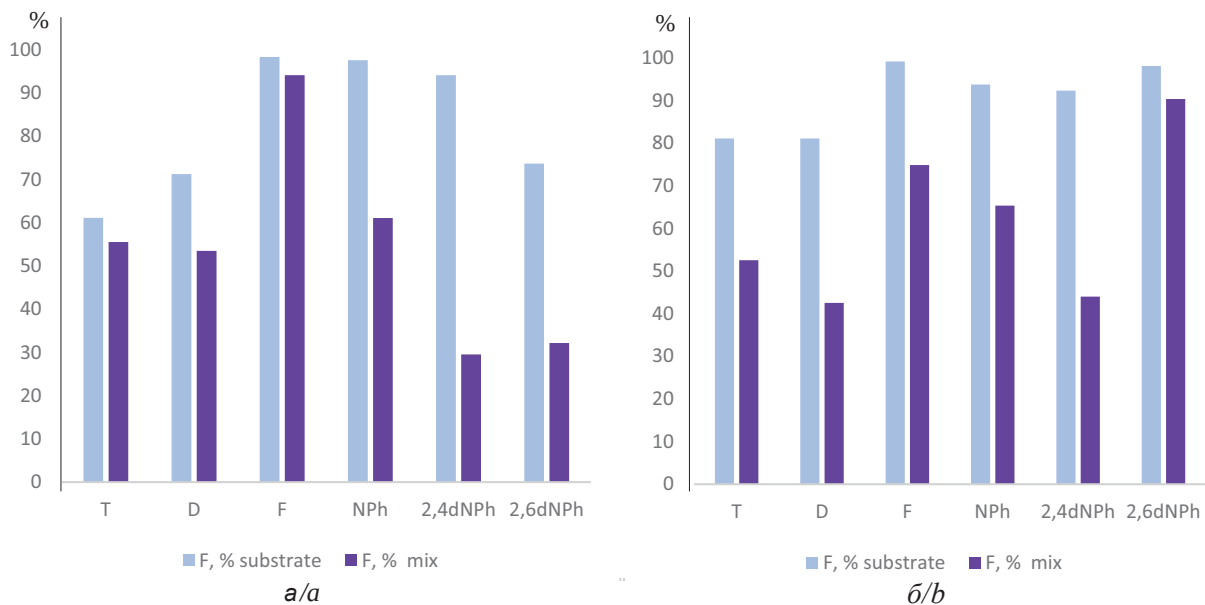


Рис. 8. Степень деструкции чистого субстрата и субстрата в смеси с красителем ЭХЧТ при pH 2 (а) и pH 10 (б), %

Fig. 8. Degree of destruction of pure substrate and substrate mixed with dye (EBT) at pH 2 (a) and pH 10 (b), %

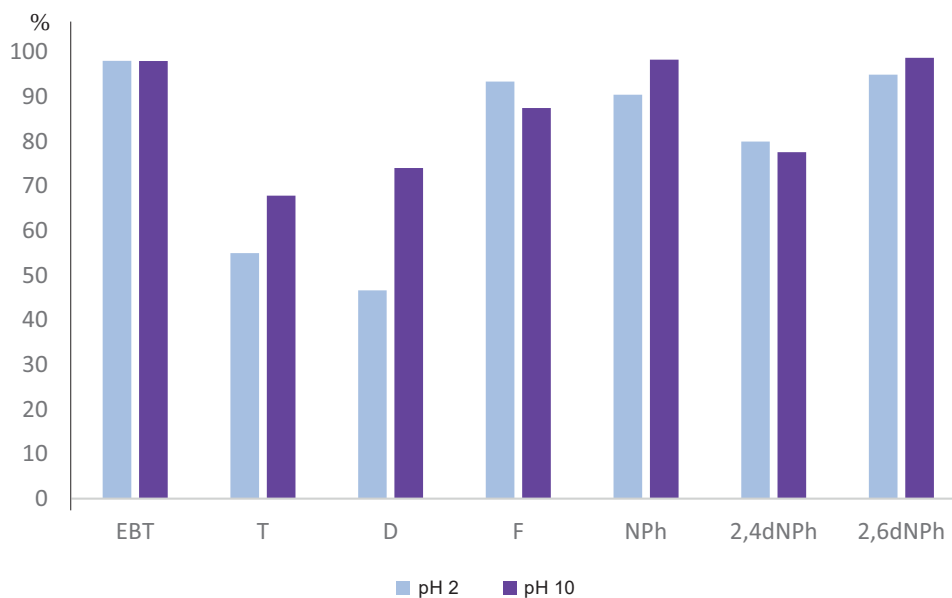


Рис. 9. Степень деструкции чистого красителя ЭХЧТ и красителя в смеси с субстратом при pH 2 и pH 10, %

Fig. 9. Degree of destruction of pure dye (EBT) and dye mixed with substrate at pH 2 and pH 10, %

впоследствии может быть положен в основу технологии очистки. Поскольку сточные воды богаты множеством загрязнителей, то изучение деструктивных особенностей загрязнителей различного класса, влияние их концентрации, pH, совместного присутствия необходимо для всестороннего анализа и моделирования механизмов деструкции.

