



УДК 504.064

Геохимическая оценка распределения подвижных форм тяжелых металлов в нефтезагрязненных аллювиальных почвах среднетаежной подзоны Западной Сибири

НОСОВА

Мария Владимировна

кандидат биологических наук, АО
«ТомскНИПИнефть», nsmvsh@mail.ru

СЕРЕДИНА

Валентина Петровна

доктор биологических наук, профессор,
Национальный исследовательский Томский
государственный университет, seredina_v@mail.ru

СТОВБУНИК

Сергей Анатольевич

АО «ТомскНИПИнефть», StovbunikSA@tomsknpi.ru

Ключевые слова:

тяжелые металлы
подвижные формы
нефтезагрязнение
коэффициент геоаккумуляции
суммарный индекс загрязнения
методы рекультивации
экологическое воздействие

Аннотация:

В статье рассмотрено содержание подвижных форм тяжелых металлов (ТМ) в нефтезагрязненных почвах среднетаежной подзоны Западной Сибири. Исследования проводились для верхних горизонтов почв (0–20 см) в различных зонах техногенной нагрузки (эпицентр, импактная зона, граница) и на фоновых участках. Результаты анализа показали значительное превышение концентраций ТМ над предельно допустимыми значениями (ПДК), установленными СанПиН 1.2.3685–21, а также над фоновыми уровнями в нефтезагрязненных почвах. Содержание подвижных форм ТМ в зоне техногенного загрязнения уменьшается в ряду: $V > Mn > Ni > Cu > Pb > Zn$. В ходе работы были рассчитаны корреляционные зависимости между содержанием подвижных форм ТМ, органического углерода (Сорг) и нефтепродуктов (НП), а также определены коэффициент геоаккумуляции (Igeo) и индекс суммарного загрязнения почв (Zc). Установлено закономерное снижение значений Zc по мере удаления от эпицентра загрязнения. Все исследуемые зоны находятся в диапазоне загрязнения, требующем мониторинга и проведения мероприятий по снижению техногенной нагрузки. Элементы Zn, Mn и V демонстрируют стабильно высокие значения Igeo и Zc, что связано с их повышенной техногенной активностью. Выявленные закономерности подчеркивают необходимость разработки и реализации комплексных природоохранных мероприятий для восстановления экологического состояния загрязненных почв.

© 2025 Петрозаводский государственный университет

Рецензент: В. И. Кулагина

Рецензент: В. В. Вапиров

Получена: 22 декабря 2024 года

Опубликована: 02 апреля 2025 года

Введение

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ) в сочетании с техногенным воздействием, таким как нефтезагрязнение, представляет одну из актуальных экологических проблем современности. Почвенный покров, как ключевой компонент экосистем, выполняет важные функции, включая фильтрацию, сорбцию и накопление загрязнителей, что делает его уязвимым к накоплению и перераспределению ТМ.

Тяжелые металлы, такие как свинец (Pb), цинк (Zn), медь (Cu), никель (Ni), ванадий (V) и марганец (Mn), обладают высокой устойчивостью и склонностью к длительному накоплению в почве, что усиливает их потенциальное воздействие на экосистемы. Свинец благодаря своей токсичности и низкой подвижности часто накапливается в верхних горизонтах почвы (Kabata-Pendias, Pendias, 2011). Цинк и медь, хотя и являются микроэлементами, при повышенных концентрациях проявляют токсические свойства (Alloway, 2013). Никель и ванадий, связанные с нефтяным загрязнением, выделяются способностью мигрировать и изменять химические свойства почвы (Olujimi et al., 2014). Марганец, как компонент природных процессов, проявляет зависимость от смены окислительно-восстановительных условий, характерных для нефтезагрязненных почв.

Среднетаежная подзона Западной Сибири с ее специфическими климатическими и почвенными условиями характеризуется высокой чувствительностью к техногенному воздействию. Однако в условиях данной территории исследования, направленные на изучение распределения подвижных форм ТМ в верхнем горизонте нефтезагрязненных почв, остаются недостаточно разработанными.

Цель исследования – выявить закономерности распределения подвижных форм свинца, цинка, меди, никеля, ванадия и марганца в верхнем горизонте нефтезагрязненных почв среднетаежной подзоны Западной Сибири.

Материалы

Объектом исследования послужил участок разлива нефти на территории средней тайги Западной Сибири в пределах Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО). Очаг загрязнения возник после аварийной ситуации на промысловом трубопроводе в центральной части поймы р. Оби. Нефтяное загрязнение было успешно устранено в ходе рекультивационных работ, выполненных в строгом соответствии с нормативными требованиями ГОСТ Р 59057–2020 (2020), ГОСТ Р 57447–2017 (2017), а также внутренними стандартами компании-недропользователя. По завершении работ участок прошел обязательную проверку и был принят уполномоченными представителями, подписавшими акт рекультивации.

В процессе восстановления территории были применены авторские предложения: помимо внесения минеральных удобрений, в почву добавлены цеолиты, которые эффективно снижают подвижность тяжелых металлов. На биологическом этапе рекультивации использовалась специальная нефтестойкая травосмесь, дополненная растениями – аккумуляторами тяжелых металлов (*Lupinus polyphyllus.*, 1753, *Salix spp.*, 1991), что позволило усилить процесс извлечения металлов из почвы.

Результаты проведенных мероприятий подтвердили их высокую эффективность: содержание подвижных форм тяжелых металлов в почве достигло фоновых значений, что свидетельствует о полном восстановлении экологического состояния участка. В статье не приводятся конкретных данных о содержании подвижных форм тяжелых металлов после рекультивации, поскольку их концентрации соответствуют фоновым значениям, что подтверждает успешность выполненных работ.

