

УДК 574.4:631.445:631.415.1(479.24)

САМООЧИЩАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОЧВ АЗЕРБАЙДЖАНА ОТ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ рН

© 2021 г. С. И. Наджафова¹, *, Ф. Ш. Кейсерухская¹, З. П. Гасанова¹

¹ Институт микробиологии НАН Азербайджана
AZ 1004 Баку, ул. М. Мушвига, 103, Республика Азербайджан

*E-mail: nadjafovas@yahoo.com

Поступила в редакцию 23.07.2020 г.

После доработки 23.11.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

Представлены результаты лабораторного моделирования интенсивности процессов самоочищения 3-х типов почв: желтоземной, серо-бурой и каштановой при загрязнении их сырой нефтью. Показано, что с изменением рН почв в сторону повышения кислотности или щелочности происходило снижение общей численности функциональных групп микроорганизмов и интенсивности дыхания. Наиболее интенсивно процесс разложения в почве сырой нефти имел место в каштановой почве при рН 7.2. В соответствии с показателями рН самоочищающую способность почв в случае загрязнения сырой нефтью можно расположить в последовательности по убыванию: каштановая (рН 7.2) > серо-бурая (рН 8.2) > желтоземная (рН 5.9). В случае загрязнения желтоземных почв их самоочищающая способность была недостаточной, что потребует принятия оперативных мер для ускорения естественных процессов самоочищения в них с целью предотвращения деградации их физико-химических и биологических свойств и ускоренной биореабилитации в управляемом режиме с использованием современных методов рекультивации.

Ключевые слова: типы почв, рН почвы, самоочищение, ускорение самоочищения, приемы рекультивации.

DOI: 10.31857/S0002188121040116

ВВЕДЕНИЕ

Основными источниками загрязнения ландшафтов, в том числе почвенного покрова, углеводородами являются нефтедобывающие предприятия и нефтеперерабатывающие заводы, транспортировка сырой нефти трубопроводами, нефтебазы, железные дороги и др. Показано, что в сфере влияния всех этих предприятий имеется потенциальная опасность возникновения зон загрязнения ландшафтов различными нефтепродуктами [1].

На многих предприятиях, находящихся на территории Азербайджана, имеется опасность загрязнения ландшафтов при аварийных ситуациях, в том числе сырой нефтью и нефтепродуктами. К основным причинам возникновения аварийных ситуаций относятся внешние и внутренние физико-химические воздействия на трубопроводы (например, в результате внешнего физического воздействия в районе г. Сумгаит на трассе ЗМЭТ произошел разрыв трубопровода и разлив сырой нефти объемом >300 т), коррозионные процессы (как это было при разливе >200 т

сырой нефти в районе п. Насосный в 1998 г. вдоль СМЭТ), в результате чего они повреждаются, несвоевременная замена или ремонт старого оборудования, ошибки рабочих и служащих. Разливы нефти могут иметь место также при их транспортировке железнодорожным транспортом, автотранспортом, на территориях автозаправочных станций и др. Причинами возникновения аварийных ситуаций, которые приводят к значительным финансовым и материальным потерям, могут являться также природные явления как эрозионные процессы, землетрясения, наводнения, обвалы и оползни и др.

Процесс самоочищения почвенного покрова от органических поллютантов может проходить активно только при определенных физико-химических условиях, которые определяют структуру и активность микробных сообществ, участвующих в этих сложных процессах. Наряду с другими физико-химическими показателями рН почвы является одним из ключевых факторов, определяющих интенсивность и саму возможность про-

цесса самоочищения почв от органических поллютантов.

Известно отношение микроорганизмов к кислотности среды, в том числе кислотности почв, загрязненных техногенными поллютантами [2]. Концентрация водородных ионов играет роль фактора, определяющего границы существования и жизнедеятельности биоорганизмов, в том числе почвенных микроорганизмов. Показатели рН являются одним из важнейших абиогенных факторов, влияющих на рост и размножение микроорганизмов. Разнообразие и метаболический потенциал бактерий-деструкторов может снижаться с переходом условий среды в стрессовую область [3, 4]. Экстремальные условия окружающей среды могут представлять естественный барьер для деградации углеводородов почвенным микробиоценозом, ограничивая, таким образом, не только возможность естественных процессов самоочищения, но также и возможности применения методов биоремедиации загрязненных почв.

