



DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-230918>

EDN: <https://elibrary.ru/AKFSPF>

УДК 504.054

Научная статья

Изучение вертикальной миграции тяжелых металлов в загрязненной нефтепродуктами почве

Ю.Н. Курбатов^{1*} , Т.А. Трифонова^{1, 2} 

¹ Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

*iur.curbatov@gmail.com

Аннотация. Исследовано влияние загрязнения почвы отработанным машинным маслом на миграционные и аккумуляционные свойства тяжелых металлов в условиях полевого опыта. Рассчитаны коэффициенты радиальной контрастности для цинка, меди, свинца, никеля и кобальта на основе двухлетнего мониторинга в течение 4 месяцев наблюдений (июнь–сентябрь 2019–2020 гг). Показано, что загрязнение почвы нефтепродуктами приводит к активному накоплению цинка в поверхностном слое почвы (0–10 см). Миграционная способность меди растет пропорционально увеличению дозы вносимого в почву отработанного масла. На накопление и подвижность Co, Pb и Ni нефтепродукты практически не влияют.

Ключевые слова: коэффициент радиальной контрастности, нефтяные углеводороды, цинк, медь, аккумуляция, поллютанты, мониторинг

ORCID:

Ю.Н. Курбатов, <https://orcid.org/0000-0002-0904-3854>

Т.А. Трифонова, <https://orcid.org/0000-0002-1628-9430>

Для цитирования: Курбатов, Ю.Н., Трифонова, Т.А., 2025. Изучение вертикальной миграции тяжелых металлов в загрязненной нефтепродуктами почве. *Трансформация экосистем* 8 (3), 166–181. <https://doi.org/10.23859/estr-230918>

Поступила в редакцию: 18.09.2023

Принята к печати: 28.03.2024

Опубликована онлайн: 15.08.2025

DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-230918>

EDN: <https://elibrary.ru/AKFSPP>

UDC 504.054

Article

Study of vertical migration of heavy metals in soil contaminated with petroleum products

Yu.N. Kurbatov^{1*} , T.A. Trifonova^{1, 2} 

¹ Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Gorkogo St. 87, Vladimir, 600000 Russia

² Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Leninskie Gory 1, building 12, Moscow, 119991 Russia

*iur.kurbatov@gmail.com

Abstract. This study investigates the effects of soil contamination by used motor oil on the migration and accumulation properties of heavy metals under field experiment conditions. Radial contrast coefficients are calculated for zinc, copper, lead, nickel, and cobalt based on two years of monitoring during the 4 month period of observations (June–September 2019–2020). It is shown that soil contamination with petroleum products leads to active accumulation of zinc in the surface soil layer (0–10 cm). The migration capacity of copper increases proportionally to the increase in the amount of waste oil entering the soil. Petroleum products have practically no effect on the accumulation and mobility of Co, Pb and Ni.

Keywords: radial contrast coefficient, petroleum hydrocarbons, zinc, copper, accumulation, pollutants, monitoring

ORCID:

Yu.N. Kurbatov, <https://orcid.org/0000-0002-0904-3854>

T.A. Trifonova, <https://orcid.org/0000-0002-1628-9430>

To cite this article: Kurbatov, Yu.N., Trifonova, T.A., 2025. Study of vertical migration of heavy metals in soil contaminated with petroleum products. *Ecosystem Transformation* 8 (3), 166–181. <https://doi.org/10.23859/estr-230918>

Received: 18.09.2023

Accepted: 28.03.2024

Published online: 15.08.2025

Введение

Мониторинг загрязнения почв нефтью и продуктами ее переработки в России является актуальной проблемой, которая находится под постоянным наблюдением контролирующих органов. Согласно государственному докладу Минприроды России за 2021 г. (О состоянии..., 2022), исследование территорий Западной Сибири, республик Татарстан, Удмуртской и Чувашской, а также Иркутской, Нижегородской, Оренбургской и Самарской областей показало высокий уровень загрязнения почв нефтепродуктами (НП). Так, концентрация НП в почвах Казани превысила фоновые значения (Ф) в 3–5 раз; в почвах Самары в среднем выявлено 940.7 мг/кг, что составляет 18.8Ф, максимальные концентрации достигают 47Ф; для почв Нижнего Новгорода соответствующие показатели равны 452 мг/кг и 2202 мг/кг (22Ф). Об опасном загрязнении свидетельствуют результаты исследования почв г. Глазов Удмуртской республики: среднее содержание НП в почвах составляет 1351 мг/кг (48Ф), а максимальные концентрации достигают 345Ф (9727 мг/кг).

Нефтепродукты, попадая в почву, приводят к изменению ее физических, химических и микробиологических свойств, в результате чего снижается или утрачивается почвенное плодородие. Создается риск накопления поллютантов растениями, что в конечном итоге может оказать негативное влияние на здоровье человека и другие живые организмы (Fu et al., 2018; Tiwari et al., 2023). Не менее опасным фактором является и изменение миграционной активности тяжелых металлов (ТМ) в условиях техногенного загрязнения. Исследованы особенности их миграции в растения на почвенных субстратах, содержащих отходы медеплавильных заводов (Котельникова и др., 2022); также изучена подвижность ТМ в почве и их биодоступность для растений в зоне влияния горно-перерабатывающих предприятий (Липина и Александрова, 2013). Проведены исследования по моделированию миграции ТМ в условиях техногенного загрязнения по результатам многолетнего мониторинга (Тимофеев и др., 2021), с помощью метода машинного обучения (Wang et al., 2023), а также в лабораторных опытах с использованием почвенных колонок (Груздков и др., 2009; Фрид и Борисочкина, 2020b).

Имеются данные о радиальном и территориальном характере распределения нефтяных загрязнений в районах добычи углеводородного сырья (Замотаев и др., 2015; Pan et al., 2021), однако проблема почвенной миграции ТМ в условиях загрязнения нефтепродуктами в настоящее время изучена недостаточно.

В связи с этим целью настоящей работы является оценка результатов двухлетнего мониторинга радиальной миграции ТМ в почве, загрязненной нефтепродуктами, в течение 4 месяцев наблюдений (с июня по сентябрь 2019–2020 гг.).

Материал и методы

В 2019 г. на территории Вязниковского района Владимирской области был заложен мелкоделяночный полевой опыт (площадь делянки 1 м²) с целью моделирования несанкционированного разлива нефтепродуктов и оценки влияния этого загрязнения на экологическое состояние почвы. Для проведения эксперимента была выбрана территория земель, выбывших в 1992 г. из сельскохозяйственного оборота и частично зарастающая древесно-кустарниковой растительностью. В качестве поллютанта использовали отработанное масло для автотракторных дизелей марки М-8ДМ, изготовленное по ГОСТ 8581-78¹. На двух участках располагались 3 параллельных опыта: на поверхность делянок производился разлив НП в концентрациях 10, 20 и 30 г/кг почвы соответственно (расстояния между опытными площадками 3–4 м). Глубина проникновения поллютанта не превышала 10 см верхнего почвенного покрова. На расстоянии не менее 5 м от опытных площадок были размечены 2 контрольных делянки без загрязнений (Рис. 1).

Тип почвы на исследуемом участке – дерново-подзолистая супесчаная, подстилаемая тяжелыми суглинками, содержание физической глины (< 0.01 мм) – 10–20% (Комаров и др., 2019), массовая доля гумуса на глубине 0–10 см составляет 1.37–1.83%, на глубине 10–20 см – 0.8–1.1%. Для изучения профиля почвы был заложен почвенный разрез на глубину 0.6 м. Полученные показатели представлены в Табл. 1.

¹ ГОСТ 8581-78. Масла моторные для автотракторных дизелей. Технические условия.