Объект исследования разделен по зонам: эпицентр загрязнения (№ 1, 26 почвенных прикопок, промзона трубопроводного транспорта); импактная зона загрязнения (№ 2, 26 почвенных прикопок, в 3 м от центра разлива) и граница загрязнения (№ 3, 25 почвенных прикопок, в 5 м от эпицентра загрязнения). Кроме загрязненных почв также были отобраны фоновые почвы (№ 4, 25 почвенных прикопок) и условный фон (№ 5, 25 почвенных прикопок). Фоновые почвы отбирались за пределами нефтяного месторождения, чтобы исключить любое антропогенное и техногенное влияние (в 10 км на север от нефтяного месторождения). Это позволило установить естественный уровень содержания веществ в почве, который служит эталоном для сравнения. Условный фон отбирался в 500 м от границы загрязнения, где следы загрязнения нефтью отсутствуют. Он формируется в пределах нефтяного месторождения, но на участках, не подверженных прямому воздействию загрязняющих веществ.

Выделение фона и условного фона необходимо для корректного анализа экологической ситуации, что позволяет разделить естественные и техногенные изменения, повлекшие трансформацию свойств почв. Это также обеспечило более точную оценку загрязнения, учитывая как фоновые, так и локальные

условия.

При выборе фоновых участков соблюдалось требование максимальной однородности факторов почвообразования. В различных зонах распространения поллютантов и на незагрязненной территории проводилось морфологическое описание почв и определялось общее проективное покрытие растительности (ОПП). Полный перечень объектов исследования представлен в табл. 1.

Таблица 1. Объекты исследования

Глубина, см	Морфологическое строение	Растительный покров
Эпицентр загрязнения (№ 1, n = 26). Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой глееватой средне-мелкой почве (<i>Gleyic Toxic Fluvisols</i>)		
0-20	На поверхности - сплошная битумизированная корка с характерным сильным запахом. Почва однородная, темно-серая, почти черная. По шкале Манселла: яркость - 3, цветность - 5B, тон - Gley 2. Горизонт бесструктурный, тяжелосуглинистый, вязкий, сырой, уплотненный, пропитанный нефтью. Переход по окраске незаметен, границы не дифференцируются.	Наблюдается полная деградация древесно-кустарничкового яруса. Отмечено наличие единичных видоизмененных экземпляров таволги иволистной (<i>Spiraea salicifolia</i> L., 1753) и лютика ползучего (<i>Ranunculus repens</i> * L., 1753). ОПП не превышает 10 %.
Импактная зона (№ 2, n = 26). Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой глееватой средне-мелкой почве (<i>Gleyic Toxic Fluvisols</i>)		
0-20	На поверхности заметна слабо выраженная битумизированная корка. Почва однородная, серого цвета. В сухом состоянии по шкале Манселла: яркость - 5, цветность - N, тон - Gley 1. Горизонт бесструктурный, с цементированными глыбистыми включениями, покрытыми маслянистой пленкой, пропитан нефтью. Переход по окраске незаметен, границы не дифференцируются.	Растительный покров представлен частично деградированными кустарниковыми ассоциациями рябины сибирской (<i>Sorbus sibirica</i> Hedl., 1901), таволги средней (<i>Spiraea media</i> L., 1792) и шиповника иглистого (<i>Rosa acicularis</i> L., 1820). Растительность угнетена, генеративные органы не развиты. ОПП до 45 %.
Граница загрязнения (№ 3, n = 25). Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой глееватой средне-мелкой почве (<i>Gleyic Toxic Fluvisols</i>)		
0-20	На поверхности наблюдаются радужные размытые пленки. Почва неоднородная по окраске, серо-бурая. В сухом состоянии по шкале Манселла: яркость - 7, цветность - 3, тон - 7.5YR. Горизонт бесструктурный, тяжелосуглинистый, вязкий, сырой, уплотненный, пропитанный нефтью. Переход по окраске незаметен, границы не дифференцируются.	В растительности преобладают подросты березы повислой (<i>Betula pendula</i> Roth.) и осины (<i>Populus tremula</i> L., 1753). ОПП до 60 %.
Фон (№ 4, n = 25). Аллювиальная серогумусовая глееватая средне-мелкая тяжелосуглинистая почва (<i>Gleyic Fluvisols</i>)		
0-20	Почва неоднородная, серо-бурая с сизыми прожилками. В сухом состоянии по шкале Манселла: яркость - 7, цветность - 3, тон - 5YR. Состоит из остатков травянистой растительности разной степени разложения, пронизана корневыми системами. Переход по составу почвенной массы четкий, граница ровная.	Растительный покров представлен ивой (<i>Salix</i> sp.), черной смородиной (<i>Ribes nigrum</i> L., 1753), таволгой иволистной (<i>Spiraea salicifolia</i> L., 1753), лабазником (<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim., 1879), лютиком ползучим (<i>Ranunculus repens</i> L., 1753), калужницей (<i>Caltha palustris</i> L., 1753) и осокой (<i>Carex</i> sp.). ОПП до 80 %.
Условный фон (№ 5, n = 25). Аллювиальная серогумусовая глееватая средне-мелкая тяжелосуглинистая почва (<i>Gleyic Fluvisols</i>)		
0-20	Почва неоднородная, серо-бурая с сизыми прожилками. По шкале Манселла: яркость - 7, цветность - 3, тон - 5YR. Состоит из остатков травянистой растительности, меньше пронизана корневыми системами, чем в зоне № 4. Переход по составу почвенной массы четкий, граница ровная.	Растительный покров включает люпин многолистный (<i>Lupinus polyphyllus</i> L., 1753), донник желтый (<i>Melilotus officinalis</i> L., 1779) и клевер луговой (<i>Trifolium pratense</i> L., 1753). ОПП до 70 %.

Систематическое положение почв на каждом обследованном участке определено по Классификации и диагностике почв России (Шишов и др., 2004) и World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2022). Исследования проведены спустя 1-2 месяца с момента загрязнения.

Методы

Исследование распределения подвижных форм тяжелых металлов в нефтезагрязненных почвах среднетаежной подзоны Западной Сибири проводилось с применением современных стандартов и методов химико-аналитического анализа.

В мировой и отечественной практике используются различные подходы, направленные на снижение подвижности тяжелых металлов или их полное удаление из почв. Эти методы базируются на физических, химических и биологических процессах, позволяя адаптировать технологии к специфическим условиям загрязнения (McBride, 1989; Орлов и др., 2002; Середина и др., 2006; Smith, 2009; Водяницкий и др., 2009; Du, Yu, 2012; Геннадиев, 2016).

