

ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ АРКТИЧЕСКИХ ПОЧВ И БИОРЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЙ

PROBLEMS OF THE STABILITY OF ARCTIC SOILS AND BIOREMEDIATION OF OIL POLLUTION



Телеснина В. М.

Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Факультета почвоведения МГУ, e-mail: vtelesnina@mail.ru

Telesnina V. M.

PhD in Biological Sciences. Senior Researcher, Faculty of Soil Science, Moscow State University, e-mail: vtelesnina@mail.ru



Жуков М. А.

Кандидат биологических наук, Учёный секретарь Научного совета АНО «Научно-координационный центр по проблемам Севера, Арктики и жизнедеятельности малочисленных народов Севера» (НКЦ «Север»), e-mail: nkcs Sever@gmail.com

Zhukov M. A.

PhD in Biological Sciences. Scientific Secretary of the Scientific Council of the ANO "Scientific Coordination Center for the problems of the North, the Arctic and the life of the indigenous peoples of the North" (ANO «North»), e-mail: nkcs Sever@gmail.com

Аннотация. Арктическая зона Российской Федерации (далее – АЗРФ) – важнейший регион добычи углеводородов и, одновременно, самым уязвимый для негативных антропогенных воздействий. Наиболее уязвим почвенный покров в силу его маломощности и залегания на многолетнемерзлых породах. При загрязнении арктических почв нефтью и нефтепродуктами, меры механического воздействия на верхний почвенный слой мало применимы и в первую очередь требуются биотехнологии.

Annotation. Russian Federation Arctic zone (RFAZ) is the most important region for hydrocarbon production and, at the same time, the most unstable for negative anthropogenic impact. The soil cover is most unstable due to low thickness and location on permafrost. By arctic soils pollution with oil and oil products, the measures of mechanical impact for topsoil are low effective, as well as biotechnologies are necessary.

Ключевые слова: Арктическая зона Российской Федерации, почвенный покров, загрязнения нефтью, биотехнологии.

Key words: Russian Federation Arctic zone, soil cover, oil pollutions, biotechnologies.

Арктические почвы и основные факторы их уязвимости

На территории Арктики распространены разнообразные почвы, строение и свойства которых детерминируют:

- отрицательные температуры в течение большей части года;
- наличие, как правило, неглубоко залегающих многолетнемерзлых пород, активно участвующих в почвообразовательных процессах;
- относительно низкая величина опада, поступающего в почву.

В результате почвы имеют особенности как морфологии, так и химических и микробиологических свойств: слабая выветрелость минеральной части почвы; накопление детрита, низкая степень разложенности органического вещества; участие криогенных процессов в почвообразовании (морозобойное растрескивание, пучение грунтов, криогенная миграция почвенного раствора); развитие процессов оглеения в той или иной степени; низкое содержание доступных растениям элементов пита-

ния; выраженная комплексность почвенного покрова по причине развития мерзлотных комплексов (полигонально-валиковые, бугристо-западинные, пятнистые и т. п.).

В АЗРФ имеются территории с самыми разнообразными биоклиматическими и геолого-геоморфологическими условиями, спектр арктических почв весьма многообразен. В зоне тундр развиты глеезёмы типичные и перегнойные в сочетании с торфяными олиготрофными и торфяно-глеевыми в бугристых почвенно-мерзлотных комплексах [1]. На более дренированных участках могут встречаться литозёмы типичные и грубогумусовые. В подзонах лесотундры и северной тайги на лёгких отложениях преобладают подзолы и подбуры, тогда как на более тяжёлых развиты глееподзолистые почвы в сочетании с торфяно-глеевыми. В более континентальных секторах АЗРФ (Восточная Сибирь) встречаются криозёмы и криоаридные литозёмы.

Основные свойства устойчивости почв к антропогенным воздействиям [2]:

- противоэрозионная устойчивость;

- геохимическая устойчивость по отношению к кислотным выпадениям, загрязнению тяжёлыми металлами, нефтепродуктами и другими продуктами техногенеза;

- биологическая устойчивость – сохранение растительного покрова и почвенной биоты.