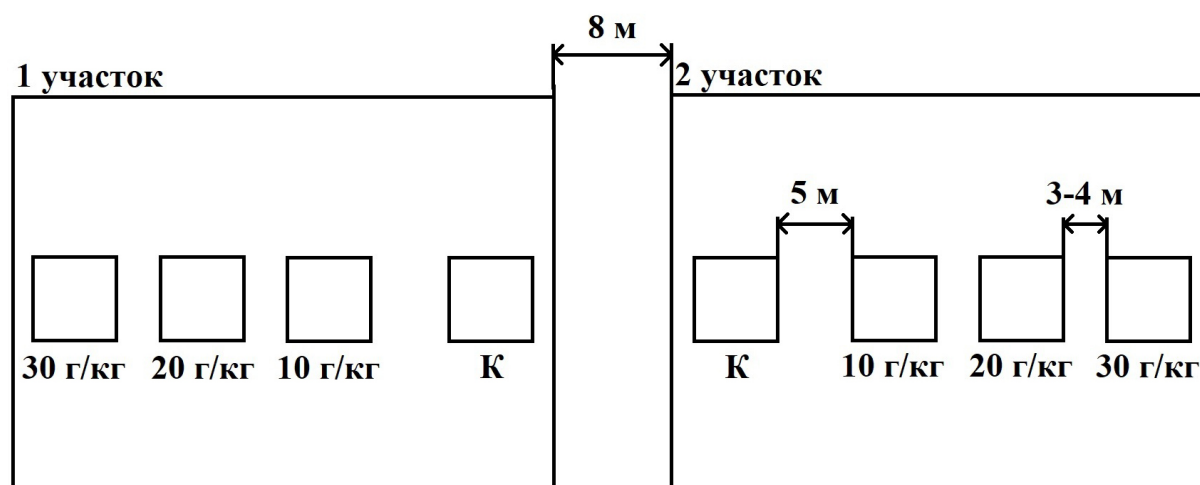


Рис. 1. Схема опыта.

Табл. 1. Показатели почвы опытного участка.

Генетический горизонт почвы	Гранулометрический состав	Расстояние между верхней и нижней границами горизонта / мощность генетического горизонта, см	pH _{KCl}
О – подстилочный	Органические остатки растений	0–2/2	5.59
АО – грубогумусовый	Супесь	2–6/4	5.59
А – гумусовый	Супесь	6–12/6	5.59
EL – элювиальный	Супесь	12–40/28	5.47
ELBt – переходный	Супесь	40–60/20	5.07
Bt – текстурный	Суглинок тяжелый	60+...	4.73

Для исследований в течение 2 лет (2019–2020 гг.) в середине каждого из 4 месяцев (июнь–сентябрь) производился отбор проб почв на глубине 0–10 и 10–20 см методом конверта по ГОСТ 17.4.3.01-2017², в середине сентября каждого года дополнительно отбиралась проба на глубине 20–30 см. Всего было проанализировано 144 почвенных образца.

Водородный показатель солевой вытяжки почвы определяли согласно ГОСТ 26483-85³.

Исследование углеводородного состава отработанного масла было произведено методом инфракрасной спектromетрии на ИК-Фурье спектрометре «ИнфраЛЮМ ФТ-08» по ПУ 03-2002 «Инструкция по проведению и идентификации нефтепродуктов с помощью ИК фурье-спектрометра «ИнфраЛЮМ ФТ-02». Проба отработанного масла, предварительно обезвоженная с использованием прокаленного сернокислого натрия, инъекционным шприцом помещалась в неразборную кювету (0.05 мм). Затем с помощью спектрометра снимался ИК-спектр поглощения нефтепродукта (Рис. 2).

² ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.

³ ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО.

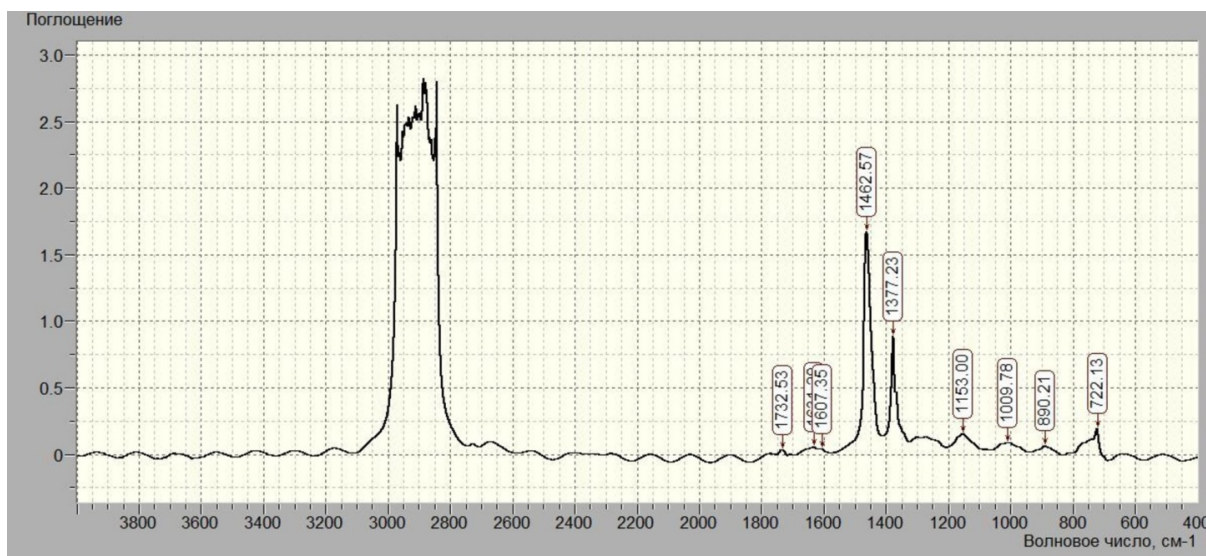


Рис. 2. ИК-спектр отработанного масла с основными характеристическими полосами поглощения.

На основе оптических плотностей характеристических полос поглощения рассчитывался процентный состав алкановых, нафтеновых, ареновых и окисленных структур, входящих в состав отработанного масла (Трифопова и Курбатов, 2023). Полученные результаты приведены в Табл. 2.

Погодные условия в рассматриваемый период были различными: 2019 г. отличался значительным превышением средней многолетней нормы осадков, однако термический режим был довольно близок к среднегодовым показателям (Табл. 3). В 2020 г. наблюдалась иная картина: за счет более теплой зимы средняя температура воздуха была несколько выше, чем в 2019 г., а количество выпавших осадков было сравнимо со среднегодовыми.

Концентрацию ТМ определяли с помощью волнодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра «Спектроскан МАКС-Г» по методике М-049-ПДО/18 (ФР.1.31.2018.32143)⁴ в двух повторностях для каждой пробы. Пробоподготовка заключалась в измельчении почвы в агатовой ступке до крупности частиц ≤ 63 мкм с последующим просеиванием через сито. Затем с помощью лабораторного гидравлического пресса формировалась подложка из борной кислоты, в которую впрессовывалась подготовленная ранее почва; получившуюся «таблетку» подвергали химическому анализу.

Для характеристики аккумуляции и миграции ТМ по почвенным горизонтам использовали коэффициент радиальной контрастности R , рассчитываемый по следующей формуле (Михальчук, 2017):

$$R = C_n / C_c,$$

где C_n – содержание элемента в горизонте n , C_c – средневзвешенное содержание элемента в исследуемой совокупности горизонтов изучаемой почвы.

Значения коэффициента $R > 1$ свидетельствуют об аккумуляции элемента в рассматриваемом почвенном горизонте и наличии геохимических барьеров (Табл. 4), значение $R < 1$ говорит о подвижности элемента (Шабанов и Маричев, 2020).

Статистическую обработку данных производили в программе «STATISTICA 10». Для определения достоверности различий между выборками использовали непараметрический U-критерий Манна–Уитни при уровне значимости $p < 0.05$.