Отбор проб почвы выполнялся в полевых условиях в соответствии с методическими требованиями ГОСТ 17.4.4.02-84 (1984). Пробы отбирали из верхнего горизонта почвы (0-20 см), наиболее подверженного воздействию нефтезагрязнений и накоплению тяжелых металлов. Верхний слой является первым барьером, где происходят процессы сорбции, накопления и перераспределения загрязнителей, а также формируются условия для дальнейшей миграции ТМ в нижележащие слои и грунтовые воды.

Содержание подвижных форм тяжелых металлов (свинца, цинка, меди, никеля, ванадия и марганца) определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП). Данный метод характеризуется высокой чувствительностью и точностью, позволяет выявлять содержание исследуемых элементов в следовых концентрациях. Перед анализом из почвенных проб проводили экстракцию подвижных форм металлов с использованием слабокислого экстрагента (ацетатно-аммонийного буфера).

Определение содержания нефтепродуктов (НП) в почвенных образцах осуществлялось флуориметрическим методом согласно требованиям ПНД Ф 16.1:2.21-98 (1998). Этот метод позволяет выявлять содержание углеводородов нефти в широком диапазоне концентраций за счет регистрации интенсивности их флуоресценции. Подготовка образцов для анализа включала экстракцию органических загрязнителей растворителями с последующим измерением флуоресценции при заданных длинах волн. В целях установления химического состояния почв был также определен общий органический углерод (Сорг) по методу Тюрина ГОСТ 26213-91 (1991).

Результаты химико-аналитических измерений подвергались статистической обработке с целью оценки достоверности полученных данных и выявления закономерностей распределения подвижных форм тяжелых металлов и нефтепродуктов. Применялись методы описательной статистики и корреляционного анализа для установления взаимосвязей между содержанием тяжелых металлов и степенью нефтезагрязнения (содержанием НП). В работе использовались параметрические методы статистики - коэффициент корреляции Пирсона. Полученные данные также были сгруппированы по зонам загрязнения с определением диапазона данных (min-max). В диапазоне выделены средние значения, стандартное отклонение (SD), коэффициент вариации (V).

Для оценки накопления тяжелых металлов или других загрязняющих веществ в почве по сравнению с фоновыми значениями был рассчитан индекс геоаккумуляции (*I_{geo}*). Комплексная оценка уровня загрязнения почвы несколькими загрязняющими веществами одновременно проведена с помощью суммарного коэффициента загрязнения (*Z_c*). Формулы для расчета индекса геоаккумуляции и суммарного коэффициента загрязнения широко используются в экологической геохимии для оценки степени загрязнения почв тяжелыми металлами.

Индекс *I_{geo}* применяется для отображения процессов накопления, оценки уровня загрязненности тяжелыми металлами и рассчитывается по формуле (Forstner, Muler, 1981):

$$I_{geo} = \log_2 * (C_i / 1.5 * C_f),$$

где *C_i* - содержание элемента в исследуемом образце (мг/кг),

C_f - содержание металла в фоновом образце (мг/кг),

1.5 - поправочный коэффициент, учитывающий природные вариации состава почвы.

Суммарный показатель химического загрязнения *Z_c* характеризует степень химического загрязнения почв обследуемой территории тяжелыми металлами и определяется как сумма коэффициентов концентрации *K_c* ($K_c = C_i / C_f$) отдельных компонентов загрязнения по формуле (СанПиН 1.2.3685-21):

$$Z_c = \sum(C_i / C_f + \dots C_i / C_{f_n}) - (n - 1),$$

где *n* - число определяемых компонентов.

Для расчета суммарного показателя загрязнения использовались средние значения содержания подвижных форм тяжелых металлов в профилях исследованных фоновых почв.

Применение описанных методов позволило обеспечить высокую точность и надежность результатов исследования, а также получить данные, необходимые для дальнейшего анализа закономерностей поведения тяжелых металлов в условиях нефтезагрязненных почв.

Результаты

В исследованных почвах максимальное содержание тяжелых металлов характерно не только для верхних замазученных горизонтов эпицентра загрязнения. Эта закономерность проявляется во всех зонах техногенной нагрузки: в импактной зоне, границе нефтяного пятна (табл. 2).

Таблица 2. Концентрация подвижных форм тяжелых металлов в почвах, мг/кг

Глубина, см	Pb	Zn	Cu	Ni
	ПДК по СанПиН 1.2.3685-21			
	6	23	3	4
Эпицентр загрязнения (№ 1, n = 26)				
0-20	8.75-10.55/	48.85-52.4/	8.6-9.9/	18.8-20.6/
	9.65 ± 0.52	50.63 ± 1.03	9.25 ± 0.38	19.7 ± 0.52
	(CV = 5.4)	(CV = 2.1)	(CV = 4.1)	(CV = 2.6)
Импактная зона (№ 2, n = 26)				
0-20	8.25-11.6/	38.5-48.15/	5-7/	11.05-14.35/
	9.93 ± 0.97	43.33 ± 2.78	6 ± 0.58	12.7 ± 0.95
	(CV = 9.7)	(CV = 6.4)	(CV = 9.6)	(CV = 7.5)
Граница загрязнения (№ 3, n = 25)				
0-20	6.3-7.5/	21.2-25.45/	3.85-5.45/	7.9-9.25/
	6.9 ± 0.35	23.33 ± 1.22	4.65 ± 0.46	8.58 ± 0.39
	(CV = 5.1)	(CV = 5.2)	(CV = 9.9)	(CV = 4.5)
Фон (№ 4, n = 25)				
0-20	1.15-1.6/	3-4.65/	0.5-1.15/	1.7-4.5/
	1.38 ± 0.13	3.83 ± 0.48	0.83 ± 0.19	3.1 ± 0.8
	(CV = 9.4)	(CV = 12.5)	(CV = 22.8)	(CV = 25.8)
Условный фон (№ 5, n = 25)				
0-20	2.85-3.21/	3.5-5.84/	1.1-2.87/	3.1-5.9/
	3.03 ± 0.1	4.67 ± 0.68	1.99 ± 0.51	4.5 ± 0.81
	(CV = 3.3)	(CV = 14.6)	(CV = 25.6)	(CV = 18.0)

Примечание. * - ПДК не установлены; ** - извлекаемый ацетатно-аммонийным буфером с pH 4.8. Вверху - диапазон стандартное отклонение, в скобках - коэффициент вариации (CV, %).

