

DOI: 10.31862/2500-2961-2024-14-1-108-120

УДК 631.412

М.Б. Рюмин, Ю.В. Артеменко, О.Г. Лопатовская

Иркутский государственный университет,
664003 г. Иркутск, Российская Федерация

Влияние нефтепродуктов на почвенное дыхание серой лесной почвы

В модельном эксперименте на серых лесных почвах Ботанического сада г. Иркутска (Восточная Сибирь) были определены содержание нефтепродуктов и интенсивность микробного дыхания с целью дальнейшей их ремедиации. Эксперименты проводились в лабораторных условиях с использованием в качестве загрязнителя нефть (50, 150 и 300 мл/кг) и дизельное топливо (50, 150 и 300 мл/кг). Для очистки нефтепродуктов образцы промывали раствором твина-80 в концентрации 5 г/л, что вызвало снижение токсичных веществ за счет вымывания маслянистых пленок с поверхности почвы. В результате промывки твином-80 выделение углекислого газа увеличилось, благодаря частичному восстановлению исходных характеристик почвы в процессе очистки.

Ключевые слова: почвенное дыхание, нефтезагрязненная почва, твин-80, ремедиация, серая лесная почва

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Рюмин М.Б., Артеменко Ю.В., Лопатовская О.Г. Влияние нефтепродуктов на почвенное дыхание серой лесной почвы // Социально-экологические технологии. 2024. Т. 14. № 1. С. 108–120. DOI: 10.31862/2500-2961-2024-14-1-108-120

© Рюмин М.Б., Артеменко Ю.В., Лопатовская О.Г., 2024

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



DOI: 10.31862/2500-2961-2024-14-1-108-120

M.B. Ryumin, Yu.V. Artemenko, O.G. LopatovskayaIrkutsk State University,
Irkutsk, 664003, Russian Federation

The effect impact of petroleum products on the soil respiration of gray forest soil

In a model experiment on gray forest soils of the Botanical Garden of Irkutsk (Eastern Siberia), the content of petroleum products and the intensity of microbial respiration were determined in order to further their remediation. The experiments were carried out in laboratory conditions using oil (50, 150 and 300 ml/kg) and diesel fuel (50, 150 and 300 ml/kg) as a pollutant. To purify petroleum products, the samples were washed with a Tween 80 solution at a concentration of 5 g/l, which caused a decrease in toxic substances due to the leaching of oily films from the soil surface. As a result of washing with Twin 80, the release of carbon dioxide increased, due to the partial restoration of the initial characteristics of the soil during the cleaning process.

Key words: soil respiration, oil-contaminated soil, Tween 80, remediation, gray forest soil

CITATION: Ryumin M.B. Artemenko Yu.V. Lopatovskaya O.G. Impact of petroleum products on soil respiration gray forest soil. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2024. Vol. 14. No. 1. Pp. 108–120. (In Rus.) DOI: 10.31862/2500-2961-2024-14-1-108-120

Введение

В настоящее время урбанизация территорий приобрела глобальные масштабы. Одним из основных ее процессов считают загрязнение почвы нефтью и нефтепродуктами [Para et al., 2010; Rumin et al., 2023].

Влияние нефтезагрязнения почв на интенсивность дыхания микроорганизмов освящено в ряде публикаций. Эти исследования, в основном, проводились в лабораторных условиях с почвами, которые были

отобраны на территории промышленных предприятий [Ohya et al., 1988; Cotrufo et al., 1995; Yuangen et al., 2001; Ананьева и др., 2002; Ramsey et al., 2005; Kozlov et al., 2009].

Было выявлено, что нефтяное загрязнение негативно влияет на активность микробного сообщества почвы, что приводит к снижению интенсивности почвенного дыхания [Культивирование..., 2016]. Однако в загрязненных нефтепродуктами почвах интенсивность дыхания может увеличиваться, что связано с повышением численности, в первую очередь, углеводородоксилирующих микроорганизмов [Hund, Schenk, 1996; Благодатская, Ананьева, 1996]. Повышение скорости дыхания свидетельствует о физиологической активности микроорганизмов в загрязненных почвах и характеризует высокую скорость окислительно-восстановительных процессов [Коэффициент..., 2017]. Это позволяет судить о том, что загрязнение почв снижает способность микроорганизмов к активному дыханию.

