

Научная статья

УДК 631.4

DOI: 10.15372/KhUR2025637

EDN: VAXYUN

Исследование свойств, определяющих восприимчивость почв криолитозоны к загрязнению нефтепродуктами

В. А. АНДРОХАНОВ¹, Д. А. СОКОЛОВ^{1,2} , Е. А. ГУРКОВА¹, Г. В. ЕРМАКОВА¹, И. Н. ГОССЕН¹, Н. А. СОКОЛОВА¹

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

²Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики – филиал ФИЦ КНЦ СО РАН, Норильск, Россия

E-mail: androhanov@issa-siberia.ru, sokolovdenis@mail.ru , gurkova@issa-siberia.ru, shgv95@mail.ru, gossen@issa-siberia.ru, nsokolova@issa-siberia.ru

Аннотация

В настоящее время в связи с активным освоением Российской Арктики все больше актуализируются вопросы, связанные с предотвращением и ликвидацией последствий нарушения хрупких экосистем Севера. В первую очередь внимание заслуживают почвы. С одной стороны, почвы являются базисом любой наземной экосистемы, с другой – в суровых условиях Крайнего Севера их самовосстановление происходит медленно, а эффективные рекультивационные мероприятия затратны. Работа посвящена одной из наиболее распространенных экологических проблем, характерных для северных территорий Сибири, загрязнению почв нефтепродуктами. Исследованы свойства наиболее распространенных в криолитозоне автоморфных и гидроморфных органогенных, суглинистых, каменистых, песчаных и супесчаных почв. Отмечено, что среди свойств почв наибольшую роль в процессах закрепления нефтепродуктов играют содержание общего углерода и емкость катионного обмена, в то время как повышенная плотность почв препятствует внедрению и аккумуляции нефтепродуктов. На основе анализа литературных данных и статистической обработки собственных материалов предложены рекомендации по ремедиации почв участков, загрязненных нефтепродуктами в различной степени.

Ключевые слова: мерзлотные почвы, органические загрязнители, нефтепродукты, Сибирь, самоочищение почв, рекультивация, нефтезагрязнение, Арктика

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственных заданий Института почвоведения и агрохимии СО РАН (проект № 121031700316-9) и Научно-исследовательского института сельского хозяйства и экологии Арктики – филиала ФИЦ КНЦ СО РАН (проект № 125020501490-7).

Для цитирования: Андроханов В. А., Соколов Д. А., Гуркова Е. А., Ермакова Г. В., Госсен И. Н., Соколова Н. А. Исследование свойств, определяющих восприимчивость почв криолитозоны к загрязнению нефтепродуктами // Химия в интересах устойчивого развития. 2025. Т. 33, № 2. С. 145–156. DOI: 10.15372/KhUR2025637. EDN: VAXYUN.

Original article

Study of properties determining the susceptibility of cryolithozone soils to oil pollution

V. A. ANDROKHANOV¹, D. A. SOKOLOV^{1,2} ✉, E. A. GURKOVA¹, G. V. ERMAKOVA¹, I. N. GOSSSEN¹, N. A. SOKOLOVA¹

¹*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

²*Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic – Branch of the Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center”, Norilsk, Russia*

E-mail: androhanov@issa-siberia.ru, sokolovdenis@mail.ru ✉, gurkova@issa-siberia.ru, shgv95@mail.ru, gossen@issa-siberia.ru, nsokolova@issa-siberia.ru

Abstract

At present, in connection with the active development of the Russian Arctic, issues related to prevention and elimination of the consequences caused by disturbances of vulnerable northern ecosystems are becoming increasingly urgent. Soils deserve attention on the first-priority basis. On the one hand, soils are the basis of any terrestrial ecosystem, on the other hand, under the harsh conditions of the Far North, their self-restoration is slow, and effective reclamation measures are costly. In the work, the most common environmental problem of the northern territories of Siberia is considered: the pollution of soils with oil products. The properties of automorphous and hydromorphous organogenic, loamy, stony, sandy, and sandy loam soils widely occurring in the cryolithozone are investigated. It is noted that among soil properties, the greatest role in the fixation of oil products is played by total carbon content and cation exchange capacity, while the increased density of soils prevents the introduction and accumulation of oil products. Based on the analysis of literature data and statistical processing of own materials, recommendations on soil remediation at the sites contaminated with oil products to different extents are proposed.

Keywords: frozen soils, organic pollutants, oil products, Siberia, soil self-purification, remediation, oil pollution, the Arctic

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние наземных экосистем Арктики в значительной мере зависит, с одной стороны, от климатических изменений, с другой – от антропогенного воздействия [1–3]. Глобальный климатический тренд особенно заметен в криолитозоне, отражаясь на росте среднегодовых температур и увеличении мощности сезонно-талого слоя [4–9]. Деградация мерзлоты приводит к ухудшению инженерно-геологических условий на промышленных площадках, снижению устойчивости грунтов и надежности объектов промышленности и социальной инфраструктуры, повышению риска техногенных аварий и увеличению площадей антропогенного загряз-

нения [4, 10–12]. Один из наиболее распространенных видов загрязнения, влекущий негативные последствия как естественных экосистем Крайнего Севера, так и для человека, – разлив нефти и нефтепродуктов (НП).

Наиболее распространенные НП – нефтяные жидкие топлива и масла, которые широко применяются в промышленном производстве, на транспорте и других сферах деятельности [13, 14]. Однако их использование связано с высоким риском загрязнения водных объектов и наземных экосистем в результате аварий и утечек из топливных хранилищ и трубопроводов [15–19]. Нефтяные топлива и масла имеют различные показатели вязкости, нерастворимы в воде и образуют эмульсии, поэтому в случае разливов

либо растекаются по поверхности, либо слабо просачиваются в почвы, обволакивая корни растений, почвенные агрегаты и поры [20–22]. Нефтезагрязненные почвы токсичны для растений [23–25] и микроорганизмов [26–30], свойства самих почв претерпевают трансформации [30–32]. При этом проблема очистки почв от НП стоит остро, поскольку, с одной стороны, удаление их из почв достаточно затруднительно, а с другой стороны, в условиях криолитозоны период, в течение которого компоненты НП могут испаряться и подвергаться микробиологической деструкции, очень короткий [33, 34]. С учетом этих обстоятельств актуальным представляется не только разработка эффективных мероприятий по очистке и рекультивации загрязненных почв, но и оценка потенциала почв к самоочищению.