Для подтверждения наличия закономерностей в распределении концентраций исследуемых подвижных форм тяжелых металлов в связи с изменением содержания $C_{орг}$ и НП рассчитывались коэффициенты корреляции (R). Выявлены парные корреляционные зависимости между отдельными элементами в почвах, что позволяет судить о сходной направленности биогеохимических процессов (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции (R) на глубине 0-20 см

Параметр	Содержание	Корреляционная связь ТМ с содержанием			
		Pb	Zn	Cu	Ni
Эпицентр загрязнения (№ 1, n = 26)					
НП, г/100 г почвы	2.94-11.41/	0.94	0.83	0.95	0.98
	7.18 ± 2.45				
Сорг, %	12.95-58.58	1	0.84	0.91	1
	35.77 ± 13.16				
Импактная зона (№ 2, n = 26)					
НП, г/100 г почвы	3.26-9.79/	0.83	0.8	0.9	0.88
	6.53 ± 1.88				
Сорг, %	9.03-47.74/	1	0.88	0.88	0.98
	28.39 ± 11.15				
Граница загрязнения (№ 3, n = 25)					
НП, г/100 г почвы	4.85-7.72/	0.8	0.74	0.78	0.82
	6.29 ± 0.82				
Сорг, %	1.66-9.49/	1	0.78	0.75	0.9
	5.58 ± 2.26				

Примечание. Над чертой - диапазон данных: lim = min-max, под чертой - среднее ± стандартное отклонение.

Индекс геоаккумуляции (Igeo) и суммарный показатель загрязнения (Zc) являются важными инструментами для оценки степени загрязнения почв и донных отложений. Их расчет позволяет получить количественную характеристику экологического состояния исследуемой территории и выявить

источники загрязнения. Согласно полученным данным, аварийные разливы нефти способствуют техногенному приносу всех исследованных подвижных форм ТМ (табл. 4).

Таблица 4. Индексы загрязнения почв (по среднему значению)

Параметр	Глубина, см	Pb	Zn	Cu	Ni
		Ci (Условный фон (№ 5), средние значения)			
		3.03	4.67	1.99	4.5
		Эпицентр загрязнения (n = 26)			
Cf	0-20	9.65	50.63	9.25	19.7
Zc	0-20			36.86	
Igeo	0-20	1.09	2.85	1.63	1.55
		Импактная зона (n = 26)			
Cf	0-20	9.93	43.33	6.6	12.7
Zc	0-20			29.15	
Igeo	0-20	1.13	2.63	1.01	0.91
		Граница загрязнения (n = 25)			
Cf	0-20	6.9	23.33	4.65	8.58
Zc	0-20			17.89	
Igeo	0-20	0.60	1.74	0.64	0.35

Значения индекса геоаккумуляции отражают в первую очередь степень вовлеченности элементов и долю техногенной нагрузки относительно фоновое содержания.

Анализ содержания подвижных форм тяжелых металлов в верхнем горизонте (0-20 см) нефтезагрязненных почв среднетаежной подзоны Западной Сибири выявил существенное превышение концентраций этих элементов над предельно допустимыми значениями. Полученные данные подтверждают значительное техногенное воздействие, изменяющее химический состав и экологическое состояние почвенного покрова.

Свинец (Pb). Средняя концентрация свинца в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения в 7 раз. Высокая вариативность концентраций в импактной зоне загрязнения (9.93 мг/кг) указывает на неравномерное распределение загрязнения, что может быть связано с точечными выбросами или различиями в сорбционной способности почв.

Цинк (Zn). Концентрация цинка в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения более чем в 13 раз. Стандартное отклонение относительно небольшое, что говорит о стабильном уровне загрязнения. Источником может быть как нефтяное загрязнение, так и техногенные выбросы, связанные с обработкой металлов (работы ремонтно-механических мастерских в ближайших производственных зонах).

Медь (Cu). Средняя концентрация меди в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения более чем в 11 раз. Низкая вариативность данных в зоне загрязнения указывает на равномерное распределение меди, что может быть связано с устойчивостью ее соединений в почвенном горизонте.

Никель (Ni). Концентрация никеля в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения в 6.4 раза. Значительные колебания стандартного отклонения в зоне фона и условного фона могут быть связаны с природной вариативностью содержания никеля в почвах и низкой сорбционной способностью почвы в данных участках.

Ванадий (V). Средняя концентрация ванадия в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения в 8.7 раза. Умеренная вариативность данных в загрязненных зонах может быть связана с неравномерным распределением нефтяных остатков, содержащих ванадий.

Марганец (Mn). Концентрация марганца в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения в 8.4 раза. Небольшое стандартное отклонение в эпицентре загрязнения свидетельствует о стабильном источнике поступления марганца, что может быть связано с окислительно-восстановительными процессами, активируемыми нефтезагрязнением.

Полученные данные подтверждают значительное техногенное воздействие, изменяющее природный химический состав почвенного покрова. В сравнении с гигиеническими нормативами, на глубине 0-20 см в 100.0 % случаев почвы загрязнены тяжелыми металлами. Исследование показало, что доля тяжелых металлов по кратности превышений ПДК согласно СанПиН 1.2.3685-21 (2021) и фоновых значений в нефтезагрязненных почвах убывает в следующем ряду: V > Mn > Ni > Cu > Pb > Zn.