В основе газообмена между почвой и атмосферой лежат различия в концентрации углекислого газа и кислорода. Этот процесс постоянно поддерживается непрерывным потреблением O_2 и выделением CO_2 в процессе дыхания почвенных микроорганизмов, почвенной фауны, корней растений и разложения органических остатков. При газообмене одновременно с накоплением углекислого газа в почвенном воздухе непрерывен процесс эмиссии его из почвы в атмосферу («дыхание почвы»). Углекислый газ, поступая в припочвенный слой атмосферы, служит источником «углеродного питания» растений [Рассел, 1995; Наумов, 2008]. Интенсивность дыхания зависит от температуры и влажности почвы, от количества наземной и корневой массы, а также от особенностей трансформации органического материала [Raich, Potter, 1995; Bridges, Batjerr, 1996; Zimov et al., 1998].

В процессе восстановления нефтезагрязненных субстратов необходимо не только достижение допустимых нормативных значений концентраций нефтепродуктов, но и восстановление исходного состояния почв. Наиболее репрезентативными показателями, отражающими восстановление первоначальных почвенных свойств после очистки, являются показатели ее биологической активности. Под биологической активностью почвы понимают совокупность биологических процессов, протекающих в почве. Основными ее составляющими являются активность ферментов и интенсивность дыхания почвы [Киреева, 1994]. Поэтому целью работы являлась оценка изменения интенсивности микробного дыхания в нефтезагрязненных субстратах с разной степенью концентрации на примере серой лесной почвы г. Иркутска.

Поскольку подобные эксперименты в серых лесных почвах г. Иркутска не проводились, необходимо было выявить насколько эти почвы устойчивы к загрязнению и какова в них интенсивность микробного дыхания. Кроме того, было определено содержание нефтепродуктов в почвах до и после промывки их поверхностно-активными веществами.

Материал и методы

В качестве объекта исследования была принята серая лесная почва, образцы которой отобрали в городской черте на территории Ботанического сада Иркутского государственного университета. Для эксперимента использовалась нефть Марковского месторождения Иркутской области и дизельное топливо от компании ООО «Сибтайр» г. Ангарска.

В экспериментальные образцы почвы приливали нефть и дизельное топливо в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг. Образцы почвы в трех повторностях и навеской по 100 г распределяли в пластиковые контейнеры объемом 250 мл, где они находились в течение суток до полного впитывания нефтепродуктов в почву. После этого почву перемещали в колбы емкостью 500 мл и промывали в течение часа на лабораторном шейкере раствором твина-80 в соотношении 1 : 4 (100 мл раствора / 400 мл воды). После обработки почвенные образцы отделяли от промывочного раствора путем фильтрования через бумажные фильтры (синяя лента). Определение влажности образцов проводили почвенным влагомером (МС-7828SOIL). Оптимальной влажности (60%) достигали путем приливания воды. Определение интенсивности почвенного дыхания велась по методике R. Ohlinger [Schinner et al., 1996]. В качестве контроля использовали холостой опыт.

В Республике Беларусь стандарт предусматривает определение нефтепродуктов методом газовой хроматографии¹, в Республике Казахстан – флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» [Чукпарова, 2011]. В Российской Федерации чаще используется экспресс-метод ИК-спектроскопии для определения количества и идентификации загрязнения почв нефтепродуктами².

Общее содержание нефтепродуктов в пробах почв определяли флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02»

¹ Государственный стандарт Республики Беларусь 17.13.05-21-2011/ISJ 1670362004. 2011. Качество почвы. Определение содержания углеводов в диапазоне C10-C40 методом газовой хроматографии. Минск, Госстандарт, РБ.

² ГОСТ Р 54039–2010 Экспресс-метод ИК-спектроскопии для определения количества и идентификации загрязнения почв нефтепродуктами. М., 2011.

(М 03-03-2012)³. Вышеперечисленные методы и методики позволили провести оценку почв на содержание нефтепродуктов, а также выявить интенсивность почвенного дыхания.

Результаты

Фоновое содержание нефти в почве представляет собой сумму результатов природных глубинных эманаций нефти и газа, а также трансформации растительности и органического вещества в верхней части почвенного профиля [Яковлев, 2013]. Оценка содержания нефтепродуктов в почве является обязательной при любых проводимых процедурах с почвами (например, строительство или реконструкция зданий) [Шамраев, 2009].