Цель настоящей работы – оценка свойств почв, лимитирующих или стимулирующих закрепление нефтепродуктов (топлив и масел), и их влияние на эффективность рекультивационных мероприятий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Район и объекты исследования

Исследовались почвы нефтезагрязненных участков, расположенных на севере Западной (Ямало-Ненецкий автономный округ) и Восточной Сибири (юго-западная часть Таймырского (Долгано-Ненецкого) автономного округа). Общим для такого обширного района является обилие речных долин крупных и мелких водотоков. Поэтому район исследований представляет собой разной степени расчлененные равнины, с неярко выраженными долинами и возвышенностями, чередующимися с низкими останцовыми массивами в восточной части (правобережье р. Енисей). Общий уклон поверхности направлен к северу, северо-западу. Долины выполнены как песчаными и суглинистыми, так и каменистыми отложениями, что сказывается на разнородности гранулометрического состава почв [35]. Климат субарктический, среднегодовая температура отрицательная (от -5 до -10 °С), период активных температур (>10 °С) длится 3–4 месяца. Среднегодовая температура почв на глубине 20 см составляет от -6 до 0 °С, глубина прогревания почвы выше 10 °С – не более 20–30 см. Годовое количество атмосферных осадков – 400–500 мм, максимум приходится на вторую половину лета и начало осени. Величина испаряемости более

чем на 25 % меньше суммы осадков [16]. Район исследований относится к зоне сплошного и островного распространения мерзлых пород, глубина оттаивания не превышает 1–1.5 м. Вследствие этого территория в значительной степени обводнена, переувлажнена, здесь много рек, ручьев, озер, заболоченных участков. Растительность представлена тундровыми и лесотундровыми биогеоценозами, пойменными лугами с кустарником, осоковыми, сфагновыми болотами, с редкостойными лиственничными лесами [35–38]. В составе почвенного покрова значительную долю занимают почвы речных долин, приозерных низменностей, заболоченных урочищ – аллювиальные, глеевые, торфяные почвы. Автоморфные позиции занимают лесные почвы – подбуры и подзолы, а также мерзлотные почвы – криоземы и криометаморфические почвы. Почвы криолитозоны характеризуются малой мощностью профиля и генетических горизонтов по причине близкого залегания многолетнемерзлых пород (30–70 см) или горизонта грунтовых вод (в поймах водотоков).

В качестве объектов исследования выбраны распространенные в криолитозоне автоморфные и гидроморфные почвы [39, 40], которые в результате разливов нефтепродуктов (дизельного топлива и бензина) были подвергнуты однократному краткосрочному загрязнению.

Отбор и подготовка проб

За период 2020–2022 гг. изучено 24 разреза почв разного гранулометрического состава (песчаные и супесчаные, суглинистые) с различным содержанием грубообломочного каменистого материала. Отбор проб и последующая пробоподготовка выполнены в соответствии с общепринятыми процедурами (ГОСТ Р 53123-2008). Почвенные пробы отбирались в герметичные полиэтиленовые мешки из слоев 0–5, 5–10 и 10–20 см. Всего исследовано 175 проб.

Лабораторные исследования

Все исследования почв выполнены в лабораториях Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск) по действующим в России стандартным методикам на поверженном оборудовании. Калибровку приборов и контроль точности измерений химических элементов в почвах осуществляли по аттестованным значениям их массовой доли в стандартных образцах почв и растений. Гранулометрический состав, в основном содержание физической глины (ча-

стиц <0.01 мм) (ФГ) в почвах, определяли пипеточным методом, плотность – по ГОСТ 70229-2022. Количество органического углерода ($C_{\text{мор}}$) определяли методом мокрого сжигания при окислении смесью 0.1 моль/л $K_2Cr_2O_7$ в разбавленной H_2SO_4 (1 : 1) при нагревании до 150 °С в сушильном шкафу (ГОСТ 26213-2021). Содержание общего азота ($N_{\text{общ}}$) и общего углерода ($C_{\text{сух}}$) исследовали методом сухого сжигания с помощью CHN-анализатора 2400 Series II (Perkin Elmer, США). Потенциометрическим методом измеряли реакцию среды водной вытяжки при отношении почва/раствор = 1 : 5, за исключением торфянистых почв, где соотношение составляло 1 : 25 (ГОСТ 26423-85). Содержание в почвах нефтепродуктов определяли флуориметрическим методом (ПНД Ф 16.1:2.21-1998 (изд. 2012 г.)). Оценку степени загрязнения почв нефтепродуктами проводили с учетом имеющихся региональных нормативов допустимого остаточного содержания нефти в почве и продуктов ее трансформации на 2-й и 3-й год после загрязнения и/или после проведения рекультивационных и иных восстановительных работ [41]. Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли с помощью пакета программ Microsoft Excel и PAST v2.17. С целью выявления и оценки свойств, оказывающих наибольшее влияние на закрепление нефтепродуктов в почвах, использовался метод главных компонент.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Загрязнение почв нефтепродуктами в результате утечек или разливов имеет наиболее катастрофическое воздействие на почвы как по объемам поступающих загрязнителей, так и по значительной распространенности в пространстве и во временном срезе. При этом степень загрязнения почв НП зависит от специфики взаимодействующих сред: с одной стороны, это количество и состав НП, поступающих в почвы, с другой – физико-химические, физические и биологические свойства почв, испытывающих загрязнение. Условия, в первую очередь климатические, оказывают влияние на интенсивность такого взаимодействия [30, 42].

Свойства почв, так или иначе обуславливающие удаление нефтяных загрязнителей из профиля, в совокупности формируют потенциал самоочищения [13, 36, 43]. При первичном поступлении нефтепродуктов на поверхность почв, их

физические свойства (гранулометрический состав, порозность, плотность, скелетность) влияют на миграцию более легких фракций, оставшихся после испарения, фотодеградаци и первичного окисления более тяжелых фракций НП [13]. Скорость и направление их миграции в профиле почв и далее в ландшафте зависят от наличия сорбционных барьеров (органогенного, хемогенного и др.) и специфики химических свойств (рН, поглощающей способности) [31, 44]. Низкие температуры почв замедляют миграцию, делая НП более вязкими [45, 46]. Поверхность зеркала грунтовых вод останавливает вертикальную миграцию, однако при наличии уклона способствует латеральному перемещению загрязнителей в сторону области разгрузки грунтовых вод, как правило, в поверхностный водоток [47]. Очищение почв от НП протекает также путем деструкции в профиле при непосредственном участии микроорганизмов [48]. Потенциал самоочищения складывается в большей степени за счет тех свойств почв, влияние которых определяется климатическими условиями.

В условиях криолитозоны Российской Арктики интенсивное самоочищение почв от НП и их деструкция микроорганизмами возможны лишь в период полярного дня с продолжительной солнечной инсоляцией, положительными среднесуточными температурами, вегетацией растительности, биологической активностью. Однако распространение многолетнемерзлых грунтов, неблагоприятный температурный режим почв, малая продолжительность периода биологической активности, возможность заморозков ограничивают как скорость миграции компонентов НП в профиле почв, так и их биологическую деструкцию [45]. Следовательно, в условиях криолитозоны основной вклад в потенциал самоочищения почв вносят, главным образом, те свойства почв, которые определяют поведение НП. К ним можно отнести гранулометрический состав, плотность, реакцию среды, а также содержание органического вещества и поглощающую способность.