Почвы, загрязненные нефтепродуктами, характеризуются изменением содержания тяжелых металлов и органического углерода, что связано с комплексными химическими и физическими

процессами. В эпицентре загрязнения среднее содержание нефтепродуктов составляет 7.18 г/100 г почвы, а органического углерода (Сорг) – 35.77 %. Наблюдаются сильные положительные корреляции между тяжелыми металлами и НП, особенно для ванадия и марганца ($R = 1.0$), что свидетельствует о возможной адсорбции этих металлов углеводородными фракциями нефти. Аналогичная связь наблюдается между содержанием ТМ и Сорг с коэффициентами корреляции до 1.0 (Pb, Ni, Mn), что указывает на стабилизацию ТМ органической матрицей почвы.

В импактной зоне среднее содержание НП составляет 6.53 г/100 г почвы, а Сорг – 28.39 %. Корреляционные связи между ТМ и НП остаются высокими, но несколько снижаются ($R = 0.9$ для Cu и 0.88 для Ni), что может быть связано с уменьшением содержания нефти. На границе загрязнения среднее содержание НП составляет 6.29 г/100 г почвы, а Сорг – 5.58 %. Корреляции между ТМ и НП заметно ослабевают ($R = 0.74-0.85$), что может быть обусловлено снижением адсорбционных свойств почвы.

На границе загрязнения (№ 3, $n = 25$) среднее содержание НП составляет 6.29 г/100 г почвы, а Сорг – 5.58 %. Между ТМ и НП корреляции заметно снижаются ($R = 0.74-0.85$), что может быть связано с уменьшением адсорбционных свойств почвы из-за снижения содержания НП. Ослабевают, но остается заметной связь между ТМ и Сорг ($R = 0.9$ для Ni, 0.79 для V), что подтверждает важность органического углерода в удержании металлов. Общее снижение НП и Сорг приводит к меньшей фиксации ТМ, что увеличивает их подвижность.

Полученные закономерности могут быть экстраполированы на другие нефтезагрязненные почвы среднетаежной подзоны Западной Сибири с аналогичными характеристиками (тип почв, уровень загрязнения, содержание органического углерода). Применимость за пределами этого региона ограничена из-за различий в почвенных свойствах, климатических условиях и источниках загрязнения. Закономерность применима для верхнего горизонта почв (0–20 см). Экстраполяция на более глубокие горизонты требует дополнительных исследований, т. к. процессы миграции и сорбции ТМ могут отличаться. Закономерности справедливы для почв, загрязненных нефтепродуктами, с высоким содержанием органического углерода. Для других типов загрязнения (например, промышленные выбросы, сельскохозяйственные химикаты) экстраполяция может быть некорректной.

Для оценки уровня загрязнения почв использован коэффициент геоаккумуляции (Igeo), который позволяет определить степень техногенного влияния. В эпицентре загрязнения значения Igeo варьируют от 1.09 (Pb) до 2.85 (Zn). Наибольший вклад в загрязнение вносят Zn и Mn, что связано с их высокими концентрациями относительно фона. В данной зоне Zn и Mn характеризуются умеренно сильным загрязнением, а остальные элементы – умеренным. В импактной зоне значения Igeo варьируют от 1.01 (Cu) до 2.63 (Zn). Основной вклад в загрязнение вносят Zn, Mn и V. Уровень загрязнения большинства элементов снижается по сравнению с эпицентром, что указывает на уменьшение техногенного воздействия. На границе загрязнения значения Igeo колеблются от 0.35 (Ni) до 1.74 (Zn). Загрязнение всех элементов снижается, а концентрации приближаются к условно-фоновым уровням (№ 5). Все элементы характеризуются низким (до умеренного) уровнем загрязнения, что соответствует переходной зоне.

Величины индекса снижаются от эпицентра к границе, что ожидаемо, т. к. концентрации загрязняющих веществ уменьшаются по мере удаления от источника загрязнения. Для элементов Zn, Mn и V наблюдается устойчиво высокий вклад в загрязнение.

Суммарный индекс загрязнения показывает совокупное воздействие всех элементов, сравнивая их концентрации с фоновыми уровнями. В эпицентре загрязнения значение $Z_c = 36.86$ указывает на экстремально высокое загрязнение (более 30). В импактной зоне $Z_c = 29.15$ уровень загрязнения высокий, но ниже, чем в эпицентре.

На границе загрязнения ($Z_c = 17.89$) уровень загрязнения средний (от 10 до 20). Загрязнение все еще выше нормы, но уже не угрожает экосистеме. Вклад элементов Zn, Mn и V все еще существенен, но снижается.

Значения Z_c демонстрируют закономерное уменьшение по мере удаления от эпицентра. Все зоны находятся в диапазоне загрязнения, который требует мониторинга и мероприятий по снижению техногенной нагрузки.

Таким образом, элементы Zn, Mn и V демонстрируют устойчиво высокие значения Igeo и Z_c , что связано с их повышенной техногенной активностью.

Загрязнение уменьшается с удалением от эпицентра, что подтверждает локальный характер источника загрязнения. В эпицентре загрязнения наблюдается высокая экологическая опасность $Z_c > 30$. Импактную зону можно охарактеризовать как опасное загрязнение, а загрязнение на границе

нефтяного пятна – умеренное.

Обсуждение

Проведенное исследование выявило значительное влияние нефтяного загрязнения на содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах среднетаежной подзоны Западной Сибири. Полученные результаты согласуются с данными других исследований, посвященных изучению взаимосвязи между загрязнением ТМ и нефтепродуктами. Однако наблюдаются и некоторые различия, обусловленные спецификой региона, характером загрязнения и свойствами почв.

Результаты исследования показали, что в нефтезагрязненных почвах концентрации ТМ значительно превышают фоновые значения и предельно допустимые концентрации. Это согласуется с данными, полученными в работах Kabata-Pendias, Pendias (2011), Alloway (2013), где также отмечается увеличение содержания ТМ в почвах, загрязненных нефтью. Например, в исследовании Alloway (2013) было установлено, что нефтяное загрязнение способствует накоплению таких элементов, как ванадий (V), никель (Ni) и марганец (Mn), что объясняется их высокой аффинностью к органическим соединениям, содержащимся в нефти. В нашем исследовании также выявлено значительное увеличение концентраций V, Ni и Mn в эпицентре загрязнения, что подтверждает их связь с нефтяными остатками.