Массовая доля нефтепродуктов в контрольном образце серой лесной почвы составила 0,1 мг/г (табл. 1). При приливании дизельного топлива в концентрации 50 мл/кг содержание нефтепродуктов увеличилась до 10,8 мг/г. После промывки твином-80 5 г/л количество нефтепродуктов снизилась до 6,3 мг/г, что меньше на 4,5 мг/г загрязненного образца почвы, но выше контроля на 6,2 мг/г.

При загрязнении дизельным топливом 150 мл/кг массовая доля нефтепродуктов в образцах почвы составляла 12,6 мг/г. Промывка твином-80 снизила значение до 8,8 мг/г, которое оказалось ниже на 4,5 мг/г загрязненного образца почвы, однако оставалось выше контрольного на 8,0 мг/г.

Загрязнение дизельным топливом 300 мл/кг вызвало увеличение содержания нефтепродуктов до 15,3 мг/г. После промывки твином-80 количество нефтепродуктов снизилась до 10,7 мг/г, что меньше на 4,6 мг/г загрязненного образца, но выше на 10,6 мг/г контроля.

Показатель массовой доли нефтепродуктов в образце почвы загрязненной нефтью 50 мл/кг соответствует 11,2 мг/г. Промывка твином-80 снизила значение до 8,0 мг/г, а это меньше на 3,1 мг/г загрязненного образца почвы. В то же время это выше контроля на 8,0 мг/г.

Концентрация нефти 150 мл/кг привела к увеличению показателя до 22,2 мг/г. Промывка твином-80 способствовала уменьшению показателя до 19,1 мг/г. Это ниже на 3,1 мг/г, чем загрязненный образец почвы, но выше контроля на 19,0 мг/г.

³ Количественный химический анализ почв: Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости «Флюорат-02». ПНД Ф 16.1:2.21-98. М., 1998.

Таблица 1

Массовая доля нефтепродуктов и интенсивность почвенного дыхания в образцах почвы, загрязненной нефтью (50, 150, 300 мл/кг) и дизельным топливом (50, 150, 300 мл/кг)
[The mass fraction of petroleum products and the intensity of soil respiration in soil samples contaminated with oil (50, 150, 300 ml/kg) and diesel fuel (50, 150, 300 ml/kg)]

Почва с загрязнителем [Soil with pollutant]	Массовая доля нефтепродуктов в почве, мг/г [Mass fraction of petroleum products in soil, mg/g]	Количество CO₂, выделившиеся за 24 часа, мг/ч [Amount of CO ₂ released in 24 hours, mg/h]
Почва (контроль) [Soil (control)]	0,1	0,76 ± 0,02
Почва + дизель 50 мл/кг [Soil + diesel 50 ml/kg]	10,8	0,62 ± 0,04
Почва + дизель 150 мл/кг [Soil + diesel 150 ml/kg]	12,6	0,42 ± 0,02
Почва + дизель 300 мл/кг [Soil + diesel 300 ml/kg]	15,3	0,33 ± 0,01
Почва + дизель 50 мл/кг + твин-80 5 г/л [Soil + diesel 50 ml/kg + Tween 80 5 g/l]	6,3	0,67 ± 0,02
Почва + дизель 150 мл/кг + твин-80 5 г/л [Soil + diesel 150 ml/kg + Tween 80 5 g/l]	8,8	0,48 ± 0,04
Почва + дизель 300 мл/кг + твин-80 5 г/л [Soil + diesel 300 ml/kg + Tween 80 5 g/l]	10,7	0,35 ± 0,01
Почва + нефть 50 мл/кг [Soil + oil 50 ml/kg]	11,2	0,23 ± 0,01
Почва + нефть 150 мл/кг [Soil + oil 150 ml/kg]	22,2	0,19 ± 0,01
Почва + нефть 300 мл/кг [Soil + oil 300 ml/kg]	44,5	0,18 ± 0,02
Почва + нефть 50 мл/кг + твин-80 5г/л [Soil + oil 50 ml/kg + Tween 80 5g/l]	8,0	0,29 ± 0,01
Почва + нефть 150 мл/кг + твин-80 5г/л [Soil + oil 150 ml/kg + Tween 80 5g/l]	19,1	0,28 ± 0,01
Почва + нефть 300 мл/кг + твин-80 5г/л [Soil + oil 300 ml/kg + Tween 80 5g/l]	41,4	0,26 ± 0,01

Загрязнение с самым высоким содержанием нефти 300 мл/кг способствовало увеличению количества нефтепродуктов до 44,5 мг/г. После промывки твином-80 показатель снизился до 41,4 мг/г и стал ниже, чем в загрязненном образце, на 3,1 мг/г (см. табл. 1). Загрязнение почв увеличивалось при повышении концентрации нефтепродуктов. Проведение этого эксперимента было необходимо для выявления эмиссии CO_2 в почвах с разной степенью загрязнения нефтепродуктами.