Гранулометрический состав наиболее консервативное свойство из всех перечисленных, однако загрязнение нефтепродуктами может вызывать изменение соотношений фракций за счет склеивания частиц вязкими веществами [47, 49]. В почвах района исследований соотношение гранулометрических фракций разнообразно и неоднородно. Значительную долю составляет скелетная фракция (размер >1 см). Диапазон значений содержания крупнозема (скелетность, %)

ТАБЛИЦА 1

Характеристики почв криолитозоны в корнеобитаемом слое (0–20 см)

Характеристика	Количество проб	Почвы			
		органогенные (торфяная)	каменистые	суглинистые	песчаные и супесчаные
Скелетность, %	45	0	33.3–82.5 55.3 (57.5)	0.0–18.2 3.4 (0.0)	0.0–13.9 3.5 (1.8)
ФГ (<0.01 мм), %	45	0	0.7–14.3 5.6 (5.0)	6.5–48.6 21.7 (20.1)	4.4–31.9 14.8 (14.2)
Плотность, %	43	0.20–0.25 0.23 (0.25)	0.80–2.10 1.44 (1.40)	0.80–1.80 1.11 (1.10)	0.90–1.71 1.18 (1.10)
C _{сух} , %	45	46.2–52.7 49.3 (50.4)	0.5–2.1 1.0 (0.8)	0.4–3.5 2.0 (2.2)	0.8–3.6 1.5 (1.3)
C _{мок} , %	45	33.1–35.7 34.0 (33.1)	0.7–6.2 3.8 (4.8)	0.1–7.7 2.7 (2.5)	1.0–14.1 3.1 (2.1)
N _{общ} , %	45	1.36–3.04 2.00 (2.40)	0.00–0.16 0.09 (0.10)	0.04–0.26 0.13 (0.13)	0.09–0.60 0.21 (0.10)
C _{сух} /N	45	18.5–45.0 32.9 (24.5)	5.0–12.8 8.6 (9.0)	7.8–18.0 12.8 (12.7)	8.0–14.0 11.52 (11.35)
ЕКО, мг-экв/100 г	45	58.0–120.0 –	11.8–57.8 28.4 (15.6)	15.6–53.6 34.4 (32.4)	11.6–50.0 36.0 (37.0)
pH	45	3.6–4.4 3.9 (3.7)	2.5–8.3 5.1 (4.1)	3.6–7.4 6.4 (6.7)	3.6–7.7 6.8 (7.0)

Примечания. 1. Здесь и в табл. 2: C_{сух} – углерод общий; C_{мок} – углерод органический; N_{общ} – общий азот; C/N – соотношение содержания углерода и азота; ЕКО – емкость катионного обмена; ФГ – физическая глина. 2. В числителе – интервал минимальных и максимальных значений, в знаменателе – среднее значение, в скобках – медиана. 3. Прочерк – нет данных.

варьирует в широких пределах от 0 до 82.5 % (табл. 1). Наиболее каменистые, как правило, аллювиальные почвы, в которых скелетная фракция содержится в большом количестве и увеличивается с глубиной. Песчаные и супесчаные почвы также могут иметь каменистые включения. Они встречаются в нижней части профиля, где их доля достигает 13.9 % (см. табл. 1). В суглинистых почвах в редких случаях также отмечается присутствие камней. Органогенные почвы (торфяные почвы, торфяно-глеоземы и криоземы) не содержат каменистый материал. Такие различия в содержании скелета обусловлены, в первую очередь, разнообразием почвообразующих пород района исследований. Каменистые аллювиальные почвы, как правило, сформированы в прирусловой части пойм рек Восточной Сибири, где аккумулируется дресвяно-галечниковый русловой аллювий. Суглинистые, супесчаные и песчаные аллювиальные почвы преобладают в более спокойных по режиму участках пойм рек и приозерных равнинах, где есть условия для накопления более тонкого материала.

Доля частиц фракции физической глины (<0.01 мм) в мелкоземе изученных почв варьирует в диапазоне от 0.7 до 48.6 % (см. табл. 1). В соответствии с этим почвы в основном харак-

теризуются легким гранулометрическим составом и лишь на отдельных участках – тяжело суглинистые. Минимальное количество мелкозема выявлено в каменистых почвах, доля частиц физической глины в них не превышает 15 %, при среднем содержании 5.6 %. Суглинистые почвы в среднем содержат 21.7 % физической глины, в песчаных и супесчаных почвах – менее 15 %. В органогенных почвах минеральная часть отсутствует.

Основной механизм перемещения НП по профилю почв – гравитационное стекание по каналам миграции, просачивание [21, 49–52]. Гранулометрический состав влияет на глубину проникновения НП в почвенный профиль: в песчаных и глинистых почвах глубина составляет 10–15 и 1–5 см соответственно [53]. Наибольшая глубина просачивания у каменистых почв за счет больших пустот между обломками, а также у органогенных почв за счет низкой плотности и высокой пористости. В процессе просачивания может происходить изменение соотношения гранулометрических фракций за счет процессов коагуляции и диспергации. Имеются сведения об увеличении доли песчаных фракций в супесчаных почвах при их загрязнении нефтепродуктами за счет коагуляции пылева-

тых фракций, а также есть данные о дисперсии и агрегации тонкодисперсных фракций в глинистых почвах [45–49]. В то же время некоторые нефтепродукты (например, дизельное топливо) не адсорбируются глиной, разбухания частиц не происходит [54].

Плотность сложения является характеристикой, весьма важной для оценки опасности вертикальной миграции НП по профилю почв. Чем она выше, тем меньшее количество нефтепродуктов, особенно вязких, проникает вниз по профилю. В изученных почвах значения плотности варьируют в диапазоне 0.20–0.25 г/см³ (см. табл. 1). Наименее плотные – органогенные почвы, за счет отсутствия минеральной части и каменистого материала. Средняя величина плотности таких почв незначительна – 0.23 г/см³. В ряду от каменистых к песчаным и супесчаным почвам интервал значений и средние величины плотности снижаются (см. табл. 1). При этом медианы суглинистых, супесчаных и песчаных почв одинаковы. Плотность каменистых почв имеет высокие значения за счет большого количества обломочного материала. В целом, учитывая данные, можно говорить о неблагоприятных величинах плотности корнеобитаемого слоя изученных почв, при этом рыхлые с поверхности почвы хорошо проницаемы для загрязнителей.

Горизонт аккумуляции органического вещества в почвах представляет собой основной накопитель и барьер для поллютантов – тяжелых металлов, нефти и др. Чем больше мощность горизонта и выше содержание органического вещества, тем более эффективно реализуется барьерная функция почв. В литературных источниках имеются сведения о высоком сорбционном потенциале торфяных почв и черноземов [55, 56]. Углеводороды обладают сродством к органическому веществу почв, в связи с чем хорошо с ним взаимодействуют [57, 58]. Горизонты аккумуляции почвенного органического вещества характеризуются высокой плотностью населения микро- и мезобиоты, которая участвует в биодеструкции нефти [59]. Известны данные об увеличении микробного населения при попадании небольшого количества НП в почвы [13, 60]. В то же время, чем более “зрелое” органическое вещество, тем лучше оно взаимодействует с НП на молекулярном уровне. Более грубое, слабо разложившееся – взаимодействует за счет механической сорбции [55].