⁴ М-049-ПДО/18. Методика измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв и донных отложений рентгенофлуоресцентным методом.

Табл. 2. Углеводородный состав отработанных масел марки М-8ДМ.

Содержание структурных групп, %			
Арены	Алканы	Нафтены	Окисленные
6.73	87.36	4.73	1.18

Табл. 3. Средние месячные и годовые температуры воздуха и суммы осадков в 2019–2020 гг. на территории Вязниковского района Владимирской области⁵. Жирным шрифтом выделены среднемесячные показатели температуры и осадков в период наблюдений (июнь–сентябрь 2019–2020 гг.).

Год	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	За год
Средние месячные и годовые температуры воздуха													
2019	-9.0	-3.6	-0.9	5.8	14.9	17.6	15.7	14.6	10.2	7.2	-0.9	-1.7	5.8
2020	-1.7	-2.4	2.6	3.5	11.5	16.5	19.0	15.7	12.1	6.8	0.1	-8.3	6.3
Средне-годовая норма	-8.3	-7.7	-2.3	5.8	13.0	16.6	19.0	16.9	11.4	4.9	-1.9	-6.1	5.1
Месячные и годовые суммы выпавших осадков													
2019	56	49	27	14	42	121	71	97	65	102	25	47	715
2020	47	40	34	50	87	37	82	51	98	29	28	19	603
Средне-годовая норма	40.4	32.6	29.3	35.8	46.2	71.1	65.0	54.4	49.7	54.6	54.3	38.6	572

Табл. 4. Градации контрастности геохимических барьеров по величине коэффициента *R*.

Характеристика барьера	Коэффициент радиальной контрастности
Слабоконтрастный	$R = 1.3-1.5$
Контрастный	$R = 1.5-3.0$
Сильноконтрастный	$R > 3.0$

⁵ Погода и климат. Интернет-ресурс. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/27543.htm> (дата обращения: 06.02.2023).

Результаты и обсуждение

Результаты двухлетнего мониторинга валового содержания ТМ в почвенных пробах представлены в Табл. 5. На содержание таких ТМ, как никель, свинец и кобальт, фактор загрязнения почвы нефтепродуктами влияет мало. Концентрации этих ТМ в течение всех месяцев наблюдений за 2 года вне зависимости от дозы внесенных поллютантов были близки к контрольным значениям, значимых отклонений не наблюдалось.

Глубина пробы 0–10 см

Для глубины 0–10 см характерны следующие закономерности: малые дозы загрязнения (10 г НП/кг) в значительной степени увеличивают концентрацию в почве цинка: до 2.3Ф в августе 2019 г. и 1.9 Ф в июле 2020 г. Медь проявляет значительную подвижность – наблюдается как аккумуляция до 1.6 фоновых значений (в июле 2020 г.), так и миграция из верхнего почвенного горизонта почти до половинного значения относительно контроля.

Доза НП 20 г/кг приводит к значительному повышению концентрации цинка: почти в 2 раза в июле 2019 г. и 2.2 раза в сентябре 2020 г. Медь показывает усиление миграции – ее содержание на глубине 0–10 см уменьшается и составляет 0.2–0.9 от фонового уровня за весь период наблюдений.

Высокая доза НП (30 г/кг) более всего повлияла на показатели накопления и миграции рассматриваемых металлов. Так, концентрация цинка значительно повышается по сравнению с контролем: до 2.1 раза в августе 2019 года, в сентябре 2020 г. отмечается его аккумуляция до 2.9Ф. Медь в условиях такого загрязнения практически не задерживается в верхнем горизонте почвы: в августе и сентябре обоих лет наблюдались значения, достоверно не обнаруживаемые прибором.

Глубина пробы 10–20 см

Содержание цинка, зафиксированное на глубине 10–20 см в течение 2019 г., практически не отличается от показателей, характерных для контрольных площадок. В 2020 г. обнаружено небольшое превышение концентрации цинка по сравнению с контролем – до 1.3 раза в случае с дозой загрязнения 30 г/кг. Остальные площадки не показывали значительных изменений. Медь, в свою очередь, более подвижна – для нее были характерны снижения до половинного значения от уровня фона и превышения до 1.8Ф (2019 г.). В 2020 г. площадки со слабым (10 г/кг) и средним (20 г/кг) загрязнением также отличались высокой подвижностью, снижение концентрации меди достигало 50% от фоновой. Однако в случае с дозой 30 г/кг выявлены высокие темпы вымывания Cu с глубины 10–20 см в нижние почвенные слои: в сравнении с фоном концентрация металла уменьшилась на 36–71%.

Глубина пробы 20–30 см

Образцы почв, отобранные в сентябре 2019–2020 гг., свидетельствуют о стабильном содержании цинка на глубине 20–30 см: концентрация его не отличается от контрольных значений ни при каких уровнях загрязнения. Однако наблюдается снижение концентрации меди на данном почвенном горизонте вплоть до 50% от фоновых показателей за тот же период.

Известно, что валовое содержание цинка в почве чаще всего прямо пропорционально мощности гумусового горизонта, что обусловлено высокой биологической значимостью этого металла и его склонностью к биологическому накоплению (Лесных, 2005). Таким образом, при загрязнении почвы нефтепродуктами создаются благоприятные условия для активного усвоения и аккумуляции Zn микробным сообществом почвы. Данная тенденция может быть связана преимущественно с интенсификацией жизнедеятельности углеводородоксилирующих микроорганизмов, что подтверждается исследованиями (Fu et al., 2018; Geng et al., 2022; Koolivand et al., 2022). В ходе работ, проведенных авторами ранее в рамках данного эксперимента, была изучена ферментативная активность почв, загрязненных нефтепродуктами (Курбатов и Скрипченко, 2020). Оказалось, что с увеличением дозы отработанного масла повышалась и уреазная активность почв, что также свидетельствует о более интенсивной деятельности микроорганизмов. В использованном нами отработанном масле содержится 87.36% алканов (Табл. 2), которые легче всего разрушаются в ходе жизнедеятельности бактерий; пути окисления этих веществ микроорганизмами достаточно изучены (Тимергазина и Переходова, 2012). В условиях настоящего эксперимента цинк представляется менее подверженным миграционным процессам в условиях повышенных осадков и температуры (Табл. 3, 5). Судя по всему, наличие в почве нефтепродуктов еще прочнее связывает соединения Zn в гумусовом горизонте, что видно по стабильно низким его концентрациям на глубине 10–20 см.

В отношении валовой концентрации меди отмечается обратная зависимость: данный металл отличается низкими показателями биологического поглощения и практически не накапливается биогенно, в связи с чем происходит вымывание и активная миграция меди в нижележащие,

Табл. 5. Валовое содержание тяжелых металлов в почве на глубине пробы 0–10, 10–20 и 20–30 см. НПКО – нижний предел количественного определения.