Заключение

Показано, что многие субстраты уже в течение первого часа подвергаются инактивации под действием УФ-облучения: труднодеструктурируемым оказался тетрациклин, его степень деструкции достигает 61% при pH 2, наиболее легкодеструктурируемым является фурацилин,



его степень деструкции наибольшая при любом значении pH, и более 99% при pH 10. По росту способности к деструкции составлен ряд, который одинаков для кислой и щелочной сред: Т<Д<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<ПНФ<ЭС<ЭРХЧТ<Ф. В нейтральной среде получен следующий ряд: 2,6-ДНФ<ЭХЧТ<Д<Т<ЭС<ПНФ<2,4-ДНФ<Ф.

Выявлено, что при окислении смеси субстратов скорость деструкции снижается: труднодеструктируемым в смеси с ЭХЧТ оказался 2,4-динитрофенол, его степень деструкции достигает 29% при pH 2 (также как 2,6-динитрофенол и тетрациклин), наиболее легкодеструктируемым является фурацилин, а также нитрофенолы в смеси в эриохромом синим в кислой среде, их степень деструкции более 98%.

Выявлено влияние pH на деструкцию субстратов в смеси: по росту способности к деструкции субстратов можно составить ряд в кислой среде в присутствии эриохрома синего: Т<2,4-ДНФ<ПНФ<Д<Ф<2,6-ДНФ; в присутствии эриохрома черного Т: 2,4-ДНФ<2,6-ДНФ<Т<Д<ПНФ<Ф. Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии тетрациклина и доксициклина при pH 2. По росту способности к деструкции субстратов в нейтральной среде можно составить ряд в присутствии эриохрома синего: 2,4-ДНФ<ПНФ<2,6-ДНФ<Д<Т<Ф; в присутствии эриохрома черного Т: ПНФ<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<Т<Д<Ф. Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии доксициклина. Аналогично, по росту способности к деструкции субстратов можно составить ряд в щелочной среде в присутствии эриохрома синего: Д<Т<ПНФ<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<Ф; в присутствии эриохрома черного Т: Д<2,4-ДНФ<Т<ПНФ<Ф<2,6-ДНФ. Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии тетрациклина, доксициклина и фурацилина при pH 10.

Метод УФ-облучения может быть рекомендован для инактивации ксенобиотиков: азокрасителей, тетрациклинов и производных нитрофурана, а также нитропроизводных фенола.