Однако в отличие от работ Adriano (2001) и Smith (2009), где основное внимание уделялось свинцу (Pb) и кадмию (Cd), в рамках проведенного исследования повышенная вариативность содержания свинца (Pb) и никеля (Ni) может быть вызвана точечным характером техногенных источников загрязнения и локальными особенностями почвы (сорбционной способностью, уровнем влажности, pH). Относительно стабильные стандартные отклонения для Zn, Cu и Mn указывают на постоянный источник загрязнения, связанный с техногенными выбросами. Ванадий (V) и марганец (Mn) демонстрируют умеренные отклонения, что может быть связано с их химическими свойствами: ванадий сорбируется органическими веществами, а марганец активно участвует в редокс-реакциях. Наибольшее превышение ПДК наблюдалось для ванадия (V) и марганца (Mn). Это может быть связано с региональными особенностями состава нефти и почв, а также с различиями в методах отбора проб и анализа.

Сильные корреляции между ТМ и НП в эпицентре загрязнения свидетельствуют о механизмах комплексообразования и физической сорбции. Снижение корреляций в импактной зоне и на границе загрязнения связано с уменьшением содержания НП и Сорг, что ослабляет фиксацию ТМ и увеличивает их подвижность. Полученные результаты согласуются с данными исследований Yang et al. (2017, 2021), Man et al. (2022), где также отмечается, что углеводородные фракции нефти способствуют адсорбции и стабилизации ТМ в почве. В работе Ruan et al. (2023) показано, что органические соединения нефти образуют комплексы с металлами, снижая их подвижность и способствуя их накоплению в верхних горизонтах почвы.

Однако в импактной зоне и на границе загрязнения наблюдалось ослабление корреляционных связей, что может быть связано с уменьшением содержания НП и органического углерода (Сорг). Это согласуется с выводами работы Водяницкого и др. (2009), где отмечается, что снижение концентрации НП приводит к уменьшению сорбционной способности почвы и увеличению подвижности ТМ. Таким образом, полученные данные подтверждают важную роль органического вещества в удержании ТМ в нефтезагрязненных почвах.

Результаты расчета индекса геоаккумуляции (Igeo) и суммарного показателя загрязнения (Zc) показали, что наиболее значительный вклад в загрязнение вносят Zn, Mn и V. Это согласуется с данными работы Девятовой и др. (2022), где также отмечается высокая техногенная активность этих элементов в нефтезагрязненных почвах. Однако в отличие от исследования Wang et al. (2012), где основное внимание уделялось Cu и Pb, в нашем случае эти элементы имели меньший вклад в общее загрязнение.

Закономерное уменьшение значений Igeo и Zc по мере удаления от эпицентра загрязнения подтверждает локальный характер источника загрязнения, что согласуется с выводами работы Yang et al. (2017, 2021). В то же время, в отличие от исследования Tozser et al. (2023), где уровень загрязнения оставался высоким даже на значительном расстоянии от источника, на исследованных почвах наблюдалось снижение Zc до умеренного уровня. Это может быть связано с особенностями распределения нефтяных остатков и свойствами почв.

Полученные данные подчеркивают необходимость разработки и применения комплексных мероприятий по рекультивации нефтезагрязненных почв. В частности, для зон с экстремально высоким уровнем загрязнения ($Zc > 30$) требуется проведение мероприятий по снижению токсичности почв и восстановлению их экологических функций.

Таким образом, результаты исследования подтверждают значительное влияние нефтяного загрязнения на содержание и распределение ТМ в почвах. Выявленные закономерности согласуются с данными других исследований, но имеют свои особенности, обусловленные региональными условиями. Полученные данные указывают на необходимость дальнейшего изучения механизмов взаимодействия ТМ и НП, а также разработки эффективных методов рекультивации загрязненных территорий.

Заключение

Анализ корреляционных связей показал, что содержание нефти и органического углерода почв оказывает значительное влияние на распределение подвижных форм ТМ в почвах. В эпицентре загрязнения высокие корреляционные связи обусловлены значительной концентрацией органического углерода, который формирует устойчивые комплексы с тяжелыми металлами. По мере удаления от эпицентра корреляционные связи ослабевают, что связано с уменьшением содержания НП и Сорг. Вещества с высоким содержанием органики (НП и Сорг) увеличивают сорбцию ТМ за счет комплексообразования и физической фиксации, а уменьшение концентрации органического вещества приводит к повышению подвижности тяжелых металлов.

Полученные данные указывают на значительное превышение норм содержания ТМ в верхнем слое почв в зонах нефтяного загрязнения. Накопление ТМ оказывает токсическое воздействие на почвенную микрофлору, замедляет биodeградацию углеводов и ухудшает условия для естественного восстановления почв. Наибольшее внимание следует уделить свинцу, меди и ванадию, поскольку их накопление в верхнем горизонте наиболее выражено.

Для снижения токсичности почв рекомендуется использовать методы химической стабилизации (например, внесение цеолитов или фосфатов), которые снижают подвижность металлов. Метод будет более эффективен совместно с посевом растений-аккумуляторов (*Lupinus polyphyllus*, *Salix spp.*) для извлечения металлов из почвы. Во время проведения восстановительных мероприятий необходимо проводить систематическое наблюдение на основе корреляционных связей между содержанием органического вещества и ТМ для более точного прогнозирования загрязнения.

Библиография

Водяницкий Ю. Н., Васильев А. А., Лобанова Е. С. Загрязненность тяжелыми металлами и металлоидами почв г. Пермь [Contamination of Perm city soils by heavy metals and metalloids] // Агрoхимия. 2009. № 4. С. 60–68.

Геннадиев А. Н. Нефть и окружающая среда [Oil and the environment] // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2016. № 6. С. 30–39.

ГОСТ 17.4.4.02–84. Охрана природы. Почвы. Методы определения содержания загрязняющих веществ [Nature protection. Soils. Methods for determining the content of pollutants]. М.: Государственный комитет СССР, 1984. 15 с.