Месяц	Глубина пробы, см	Валовое содержание элемента, мг/кг											
		Zn		Cu		Ni		Pb		Co			
		2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Контроль (0 г/кг)													
Июнь	0–10	63.73 ± 1.87	60.41 ± 1.23	49.82 ± 8.43	27.79 ± 3.49	30.77 ± 2.15	28.99 ± 1.10	18.29 ± 2.04	15.15 ± 2.52	11.35 ± 0.40	11.74 ± 0.26	11.35 ± 0.40	11.74 ± 0.26
	10–20	68.06 ± 1.05	62.15 ± 1.71	66.91 ± 4.62	27.03 ± 4.35	32.72 ± 0.85	31.21 ± 2.11	16.93 ± 1.24	16.20 ± 1.75	12.32 ± 0.55	12.33 ± 0.28	12.32 ± 0.55	12.33 ± 0.28
Июль	0–10	62.63 ± 2.29	57.18 ± 4.12	51.56 ± 13.40	18.35 ± 1.10	30.90 ± 1.49	25.93 ± 2.16	28.58 ± 2.58	20.74 ± 1.80	11.81 ± 0.72	10.03 ± 0.82	11.81 ± 0.72	10.03 ± 0.82
	10–20	61.84 ± 1.91	62.40 ± 1.35	52.63 ± 6.94	46.68 ± 5.06	30.46 ± 1.29	30.74 ± 0.57	19.84 ± 2.80	17.90 ± 1.44	11.19 ± 0.77	10.74 ± 0.44	11.19 ± 0.77	10.74 ± 0.44
Август	0–10	54.85 ± 1.39	58.20 ± 0.66	37.57 ± 10.07	21.27 ± 7.40	27.12 ± 0.61	29.73 ± 2.28	19.59 ± 1.94	13.82 ± 3.76	10.55 ± 0.76	10.35 ± 0.49	10.55 ± 0.76	10.35 ± 0.49
	10–20	58.48 ± 3.21	58.60 ± 1.30	68.56 ± 7.01	48.99 ± 2.73	30.05 ± 1.67	31.35 ± 2.06	18.54 ± 3.29	14.80 ± 2.48	10.61 ± 0.58	11.41 ± 0.39	10.61 ± 0.58	11.41 ± 0.39
Сентябрь	0–10	67.91 ± 1.39	61.92 ± 3.55	59.24 ± 4.41	33.81 ± 7.56	33.10 ± 1.02	32.99 ± 3.03	22.27 ± 0.90	17.95 ± 3.09	11.53 ± 0.81	11.60 ± 0.63	11.53 ± 0.81	11.60 ± 0.63
	10–20	60.58 ± 1.84	58.85 ± 0.70	38.74 ± 5.03	24.85 ± 1.69	31.32 ± 0.26	29.80 ± 1.00	17.57 ± 2.46	20.45 ± 2.82	11.93 ± 0.35	11.41 ± 0.54	11.93 ± 0.35	11.41 ± 0.54
	20–30	62.78 ± 0.40	61.45 ± 1.73	30.86 ± 5.80	40.28 ± 5.44	32.04 ± 0.25	34.98 ± 1.86	18.65 ± 1.17	14.51 ± 1.03	11.04 ± 0.41	11.41 ± 0.77	11.04 ± 0.41	11.41 ± 0.77
10 г/кг													
Июнь	0–10	107.48 ± 14.54	72.80 ± 5.22	49.88 ± 3.26	29.20 ± 1.67	31.02 ± 1.52	32.07 ± 1.73	15.84 ± 3.32	13.35 ± 1.30	10.69 ± 0.52	12.06 ± 0.53	10.69 ± 0.52	12.06 ± 0.53
	10–20	75.57 ± 0.76	64.50 ± 0.98	73.33 ± 4.98	32.15 ± 1.46	35.90 ± 0.95	31.32 ± 1.58	22.44 ± 3.17	19.03 ± 2.30	12.56 ± 0.59	12.52 ± 0.19	12.56 ± 0.59	12.52 ± 0.19
Июль	0–10	71.34 ± 3.55	106.97 ± 1.74	39.53 ± 9.42	28.69 ± 7.31	31.32 ± 1.80	31.41 ± 1.11	22.96 ± 4.10	19.94 ± 1.21	11.44 ± 0.49	12.00 ± 0.53	11.44 ± 0.49	12.00 ± 0.53
	10–20	59.61 ± 3.31	62.69 ± 3.30	51.42 ± 14.62	41.68 ± 2.82	31.42 ± 2.23	31.98 ± 1.06	13.64 ± 2.31	11.16 ± 2.75	11.47 ± 0.69	12.68 ± 0.54	11.47 ± 0.69	12.68 ± 0.54
Август	0–10	123.42 ± 2.64	101.70 ± 11.44	42.05 ± 11.35	13.83 ± 2.87	29.76 ± 2.85	32.22 ± 0.88	19.27 ± 1.05	15.56 ± 0.76	10.09 ± 0.25	10.94 ± 0.39	10.09 ± 0.25	10.94 ± 0.39
	10–20	59.83 ± 3.45	63.18 ± 0.68	41.63 ± 14.51	27.56 ± 2.43	31.98 ± 3.07	32.42 ± 1.01	17.86 ± 2.07	12.87 ± 4.02	11.21 ± 0.77	12.48 ± 1.15	11.21 ± 0.77	12.48 ± 1.15
Сентябрь	0–10	66.66 ± 0.18	95.40 ± 10.05	34.80 ± 0.79	17.83 ± 5.39	32.02 ± 0.20	32.83 ± 0.89	18.00 ± 1.90	21.32 ± 1.75	11.88 ± 1.66	10.75 ± 0.40	11.88 ± 1.66	10.75 ± 0.40
	10–20	64.48 ± 2.69	71.16 ± 1.71	53.98 ± 2.68	22.04 ± 4.54	35.60 ± 1.11	32.26 ± 1.30	22.36 ± 4.39	17.15 ± 1.61	12.48 ± 0.57	11.87 ± 1.09	12.48 ± 0.57	11.87 ± 1.09
	20–30	65.33 ± 1.36	63.58 ± 2.09	23.87 ± 2.91	31.49 ± 3.44	33.51 ± 1.45	34.50 ± 2.21	21.96 ± 2.83	22.37 ± 2.14	11.81 ± 0.61	11.76 ± 0.22	11.81 ± 0.61	11.76 ± 0.22