Перечень параметров оценки устойчивости включает: климатические показатели, характеристики рельефа и мерзлоты; характеристики фитоценотического компонента экосистемы – биомасса, продуктивность, ёмкость и интенсивность круговорота; свойства и режимы почв – щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные условия, водный режим, гранулометрический и минералогический состав, ёмкость катионного обмена.

Устойчивость почв к загрязнению нефтепродуктами и сопутствующими тяжёлыми металлами, зависит от ряда факторов. К внешним относятся сумма активных температур, интенсивность солнечной радиации. К внутренним – свойства самой почвы. Так, наличие многолетнемерзлых пород затрудняет отток загрязняющих веществ из почвы. Не способствует детоксикации низкая биологическая ак-

тивность почв из-за низких температур и переувлажнённости. Суглинистые почвы в большей степени, чем супесчаные и песчаные, поглощают тяжёлые металлы, также как и почвы, богатые органическим веществом по сравнению с бедными. С другой стороны, песчаные почвы характеризуются более оптимальным воздушным режимом, что немаловажно для окисления загрязняющих органических веществ — нефти и ПАУ (полициклические ароматические углеводороды).

В целом почвы тундр весьма уязвимы в отношении загрязнения нефтепродуктами.

Низкие температуры, переувлажнение и низкая активность микробиоты сильно замедляют разложение нефтепродуктов — особенно в суглинистых почвах с затруднённым внутренним стоком и высоко залегающими многолетнемерзлыми породами. Почвы северотаёжной зоны, сложенные песками и супесями и лишённые многолетней мерзлоты по крайней мере на глубине почвенного профиля, более способны к самоочищению из-за благоприятного водно-воздушного режима, но они не могут поглощать тяжёлые металлы из-за низкой ёмкости катионного обмена. Катионы металлов, в том числе особо токсичные (ртуть, кадмий, свинец) не адсорбируются в почвенном профиле и по грунтовым водам мигрируют по ландшафту. Механическое воздействие вызывает усиление таяния многолетнемерзлых пород, а повреждённые тундровые почвы восстанавливаются долго.

Возможные меры очищения от нефтезагрязнений арктических почв

Меры ликвидации нефтяных загрязнений почв обычно подразделяются на:

- механические и физико-механические, очищающие поверхность, но не восстанавливающие почвенный покров;

- химические, физико-химические, и биологические.

Механические меры: локализация нефтеразливов и сбор разлитой нефти; удаление нефтезагрязнённого почвогрунта, что в условиях Арктики недопустимо из-за образования термокарстовых оттаек; замена верхнего слоя почвы, засыпка загрязнений и захоронение собранных грунтов в условиях Арктики также не реализуемы. Физико-механические меры: сжигание разлитой нефти, термосорбция, затверждение, промывание и экстракция химическими растворителями [3]. Это возможно при загрязнении небольшого участка земли на промышленных объектах, но абсолютно нереализуемо при очищении значительных площадей.

Химические меры: дегалогенирование — отщепление молекул галогена при химических и термических реакциях в Арктике нереализуемо. Физико-химические меры: адгезия, диспергирование, капсулирование, обработка ферромагнитной жидкостью, промывка почв моющими растворами и сорбционная очистка. Адгезия, диспергирование и капсулирование применяются для изменения фракционного состава покрывающего поверхность нефтяного загрязнения для удобства механического удаления [4]. Но почву это не очистит. Обработкой ферромагнитной жидкости и ПАВ отделяют нефть от песка. В АЗРФ это актуально для НАО и ЯНАО. Промывка почв моющими растворами в Арктике слабо реализуема, наиболее эффективны методы биоремедиации нефтезагрязнений, которым при наличии условий могут предшествовать сбор и удаление доступных для этого объемов загрязнителя.

Основные методы биоремедиации нефтезагрязнений и вопросы их применения

Трудности реабилитации в условиях АЗРФ связаны с низкой способностью почв к самоочищению из-за близкого залегания многолетнемерзлых пород, застойного увлажнения, низких температур, короткого вегетационного периода, недостатка питательных веществ и низкой активности микробных популяций.