Изученные нами почвы, в целом, отличаются малой мощностью горизонта аккумуляции почвенного органического вещества – от 2 до 12 см. Максимальная мощность горизонта характерна для суглинистых и супесчаных почв. У каменистых, особенно с высоким содержанием обломочного материала с поверхности, органогенный горизонт маломощный, часто дискретный. Содержание органического углерода ($C_{\text{мок}}$) в корнеобитаемом слое изменяется в очень широком диапазоне от 0.1 до 35.7 % (см. табл. 1). Максимальное количество выявлено в торфяных органогенных горизонтах – от 33 до 35.7%, что является типичным для таких почв. Также органогенные почвы выделяются насыщенностью азотом и широким диапазоном значений отношения C/N (18–45). Такие параметры обеспечиваются большим количеством растительных остатков различной степени разложения и видовым разнообразием ботанического состава.

Наименьшим содержанием органического углерода отличаются суглинистые почвы, очевидно, за счет наиболее тяжелых разновидностей. Среднее значение $C_{\text{мок}}$ составляет 2.7 %. При этом количество общего азота низкое – в среднем 0.13 %, а соотношение C/N варьирует в диапазоне от 7.8 до 18.0. Песчаные, супесчаные и каменистые почвы обладают относительно более высоким содержанием органического углерода и общего азота. С глубиной количество углерода и азота снижается, особенно в каменистых почвах.

Поглотительная способность почв является одним из ключевых свойств, обеспечивающих их способность к депонированию загрязнителей (тяжелых металлов, радионуклидов, нефтепродуктов) [36]. Емкость поглощения тесно связана с гранулометрическим составом, содержанием органического вещества, рН. В изученных почвах емкость катионного обмена (ЕКО) варьирует в широком диапазоне от 11.6 до 120 мг-экв/100 г (см. табл. 1). Наибольшие значения емкости фиксируются в торфяных почвах, где максимальные значения составляют 120 мг-экв/100 г почвы. Также в них отмечена наиболее кислая реакция (рН 3.6–4.4). В ряду от суглинистых к каменистым почвам средняя величина ЕКО и значения рН снижаются.

Таким образом, совокупность свойств изученных почв формирует разнородный потенциал, способный как к поглощению (закреплению, депонированию) нефтепродуктов, так и само-

очищению от них. Поведение загрязнителей на поверхности почв (в случае утечки или разливов) во многом зависит как от свойств почв, так и от локальных метеоусловий [13, 43]. Имеются данные, что с поверхности песчаных почв дизельное топливо испаряется вдвое быстрее при скорости ветра до 2 м/с [25], но при дальнейшем росте скорости ветра эта способность снижается. Интенсивная инсоляция способствует фотодegradации тяжелых фракций [43, 61, 62]. Промывание почв осадками и затопление во время паводка также приводит к очищению почвы от загрязнителей.

При просачивании НП в минеральные почвы первым барьером для них является органогенный горизонт. За счет большого объема порового пространства и содержания органического вещества он способен поглощать их и препятствовать вертикальной миграции [13]. В изученных аллювиальных почвах верхняя часть профиля представлена преимущественно серогумусовым горизонтом небольшой мощности с содержанием органического углерода 0,8–14,1 %. Гранулометрический состав серогумусового горизонта характеризуется как супесчаный и легкосуглинистый. На поверхности часто присутствует каменистый материал, таким образом способность горизонта выступать барьером при масштабном загрязнении невелика. Однако такие свойства благоприятствуют промыванию и очищению горизонта.

Вторым барьером при вертикальном перемещении нефтепродуктов служит глеевый горизонт, который характеризуется низкой порозностью, связностью и переувлажненностью [39, 43, 61]. Дополнительный экранирующий эффект создают грунтовые воды и многолетнемерзлые породы. При этом глеевый горизонт присутствует не во всех почвах, а мерзлота может залегать глубже, особенно в долинах рек. Зачастую нижняя часть профиля почв сильно камениста, что при больших объемах поступления загрязнителей может снизить барьерный эффект вышележащих горизонтов до минимума и способствовать поступлению НП в грунтовые воды. В этом случае вертикальная миграция НП меняется на латеральную и поток загрязнителей движется по поверхности зеркала грунтовых вод по естественному уклону в сторону их разгрузки в русло ближайшего водотока [47, 63–66].

В органогенных почвах поведение НП может быть очень неоднозначным. С одной стороны, отсутствие минеральной части, высокая порозность и низкая плотность торфяных почв способствуют свободному просачиванию нефтепро-

дуктов в профиль [67] до уровня грунтовых вод и такому же свободному испарению части фракций с поверхности и из корнеобитаемого слоя. С другой стороны, высокая поглощательная способность и большая влагонасыщенность обуславливают аккумуляцию и задержание в толще торфа значительного объема поступающих загрязнителей. Их биодеструкция замедлена из-за большого количества органики и кислого диапазона рН, что лимитирует развитие микроорганизмов [25, 68–70]. Колебания уровня грунтовых вод могут способствовать ремобилизации нефтепродуктов и повторному загрязнению торфяных почв [71].

В целом изученные минеральные почвы с суглинистым гранулометрическим составом, высокой плотностью и минимальной скелетностью характеризуются достаточным потенциалом к накоплению и задержанию нефтепродуктов. Сильнокаменистые и песчаные/супесчаные почвы менее устойчивы к нефтяному загрязнению, но имеют высокий потенциал к самоочищению, поскольку, как правило, приурочены к речным долинам. Органогенные почвы отличаются низким потенциалом к самоочищению. Свой вклад вносят локальные климатические особенности, сильная обводненность территории и близкое залегание мерзлоты. В таких условиях устранение последствий нефтяных загрязнений не представляется без проведения рекультивационных мероприятий. При этом перед проведением рекультивации необходимо учитывать концентрацию нефтепродуктов в почвах.