Большинство микроорганизмов функционирует при рН почвы от 4.0 до 9.0, однако их оптимальный рост наблюдается в среде, при концентрации ионов водорода, близкой к рН 7.0, что характерно для большинства природных сред. Очень высокие (кислая реакция) или очень низкие (щелочная реакция) концентрации водородных ионов обычно токсичны для большинства организмов. Наиболее активно процессы роста и развития микроорганизмов-деградаторов нефтяных углеводородов имеют место в среде с нейтральным рН в пределах 6.8–7.2 ед. В то же время ряд исследований показали широкий диапазон рН, при котором в естественных условиях может идти деградация нефтяных углеводородов в почве. Например, из месторождения в Китае выделен новый род *Amicollicoccus*, который рос в диапазоне рН 6.0–11 (оптимум 8.0 ед.) [5]. Из микробного сообщества, существующего в экстремальных условиях нефтешлама (рН 1.15), выделены и изучены 13 штаммов бактерий – умеренных ацидофилов, идентифицированных как *Corynebacterium* sp., *D. maris* и *Bacillus* sp., способных к деградации широкого спектра углеводородов в широком диапазоне рН от 4.0 до 9.0 ед. [6].

Цель работы – на примере 3-х основных типов почв (каштановой, серо-бурой и желтоземной), характеризующихся различными показателями рН, широко распространенных на территории Азербайджана и используемых под различные сельскохозяйственные культуры (чай, хлопок, зерновые, садовые и др.), оценить активность

процессов самоочищения в случае их загрязнения нефтяными углеводородами.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были 3 типа почв: каштановая, серо-бурая и желтоземная (рис. 1). Почвенные образцы отбирали непосредственно в местах их распространения [7]. Кислотность почв определяли с помощью полевого рН-метра-влагометра. Отбор проб почвы общей смешанной массой 1.0 кг проводили из слоя 0–20 см в стерильные пакеты по методу “конверта” [8], затем доставляли в лабораторию. Исследование проводили методом лабораторного моделирования: в стеклянные стаканы объемом 300 мл вносили образцы почв массой 250 г. В почву вносили сырую нефть Сураханского месторождения (Апшеронский полуостров) из расчета 2 г/100 г почвы, тщательно перемешивали. Содержание нефти в исследованных образцах почв составляло 2% от массы почвы, что соответствовало высокой степени загрязнения почв. Стаканы помещали в термостат и инкубировали при постоянной температуре 26°C, время инкубирования – 180 сут. Почву в стакане периодически увлажняли до 40% ППВ. Влажность почв поддерживали постоянной, добавляя воду в соответствии с потерей их массы. Через 180 сут после начала эксперимента из каждого экспериментального стакана отбирали пробы почв и в них определяли содержание остаточных углеводородов гравиметрическим методом [9]. В образцах почв также определяли общую численность гетеротрофных микроорганизмов на МПА [10]. Численность углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ) в почвах выявляли на агаризованной минеральной среде с *n*-гексадеканом в качестве единственного источника углерода и энергии [10]. Дыхание почв определяли по интенсивности продуцирования CO₂ по методу [11].

Исходные показатели рН почв до начала эксперимента были следующими: каштановой – 7.2, серо-бурой – 8.2, желтоземной – 5.9, численность углеводородокисляющих микроорганизмов (титр): каштановой – 1×10^5 , серо-бурой – 3.5×10^4 , желтоземной – 1×10^3 , степень загрязнения для всех типов почв – 2%.

Все лабораторные эксперименты проводили в 3-х повторностях. Достоверность полученных результатов определяли с помощью *t*-критерия Стьюдента, статистическую обработку проводили в программе Microsoft Excel 2002. Представление результатов в таблицах и графиках – среднее стандартное отклонение.



Рис. 1. Расположение точек отбора почвенных проб для исследования их самоочищающей способности: 1 – серо-бурая почва, 2 – каштановая почва, 3 – желтоземная почва.

Встречающиеся в природе щелочные условия обычно связаны с почвами. Типичными являются почвы, обогащенные щелочными минералами. Щелочные почвы могут формироваться в результате полного окисления органического вещества в районах с повышенной аэрацией и высокой температурой – к таким территориям в Азербайджане относят почвы аридных зон, которые формируются в условиях климата пустынь или полупустынь. Почвы со щелочными рН распространены, в том числе, и на Апшеронском полуострове: это в основном серо-бурые почвы, рН этих почв в зависимости от подтипа меняется в пределах 7.8–9.0 ед., их общая площадь составляет 150 тыс. га. Гранулометрический состав (<0.001 мм) составляет 32–43%, содержание гумуса – 0.84–1.60%, содержание азота – 0.08–0.13%, соотношение С : N – 6.8–7.2. Эти почвы в наибольшей степени загрязнены нефтью и нефтепродуктами: общая площадь нефтезагрязненных почв в регионе составляет >25 тыс. га.