ГОСТ 26213–91. Почвы. Методы определения органического вещества [Soils. Methods for the determination of organic matter]. М.: Государственный комитет СССР, 1992. 7 с.

ГОСТ Р 57447–2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация земель и земельных участков, загрязненных нефтью и нефтепродуктами [Best available technologies. Reclamation of lands and land plots contaminated with oil and oil products]. М.: Стандартинформ, 2017. 32 с.

ГОСТ Р 59057–2020. Охрана окружающей среды. Земли. Общие требования по рекультивации нарушенных земель [Environmental protection. Lands. General requirements for the reclamation of disturbed lands]. М.: Стандартинформ, 2020. 24 с.

Девятова Т. А., Горбунова Н. С., Горбунова Ю. С., Гафар Х. Г. Распределение тяжелых металлов и бенз(а)пирена в нефтезагрязненных почвах города Кайяра (Ирак) [Distribution of metals and benzo(a)pyrene in oil-contaminated soils of the city of Qayyara (Iraq)] // АгрoЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. 2022. № 1. DOI: <https://doi.org/10.51419/202121116>.

Орлов Д. С., Садовникова Л. К., Лозановская И. Н. Экология и охрана биосферы при химическом

Носова М. В., Середина В. П., Стовбунник С. А. Геохимическая оценка распределения подвижных форм тяжелых металлов в нефтесеконгрязненньх аллювиальных почвах среднетаетежной подзоны Западной Сибири // Принципы экологии. 2025. Т. 17. № 1. С. 3–2.

загрязнению [Ecology and biosphere protection under chemical pollution] / Под общ. ред. Д. С. Орлова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2002. 334 с.

ПНД Ф 16.1:2.21–98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости Флюорат-02 [Methodology for measuring the proportion of petroleum products in soil samples by the fluorimetric method using a Fluorat-02 liquid analyzer]. М.: Федеральное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1998. 31 с.

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. М.: Роспотребнадзор, 2021. 192 с.

Середина В. П., Андреева Т. А., Алексеева Т. П., Бурмистрова Т. И., Терещенко Н. Н. Нефтесеконгрязненные почвы: свойства и рекультивация [Oil-polluted soils: properties and reclamation]. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 270 с.

Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификации и диагностика почв России [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Adriano D. C. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. 2nd Edition. New York: Springer, 2001. 867 p.

Alloway B. J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Dordrecht: Springer, 2013. 614 p.

Du C. W., Yu Y. J. Distribution of heavy metals in the soils of the mining area in Western Liaoning Province // International Journal of Environmental Research. 2012. P. 31–33.

Forstner U., Muler G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man’s influence and environmental impact // Geojournal. 1981. Vol. 5. P. 417–432.

Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. (4th ed.). Boca Raton: CRC Press, 2011. 520 p.

Man J., Zeng L., Luo J., Gao W., Yao Y. Application of the deep learning algorithm to identify the spatial distribution of heavy metals at contaminated sites // ACS EST Engg. 2022. Vol. 2 (2). P. 158–168. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00224>

McBride M. B. Reactions controlling heavy metal solubility in soils // Advances in Soil Science. 1989. Vol. 10. P. 1–57.

Olujimi O. O., Fatoki O. S., Oputu O., Opeolu B. O. Heavy metals in environment: Distribution and their influence on environmental pollution // Environmental Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21, № 13. P. 7981–7988.

Ruan X., Ge S., Jiao Z., Zhan W., Wang Y., Bioaccumulation and risk assessment of potential toxic elements in the soil-vegetable system as influenced by historical wastewater irrigation // Agric. Water Manag. 2023. Vol. 279. P. 108197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023>

Smith S. R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge // Environment International. 2009. Vol. 35, № 1. P. 142–156.

Tozser D., Sipos B., Tothmeresz B., Simon E. Heavy Metal Pollution of Soil in Vienna, Austria Dina Bibi // Water Air Soil Pollut. 2023. Vol. 234 (232). P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06244-5>

Wang J., Zheng Y. A., Wang A. Effect of kapok fiber treated with various solvents on oil absorbency // Industrial Crops and Products. 2012. Vol. 40 (1). P. 178–184.

Носова М. В., Середина В. П., Стовбуник С. А. Геохимическая оценка распределения подвижных форм тяжелых металлов в нефтезагрязненных аллювиальных почвах среднетаежной подзоны Западной Сибири // Принципы экологии. 2025. Т. 17. № 1. С. 3–2.

World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps // World Soil Resources Reports. Rome: FAO, 2022. № 106. P. 181.

Yang H., Huang K., Zhang K., Weng Q., Zhang H., Wang F. Predicting heavy metal adsorption on soil with machine learning and mapping global distribution of soil adsorption capacities // Environ. Sci. Technol. 2021. Vol. 55 (21). P. 14316–14328. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02479>

Yang Z., Dong C., Chen C., Sheu Y., Kao C. Using polyglutamic acid as soil-washing agent to remediate heavy metal-contaminated soils // Environ. Sci. Pollut. 2017. Vol. 25. P. 5231–5242. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9235-7>

Geochemical assessment of the distribution of mobile forms of heavy metals in oil-contaminated alluvial soils of the middle taiga subzone of Western Siberia

**NOSOVA
Maria**

Ph.D., JSC TomskNIPIneft, nsmvsh@mail.ru

**SEREDINA
Valentina**

D.Sc., professor, National Research Tomsk State University, seredina_v@mail.ru

**STOVBUNIK
Sergey**

JSC TomskNIPIneft, StovbunikSA@tomsknipi.ru

Keywords:

heavy metals
mobile forms
oil pollution
geoaccumulation coefficient
total pollution index
reclamation methods
environmental impact

Summary:

The article considers the content of mobile forms of heavy metals (HM) in oil-contaminated soils of the middle taiga subzone of Western Siberia. The studies were conducted for the upper soil horizons (0–20 cm) in various zones of anthropogenic impact (epicenter, impact zone, zone boundary) and in the background areas. The analysis results showed a significant excess of HM concentrations over the maximum permissible values (MPC) established by SanPiN 1.2.3685–21, as well as over background levels in oil-contaminated soils. The content of mobile forms of HM in the anthropogenic impact zone decreases in the following order: V > Mn > Ni > Cu > Pb > Zn. In the course of the work, correlations between the content of mobile forms of HM, organic carbon (Corg) and petroleum products (PP) were calculated, and the geo-accumulation coefficient (Igeo) and the total index of soil pollution (Zc) were determined. It was established that Zc values decrease naturally with distance from the pollution epicenter. All the studied zones are in the pollution range that requires monitoring and measures to reduce the anthropogenic impact. The elements Zn, Mn and V demonstrate consistently high Igeo and Zc values, which is associated with their increased technological activity. The revealed patterns emphasize the need to develop and implement comprehensive environmental protection measures to restore the ecological state of contaminated soils.