Оценка влияния различных характеристик на закрепление нефтепродуктов в почвах проводилась методом главных компонент. В выборку были включены корнеобитаемые горизонты почв участков, где в год загрязнения достоверно фиксировалось повышение содержания нефтепродуктов. Учитывались характеристики, обуславливающие способность почв закреплять НП (рис. 1). Объекты исследований были сгруппированы с учетом уровней содержания НП [35]. Результаты показывают, что первая компонента, включающая 42,4 % дисперсии, имеет сильную корреляционную связь с содержанием НП в почвах (табл. 2). Ее определяют такие свойства почв, как общее содержание углерода и азота, а также способность почв поглощать катионы (ЕКО). Также первую компоненту определяет плотность почв. Значения плотности по отношению к главной компоненте, так же как и к задержанию нефтепродуктов, демонстрируют отрицательную корреляцию. Содержание фи-

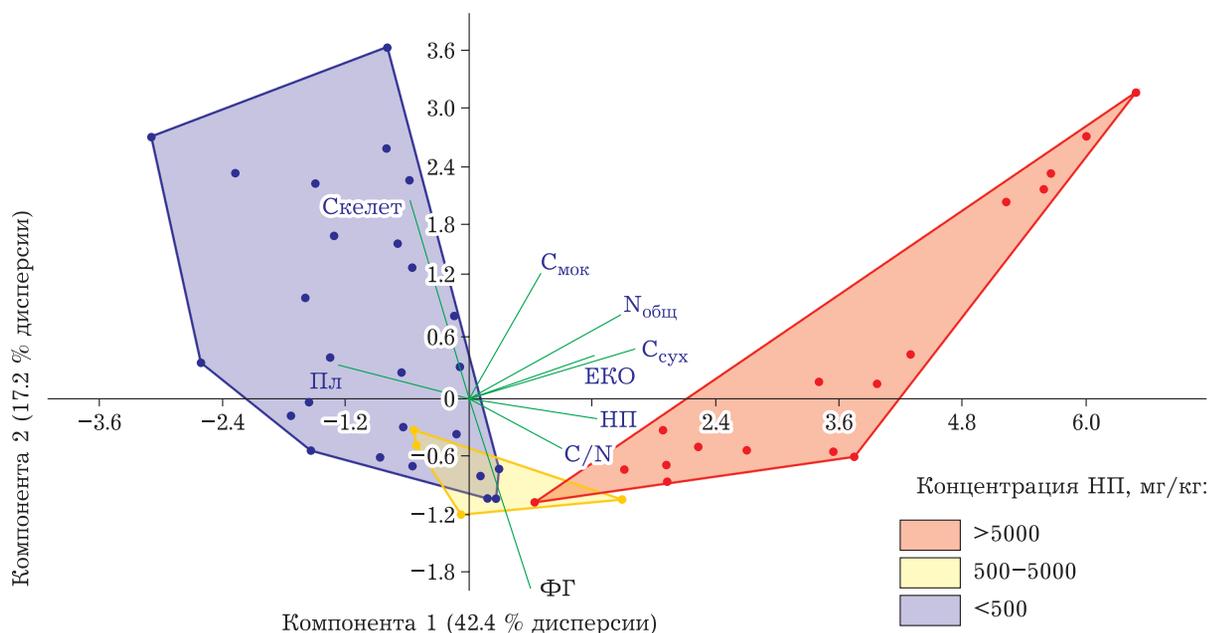


Рис. 1. Распределение загрязненных нефтепродуктами (НП) почв в пространстве двух главных компонент, формируемых основными физическими и химическими характеристиками: $C_{\text{сух}}$ – углерод общий; $C_{\text{мокс}}$ – углерод органический; $N_{\text{общ}}$ – общий азот; C/N – соотношение углерода и азота; ЕКО – емкость катионного обмена; Пл – плотность; ФГ – физическая глина (частицы <0.01 мм); Скелет – крупнозем.

зической глины, коррелирующее со второй компонентой, не имеет выраженной связи с первой. Это обусловлено тем, что обогащенные тонкодисперсным материалом почвы криолитозоны более влажные и плотные, а увеличение плотности почв отрицательно влияет на проникновение НП. Основным фактором, определяющим закрепление НП в почвах, является общее содержание углерода, причем не специфического почвенного (педогенного) органического вещества, диагностируемого по $C_{\text{мокс}}$, а углерода $C_{\text{сух}}$, основная часть которого приходится на живые и

отмершие части растений. Отмеченная зависимость очень часто связана с тем, что в год загрязнения основная часть НП остается на подстилке и проникает в глубь почв позже под воздействием снеговых и дождевых вод.

Анализ литературных источников, а также статистически обработанные собственные данные, позволяют предложить мероприятия по ремедиации почв, загрязненных нефтепродуктами до уровня допустимых значений, а также создания условий, препятствующих миграции НП в ландшафте (табл. 3). Выбор мероприятий опре-

ТАБЛИЦА 2

Корреляционная связь главных компонент и характеристик, определяющих закрепление нефтепродуктов в почвах

Характеристика почв	Компонента 1 (42.4 % дисперсии)	Компонента 2 (17.2 % дисперсии)
Плотность (Пл), г/см ³	-0.74	0.13
Содержание нефтепродуктов (НП), мг/кг	0.71	-0.08
Содержание органического углерода ($C_{\text{мокс}}$), %	0.40	0.48
Содержание общего углерода ($C_{\text{сух}}$), %	0.93	0.19
Содержание общего азота ($N_{\text{общ}}$), %	0.86	0.32
Соотношение $C_{\text{сух}}/N_{\text{общ}}$	0.52	-0.19
Емкость катионного обмена (ЕКО), мг-экв/100 г	0.70	0.16
Содержание крупнозема (Скелет), %	-0.33	0.75
Содержание частиц <0.01 мм (ФГ), %	0.35	-0.73

Примечание. Цветом выделены значения сильной корреляционной связи.

ТАБЛИЦА 3

Рекомендуемые мероприятия по очищению почв от нефтепродуктов при различных уровнях загрязнения

Содержание нефтепродуктов в почвах, мг/кг	Уровень загрязнения	Рекомендуемые мероприятия по очистке
<500	Низкий	Проведение рекультивации не требуется
500–5000	Среднее и сильное	Механическая обработка почв с посевом многолетних трав, в отдельных случаях с внесением удобрений
>5000	Очень сильное	Механическая обработка почв с внесением химических мелиорантов с последующим посевом многолетних трав и (в отдельных случаях) внесением удобрений

деляется свойствами почв, их положением в ландшафте и количеством НП. Так, каменистые почвы, как правило, наименее подвержены загрязнению и обладают высоким потенциалом самоочищения в связи с высокой плотностью и скелетностью, т. е. свойствами, препятствующими проникновению НП вглубь почв и их закреплению в профиле. Растительный покров таких участков также характеризуется обедненностью по видовому составу и низкими значениями проективного покрытия. Из почв НП либо вымываются дождями или паводками, либо (в случае с легкими углеводородами) улетучиваются. Учитывая высокий потенциал самоочищения почв, нами не рекомендуется рекультивация, если концентрация нефтепродуктов в почвах <500 мг/кг (см. табл. 3). При отмеченном уровне загрязнения не следует проводить мероприятия также на участках с суглинистыми и торфяными почвами. Это связано с тем, что использование технических средств неизбежно влечет за собой нарушение верхних органогенных горизонтов почв. В таком случае ущерб от ликвидации последствий загрязнения в отношении уязвимых арктических почв превысит ущерб от загрязнения.