Почвы с нейтральным рН (в пределах 6.9–7.8) представлены каштановыми почвами, они распространены в сухих субтропических степях Азербайджана с общей площадью почти в 1.4 млн га [7]. По гранулометрическому составу почвы глинистые, содержание гумуса – 2–4%, содержание азота – 0.20–0.30%, соотношение С : N – 7–9.

Почвы с кислой средой в Азербайджане распространены в Талышско-Ленкоранской зоне: горно-лесные желто-бурые, в которых рН в верхних слоях составляет 5.3–5.9, глубже снижается до 4.4–4.6 ед., что связано с присутствием поглощенного алюминия. Горно-лесные желтоземные почвы этого же региона являются типичными представителями почв влажных субтропиков

Азербайджана: реакция почвенной среды обычно слабокислая и кислая, pH_{H_2O} составляет 3.2–4.7. По гранулометрическому составу дифференциация профиля слабая, содержание илистой фракции в верхнем горизонте равно 13.3–27.2%, содержание гумуса – 2.0–2.7%, содержание азота – 0.25–0.27%, соотношение С : N в верхней части профиля – 8.6–9.1. Общая площадь земель в этом регионе составляет 157 тыс. га.

Скорость самоочищения в исследованных почвах от углеводородов оценивали по интенсивности роста и развития микроорганизмов, в том числе углеводородоокисляющих микроорганизмов (УОМ), способных разлагать загрязнитель, по интенсивности дыхания почв, которая свидетельствовала об использовании загрязнителя в качестве единственного источника углерода и энергии, а также по интенсивности его разложения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты микробиологических исследований показали, что с изменением показателя кислотности почв от нейтрального в сторону подкисления или подщелачивания отмечено снижение общей численности микроорганизмов (рис. 2) и интенсивности дыхания (рис. 3). Изменения дыхания почвы были обусловлены интенсивностью биологических процессов в почве. Высокая дыхательная активность в каштановой почве (0.71 г CO_2 /кг почвы) по сравнению с другими типами почв – желтоземной и серо-бурой в присутствии углеводородного субстрата свидетельствовала о сравнительно высокой мобилизационной активности микрофлоры в этой почве, результатом которой был всплеск интенсивности дыхания.

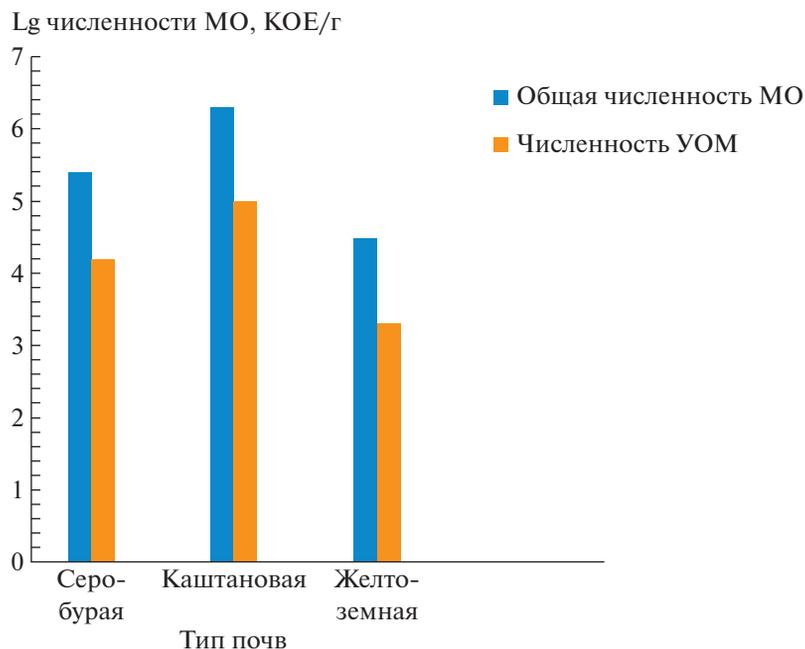


Рис. 2. Численность микроорганизмов в различных типах почв.