Под дыханием почвы понимают интенсивность эмиссии углекислого газа из почвы, которая определяется скоростью процессов биодеструкции органического вещества в почве [Наумов, 2008]. Дыхательная активность в контрольных образцах почвы, без нефтяного загрязнения была наибольшей и составила 0,76 мг/ч (см. табл. 1). При добавлении дизельного топлива (50 мл/кг), она уменьшилась до 0,62 мг/ч. Это соответствует снижению CO_2 на 0,14 мг/ч. Промывка твином-80 сократила скорость выделения углекислого газа по сравнению с контрольным образцом на 0,09 мг/ч.

При внесении дизельного топлива в концентрации 150 мл/кг выделение CO_2 уменьшилось на 0,3 мг/ч по сравнению с контролем.

После промывки твином-80 произошло увеличение CO_2 на 0,1 мг/ч, при этом оно оказалось ниже контроля на 0,1 мг/ч.

Добавление дизельного топлива в количестве 300 мл/кг еще больше снизило интенсивность дыхания микроорганизмов, разница с контролем составила 0,4 мг/ч. После промывки твином-80 показатель повысился на 0,02 мг/ч, однако остался ниже контрольного на 0,4 мг/ч.

Обработка нефтью в концентрации 50 мл/кг привела к уменьшению дыхания на 0,5 мг/ч по сравнению с контролем. После промывки показатель повысился и стал выше на 0,06 мг/ч, однако остался ниже контроля на 0,5 мг/ч. С увеличением концентрации нефти до 150 мл/кг отмечено снижение CO_2 на 0,6 мг/ч по сравнению с контролем. После промывки твином-80 оно увеличилось на 0,1 мг/ч, при этом осталась ниже контроля на 0,5 мг/ч. Концентрация нефти 300 мл/кг привела к снижению CO_2 на 0,6 мг/ч. После обработки твином-80 показатель повысился на 0,1 мг/ч, но остался ниже контрольного на 0,5 мг/ч (см. табл. 1).

Обсуждение

Технологии ремедиации нефтезагрязненных почв оказывают влияние не только на разложение нефти в почве, но и на интенсивность выделения углекислого газа, эмиссию или «дыхание» почвы [Киреева и др., 2009; Wu et al., 2016; Minnikova et al., 2018, 2021].

Применение ПАВ (поверхностно-активных веществ) оказывает стимулирующее действие на рост нефтеокисляющих бактерий и положительно сказывается на деструкции нефти в почвенных образцах [Rupin, 2023].

Благодаря полученным результатам было выявлено, что промывка твином-80 вызывала уменьшение количества нефтепродуктов в обоих случаях по сравнению с нефтезагрязненными почвенными образцами. Тем не менее, содержание нефтепродуктов осталось выше, чем в контрольных образцах.

При одинаковых концентрациях нефти и дизельного топлива наиболее токсичным действием на почву обладает нефть по сравнению с дизельным топливом. Кроме того, результаты исследований показали, что промывка твином-80 в концентрации 5 г/л нефтезагрязненных образцов почвы менее эффективна, чем образцов с дизельным топливом. На наш взгляд, необходимо увеличение концентрации твина-80 для промывочного раствора, поскольку это приводит к улучшению физико-химических свойств почв.

Определено, что разная степень загрязнения почвы нефтепродуктами отражается на интенсивности выделения CO_2 микроорганизмами. При высоких концентрациях эмиссия углекислого газа наименьшая. Однако при одинаковых концентрациях нефти и дизельного топлива наиболее токсичным действием обладает нефть. При обработке твином-80 выявлено увеличение CO_2 на нефтезагрязненных образцах почвы, но эти значения остались ниже, чем в контрольном образце.