Превышение уровня загрязнения >500 мг/кг служит показанием для проведения механической обработки поверхности почв, способствующей аэрации верхних горизонтов с целью усиления фотодеградации, микробиологической деструкции, а также испарения ряда фракций. Кроме того, обработка обеспечивает перемешивание верхнего загрязненного слоя почв с нижележащими, менее загрязненными, что создает благоприятные условия для биологического этапа рекультивации. Рекомендуется механическую обработку совмещать с посевом злаковых многолетних трав, пригодных для использования в условиях криолитозоны. Посев трав позволяет за короткое время достичь задерживающего эффекта и озеленить рекультивированную поверхность с целью регулирования теплового и водного режимов, развития семязачатков и спор растений местной флоры. Вне водоохраных зон для усиления эффекта возможно внесение удобрений. Норма удобрений зависит от видов трав. Однако, учитывая специфику агрохимических свойств почв криолитозоны, нами рекомендуется использование повышенных доз, в частности, азота (действующего вещества) – 60 кг/га, фосфора и калия – по 40 кг/га.

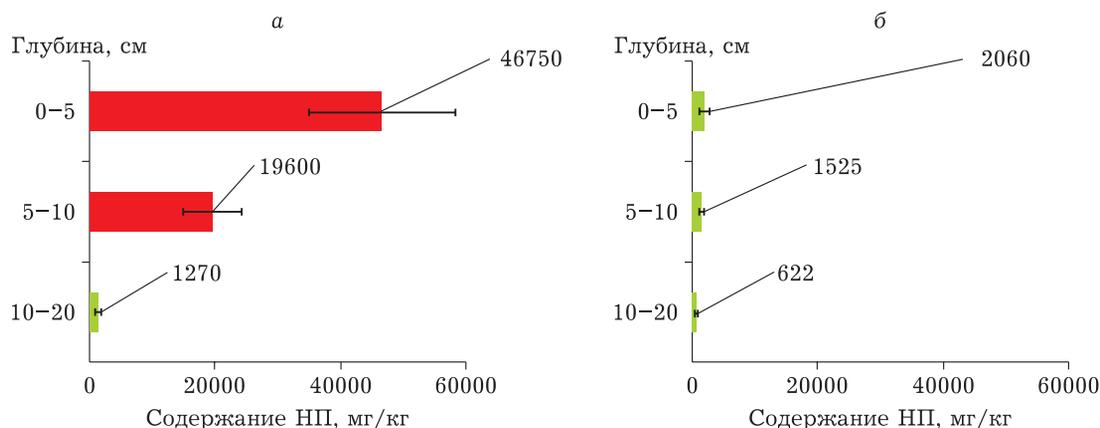


Рис. 2. Содержание нефтепродуктов (НП) в почвах рекультивированных участков: а – до внесения пероксида кальция; б – через год после внесения пероксида кальция.

При очень сильном загрязнении почв нефтепродуктами (>5000 мг/кг) за год до посева травосмеси необходимо совмещать механическую обработку с внесением химических мелиорантов. Из их числа наиболее подходящим для почв криолитозоны является пероксид кальция CaO_2 (рис. 2), который не относится к поверхностно активным веществам, а следовательно, не может негативно сказаться на других компонентах хрупких арктических экосистем. В то же время при окислении нефтепродуктов пероксидом происходит образование карбоната кальция, что способствует снижению кислотности почв и, как следствие, активизации биологических процессов деструкции нефтепродуктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование показывает, что специфика почв криолитозоны проявляется в значительном разнообразии свойств, определяющих подверженность почв загрязнению нефтепродуктами. В условиях субарктического климата свойства почв могут как отрицательно, так и положительно сказаться на проникновении, закреплении и деструкции нефтепродуктов при рекультивации и самоочищении. Среди свойств почв криолитозоны наибольшую роль в процессах аккумуляции легких фракций нефтепродуктов играют содержание общего углерода ($\text{C}_{\text{сух}}$) и связанное с ним содержание общего азота ($\text{N}_{\text{общ}}$), а также емкость катионного обмена. Повышенная плотность почв отрицательно влияет на аккумуляцию нефтепродуктов.

Учитывая отмеченную специфику, рекомендуется на участках, уровень загрязнения почв которых ≤ 500 мг/кг, не проводить восстановительные мероприятия с использованием технических средств. В противном случае последствия от их действия могут нанести больший ущерб, чем загрязнение. На территориях, где уровень содержания нефтепродуктов в почвах находится в интервале 500–5000 мг/кг, рекомендуется проводить механическую обработку почв с последующим посевом многолетних трав. Ее эффективность повышает внесение азотных и фосфорно-калийных удобрений. В почвах участков с уровнем загрязнения нефтепродуктами, превышающим 5000 мг/кг, вместе с механической обработкой и перед биологической рекультивацией необходимо внесение химических мелиорантов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соколов Д. А., Иванова И. С., Морозов С. В., Пчельникова Т. Г., Солдатова Е. А. Полициклические ароматические углеводороды в торфяных олиготрофных почвах северных территорий Западной Сибири // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1228–1240.
2. Encyclopedia of the World's Biomes / M. I. Goldstein, D. A. DellaSala (Eds.). Vol. 2. Amsterdam: Elsevier, 2020. P. 409–420.
3. Tolvanen A., Eilu P., Juutinen A., Kangas K., Kivinen M., Markkovaara-Koivisto M., Naskali A., Salokannel V., Tuulentie S., Similä J. Mining in the Arctic environment – a review from ecological, socioeconomic and legal perspectives // J. Environ. Manage. 2019. Vol. 233. P. 832–844.
4. Глязнецова Ю. С. Особенности трансформации старого нефтяного загрязнения в почвах Арктической зоны Якутии // Теорет. и приклад. экология. 2021. № 2. С. 89–94.
5. Соколов Д. А., Иванова И. С., Сиромля Т. И. Содержание и подвижность металлов в олиготрофных торфяных почвах криолитозоны Западной Сибири // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1612–1627.
6. Akhtar S., Hollaender H., Yuan Q. Impact of heat and contaminants transfer from landfills to permafrost subgrade in arctic climate: a review // Cold Reg. Sci. Technol. 2023. Vol. 206. Art. 103737.
7. Gao Z., Ma S., Li J., Sun P., Liu Y., Xing Q., He Q., Tian Y. Climate-induced long-term variations of the Arctic ecosystems // Prog. Oceanogr. 2023. Vol. 213. Art. 103006.
8. Novoselov A., Potravny I., Novoselova I., Gassiy V., Sharkova A. Harmonization of interests during Arctic industrial development: the case of mining corporation and indigenous peoples in Russia // Polar Sci. 2023. Vol. 35. Art. 100915.
9. Vinogradova V., Titkova T., Zolotokrylin A. How climate change is affecting the transitional natural zones of the Northern and Arctic regions of Russia // Polar Sci. 2021. Vol. 29. Art. 100652.
10. Сысо А. И., Соколов Д. А., Сиромля Т. И., Ермолов Ю. В., Махатков И. Д. Антропогенная трансформация свойств почв ландшафтов Таймыра // Почвоведение. 2022. № 5. С. 521–537.
11. Lifshits S., Glyaznetsova Yu., Erofeevskaya L., Chalaya O., Zueva I. Effect of oil pollution on the ecological condition of soils and bottom sediments of the Arctic region (Yakutia) // Environ. Pollut. 2021. Vol. 288. Art. 117680.
12. Седова Н. Б., Кочемасова Е. Ю. Экологические проблемы Арктики и их социально-экономические последствия // ЭКО. 2017. № 5 (515). С. 160–171.
13. Геннадиев А. Н. Нефть и окружающая среда // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 6. С. 30–39.
14. Encyclopedia of Toxicology / P. Wexler (Ed.). 3rd ed. Amsterdam: Academic Press, 2014. P. 115–118.
15. Иванова И. С., Еделев А. В., Юркевич Н. В., Ельцов И. Н., Наливайко Н. Г., Саева О. П. Оценка влияния аварийного разлива нефтепродуктов на поверхностные воды бассейна реки Пясины // Экология и пром-сть России. 2022. Т. 26, № 7. С. 48–55.
16. Савченко В. А. Экологические проблемы Таймыра. М.: СИП РИА, 1998. 193 с.
17. Сазонов А. Д., Комаров Р. С., Передера О. С. Разлив нефтепродуктов в Норильске 29 мая 2020 года: предполагаемые причины и возможные экологические последствия // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Систем. анализ и моделирование экон. и экол. систем. 2020. Т. 1, № 5. С. 173–177.
18. Таран О. П., Скрипников А. М., Ионин В. А., Кайгородов К. Л., Кривоногов С. К., Добрецов Н. Н., Добрецов В. Н., Лазарева Е. В., Крук Н. Н. Состав и концентра-