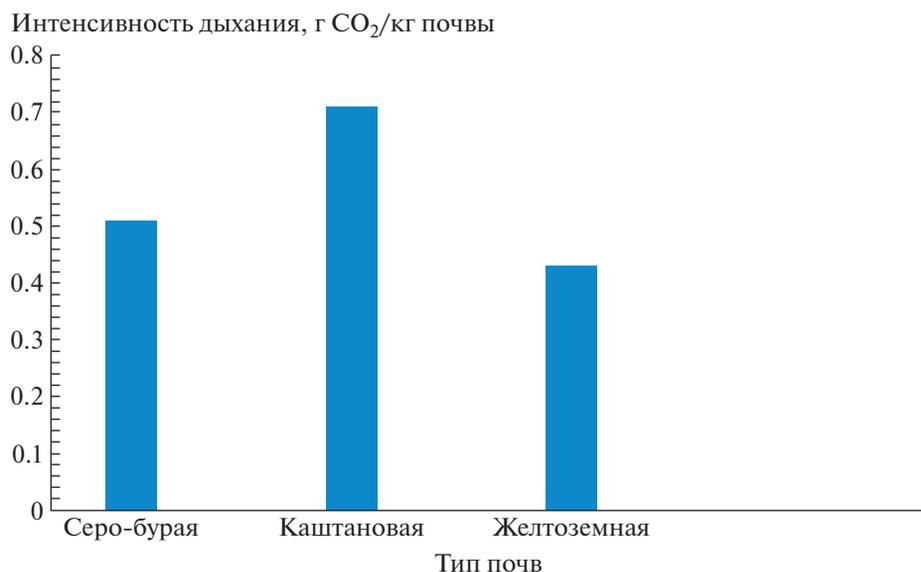


Рис. 3. Интенсивность дыхания в различных типах почв.

Данные, представленные в табл. 1, показали различие в скорости разложения сырой нефти в почве в зависимости от типа почв. Выявлено, что величина рН почвы как абиогенный фактор при всех прочих равных условиях (степень загрязнения 2%, температура и время инкубирования, увлажнение и др.) определяла интенсивность процессов самоочищения почв. Наиболее интенсивно процесс разложения в почве сырой нефти имел место в каштановой почве: через 180 сут в ней разложилось

64.5% нефти от исходного количества, в серо-бурой – 48.5, в желтоземной – всего 21%.

Таким образом, в соответствии с показателями рН самоочищающую способность почв в случае загрязнения сырой нефтью можно расположить в следующей последовательности по убыванию: каштановая (рН 7.2) > серо-бурая (рН 8.2) > желтоземная (рН 5.9).

В желтоземных почвах с кислой реакцией этот фактор имел решающее значение при разложе-

Таблица 1. Биологическая активность и интенсивность самоочищения от сырой нефти почв с различными показателями рН

Почва	рН	Показатели			
		Численность УОМ, титр		Содержание нефтяных углеводов, г/на кг почвы	
		начало инкубирования	через 180 сут	начало инкубирования	через 180 сут
Серо-бурая	8.2	$3.5 \times 10^4 \pm 2.1$	$3.1 \times 10^5 \pm 2.2$	20	10.3
Каштановая	7.2	$1 \times 10^5 \pm 1.9$	$3.1 \times 10^6 \pm 2.0$	20	7.1
Желтоземная	5.9	$1 \times 10^3 \pm 1.1$	$3 \times 10^4 \pm 1.3$	20	14.2

нии нефти и нефтепродуктов, т.к. повышенная кислотность ослабляла микробиологическую активность. Полученные данные дали основание прогнозировать, что в случае загрязнения желтоземных почв их самоочищающая способность будет недостаточной и потребуются принятие оперативных мер для ускорения естественных процессов самоочищения этих почв с целью предотвращения деградации их физико-химических и биологических свойств и их ускоренной биореабилитации с использованием современных методов рекультивации. Поэтому для создания рН, оптимального для биоразложения поллютанта, кислые почвы в случае их загрязнения необходимо известковать [12], что позволит устранить избыточную кислотность, вредную для роста и развития микроорганизмов, обеспечивающих процесс разложения загрязнителя, улучшит физические свойства почв. Принимая во внимание, что в отличие от серо-бурых почв, на которых располагаются нефтедобывающие предприятия (Апшеронский полуостров), и для которых высока вероятность загрязнения, вероятность загрязнения желтоземных почв углеводородами значительно меньше (в основном $\approx 5\text{--}10 \text{ м}^2$ на территориях заправочных станций), для этого типа почв в случае их загрязнения норма известкования может составить в пределах $5\text{--}14 \text{ кг}$ извести/ 10 м^2 (срок эффективного действия – $12\text{--}15$ лет).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования интенсивности самоочищения 3-х разных типов почв в случае загрязнения их сырой нефтью показали значимость показателя кислотности почв. При прочих равных условиях (степени загрязнения, показателя увлажнения, температуры) кислотность почв имеет определяющее значение для активности процесса деградации нефти в почве: наиболее активно процесс разложения в почве сырой нефти