Эксперименты на серых лесных почвах г. Иркутска показали сходство и отличия с почвами и загрязнением нефтепродуктами в других регионах [Антипов, 2014; Ахмадиев, Халецкая, 2014; Коэффициент..., 2017; Ogunmokun et al., 2020; Сакаева, Юдина, 2023]. Так, А.А. Вершининым выявлено, что в дерново-подзолистых почвах при высоких концентрациях нефтепродуктов, соответствующих 4,8 и 8,3 г/кг, значения микробного дыхания составляли 0,34–0,44, что свидетельствует о нарушении стабильности микробного пула [Коэффициент..., 2017]. М.В. Ахмадиев отметил снижение дыхательной активности ($2,39 \pm 0,04$) мг CO_2 с концентрацией нефтепродуктов 38–40 г/кг [Ахмадиев, Халецкая, 2014]. Мы также считаем, что активность микроорганизмов в нефтезагрязненной почве снижается вследствие уменьшения общей численности микроорганизмов, в том числе и углеводородокисляющих. Это отражается на интенсивности биодеструкции нефтепродуктов в почве и, как следствие, снижении интенсивности выделения CO_2 .

Выводы

1. Выявлено, что нефть более токсична, чем дизельное топливо. При равных концентрациях нефти и дизельного топлива наиболее отрицательное воздействие на свойства и биологическую активность почвы оказывает нефть.

2. Экспериментально подтверждено, что промывка твином-80 в концентрации 5 г/л в нефтезагрязненных образцах почвы была менее эффективна, чем промывка образцов, содержащих дизельное топливо. Несмотря на то, что промывка твином-80 привела к уменьшению нефтепродуктов в почве, их оставалось больше, чем в контрольных образцах.

3. Впервые доказано, что при загрязнении серых лесных почв территорий г. Иркутска нефтью и дизелем интенсивность выделения CO_2 снижается. Это обусловлено токсичным действием нефтепродуктов на микроорганизмы путем обволакивания загрязнителем частиц почвы и ограничением доступа кислорода.

4. Результаты исследования показали, что восстановительная способность почвы к интенсивному дыханию – процесс сложный. Даже при низких концентрациях нефтепродуктов в почве, после промывки твином-80 показатель дыхательной активности оставался слабым.

Библиографический список / References

Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Демкина Т.С. Оценка устойчивости микробных комплексов к природным и антропогенным воздействиям // Почвоведение. 2002. № 5. С. 580–587. [Ananyeva N.D., Blagodatskaja E.V., Demkina T.S. Assessment of the resistance of microbial complexes to natural and anthropogenic influences. *Pochvovedenie*. 2002. No. 5. Pp. 580–587. (In Rus.)]

Ахмадиев М.В., Халецкая М.И. Оценка интенсивности дыхания нефтезагрязненной почвы // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. 2014. № 1. С. 34–38. [Ahmadiyev M.V., Haleckaya M.I. Estimation of the respiration rate of oil-contaminated soil. *Ekologiya i nauchno-tehnicheskij progress. Urbanistika*. 2014. No. 1. Pp. 34–38. (In Rus.)]

Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д. Оценка устойчивости микробных сообществ в процессе разложения поллютантов в почве // Почвоведение. 1996. № 11. С. 1341–1346. [Blagodatskaya E.V., Ananyeva N.D. Assessment of the stability of microbial communities during the decomposition of pollutants in soils. *Pochvovedenie*. 1996. No. 11. Pp. 1341–1346. (In Rus.)]

Влияние поверхностно-активных веществ на рост и деструктивную активность углеводородокисляющих микроорганизмов / Антипова К.А. и др. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 3. С. 256–259. [Antipova K.A. et al. The influence of surfactants on the growth and destructive activity of hydrocarbon-oxidizing microorganisms. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. Vol. 17. No. 3. Pp. 256–259. (In Rus.)]

Дыхательная активность дерново-карбонатной почвы, загрязненной дизельным топливом / Вершинин А.А. и др. // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 7. С. 168–174. [Vershinin A.A. et al. Respiratory activity of soddy-carbonate soil contaminated with diesel fuel. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2011. No. 7. Pp. 168–174. (In Rus.)]

Киреева Н.А. Микробиологические процессы в нефтезагрязненных почвах. Уфа, 1994. [Kireeva N.A. Mikrobiologicheskie process v neftezagrjaznennyh pochvah [Microbiological processes in oil-contaminated soils]. Ufa, 1994.]

Киреева Н.А., Григориади А.С., Хайбуллина Е.Ф. Ассоциации углеводородоокисляющих микроорганизмов для биоремедиации нефтезагрязненных почв // Вестник Башкирского университета. 2009. Т. 14. № 2. С. 391–394. [Kireeva N.A., Grigoriadi A.S., Hajbullina E.F. Associations of hydrocarbon-oxidizing microorganisms for bioremediation of oil-contaminated soils. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2009. Vol. 14. No. 2. Pp. 391–394. (In Rus.)]