- ция углеводородов донных отложений в зоне разлива дизельного топлива ТЭЦ-3 АО «НТЭК» (г. Норильск, Арктическая Сибирь) // Сибирский экол. журн. 2021. № 4. С. 423–450.
19. Юркевич Н. В., Ельцов И. Н., Гуреев В. Н., Мазов Н. А., Юркевич Н. В., Еделев А. В. Техногенное воздействие на окружающую среду в Российской Арктике на примере Норильского промышленного района // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 12. С. 230–249.
20. Бабаев Э. Р. Биодegradация нефтезагрязнений под воздействием углеводородокисляющих микроорганизмов // Нефтегазохимия. 2019. № 1. С. 48–51.
21. Ежелев З. С. Свойства и режимы рекультивированных после разливов нефти почв Усинского района Республики Коми: дис. ... канд. биол. наук. М., 2015. 142 с.
22. Кумпаненко И. В., Иванова Н. А., Ковалева Н. Ю., Сахарова Н. А., Шиянова К. А., Рошин А. В. Исследование прорастания в грунт нефти и нефтепродуктов при их разливах // Хим. физика. 2021. Т. 40, № 1. С. 45–54.
23. Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П., Корнейкова М. В., Ахтулова Е. М., Михайлова И. В. Воздействие загрязнения почв дизельным топливом на растения и ризосферную микробиоту на Кольском Севере // Агрохимия. 2007. № 12. С. 49–55.
24. Eze M. O., George S. C., Hose G. C. Dose-response analysis of diesel fuel phytotoxicity on selected plant species // Chemosphere. 2021. Vol. 263. Art. 128382.
25. Johnsen A. R., Boe U. S., Henriksen P., Malmquist L. M. V., Christensen J. H. Full-scale bioremediation of diesel-polluted soil in an Arctic landfarm // Environ. Pollut. 2021. Vol. 280. Art. 116946.
26. Мазанко М. С., Денисова Т. В., Колесников С. И., Казеев К. Ш., Даденко Е. В. Влияние сочетанного химического и электромагнитного загрязнения на биологические свойства почв. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федер. ун-та, 2013. 168 с.
27. Karneeva A., Kulikova O., Mazlova E., Buryak A. Aged diesel and heavy metal pollution in the Arctic tundra (Yamal Peninsula, Russia) // Sci. Total Environ. 2021. Vol. 792. Art. 148471.
28. Labud V., Garcia C., Hernandez T. Effect of hydrocarbon pollution on the microbial properties of a sandy and a clay soil // Chemosphere. 2007. Vol. 66, No. 10. P. 1863–1871.
29. Varjani S. J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons // Bioresour. Technol. 2017. Vol. 223. P. 277–286.
30. Мерзлякова А. С., Околелова А. А., Заикина В. Н., Пасикова А. В. Изменение свойств нефтезагрязненных почв // Изв. вузов. Приклад. химия и биотехнология. 2017. Т. 7, № 2 (21). С. 173–180.
31. Salimnezhad A., Soltani-Jigheh H., Soorki A. A. Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil // J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2021. Vol. 13, No. 3. P. 653–670.
32. Shah S. J., Shroff A. V., Patel J. V., Tiwari K. C., Ramakrishnan D. Stabilization of fuel oil contaminated soil – A case study // Geotech. Geol. Eng. 2003. Vol. 21, No. 4. P. 415–427.
33. Маслов М. Н., Маслова О. А., Ежелев З. С. Микробиологическая трансформация органического вещества в нефтезагрязненных тундровых почвах после рекультивации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 70–78.
34. Brown K. E., Wasley J., King C. K. Assessing risks from fuel contamination in Antarctica: dynamics of diesel ageing in soil and toxicity to an endemic nematode // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2023. Vol. 249. Art. 114345.
35. Севастьянов Д. В., Исаченко Т. Е., Гук Е. Н. Норильский регион: от природной специфики к практике освоения // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология. География. 2014. № 3. С. 82–94.
36. Способность почв к самоочищению от нефти и нефтепродуктов // Национальный атлас России: в 4 т. Т. 2. М., 2004–2021. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/319.html> (дата обращения: 12.05.2024).
37. Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель, 2011. 632 с.
38. Паринкина О. М. Скорость разложения органического вещества в тундрах полуострова Таймыр // Биогеоценозы Таймырской Тундры / отв. ред. Б. А. Томили. Л.: Наука, 1980. С. 234–248.
39. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. 182 с.
40. World Reference Base for Soil Resources: International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps / International Union of Soil Science (IUSS). 4th ed. Vienne, 2022. 235 p.
41. Пиковский Ю. И., Геннадиев А. Н., Чернявский С. С., Сахаров Г. Н. Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1132–1140.
42. Исмаилов Н. М., Гасымова А. С. Самоочищающая способность почв от нефти и нефтепродуктов в зависимости от структуры углеводородов // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22, № 4 (69). С. 73–80.
43. Геннадиев А. Н., Пиковский Ю. И., Цибарт А. С., Смирнова М. А. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1195–1209.
44. Глазовская М. А. Геохимические барьеры в почвах равнин, их типология, функциональные особенности и экологическое значение // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 1. С. 8–14.
45. Середин В. В., Ядзинская М. Р. Исследование механизма агрегации частиц в глинистых грунтах при загрязнении их углеводородами // Фундам. исслед. 2014. № 8-6. С. 1408–1412.
46. Chaudhary D. K., Kim J. New insights into bioremediation strategies for oil-contaminated soil in cold environments // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2019. Vol. 142. P. 58–72.
47. Галинуров И. Р., Сафаров А. М., Кудашева Ф. Х., Хатмуллина Р. М., Смирнова Т. П. Миграция нефтяных углеводородов в профиле прирусловых пойменных почв // Вестн. Башкирского ун-та. 2011. Т. 16, № 1. С. 47–52.
48. Mnif I., Sahnoun R., Ellouz-Chaabouni S., Ghribi D. Application of bacterial biosurfactants for enhanced removal and biodegradation of diesel oil in soil using a newly isolated consortium // Process Saf. Environ. Prot. 2017. Vol. 109. P. 72–81.
49. Середин В. В., Ядзинская М. Р., Красильников П. А. Прогноз прочностных свойств песков, загрязненных углеводородами // Инж. геология. 2014. № 6. С. 50–55.
50. Солнцева Н. П., Гусева О. А., Горячкин С. В. Моделирование процессов миграции нефти и нефтепродуктов в почвах тундры // Вестн. Московского ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1996. № 2. С. 10–17.
51. Туров Ю. П., Гузняева М. Ю., Лазарев Д. А., Петрова Ю. Ю., Жданова Г. О., Стом Д. И. Изучение процессов сорбции и удаления углеводородов нефти из образцов почвы // Почвоведение. 2022. № 6. С. 747–758.
52. Amellal N., Portal J.-M., Berthelin J. Effect of soil structure on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons within aggregates of a contaminated soil // Appl. Geochem. 2001. Vol. 16, No. 14. P. 1611–1619.
53. Околелова А. А., Капля В. Н., Лапченков А. Г. Оценка содержания нефтепродуктов в почвах // Науч. вед. Бел-