Месяц	Глубина пробы, см	Валовое содержание элемента, мг/кг											
		Zn		Cu		Ni		Pb		2019		2020	
20 г/кг													
Июнь	0–10	89.65 ± 9.95	80.36 ± 2.15	17.58 ± 5.78	12.75 ± 2.31	28.91 ± 2.01	30.50 ± 1.46	16.11 ± 0.99	17.43 ± 1.39	9.36 ± 0.43	10.86 ± 0.37	10.86 ± 0.37	10.86 ± 0.37
	10–20	72.32 ± 8.06	63.73 ± 1.03	59.31 ± 5.65	29.35 ± 3.12	33.90 ± 1.31	34.88 ± 0.69	19.09 ± 1.93	17.80 ± 1.80	11.52 ± 0.64	11.62 ± 0.47	11.62 ± 0.47	11.62 ± 0.47
Июль	0–10	117.53 ± 22.55	88.91 ± 5.08	26.58 ± 8.22	16.01 ± 2.39	30.16 ± 2.02	32.13 ± 0.87	21.84 ± 2.90	16.46 ± 2.33	10.96 ± 0.45	10.44 ± 0.77	10.44 ± 0.77	10.44 ± 0.77
	10–20	59.31 ± 3.47	67.68 ± 3.99	44.34 ± 10.85	37.71 ± 3.56	30.86 ± 2.34	34.04 ± 2.58	20.56 ± 2.39	18.52 ± 2.67	11.12 ± 0.50	12.18 ± 0.71	12.18 ± 0.71	12.18 ± 0.71
Август	0–10	65.93 ± 2.13	115.16 ± 15.95	14.99 ± 2.32	< НПКО	27.07 ± 0.20	29.40 ± 1.31	20.60 ± 0.56	18.51 ± 1.86	10.58 ± 0.17	10.14 ± 0.35	10.14 ± 0.35	10.14 ± 0.35
	10–20	67.33 ± 5.56	65.03 ± 1.29	51.84 ± 10.01	27.54 ± 3.29	33.86 ± 0.81	31.82 ± 1.68	17.67 ± 3.04	16.32 ± 1.57	11.35 ± 0.59	10.38 ± 0.92	10.38 ± 0.92	10.38 ± 0.92
Сентябрь	0–10	87.76 ± 6.60	132.88 ± 18.51	37.05 ± 6.31	28.16 ± 6.80	36.09 ± 2.96	36.81 ± 2.44	20.04 ± 1.51	24.37 ± 2.76	11.86 ± 0.54	10.72 ± 0.50	10.72 ± 0.50	10.72 ± 0.50
	10–20	59.40 ± 6.07	68.02 ± 1.69	67.95 ± 16.71	21.79 ± 6.05	35.54 ± 3.15	32.70 ± 2.38	18.68 ± 1.57	16.57 ± 1.85	11.67 ± 0.70	11.72 ± 0.73	11.72 ± 0.73	11.72 ± 0.73
20–30	64.19 ± 3.53	61.99 ± 2.06	18.31 ± 0.57	30.83 ± 1.98	31.61 ± 0.19	34.03 ± 0.65	18.85 ± 0.99	18.89 ± 0.95	9.66 ± 0.20	11.21 ± 0.39	11.21 ± 0.39	11.21 ± 0.39	11.21 ± 0.39
30 г/кг													
Июнь	0–10	119.68 ± 9.32	139.73 ± 1.68	33.21 ± 5.09	< НПКО	27.91 ± 1.60	28.56 ± 1.29	20.19 ± 2.33	15.49 ± 3.56	10.94 ± 0.36	10.33 ± 0.28	10.33 ± 0.28	10.33 ± 0.28
	10–20	75.24 ± 3.21	73.17 ± 8.38	74.19 ± 3.02	< НПКО	35.57 ± 1.36	30.58 ± 1.44	22.13 ± 1.59	17.90 ± 2.28	13.02 ± 0.60	10.72 ± 0.53	10.72 ± 0.53	10.72 ± 0.53
Июль	0–10	88.16 ± 4.37	158.67 ± 3.49	20.12 ± 5.57	17.35 ± 6.58	28.91 ± 2.04	28.79 ± 2.00	21.72 ± 0.88	15.47 ± 2.01	10.79 ± 0.77	11.60 ± 0.73	11.60 ± 0.73	11.60 ± 0.73
	10–20	64.29 ± 5.70	75.95 ± 8.53	51.60 ± 11.41	17.80 ± 4.52	33.43 ± 1.07	30.60 ± 1.06	25.12 ± 0.31	13.88 ± 2.95	12.11 ± 0.49	11.46 ± 0.53	11.46 ± 0.53	11.46 ± 0.53
Август	0–10	113.73 ± 1.71	158.50 ± 3.15	< НПКО	< НПКО	29.37 ± 0.04	31.52 ± 2.23	21.03 ± 0.83	19.23 ± 1.45	12.17 ± 0.35	9.63 ± 0.28	9.63 ± 0.28	9.63 ± 0.28
	10–20	60.50 ± 10.65	75.48 ± 5.86	25.88 ± 9.06	30.91 ± 6.42	29.34 ± 2.82	30.76 ± 1.73	16.33 ± 1.73	17.50 ± 2.98	9.57 ± 0.68	10.99 ± 0.83	10.99 ± 0.83	10.99 ± 0.83
Сентябрь	0–10	135.04 ± 0.42	177.21 ± 6.62	< НПКО	< НПКО	29.94 ± 0.92	32.07 ± 1.29	17.89 ± 0.22	16.30 ± 1.83	11.04 ± 0.44	11.12 ± 0.55	11.12 ± 0.55	11.12 ± 0.55
	10–20	70.49 ± 5.87	68.64 ± 4.50	59.06 ± 3.73	14.19 ± 2.10	36.27 ± 1.03	30.70 ± 1.09	17.98 ± 1.82	21.05 ± 1.31	12.78 ± 0.25	11.13 ± 0.30	11.13 ± 0.30	11.13 ± 0.30
20–30	66.55 ± 1.94	62.17 ± 1.31	20.89 ± 1.95	20.58 ± 3.74	33.12 ± 0.15	30.46 ± 1.06	17.45 ± 1.10	17.47 ± 1.53	10.53 ± 1.54	12.04 ± 0.89	12.04 ± 0.89	12.04 ± 0.89	

обедненные органическим веществом слои почвы (Лесных, 2005). Кроме того, благоприятные погодные условия, а именно повышенные температура и уровень осадков, также может вносить свой вклад в интенсивность миграции или иммобилизации изучаемых металлов. Подобные выводы уже были сделаны ранее (Фрид и Борисочкина, 2020а); в этой работе на миграционную активность меди преимущественное влияние оказывали в равной степени пары факторов «карбонаты–орошение» и «карбонаты–температура». Действительно, при анализе Табл. 3 видно, что с увеличением температуры воздуха и количества осадков усиливаются и процессы миграции меди из гумусового слоя почвы преимущественно на глубину 10–20 см. Фактор загрязнения почвы отработанным маслом только усиливает данную тенденцию.

Для характеристики вертикальной миграции ТМ в условиях загрязнения нефтепродуктами были рассчитаны коэффициенты их радиальной контрастности в изучаемой почве на глубине 0–10, 10–20 и 20–30 см (Табл. 6).

Для никеля, свинца и кобальта характерно равномерное распределение в рассматриваемых слоях почвы; их соотношение и количество не зависит от доз нефтепродуктов.

Радиальная контрастность в исследуемых почвах обнаруживается в отношении цинка и меди, причем с увеличением дозы НП растет и значение данного коэффициента. В контрольных образцах почвы разница в содержании цинка во всех рассматриваемых горизонтах не обнаруживается. При слабой дозе загрязнения (10 г НП/кг) аккумуляция Zn в слое 0–10 см проявилась лишь в августе

Табл. 6. Коэффициенты радиальной контрастности тяжелых металлов в почве на глубине пробы 0–10, 10–20 и 20–30 см. Жирным шрифтом выделены показатели слабоконтрастных ($R = 1.3–1.5$) и контрастных барьеров ($R = 1.5–3.0$).

Месяц	Глубина пробы, см	Коэффициент радиальной контрастности									
		Zn		Cu		Ni		Pb		Co	
		2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Контроль (0 г/кг)											
Июнь	0–10	0.97	0.99	0.85	1.01	0.97	0.96	1.04	0.97	0.96	0.98
	10–20	1.03	1.01	1.15	0.99	1.03	1.04	0.96	1.03	1.04	1.02
Июль	0–10	1.01	0.96	0.99	0.56	1.01	0.92	1.18	1.07	1.03	0.97
	10–20	0.99	1.04	1.01	1.44	0.99	1.08	0.82	0.93	0.97	1.03
Август	0–10	0.97	1.00	0.71	0.61	0.95	0.97	1.03	0.97	1.00	0.95
	10–20	1.03	1.00	1.29	1.39	1.05	1.03	0.97	1.03	1.00	1.05
Сентябрь	0–10	1.07	1.02	1.38	1.03	1.03	1.01	1.14	1.02	1.00	1.01
	10–20	0.95	0.97	0.90	0.75	0.97	0.91	0.90	1.16	1.04	0.99
	20–30	0.98	1.01	0.72	1.22	1.00	1.07	0.96	0.82	0.96	0.99
10 г/кг											
Июнь	0–10	1.17	1.06	0.81	0.95	0.93	1.01	0.83	0.82	0.92	0.98
	10–20	0.83	0.94	1.19	1.05	1.07	0.99	1.17	1.18	1.08	1.02
Июль	0–10	1.09	1.26	0.87	0.82	1.00	0.99	1.25	1.28	1.00	0.97
	10–20	0.91	0.74	1.13	1.18	1.00	1.01	0.75	0.72	1.00	1.03
Август	0–10	1.35	1.23	1.01	0.67	0.96	1.00	1.04	1.09	0.95	0.93
	10–20	0.65	0.77	0.99	1.33	1.04	1.00	0.96	0.91	1.05	1.07
Сентябрь	0–10	1.02	1.24	0.93	0.75	0.95	0.99	0.87	1.05	0.99	0.94
	10–20	0.98	0.93	1.44	0.93	1.06	0.97	1.08	0.85	1.04	1.04
	20–30	1.00	0.83	0.64	1.32	0.99	1.04	1.06	1.10	0.98	1.03