Список литературы

1. Юркова А. А. Химическое загрязнение окружающей среды // *Colloquium-Journal*. 2021. № 18, ч. 1(105). С. 9–12. <https://doi.org/10.24412/2520-6990-2021-18105-9-12>
2. Баренбойм Г. М. Загрязнение природных вод лекарствами. М. : Наука, 2015. 283 с.
3. Демин А. П. Сброс сточных вод и загрязнение водных объектов в бассейне реки Волга (1990–2018 гг.) // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. 2020. Т. 1, № 5. С. 138–143. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2020-1-5-138-143>
4. Сафонова Л. Б. Загрязнение окружающей среды химическими соединениями и отходами сельскохозяйственной промышленности // *Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 12 ноября 2015 г.)*. Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2015. Ч. 3. С. 237–244.
5. Пат. RU 2333161 С2. Состав для очистки почвы и воды от нефтяных загрязнений и способ очистки воды от нефтяных загрязнений / И. Х. Гараев, И. И. Гараев, А. И. Гараев, И. А. Гараев, М. А. Гараев. Заявка № 2006128823/13. 10.09.2008.
6. Кизилов О. А., Байкин Ю. Л., Овчинников П. Ю. Применение минеральных сорбентов при загрязнении почв тяжелыми металлами // *Вестник биотехнологии*. 2017. № 1 (11). С. 16. URL: <http://bio.urgau.ru/images/01-2017>
7. Водяницкий Ю. Н., Яковлев А. С. Загрязнение почв и почвенно-грунтовых вод новыми органическими микрополлютантами // *Почвоведение*. 2016. Т. 49, № 5. С. 609–619. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16050154>
8. Оралбаев Б. С., Нурғалиев А. М. Загрязнение почв нефтепродуктами и эффективный метод их восстановления // *Молодой ученый*. 2019. № 52 (290). С. 459–462.
9. Abseit A. S., Kelesbaev K. N., Abdikarim G. G. Indicator of air pollution in Turkestan // *Международный студенческий научный вестник*. 2020. № 2. С. 137.
10. Высотина А.А., Федоров В. А., Литовченко В. И. Очистка сточных вод лесопромышленного предприятия методом флотации // *Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации : материалы XXI Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Красноярск, 18 мая 2022 г.)*. Красноярск : СибГУ им. М. Д. Решетнева, 2022. С. 205–207.
11. Andreyuk S. V., Zan M. V. Study of methods for physico-chemical treatment of groundwater from nitrates // *Vestnik of Brest State Technical University*. 2023. № 3 (132). С. 15–17. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-132-3-15-17>
12. Hajiyeva S. R., Shamilov N. T., Bayramov G. I., Raki-da N. M. Ecological effective treatment of industrial wastewater formed in the oil-producing industry by coagulation method // *Azerbaijan Chemical Journal*. 2021. № 3. С. 63–66. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2021-3-63-66>
13. Кушаев Э. Н. Экспериментальные исследования метода озонирования в технологии очистки сточных вод газохроматографическим методом // *Интеграционные процессы в науке в современных условиях : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. (Волгоград, 5 июня 2017 г.) : в 4 ч. Ч. 3*. Уфа : Аэтерна, 2017. С. 82–85.



14. Лупандина Н. С., Марченкова Е. Н. Очистка сточных вод биологическими методами и сопряженные с методом проблемы // Актуальные аспекты и перспективы развития современной биотехнологии : сб. докл. междунар. науч. конф. (Белгород, 26–28 марта 2024 г.). Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2024. С. 268–272.
15. Кащенко О. В., Киселев К. А. Комбинирование методов хлорирования и УФ-облучения // Современные научные исследования и инновации. 2021. № 6 (122). URL: <https://web.snauka.ru/issues/2021/06/95826>
16. Устинова М. Н., Золотухина К. А. Инактивация ксенобиотиков: некоторых азокрасителей, нитропроизводных фенола и тетрациклинов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 4. С. 382–391. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-4-382-391>, EDN: DYDGWL
17. Устинова М. Н., Золотухина К. А. Фотодеструкция смесей ксенобиотиков // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия». 2024. № 4 (58). С. 42–55. <https://doi.org/10.26456/vtchem2024.4.5>
18. Устинова М. Н., Филиппова К. А. Окислительная деструкция тетрациклинов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 23–33. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-1-23-33>, EDN: DUOUC
19. Устинова М. Н., Дмитрук Д. И. Инактивация фармацевтических отходов // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия». 2024. № 3 (57). С. 137–152. <https://doi.org/10.26456/vtchem2024.3.13>
20. Safety: Proc. of the Intern. sci. and pract. conf. (Voronezh, November 12, 2015), part 3]. Voronezh, Voronezh State Technical University Publ., 2015, pp. 237–244 (in Russian).
5. Pat. RU 2333161 C2. *Composition for treatment of soil and water from oil contamination and method of water treatment from oil contamination*. I. Kh. Garaev, I. I. Garaev, A. I. Garaev, I. A. Garaeva, M. A. Garaeva. Application No. 2006128823/13. 10.09.2008 (in Russian).
6. Kizilov O. A., Bajkin Yu. L., Ovchinnikov P. Yu. Application of mineral sorbents in soil contamination by heavy metals. *Bulletin of Biotechnology*, 2017, vol. 1 (11), pp. 16 (in Russian). Available at: <http://bio.urgau.ru/images/01-2017>
7. Vodyanitskii Y. N., Yakovlev A. S. Contamination of soil and groundwater with new organic micropollutants: A review. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 5, pp. 560–569. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16050154>
8. Oralbaev B. S., Nurgaliev A. M. Soil pollution by petroleum products and an effective method for their restoration. *Young Scientist*, 2019, no. 52 (290), pp. 459–462 (in Russian).
9. Abseit A. S., Kelesbaev K. N., Abdikarim G. G. Indicator of air pollution in Turkestan. *International Student Scientific Magazine*, 2020, no. 2, pp. 137.
10. Vysotina A. A., Fedorov V. A., Litovchenko V. I. Waste water treatment of timber industry enterprises by flotation method. *Molodezh. Obshchestvo. Sovremennaya nauka, tekhnika i innovatsii: materialy XXI Vseros. nauch. konf. s mezhdynar. uchastiem (Krasnoyarsk, 18 maya 2022 g.)* [Youth. Society. Modern Science, Technology, and Innovations: Proc. XXI All-Russ. sci. conf. with Intern. participation (Krasnoyarsk, May 18, 2022)]. Krasnoyarsk, Reshetov Siberian State University of Science and Technologies Publ., 2022, pp. 205–207 (in Russian).
11. Andreyuk S. V., Zan M. V. Study of methods for physico-chemical treatment of groundwater from nitrates. *Vestnik of Brest State Technical University*, 2023, no. 3 (132), pp. 15–17. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-132-3-15-17>
12. Hajiyeva S. R., Shamilov N. T., Bayramov G. I., Raki-da N. M. Ecological effective treatment of industrial wastewater formed in the oil-producing industry by coagulation method. *Azerbaijan Chemical Journal*, 2021, no. 3, pp. 63–66. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2021-3-63-66>
13. Kushaev E. N. Experimental studies of the ozonation method in wastewater treatment technology using gas chromatography. In: *Integratsionnye protsessy v nauke v sovremennykh usloviyakh: sb. st. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Volgograd, 5 iyunya 2017 g.): v 4 ch. Ch. 3* [Integration Processes in Science in Modern Conditions: Proc. All-Russ. sci. conf. with Intern. participation (Volgograd, June 5, 2017): in 4 pt. Pt 3]. Ufa, Aeterna, 2017, pp. 82–85 (in Russian).