Коэффициент микробного дыхания различных типов почв в условиях нефтяного загрязнения / Вершинин А.А. и др. // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 4. С. 103–106. [Vershinin A.A. et al. Microbial respiration coefficient of various types of soils under conditions of oil pollution. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2017. Vol. 20. No. 4. Pp. 103–106. (In Rus.)]

Культивирование высших растений и дыхательная активность нефтезагрязненных почв / Вершинин А.А. и др. // Российский журнал прикладной экологии. 2016. № 3 (7). С. 46–51. [Vershinin A.A. et al. Cultivation of higher plants and respiratory activity of oil-contaminated soils. *Rossiiskij zhurnal prikladnoj ekologii*. 2016. No. 3 (7). Pp. 46–51. (In Rus.)]

Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск, 2008. [Naumov A.V. Dyhanie pochvy: sostavl'jajushhie, jekologicheskie funkicii, geograficheskie zakonomernosti [Soil respiration: Components, ecological functions, geographical patterns]. Novosibirsk, 2008.]

Рассел М.Б. Аэрация почвы и развитие растений. Физические условия почвы и растение. М., 1995. [Russel M.B. Ajeracija pochvy i razvitie rastenij. Fizicheskie uslovija pochvy i rastenie [Soil aeration and plant development. Physical soil conditions and plant]. Moscow, 1995.]

Сакаева Э.Х., Юдина Д.Р. Влияние нефтяных углеводородов на дыхание загрязненных почв // Экология родного края: проблемы и пути их решения. 2023. С. 87–90. [Sakaeva E.H., Yudina D.R. The influence of petroleum hydrocarbons on the respiration of contaminated soils. *Ekologiya rodnogo kraja: problemy i puti ih resheniya*. 2023. Pp. 87–90. (In Rus.)]

Чукпарова А.У. Оценка состояния и биологическая рекультивация нефтезагрязненных почв // Всероссийский журнал научных публикаций. 2011. № 4. С. 24–25. [Chukparova A.U. Assessment of the condition and biological remediation of oil-contaminated soils. *Vserossiiskij zhurnal nauchnyh publikacij*. 2011. No. 4. Pp. 24–25. (In Rus.)]

Шамраев А.В. Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды // Вестник Оренбургского государственного университета.

2009. № 6 (100). С. 642–644. [Shamraev A.V. The influence of oil and petroleum products on various components of the environment. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2009. No. 6 (100). Pp. 642–644. (In Rus.)]

Яковлев А.С., Никулина Ю.Г. Экологическое нормирование допустимого остаточного содержания нефти в почвах земель разного хозяйственного значения // Почвоведение. 2013. № 2. С. 234–239. [Jakovlev A.S., Nikulina Ju.G. Environmental regulation of permissible residual oil content in soils of lands of different economic importance. *Pochvovedenie*. 2013. No. 2. Pp. 234–239. (In Rus.)]

Allaire P.E., Lange F., Lafond J.A. et al. Multiscale spatial variability of CO₂ emissions and correlations with soil properties. *Geoderma*. 2012. No. 170. Pp. 251–260.

Bridges E.M., Batjepp N.H. Soil gaseous emissions and global climate change. *Geography*. 1996. Vol. 81. No. 2. Pp. 155–169.

Cotrufo M.F., De Santo A.V., Alfani A. et al. Effects of urban heavy metal pollution on organic matter decomposition in *Quercus ilex* L. woods. *Environ. Pollut.* 1995. Vol. 89. No. 1. Pp. 81–87.

Hund K., Schenk B. The microbial respiration quotient as indicator for bioremediation processes. *Chemosphere*. 1994. Vol. 28. No. 3. Pp. 477–490. DOI: 10.1016/0045-6535(94)90292-5

Kozlov M.V., Zvereva E.L., Zverev V.E. Impacts of point polluters on terrestrial biota. *Comparative analysis of 18 contaminated areas*. Dordrecht, 2009. Pp. 465–466.

Minnikova T., Kolesnikov S., Minkina T., Mandzhieva S. Assessment of ecological condition of haplic chernozem calcic contaminated with petroleum hydrocarbons during application of bioremediation agents of various natures. *Land*. 2021. No. 10. P. 169.