Месяц	Глубина пробы, см	Коэффициент радиальной контрастности									
		Zn		Cu		Ni		Pb		Co	
		2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
20 г/кг											
Июнь	0–10	1.11	1.12	0.46	0.61	0.92	0.93	0.92	0.99	0.90	0.97
	10–20	0.89	0.88	1.54	1.39	1.08	1.07	1.08	1.01	1.10	1.03
Июль	0–10	1.33	1.14	0.75	0.60	0.99	0.97	1.03	0.94	0.99	0.92
	10–20	0.67	0.86	1.25	1.40	1.01	1.03	0.97	1.06	1.01	1.08
Август	0–10	0.99	1.28	0.45	0.26	0.89	0.96	1.08	1.06	0.96	0.99
	10–20	1.01	0.72	1.55	1.74	1.11	1.04	0.92	0.94	1.04	1.01
Сентябрь	0–10	1.25	1.52	0.90	1.05	1.05	1.07	1.04	1.22	1.07	0.96
	10–20	0.84	0.78	1.65	0.81	1.03	0.95	0.97	0.83	1.05	1.04
	20–30	0.91	0.71	0.45	1.14	0.92	0.99	0.98	0.95	0.87	1.00
30 г/кг											
Июнь	0–10	1.23	1.31	0.62	0.84	0.88	0.97	0.95	0.93	0.91	0.98
	10–20	0.77	0.69	1.38	1.16	1.12	1.03	1.05	1.07	1.09	1.02
Июль	0–10	1.16	1.35	0.56	0.99	0.93	0.97	0.93	1.05	0.94	1.01
	10–20	0.84	0.65	1.44	1.01	1.07	1.03	1.07	0.95	1.06	0.99
Август	0–10	1.31	1.35	0.09	0.00	1.00	1.01	1.13	1.05	1.12	0.93
	10–20	0.69	0.65	1.91	2.00	1.00	0.99	0.87	0.95	0.88	1.07
Сентябрь	0–10	1.49	1.73	0.33	0.21	0.90	1.03	1.01	0.89	0.96	0.97
	10–20	0.78	0.67	1.97	1.14	1.10	0.99	1.01	1.15	1.12	0.97
	20–30	0.73	0.61	0.70	1.65	1.00	0.98	0.98	0.96	0.92	1.05

2019 г. Средняя степень загрязнения (20 г/кг) привела к незначительной аккумуляции цинка в верхнем слое почвы в июле 2019 г. и в сентябре 2020 г. Однако наиболее выраженный геохимический барьер для Zn создает сильная доза загрязнения (30 г/кг). Барьеры слабой и средней контрастности для данного металла возникают в верхнем гумусовом горизонте; их влияние прослеживается на протяжении почти всего периода наблюдений (кроме 2 первых месяцев сразу после загрязнения).

Судя по коэффициентам радиальной контрастности, медь весьма подвижна в условиях загрязнения почвы НП. Уже в контрольных образцах прослеживается тенденция к вымыванию этого элемента из верхних в нижележащие почвенные слои. Так, для Cu на глубине 10–20 см в июле и августе 2020 г. было выявлено наличие слабоконтрастного барьера. В сентябре 2019 г. верхний слой выступил местом накопления этого металла ($R = 1.38$); в другие месяцы обоих лет содержание элемента в обоих горизонтах отличалось достаточной стабильностью. С добавлением нефтепродуктов и увеличением их концентрации тенденция к миграции Cu только усиливается. Например, при дозе 10 г НП/кг слабоконтрастный барьер на глубине 10–20 см обнаружился в сентябре 2019 г. и в августе 2020 г. Однако показатель $R = 1.32$, характерный для глубины 20–30 см, свидетельствует о способности меди к дальнейшему проникновению в нижние почвенные горизонты. Средняя доза поллютанта (20 г НП/кг) значительно увеличивает подвижность меди, причем максимальная степень миграции этого металла наблюдается в поверхностном слое почвы, а на глубине 10–20 см происходит его аккумуляция. Слабо- и среднеконтрастные барьеры во втором рассматриваемом слое выявляются на протяжении практически всего времени наблюдений. Высокая концентрация поллютанта в почве (30 г НП/кг) провоцирует еще более интенсивную миграцию меди из гумусового горизонта в

нижележащие слои. Так, в августе обоих лет и в сентябре 2019 г. для глубины 10–20 см характерны контрастные барьеры (коэффициент R находится в диапазоне 1.91–2.00). А в сентябре 2020 г. аккумуляция меди проявилась на глубине 20–30 см; обнаружен контрастный барьер ($R = 1.65$).

Согласно данным, полученным в ходе лабораторного опыта с почвенными колонками, аккумуляющая способность песчаных горизонтов выше, чем у суглинистых (Груздков и др., 2009). Авторами отмечается импульсный характер миграции ТМ: поллютанты аккумулируются в гумусовом слое до некоторого предела, затем формируется их «импульс» максимальной концентрации, который со временем смещается в нижележащие горизонты. При этом наблюдается последовательное чередование максимумов и минимумов концентраций поллютантов вниз по почвенному профилю. В нашем случае супесчаные почвы располагаются вплоть до 60 см в глубину, далее находится текстурный слой, представленный тяжелым суглинком (Табл. 1). Этим может объясняться наблюдаемая тенденция к периодическому накоплению меди на глубинах 10–30 см в течение нескольких месяцев в условиях настоящего эксперимента – тяжелый суглинок выступает мощным геохимическим барьером для соединений меди. Выпадающие осадки задерживаются этим слоем и могут способствовать вторичному загрязнению ТМ вышележащих слоев почвы, что явно прослеживается в случае с медью по пробам, отобраным с глубины 10–20 см за весь период наблюдений. Согласно данным некоторых авторов (Михальчук и др., 2022; Синдирева и др., 2022), медь, в сравнении с цинком, обладает более высокой внутрипрофильной миграционной активностью в связи с менее прочной фиксацией элемента органическим веществом почв. В нашем исследовании наблюдается похожая картина: на глубине 10–20 см медь аккумулируется наиболее интенсивно, в случае со слабым (10 г НП/кг) и сильным (30 г НП/кг) загрязнением выявлена аккумуляция и в более глубоких слоях почвы. Как следствие, концентрация меди в поверхностном слое почвы невелика, зачастую (например, в августе–сентябре) фиксируются лишь ее низкие концентрации, достоверно не обнаруживаемые прибором. Известно, что по отношению к кислотности медь является достаточно подвижным элементом (Зубарев и Мищук, 2019). Исследованная нами почва в верхнем слое имеет слабокислую среду ($pH = 5.59$), затем с увеличением глубины ее кислотность повышается (Табл. 1), что также способствует вертикальной миграции водорастворимых соединений данного элемента.

Заключение

Таким образом, фактор загрязнения почвы НП в основном влияет на миграционные и аккумуляционные свойства меди и цинка. Тенденция к накоплению цинка в верхнем почвенном горизонте обусловлена его высокой способностью к биогенной аккумуляции, чему благоприятствует фактор наличия в почве нефтепродуктов, стимулирующих активность углеводородокисляющих бактерий, а также меньшая его способность к миграции в условиях увеличения температуры воздуха и количества осадков.