Если в более южных регионах процесс самовосстановления от нефтяных загрязненных занимает 10-25 лет, то в условиях Севера и Арктики потребуются минимум 50 лет. При загрязнении почв нефтью происходит гидрофобизация и нарушается водно-воздушный режим в системе почва-атмосфера.

При этом происходит снижение вдвое общего микробного числа и почти в 7 раз спорообразующих аэробных бактерий. Нефть и нефтепродукты являются пищей для микроорганизмов, в том числе образующих споры при исчерпывании доступных органических веществ. Обогащение ими почвы вызывает переход спор в вегетативные клетки. Разложение нефти и нефтепродуктов в мерзлотных почвах нужно интенсифицировать стимуляцией собственной углеводородоксилирующей микрофлоры и внесением содержащих углеводородоксилирующие микроорганизмы биопрепаратов [5].

Уже через две недели после попадания нефти почвенный микробиоценоз адаптируется к нефтяному загрязнению и общее микробное число обнаруживает резкое возрастание (до 90 раз), а спорообразующих бактерий — до 30 и более раз. При биоремеди-

ации почвы с применением бактериальных культур из штаммов бактерий рода *Bacillus* и фиторекультивации отмечены увеличение общего микробного числа и количества спорообразующих аэробных бактерий, рост микроскопических грибов.

Развитие микробных культур проходит через адаптацию к условиям среды, активный рост, стационарное функционирование и отмирание. Время адаптации зависит от начальной концентрации микроорганизмов. Чем она выше, тем время адаптации короче. Аналогично и в фазе активного роста. Поэтому для высокоширотных регионов очень важно, чтобы биопрепарат был концентрирован и, желательно, дешёв. Внесение чистых культур микроорганизмов в растворах связано с определёнными техническими сложностями и неудобствами. Высокая эффективность достигнута в опыте при применении суспензии штаммов бактерий *Bacillus subtilis* «Колыма 7/2к» из расчёта 250 мл/м², деструкция нефти за три месяца достигла до 0,64±0,1 мг/г или составила 99,53 %. Но в качестве подкормки *Bacillus subtilis* использовался куриный помёт из расчёта 15 т/га, вдвое увеличивший эффект деструкции нефти (без куриного помёта деструкция нефти за три месяца составила только 37,6 %) [6].

Птичий помёт — источник колоссального количества разнообразных микроорганизмов, способных разлагать различные субстраты.

Поскольку удаление слоя загрязнённой почвы в Арктике неприменимо, биопрепараты приходится вносить поверхностно и биодegradация загрязнения идёт преимущественно в приповерхностных слоях почвы. Это снижает их эффективность, но атмосфера Арктики и Субарктики

за исключением зоны центрально-азиатского (якутского) антициклона наполнена влагой и осадки вымывают препараты в почву. Там, где невозможны механические меры воздействия на почвенный покров в результате испарения лёгких фракций происходит склеивание частиц почвы тяжёлыми нефтяными фракциями. Вследствие образуются корки, задерживающие поступление влаги и воздуха в приповерхностные слои почвы. В этой ситуации применение чистых микробных культур, высеваемых непосредственно на поверхность нефтяных корок, нерационально.

Целесообразно внесение биопрепаратов с сорбентами и комплексом минеральных и (или) органических удобрений [7]. Иммобилизация углеводородокисляющих микроорганизмов обычно рекомендуется на естественных минеральных материалах. Сорбент-носитель должен обладать следующими свойствами: проницаемостью, нефтеёмкостью, неслеживаемостью, пористостью и сыпучестью. Этим требованиям отвечают цеолиты и вспученный вермикулит (ГОСТ 12865-67) [8]. Кристаллическая решетка цеолитов обеспечивает сорбционную способность и хорошую адгезию микробным клеткам, даёт им возможность закрепляться не только на поверхности носителя, но и внутри, что позволяет его использовать в качестве сорбента-носителя для иммобилизации микробных культур. Этим требованиям отвечает природный цеолит месторождения Хонгуруу (Западная Якутия), используемый в препарате, разработанном и запатентованном ФГБУН Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук (г. Якутск) (патент RU 2600868 С2, 2014). В препарате использованы штаммы *Rhodococcus* sp. ВКМ Ac-2626D и *Serratia*

plymuthica ВКМ В-2819D, выделенные из мерзлотных грунтов Центральной Якутии и активные в интервале температур от +4 °С до +30 °С.