Minnikova T.V., Denisova T.V., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V. Assessment of agroecological indicators of oil-contaminated chernozem in Rostov Oblast after remediation with urea and potassium humate. *Russian Agricultural Sciences*. 2018. Vol. 44. No. 2. Pp. 177–180.

Ogunmokun F.A., Liu Z., Wallach R. The influence of surfactant-application method on the effectiveness of water-repellent soil remediation. *Geoderma*. 2020. Vol. 362. P. 114081.

Ohya H., Fujiwara S., Komai Y., Yamaguchi M. Microbial biomass and activity in urban soils contaminated with Zn and Pb. *Biol. Fert. Soils*. 1988. Vol. 6. No. 1. Pp. 9–13.

Papa S., Bartoli G., Pellegrino A., Fioretto A. Microbial activities and trace element contents in an urban soil. *Environ. Monit. Assess.* 2010. Vol. 165. No. 1–4. Pp. 193–203.

Raich J.W., Potter C.P. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. No. 9. Pp. 23–26.

Ramsey P.W., Rillig M.C., Feris K.P. et al. Mine waste contamination limits soil respiration rates: A case study using quantile regression. *Soil Biol. Biochem.* 2005. Vol. 37. No. 6. Pp. 1177–1183.

Rumin M.B., Cherkasov D.V., Lopatovskaya O.G. et al. Effect of oil and surfactants on changes in some physical properties of soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. 1229 (1). 012039.

Schinner F., Öhlinger R., Kandeler E. *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. Berlin; Heidelberg; New York, 1991. Pp. 86–90.

Stom D.I., Matveeva O.N., Zhdanova G.O. et al. Transformation of oil and hexadecane in soil by microbial preparations and earthworms. Transformation of oil and hexadecane in soil by microbial preparations and earthworms. *Bioremediation Journal*. 2021. Vol. 25. No. 2. Pp. 159–168. DOI: 10.1080/10889868.2020.1860894

Wu M., Dick W.A., Li W. et al. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2016. No. 107. Pp. 158–164.

Yuangen Y., Paterson E., Campbell C.D. Urban soil microbial features and their environmental significance as exemplified by Aberdeen City, UK. *Chinese J. Geochemistry*. 2001. Vol. 20. No. 1. Pp. 34–44.

Zimov P.P.A. et al. Winter biotic activity and production of CO₂ in Siberian soils: A factor in the greenhouse effect. *Journal of Geophysical Research*. 1998. Pp. 5017–5023.

Статья поступила в редакцию 10.01.2024, принята к публикации 19.02.2024
The article was received on 10.01.2024, accepted for publication 19.02.2024

Сведения об авторах / About the authors

Рюмин Максим Борисович – аспирант кафедры почвоведения и земельных ресурсов биолого-почвенного факультета, Иркутский государственный университет

Maxim B. Ryumin – postgraduate student at the Department of Soil Science and Land Resources of the Faculty of Biology and Soil Science, Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4762-4613>

E-mail: maksim.ryumin@mail.ru

Артемюк Юлия Владимировна – аспирант кафедры почвоведения и земельных ресурсов биолого-почвенного факультета, Иркутский государственный университет

Yulia V. Artemenko – postgraduate student at the Department of Soil Science and Land Resources of the Faculty of Biology and Soil Science, Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4228-778X>

E-mail: juliapixell@gmail.com

Лопатовская Ольга Геннадьевна – доктор биологических наук; профессор кафедры почвоведения и земельных ресурсов биолого-почвенного факультета, Иркутский государственный университет

Olga G. Lopatovskaya – Dr. Biol. Hab.; Professor at the Department of Soil Science and Land Resources of the Faculty of Biology and Soil Science, Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

E-mail: lopatovs@gmail.com

Заявленный вклад авторов

М.Б. Рюмин – обработка данных, анализ и интерпретация результатов обработки данных, подготовка текста статьи

Ю.В. Артеменко – анализ и интерпретация результатов обработки данных

О.Г. Лопатовская – общее руководство направлением исследования, участие в подготовке текста статьи

Contribution of the authors

M.B. Ryumin – data processing, analysis and interpretation of data processing results, preparation of the text of the article

Y.V. Artemenko – analysis and interpretation of the results of data processing

O.G. Lopatovskaya – general management of the research direction, participation in the preparation of the text of the article

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
All authors have read and approved the final manuscript