Для меди выявлена высокая подвижность, которая увеличивается пропорционально повышению дозы загрязнения НП. Эта закономерность объясняется низкой степенью биогенного накопления данного металла и менее прочной его фиксацией органическим веществом почвы, повышенной температурой воздуха и уровнем осадков в период наблюдения, а также увеличением показателя кислотности вниз по почвенному профилю. В то же время наблюдаемая тенденция к повышению концентрации меди на глубине 10–20 см может быть обусловлена вторичным загрязнением этого слоя почвы в результате удерживания осадков мощным слоем тяжелого суглинка на глубине 60 см и ниже, который, очевидно, выступает геохимическим барьером для Си. Кроме того, супесчаная почва, располагающаяся по профилю на глубине 0–60 см, обладает большей способностью к аккумуляции ТМ по сравнению с суглинками, что также объясняет наблюдаемую нестабильность процессов миграции данного элемента.

Такие металлы, как кобальт, свинец и никель, распределены равномерно в пределах слоя 0–30 см; зависимости их содержания в почве от степени ее загрязнения НП не обнаружилось.

Список литературы

- Груздков, Д.Ю., Ширкин, Л.А., Трифонова, Т.А., 2009. Оценка миграции тяжелых металлов в почвах. *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение* 4, 40–45.
- Замотаев, И.В., Иванов, И.В., Михеев, П.В., Никонова, А.Н., 2015. Химическое загрязнение и трансформация почв в районах добычи углеводородного сырья (обзор литературы). *Почвоведение* 12, 1505–1518. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1512014X>

- Зубарев, В.А., Мищук, С.Н., 2019. Изменение концентраций тяжелых металлов почв юга Среднеамурской низменности при длительном сельскохозяйственном использовании. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов* **330** (8), 18–26. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2208>
- Комаров, В.И., Селиванов, О.Г., Марцев, А.А., Подолец, А.А., Лукьянов, С.Н., 2019. Содержание тяжелых металлов в пахотном горизонте почв сельскохозяйственного назначения Владимирской области. *Агрохимия* **12**, 75–82. <https://doi.org/10.1134/S0002188119100089>
- Котельникова, А.Л., Золотова, Е.С., Рябинин, В.Ф., 2022. Миграция элементов из отходов переработки медеплавильных шлаков в систему торф–растения. *Литосфера* **22** (1), 135–147. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-1-135-147>
- Курбатов, Ю.Н., Скрипченко, Л.С., 2020. Влияние нефтяного загрязнения на уреазную активность почвы. *Сборник материалов заочной научно-практической конференции «Дни науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 15–30 апреля 2020 г., Владимир*. Владимир, Россия, 2635–2644.
- Лесных, Е.А., 2005. Поведение микроэлементов в почве при утрате гумуса на примере почв приобского плато Алтайского края. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета* **3**, 27–30.
- Липина, Л.Н., Александрова, Т.Н., 2013. Подвижность тяжелых металлов в почве и их биодоступность в зоне влияния горно-перерабатывающего предприятия. *Проблемы региональной экологии* **3**, 108–111.
- Михальчук, Н.В., 2017. Подвижные формы тяжелых металлов и микроэлементов в почвах карбонатного ряда юго-запада Беларуси. *Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук* **3**, 90–97.
- Михальчук, Н.В., Качанович, П.В., Ажгиревич, А.Н., Дашкевич, М.М., 2022. Особенности вертикальной миграции тяжелых металлов в почвах различных типов лесных биогеоценозов при аэротехногенном загрязнении свинецсодержащей пылью. *Природопользование* **1**, 45–55. <https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-45-55>
- О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад, 2022. Минприроды России, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 684 с.
- Синдирева, А.В., Котченко, С.Г., Елизаров, О.И., 2022. Экологическая оценка содержания меди в почвенном покрове на юге Тюменской области. *Вестник Нижневартковского государственного университета* **1** (57), 82–90. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/22-1/09>
- Тимергазина, И.Ф., Переходова, Л.С., 2012. К проблеме биологического окисления нефти и нефтепродуктов углеводородокисляющими микроорганизмами. *Нефтегазовая геология. Теория и практика* **7** (1).
- Тимофеев, А.Н., Муратова, Г.В., Минкина, Т.М., 2021. Моделирование миграции тяжелых металлов в почве от наземного источника в окрестностях Новочеркасской ГРЭС. *Инженерный вестник Дона* **8**.
- Трифонова, Т.А., Курбатов, Ю.Н., 2023. Исследование интегральной токсичности почвы, загрязненной нефтепродуктами. *Теоретическая и прикладная экология* **3**, 141–150. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-4-141-150>

- Фрид, А.С., Борисочкина, Т.И., 2020а. Закономерности варьирования величин диффузионных параметров вертикальной миграции тяжелых металлов и фтора в разных почвах при загрязнении. *Агрохимия* **11**, 53–65. <https://doi.org/10.31857/S0002188120110046>
- Фрид, А.С., Борисочкина, Т.И., 2020b. Методические особенности исследования миграции тяжелых металлов и других веществ в почвенных колонках при загрязнении. *Агрохимия* **9**, 74–86. <https://doi.org/10.31857/S0002188120090057>
- Шабанов, М.В., Маричев, М.С., 2020. Тяжелые металлы в почвах геохимически сопряженных ландшафтов Красноуральского промышленного узла. *Социально-экологические технологии* **10** (2), 201–225. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2020-10-2-201-225>
- Fu, X.-W., Li, T.-Y., Ji, L., Wang, L.-L., Zheng, L.-W., Wang, J.-N., Zhang, Q., 2018. Occurrence, sources and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils around oil wells in the border regions between oil fields and suburbs. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **157**, 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.054>
- Geng, P., Ma, A., Wei, X., Chen, X., Yin, J. et al., 2022. Interaction and spatio-taxonomic patterns of the soil microbiome around oil production wells impacted by petroleum hydrocarbons. *Environmental Pollution* **307**, 119531. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119531>
- Koolivand, A., Abtahi, H., Parhamfar, M., Saeedi, R., Coulon, F. et al., 2022. The effect of petroleum hydrocarbons concentration on competition between oil-degrading bacteria and indigenous compost microorganisms in petroleum sludge bioremediation. *Environmental Technology & Innovation* **26**, 102319. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102319>
- Pan, Y., Zhang, Q., Yu, Y., Tong, Y., Wu, W. et al., 2021. Three-dimensional migration and resistivity characteristics of crude oil in heterogeneous soil layers. *Environmental Pollution* **268** (A), 115309. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115309>
- Tiwari, R., Agrawal, P., Bawa, S., Karadbhajne, V., Agrawal, A.J., 2023. Soil contamination by waste transformer oil: A review. *Materials Today: Proceedings* **72** (1), 306–310. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.403>
- Wang, F., Huo, L., Li, Y., Wu, L., Zhang, Y., Shi, G., An, Y., 2023. A hybrid framework for delineating the migration route of soil heavy metal pollution by heavy metal similarity calculation and machine learning method. *Science of The Total Environment* **858** (3), 160065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160065>

References

- Frid, A.S., Borisochkina, T.I., 2020a. Zakonomernosti var'irovaniya velichin diffuzionnykh parametrov vertikal'noi migratsii tyazhelykh metallov i ftora v raznykh pochvakh pri zagryaznenii [Patterns of variation in the values of diffusion parameters of vertical migration of heavy metals and fluorine in different soils during pollution]. *Agrohimiya [Agrochemistry]* **11**, 53–65. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188120110046>
- Frid, A.S., Borisochkina, T.I., 2020b. Metodicheskie osobennosti issledovaniya migratsii tyazhelykh metallov i drugikh veshchestv v pochvennykh kolonkakh pri zagryaznenii [Methodological features of studying the migration of heavy metals and other substances in soil columns during pollution]. *Agrohimiya [Agrochemistry]* **9**, 74–86. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188120090057>
- Fu, X.-W., Li, T.-Y., Ji, L., Wang, L.-L., Zheng, L.-W., Wang, J.-N., Zhang, Q., 2018. Occurrence, sources and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils around oil wells in the border regions between oil fields and suburbs. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **157**, 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.054>