Цеолит Хонгуруу — каркасный аллюмосиликат — имеет в структуре полости, занятые крупными ионами и молекулами воды, которые имеют свободу движения для ионного обмена и обратимой дегидратации [9]. Насыщение цеолитов Хонгуруу нефтью происходит сразу после погружения в нефть. Через 1 минуту нефтеёмкость достигает 0,4-0,5 г/г и не меняется в течение шести часов [10]. Цеолит способствует формированию в загрязнённом грунте центров активной деструкции нефтяных углеводородов благодаря сорбции на его поверхности культур микроорганизмов.

Цеолиты Хонгуруу — источник макро- и микроэлементов для питания нефтеокисляющих микроорганизмов почв.

Внесение цеолита может усилить азотфиксирующую способность почв за счёт наличия Mo и Fe, активирующих у азотфиксирующих микроорганизмов нитрогеназный ферментный комплекс. Вермикулит месторождения Инагли (Якутия), используемый в препарате для очистки почв и воды от нефтезагрязнений (патент RU 2600872 С2, 2014) — природно-гидратированная слюда во вспученной по ГОСТ 12865-67 форме — также является перспективным сорбентом-носителем. Он обладает необходимыми уровнями проницаемости, нефтеёмкости, неслеживаемости, пористости и сыпучести, сочетает свойства носителя микроорганизмов и сорбента для нефти, что обеспечивает высокую эффективность и пролонгированность реакций деструкции нефтяных углеводородов [11].

Почвы тундр, лесотундр и северной тайги преимущественно олиготрофны, бедны минеральными и органическими питательными веществами, что сдерживает размножение бактерий. Разработчики биопрепаратов-нефтедеструкторов рекомендуют использовать совместно с ними минеральные удобрения. Но содержащие фосфор и азот удобрения могут вместе с поверхностным стоком поступать в олиготрофные арктические водоёмы и вызывать их эвтрофикацию, негативно влияя на ценные лососевые и сиговые рыбы. Поэтому при использовании удобрений эффект их воздействия на водоёмы Арктики должен тщательно рассчитываться. Повышать эффективность очистки нефтезагрязнённых почв можно посевом трав с разветвлённой корневой системой. Они сдерживают миграцию загрязнителей, препятствуют пересыханию почвы и образованию корки, что важно для высокой микробиологической активности. Растения через ризосферу (симбиотические микроорганизмы) положительно влияют на деструкцию нефти и нефтепродуктов [12].

Растения, адаптируясь к токсичной среде, используют все возможные механизмы защиты от увеличения активности антиоксидантных систем и систем репараций ДНК до включения апоптоза и SOS-репараций, используя часть продуктов биодegradации нефтезагрязнений для питания.

Синергетический эффект взаимоактивации микробов и растений увеличивает скорость биодegradации загрязнения, способствует вовлечению в процессы трансформации более широкого спектра углеводов и приближению состава почвенных битумоидов к природному фону [12].