References

1. Yurkova A. A. Chemical environment pollution. *Colloquium-Journal*, 2021, vol. 18, part 1 (105), pp. 9–12 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2520-6990-2021-18105-9-12>
2. Barenbojm G. M. *Zagryaznenie prirodnikh vod lekarstvami* [Pollution of natural waters by medicines]. Moscow, Nauka, 2015. 283 p. (in Russian).
3. Demin A. P. Waste discharge and water pollution in the Volga river basin (1990–2018 gg). *Ecology, Economy, Informatics: System Analysis and Mathematical Modeling of Ecological and Economic Systems*, 2020, vol. 1, no. 5, pp. 138–143 (in Russian). <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2020-1-5-138-143>
4. Safonova L. B. Environmental pollution caused by chemical compounds and agricultural waste. *Kompleksnyye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Voronezh, 12 noyabrya 2015 g.). Ch. 3* [Complex Problems of Technosphere



14. Lupandina N. S., Marchenkova E. N. Wastewater treatment by biological methods and problems associated with the method. In: *Aktualnye aspekty i perspektivy razvitiya sovremennoy biotekhnologii: sbornik dokl. mezhdunar. nauch. konf. (Belgorod, 26–28 marta 2024 g.)* [Actual Aspects and Prospects of Development of Modern Biotechnology: Coll. of reports of the conf. Intern. sci. (Belgorod, March 26–28, 2024)]. Belgorod, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov Publ., 2024, pp. 268–272 (in Russian).
15. Kashchenko O. V., Kiselev K. A. Combining methods of chlorination and UV irradiation. *Modern Scientific Researches and Innovations*, 2021, no. 6 (122) (in Russian). Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2021/06/95826>
16. Ustinova M. N., Zolotukhina K. A. Inactivation of xenobiotics: Some azo dyes, phenol nitro derivatives, and tetracyclines. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2023, vol. 23, iss. 4, pp. 382–391 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-4-382-391>, EDN: DYDGWL
17. Ustinova M. N., Zolotukhina K. A. Photodestruction of xenobiotic mixtures. *Bulletin of Tver State University. Series: Chemistry*, 2024, no. 4 (58), pp. 42–55 (in Russian). <https://doi.org/10.26456/vtchem2024.4.5>
18. Ustinova M. N., Filippova K. A. Oxidative degradation of tetracyclines. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 23–33 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-1-23-33>, EDN: DUOUC
19. Ustinova M. N., Dmitruk D. I. Inactivation of pharmaceutical waste. *Bulletin of Tver State University. Series: Chemistry*, 2024, no. 3 (57), pp. 137–152 (in Russian). <https://doi.org/10.26456/vtchem2024.3.13>

Поступила в редакцию 05.08.2025, одобрена после рецензирования 17.11.2025, принята к публикации 20.11.2025
The article was submitted 05.08.2025, approved after reviewing 17.11.2025, accepted for publication 20.11.2025