- Geng, P., Ma, A., Wei, X., Chen, X., Yin, J. et al., 2022. Interaction and spatio-taxonomic patterns of the soil microbiome around oil production wells impacted by petroleum hydrocarbons. *Environmental Pollution* **307**, 119531. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119531>
- Gruzdkov, D.Yu., Shirkin, L.A., Trifonova, T.A., 2009. Otsenka migratsii tyazhelykh metallov v pochvakh [Assessment of migration of heavy metals in soils]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie [Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science]* **4**, 40–45. (In Russian).
- Komarov, V.I., Selivanov, O.G., Martsev, A.A., Podolets, A.A., Luk'yanov, S.N., 2019. Soderzhanie tyazhelykh metallov v pakhotnom gorizonte pochv sel'skohozyaistvennogo naznacheniya Vladimirskoi oblasti [The content of heavy metals in the arable horizon of agricultural soils of the Vladimir region]. *Agrokhimiya [Agrochemistry]* **12**, 75–82. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0002188119100089>
- Koolivand, A., Abtahi, H., Parhamfar, M., Saeedi, R., Coulon, F. et al., 2022. The effect of petroleum hydrocarbons concentration on competition between oil-degrading bacteria and indigenous compost microorganisms in petroleum sludge bioremediation. *Environmental Technology & Innovation* **26**, 102319. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102319>
- Kotel'nikova, A.L., Zolotova, E.S., Ryabinin, V.F., 2022. Migratsiya elementov iz otkhodov pererabotki medeplavil'nykh shlakov v sistemu torf–rasteniya [Migration of elements from copper smelting slag processing waste into the peat–plant system]. *Litosfera [Lithosphere]* **22** (1), 135–147. (In Russian). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-1-135-147>
- Kurbatov, Yu.N., Skripchenko, L.S., 2020. Vliyanie neftyanogo zagryazneniya na ureaznuyu aktivnost' pochvy [The influence of oil pollution on urease activity of soil]. *Sbornik materialov zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Dni nauki studentov Vladimirskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Aleksandra Grigor'evicha i Nikolaya Grigor'evicha Stoletovykh" [Collection of materials of the correspondence scientific and practical conference "Science days of students of Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov"]*, Vladimir, 15–30 April 2020. Vladimir, Russia, 2635–2644. (In Russian).
- Lesnykh, E.A., 2005. Povedenie mikroelementov v pochve pri utrate gumusa na primere pochv priobskogo plato Altaiskogo kraya [The behavior of microelements in the soil during the loss of humus using the example of soils of the Priob plateau of the Altai Territory]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Altai State Agrarian University]* **3**, 27–30. (In Russian).
- Lipina, L.N., Aleksandrova, T.N., 2013. Podvizhnost' tyazhelykh metallov v pochve i ikh biodostupnost' v zone vliyaniya gorno-pererabatyvayushchego predpriyatiya [Mobility of heavy metals in soil and their bioavailability in the zone of influence of a mining and processing enterprise]. *Problemy regional'noi ekologii [Problems of Regional Ecology]* **3**, 108–111. (In Russian).
- Mikhail'chuk, N.V., 2017. Podvizhnye formy tyazhelykh metallov i mikroelementov v pochvakh karbonatnogo ryada yugo-zapada Belarusi [Mobile forms of heavy metals and microelements in soils of the carbonate series of southwestern Belarus]. *Vesci Nacyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya himichnykh navuk [Vesti National Academy of Sciences of Belarus. Series of Chemical Sciences]* **3**, 90–97. (In Russian).
- Mikhail'chuk, N.V., Kachanovich, P.V., Azhgirevich, A.N., Dashkevich, M.M., 2022. Osobennosti vertikal'noi migratsii tyazhyolykh metallov v pochvakh razlichnykh tipov lesnykh biogeotsenozov pri aerotekhnogennom zagryaznenii svinetssoderzhashchei pyl'yu [Features of vertical migration of heavy metals in soils of various types of forest biogeocenoses during aerotechnogenic pollution with lead-containing dust]. *Prirodopol'zovanie [Nature Management]* **1**, 45–55. (In Russian). <https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-45-55>
- O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu. Gosudarstvennyi doklad [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021. State

- report], 2022. Ministry of Natural Resources of Russia, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia, 684 p. (In Russian).
- Pan, Y., Zhang, Q., Yu, Y., Tong, Y., Wu, W. et al., 2021. Three-dimensional migration and resistivity characteristics of crude oil in heterogeneous soil layers. *Environmental Pollution* **268** (A), 115309. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115309>
- Sindireva, A.V., Kotchenko, S.G., Elizarov, O.I., 2022. Ekologicheskaya otsenka sodержaniya medi v pochvennom pokrove na yuge Tyumenskoi oblasti [Environmental assessment of copper content in soil cover in the south of the Tyumen region]. *Vestnik Nizhneartovskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Nizhneartovsk State University]* **1** (57), 82–90. (In Russian). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/22-1/09>
- Shabanov, M.V., Marichev, M.S., 2020. Tyazhelye metally v pochvakh geohimicheski sopryazhennykh landshaftov Krasnoural'skogo promyshlennogo uzla [Heavy metals in soils of geochemically related landscapes of the Krasnouralsk industrial hub]. *Social'no-ekologicheskie tekhnologii [Social and Environmental Technologies]* **10** (2), 201–225. (In Russian). <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2020-10-2-201-225>
- Timergazina, I.F., Perekhodova, L.S., 2012. K probleme biologicheskogo okisleniya nefti i nefteproduktov uglevodorodokislyayushchimi mikroorganizmami [On the problem of biological oxidation of oil and petroleum products by hydrocarbon-oxidizing microorganisms]. *Neftegazovaia geologiya. Teoriia i praktika [Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies]* **7** (1). (In Russian).
- Timofeev, A.N., Muratova, G.V., Minkina, T.M., 2021. Modelirovanie migratsii tyazhelykh metallov v pochve ot nazemnogo istochnika v okrestnostyakh Novocherkasskoi GRES [Modeling the migration of heavy metals in soil from a ground source in the vicinity of the Novocherkassk State District Power Plant]. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]* **8**. (In Russian).
- Tiwari, R., Agrawal, P., Bawa, S., Karadbhajne, V., Agrawal, A.J., 2023. Soil contamination by waste transformer oil: A review. *Materials Today: Proceedings* **72** (1), 306–310. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.403>
- Trifonova, T.A., Kurbatov, Yu.N., 2023. Issledovanie integral'noi toksichnosti pochvy, zagryaznyonnoi nefteproduktami [The study of the integral toxicity of oil-contaminated soil]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]* **3**, 141–150. (In Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-4-141-150>
- Wang, F., Huo, L., Li, Y., Wu, L., Zhang, Y., Shi, G., An, Y., 2023. A hybrid framework for delineating the migration route of soil heavy metal pollution by heavy metal similarity calculation and machine learning method. *Science of The Total Environment* **858** (3), 160065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160065>
- Zamotaev, I.V., Ivanov, I.V., Mikheev, P.V., Nikonova, A.N., 2015. Khimicheskoe zagryaznenie i transformatsiya pochv v raionakh dobychi uglevodorodnogo syr'ya (obzor literatury) [Chemical pollution and transformation of soils in areas of hydrocarbon production (literature review)]. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]* **12**, 1505–1518. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0032180X1512014X>
- Zubarev, V.A., Mishchuk, S.N., 2019. Izmenenie kontsentratsii tyazhelykh metallov pochv yuga Sredneamurskoi nizmennosti pri dlitel'nom sel'skohozyaistvennom ispol'zovanii [Changes in the concentrations of heavy metals in soils in the south of the Middle Amur Lowland during long-term agricultural use]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering]* **330** (8), 18–26. (In Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2208>