- городского гос. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2019. Т. 43, № 1. С. 76–86.
54. Золотарёв Л. Р. Изменение механических свойств глинистых грунтов при взаимодействии с нефтепродуктами // Вестн. Пермского ун-та. Геология. 2018. Т. 17, № 3. С. 263–267.
 55. Анчугова Е. М., Маркарова М. Ю., Щемелинина Т. Н., Володин В. В. Особенности вертикального распределения углеводов в почвенных субстратах // Изв. Самарского науч. центра Российской акад. наук. 2010. Т. 12, № 1–5. С. 1203–1207.
 56. Шорина Т. С., Русанов А. М., Сулейманова А. М. Влияние нефти на физические свойства чернозема обыкновенного степной зоны Урала // Вестн. Оренбургского гос. ун-та. 2010. № 6 (112). С. 137–140.
 57. Chen M., Vernon C. R., Graham N. T., Hejazi M., Huang M., Cheng Y., Calvin K. Global land use for 2015–2100 at 0.05° resolution under diverse socioeconomic and climate scenarios // *Sci. Data*. 2020. Vol. 7. Art. 320.
 58. Falciglia P. P., Giustra M. G., Vagliasindi F. G. A. Low-temperature thermal desorption of diesel polluted soil: influence of temperature and soil texture on contaminant removal kinetics // *J. Hazard. Mater.* 2011. Vol. 185, No. 1. P. 392–400.
 59. Delille D. Response of Antarctic soil bacterial assemblages to contamination by diesel fuel and crude oil // *Microb. Ecol.* 2000. Vol. 40, No. 2. P. 159–168.
 60. Serrano A., Tejada M., Gallego M., Gonzalez J. L. Evaluation of soil biological activity after a diesel fuel spill // *Sci. Total Environ.* 2009. Vol. 407, No. 13. P. 4056–4061.
 61. D'Auria M., Emanuele L., Racioppi R., Velluzzi V. Photochemical degradation of crude oil: comparison between direct irradiation, photocatalysis, and photocatalysis on zeolite // *J. Hazard. Mater.* 2009. Vol. 164, No. 1. P. 32–38.
 62. Liu Z., Sun X., Fu J., Liu W., Cai Z. Elevated nitrate promoted photodegradation of PAHs in aqueous phase: implications for the increased nutrient discharge // *J. Hazard. Mater.* 2023. Vol. 443, Part A. Art. 30143.
 63. Качинский В. Л. Поведение битуминозных веществ в почвах южнотундровых и среднетаежных ландшафтов: барьеры-экраны и барьеры-концентраторы // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 1. С. 68–75.
 64. Качинский В. Л., Завгородняя Ю. А., Геннадиев А. Н. Углеродное загрязнение арктогундровых почв острова Большой Ляховский (Новосибирские острова) // *Почвоведение*. 2014. № 2. С. 155–168.
 65. *Permafrost Soils* / R. Margesin (Ed.). Heidelberg: Springer, 2009. P. 263–278.
 66. Orgogozo L., Xavier T., Oulbani H., Grenier C. Permafrost modelling with OpenFOAM®: new advancements of the permaFoam solver // *Comput. Phys. Commun.* 2023. Vol. 282. Art. 108541.
 67. Gharedaghloo B., Price J. S. Characterizing the immiscible transport properties of diesel and water in peat soil // *J. Contam. Hydrol.* 2019. Vol. 221. P. 11–25.
 68. Chen C.-H., Liu P.-W. G., Whang L.-M. Effects of natural organic matters on bioavailability of petroleum hydrocarbons in soil-water environments // *Chemosphere*. 2019. Vol. 233. P. 843–851.
 69. Chen Y.-A., Liu P.-W. G., Whang L.-M., Wu Y.-J., Cheng S.-S. Effect of soil organic matter on petroleum hydrocarbon degradation in diesel/fuel oil-contaminated soil // *J. Biosci. Bioeng.* 2020. Vol. 129, No. 5. P. 603–612.
 70. Masyagina O. V., Matvienko A. I., Ponomareva T. V., Grodnitskaya I. D., Sideleva E. V., Kadutskiy V. K., Prudnikova S. V., Bezbido V. S., Kudryavtseva K. A., Evgrafova S. Y. Soil contamination by diesel fuel destabilizes the soil microbial pools: insights from permafrost soil incubations // *Environ. Pollut.* 2023. Vol. 323. Art. 121269.
 71. Gupta P. K., Gharedaghloo B., Price J. S. Multiphase flow behavior of diesel in bog, fen, and swamp peats // *J. Contam. Hydrol.* 2023. Vol. 255. Art. 104162.

Поступила в редакцию 14.05.2024

Одобрена после рецензирования 04.07.2024

Принята к публикации 12.07.2024