Литература

- Васильевская В. Д., Иванов В. В., Богатырев Л. Г. Почвы Севера Западной Сибири, М., Изд-во МГУ, 1986, С. 227.
 - Глазовская М. А. Принципы классификации почв по их устойчивости к химическому загрязнению // Земельные ресурсы мира, их использование и охрана. М., 1978. С. 85-99.
 - Аргунов, В. А. Объемная очистка нефтезагрязненных почвогрунтов / В. А. Аргунов, О. Г. Фетисов, Г. Л. Гендель // Новые технологии для очистки нефтезагрязненных вод, почв, переработки и утилизации нефтешламов: междунар. конф. (10-11 декабря 2001 г.): тез. докл. М.: Издательский дом «Ноосфера». 2001. С. 127-128.
 - Аренс В. Ж. Нефтяные загрязнения: как решить проблему / В. Ж. Аренс, О. М. Гридин, А. Л. Яншин // Экология и промышленность России. 1999 сент. С. 33-36.
 - Иларионов С. А. Экологические аспекты восстановления нефтезагрязненных почв. 2004. Екатеринбург: УрО РАН, С. 194.
 - Белоусова Н. И. Отбор микроорганизмов, способных к деструкции нефти и нефтепродуктов при пониженных температурах / Н. И. Белоусова, Л. М. Барышникова, А. Н. Шкидченко // Прикладная биохимия и микробиология. 2002. Т. 38, № 5. С. 513-517.
 - Коронелли Т. В., Комарова Т. И., Ильинский В. В. Интродукция бактерий рода *Rhodococcus* в тундровую почву, загрязненную нефтью. Прикл. Биохим. и микроб. 1997. Т. 33, №2. С. 198-201.
 - Ерофеевская Л. А., Бурмистрова Т. И., Алексеева Т. П., Терещенко Н. Н. // Цеолит как незаменимый компонент в реабилитации нарушенных земель. Биологические науки. Новое слово в науке и практике: гипотезы, апробация результатов исследований. 2013, №3. С. 7-9.
 - Колодезников К. Е., Новгородов П. Г., Степанов В. В. Типы цеолитового сырья месторождения Хонгуруу // Перспективы применения цеолитовых пород месторождения Хонгуруу: Сб. науч. Тр. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1993. С. 5-13.
 - Аренс В. Ж., Саушин А. З., Гридин О. М., Гридин А. О. Очистка окружающей среды от углеводородных загрязнений. М., Изд-во «Интербук», 1999. С. 371.
 - Кондратьева Н. И., Габышева Р. И., Новгородов П. Г. Вермикулиты месторождения Инагли (Якутия) для очистки водной поверхности и почвы от нефтезагрязнений // Материалы 1-й международной конференции: Значение промышленных минералов в мировой экономике: месторождения, технология, экономические оценки - Москва, 31 января - 3 февраля 2006 г. М., ГЕОС, 2006. С. 101.
 - Lifshits S. Kh., Chalaya O. N., Glaznetsova Yu. S., Zueva I. N. The effect of oil contamination on the adaptive potential of plants in criolite zones / AAAPG-2012. Abstract of "The 8th Intern. Conf. on Petroleum Geochemistry and Exploration in the Afro-Asian Region". Hangzhou, China. November 2-4, 2012. P. 91.
 - Кошелева И. А. Дegradация фенатрена мутантными штаммами деструкторами нафталина / И. А. Кошелева, Н. В. Балашева, Т. Ю. Измалкова и др. // Микробиология. 2000. Т. 69, № 6. С. 783-789.
 - Белоусова Н. И., Пырченкова И. А. Выбор и характеристика активных психотрофных микроорганизмов-деструкторов нефти / И. А. Пырченкова, А. Б. Гафаров, И. Ф. Пунтус и др. // Прикладная биохимия и микробиология. 2006. Т. 42, № 3. С. 298-305.
- Важным фактором биологической деструкции нефтепродуктов является температура [13]. Для условий АЗРФ необходимы биопрепараты-деструкторы нефтезагрязнений на основе районированных аборигенных штаммов, обладающих способностью расти при пониженных температурах (+4+10 °С), низких значениях рН (4,5-6), повышенном содержании NaCl (1-4 %) [14]. Микроорганизмы могут выжить при ультранизких температурах обладая соответствующими механизмами биологического обмена, включая особенности белкового синтеза и структурой ферментных белков.
- Наиболее перспективна группа психрофильных штаммов микроорганизмов-нефтедеструкторов, выделенная в Ре-

спублике Саха (Якутия). Они размножаются при низких температурах и легко переносят ультрахолодные зимы. В Центральной Якутии из-за обширного зимнего антициклона снежный покров рыхл и невелик, а ночные температуры особенно низки, в связи с чем почвы промерзают быстро на значительную глубину и температуры низки даже в сравнении с почвами арктических островов, где в силу морского циклонического климата не происходит такого низкого падения температур. Но целесообразно иметь аборигенные штаммы для всех секторов Арктики, особенно из мест скопления бочек из-под нефтепродуктов.