References

- Adriano D. C. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. 2nd Edition. New York: Springer, 2001. 867 p.
- Alloway B. J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Dordrecht: Springer, 2013. 614 p.
- Best available technologies. Reclamation of lands and land plots contaminated with oil and oil products. M.: Standartinform, 2017. 32 p.
- Devyatova T. A. Gorbunova N. S. Gorbunova Yu. S. Gafar H. G. Distribution of metals and benzo(a)pyrene in oil-contaminated soils of the city of Qayyara (Iraq), AgroEkolInfo: Elektronnyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal. 2022. No. 1. DOI: <https://doi.org/10.51419/202121116>.
- Du C. W., Yu Y. J. Distribution of heavy metals in the soils of the mining area in Western Liaoning Province,

Nosova M., Seredina V., Stovbunik S. Geochemical assessment of the distribution of mobile forms of heavy metals in oil-contaminated alluvial soils of the middle taiga subzone of Western Siberia // *Principy èkologii*. 2025. Vol. 17. № 1. P. 3–2.

International Journal of Environmental Research. 2012. P. 31–33.

Environmental protection. Lands. General requirements for the reclamation of disturbed lands. M.: Standartinform, 2020. 24 p.

Forstner U., Muler G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact, *Geojournal*. 1981. Vol. 5. R. 417–432.

Gennadiyev A. N. Oil and the environment, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2016. No. 6. P. 30–39.

Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. M.: Rospotrebnadzor, 2021. 192 p.

Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. (4th ed.). Boca Raton: CRC Press, 2011. 520 p.

Man J., Zeng L., Luo J., Gao W., Yao Y. Application of the deep learning algorithm to identify the spatial distribution of heavy metals at contaminated sites, *ACS EST Engg*. 2022. Vol. 2 (2). R. 158–168. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00224>

McBride M. B. Reactions controlling heavy metal solubility in soils, *Advances in Soil Science*. 1989. Vol. 10. P. 1–57.

Methodology for measuring the proportion of petroleum products in soil samples by the fluorimetric method using a Fluorat-02 liquid analyzer. M.: Federal'noe upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushey sredy, 1998. 31 p.

Nature protection. Soils. Methods for determining the content of pollutants. M.: Gosudarstvennyy komitet SSSR, 1984. 15 p.

Olujimi O. O., Fatoki O. S., Oputu O., Opeolu B. O. Heavy metals in environment: Distribution and their influence on environmental pollution, *Environmental Science and Pollution Research*. 2014. Vol. 21, No. 13. P. 7981–7988.

Orlov D. S. Sadovnikova L. K. Lozanovskaya I. N. Ecology and biosphere protection under chemical pollution, *Pod obsch. red. D. P. Orlova. 2-e izd., pererab. i dop.* M.: Vysshaya shkola, 2002. 334 p.

Ruan X., Ge S., Jiao Z., Zhan W., Wang Y., Bioaccumulation and risk assessment of potential toxic elements in the soil-vegetable system as influenced by historical wastewater irrigation, *Agric. Water Manag.* 2023. Vol. 279. R. 108197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023>

Seredina V. P. Andreeva T. A. Alekseeva T. P. Burmistrova T. I. Tereschenko N. N. Oil-polluted soils: properties and reclamation. Tomsk: Izd-vo TPU, 2006. 270 p.

Shishov L. L. Tonkonogov V. D. Lebedeva I. I. Gerasimova M. I. Classification and diagnostics of soils in Russia. Smolensk: Oykumena, 2004. 342 p.

Smith S. R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge, *Environment International*. 2009. Vol. 35, No. 1. R. 142–156.

Soils. Methods for the determination of organic matter. M.: Gosudarstvennyy komitet SSSR, 1992. 7 p.

Tozser D., Sipos B., Tothmeresz B., Simon E. Heavy Metal Pollution of Soil in Vienna, Austria Dina Bibi, *Water Air Soil Pollut.* 2023. Vol. 234 (232). P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06244-5>

Vodyanickiy Yu. N. Vasil'ev A. A. Lobanova E. S. Contamination of Perm city soils by heavy metals and metalloids, *Agrohimiya*. 2009. No. 4. P. 60–68.

Nosova M., Seredina V., Stovbunik S. Geochemical assessment of the distribution of mobile forms of heavy metals in oil-contaminated alluvial soils of the middle taiga subzone of Western Siberia // *Principy èkologii*. 2025. Vol. 17. № 1. P. 3–2.

Wang J., Zheng Y. A., Wang A. Effect of kapok fiber treated with various solvents on oil absorbency, *Industrial Crops and Products*. 2012. Vol. 40 (1). P. 178-184.

World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, *World Soil Resources Reports*. Rome: FAO, 2022. No. 106. P. 181.

Yang H., Huang K., Zhang K., Weng Q., Zhang H., Wang F. Predicting heavy metal adsorption on soil with machine learning and mapping global distribution of soil adsorption capacities, *Environ. Sci. Technol.* 2021. Vol. 55 (21). P. 14316–14328. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02479>

Yang Z., Dong C., Chen C., Sheu Y., Kao C. Using polyglutamic acid as soil-washing agent to remediate heavy metal-contaminated soils, *Environ. Sci. Pollut.* 2017. Vol. 25. P. 5231–5242. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9235-7>