Необходимо учитывать, что в соответствии с описаниями уже разработанных биопрепаратов минимальный эффективный для них уровень pH - 4,5. Но почвы торфяных бугров крупнобугристых болот и верховых торфяников имеют ещё более высокую кислотность (pH 3-4,5). Для таких территорий нужно применять известкование, что при правильном дозировании не вызовет серьёзных проблем, так как те же растительные сообщества успешно произрастают на карбонатных породах.

Literature

- Vasil'yevskaya V. D., Ivanov V. V., Bogatyrev L. G. Soils of West Siberian North, Moscow, MSU, 1986, P. 227.
- Glazovskaya M. A. Principles of soils classification by their sustainability to chemical pollution // Land resources of the world, their use and protection. Moscow, 1978. Pp. 85-99.
- Argunov V. A. The Volumetric cleaning of oil-polluted soils and grounds /V. A. Argunov, O. G. Fetisov, G. L. Gendel // New technologies for cleaning oil-polluted water and soil, processing and disposal of oil sludge: International Conference (10-11 December, 2001): materials. Moscow: Publishing office «Noosphere». 2001. Pp. 127-128.
- Arene, V. Zh. Oil pollutions: how to solve the problem / V. Zh. Apene, O. M. Gridin, A. L. Yanshin // Ecology and industry of Russia. 1999 Sept. Pp. 33-36.
- Ilarionov S. A. Ecological aspects of oil-polluted soil recovery. 2004. Ekaterinburg: UO RAS, P. 194.
- Belousova, N. I. Selection of microorganisms, able to destruction of oil and oil production by low temperatures / N. I. Belousova, L. M. Baryshnikova, A. N. Shkidchenko // Applied Biochemistry and Microbiology. 2002. V. 38, N 5. Pp. 513-517.
- Koronelly T. V., Komarova T. I., Il'insky V. V. Introduction of Rhodococcus bacteria into the tundra soil, polluted by oil. Applied Biochemistry and Microbiology. 1997. v. 33, N 2. pp.198-201.
- Yeropheevskaya L. A., Burmistrova T. I., Alexeeva T. P., Tereshenko N. N. // Zeolite as an irreplaceable component in the rehabilitation of disturbed lands. Biological Sciences. A new word in science and practice: hypotheses, testing of research results. 2013, N3. Pp. 7-9.
- Kolodeznokov K. Ye., Novgorodov P. G., Stepanov V. V. Types of zeolite raw materials from the Honguruu deposit // Perspectives of zeolite rock application in Honguruu deposit: Collection of scientific papers. Yakutsk: YaSC SO RAS, 1993. Pp. 5-13.
- Arene V. Zh., Saushin A. Z., Gridin O. M., Gridin A. O. Environment cleaning from hydrocarbon pollution. Moscow, «Interbook», 1999. P. 371.
- Kondrat'yeva N. I., Gabysheva R. I., Novgorodov P. G. Vermiculites of the Inagli deposit (Yakutia) for cleaning the water surface and soil from oil pollution // Materials of I-st International Conference: The importance of industrial minerals in the world economy: deposits, technology, economic assessments. Moscow, 31 January - 3 February 2006. M., GEOS, 2006. P. 101.
- Lifshits S. Kh., Chalaya O. N., Glaznetsova Yu. S., Zueva I. N. The effect of oil contamination on the adaptive potential of plants in criolite zones /AAAPG-2012. Abstract of "The 8th Intern. Conf. on Petroleum Geochemistry and Exploration in the Afro-Asian Region". Hangzhou, China. November 2-4, 2012. P. 91.
- Belousova N. I., Pyrchenkova I. A. Selection and characteristics of active psychotrophic microorganisms-oil destructors / I. A. Pyrchenkova, A. B. Gapharov, I. Ph. Puntus et al // Applied Biochemistry and Microbiology. 2006. v. 42, N 3. Pp. 298-305.
- Kosheleva I. A. Degradation of fenatren by mutant strains of naphthalene destructors / I. A. Kosheleva, N. V. Balasheva, T. Yu., Izmalkova et al // Microbiology. 2000. v. 69, N 6. Pp. 783-789.