обнаруживался при нейтральных величинах рН, характерных для каштановых почв. Через 180 сут инкубации загрязненных почв в модельном опыте (степень загрязнения нефтью 2%) в каштановой почве разложилось 64.5% нефти от исходного количества, в серо-бурой – 48.5%, в желтоземной – всего 21%. Данная закономерность подтверждена численностью сапрофитных микроорганизмов, а также активностью в почве УОМ, ответственных за процесс деградации углеводов: исходная численность в каштановой почве этих групп микроорганизмов составляла 1.10^5 млн/мл, через 180 сут эксперимента их численность увеличилась до 3.1×10^6 млн/мл, что было значительно больше, чем в других типах почв. Показатели дыхательной активности (CO_2 , г/кг почвы) также коррелировали с численностью микроорганизмов: они были значительно больше для каштановой почвы – $0.72 \text{ г CO}_2/\text{кг}$ почвы по сравнению с серо-бурой ($0.52 \text{ г CO}_2/\text{кг}$ почвы) и желтоземной ($0.41 \text{ г CO}_2/\text{кг}$ почвы). Остаточная степень загрязнения для каштановой почвы через 180 сут составила всего 0.7% при исходной степени загрязнения 2.0%: такая загрязненность уже считается безопасной для почвы.

Таким образом, в случае загрязнения сырой нефтью по степени самоочищения исследованные типы почв располагаются в последовательности: каштановая (рН 7.2) > серо-бурая (рН 8.2) > желтоземная (рН 5.9).

Можно прогнозировать, что допустимый верхний предел загрязнения нефтью и нефтепродуктами также будет различен в исследованных типах почв: каштановые типы почв могут выдерживать более высокую техногенную нагрузку по сравнению с серо-бурой и желтоземными почвами. В каштановых почвах при одинаковой степени загрязнения углеводородами процесс самоочищения будет происходить значительно быст-

рее по сравнению с другими типами почв (серобурой и желтоземной).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Ю.Л., Акимов Б.А., Соколов Ю.И. Предупреждение и ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов. М.: Ин-октаво, 2005. 368 с.
2. Шлегель Г. Общая микробиология. М.: Мир, 1987. 565 с.
3. Foght J.M., McFarlane D.M. Growth of extremophiles on petroleum // Enigmatic microorganisms and life in extreme environments / Ed. Seckbach J. 1999. P. 527–538.
4. Margesin R., Schinner F. Bioremediation (natural attenuation and biostimulation) of diesel-oil-contaminated soil in an alpine glacier skiing area // Appl/ Microbiol/ Biotechnol. 2001. V. 67. P. 3127–3133.
5. Wang Y.N., Chi Ch.Q., Lou Z.Y., Tang Y.Q. et al. *Amycolobicoccus subflavus* gen. nov., sp. nov., an actinomycete isolated from a saline soil contaminated by crude oil // Inter. J. Systematic Evolut. Microbiol. 2010. V. 60. P. 638–643.
6. Плевакова Е.В. Эколого-функциональные аспекты микробной ремедиации нефтезагрязненных почв: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Саратов, 2010. 47 с.
7. Салаев М.Э., Бабаев М.П., Джафарова Ч.М., Гасанов В.Г. Морфогенетические профили почв Азербайджана. Баку: Элм, 2004. 202 с.
8. Егоров Н.С. Руководство к практическим занятиям по микробиологии. М.: Изд-во МГУ, 1995. 224 с.
9. РД 52.18.647-2003. Метод. указ-я. Определение массовой доли нефтепродуктов в почвах. Методика выполнения измерений гравиметрическим методом. 2003. 21 с.
10. Практикум по микробиологии / Под ред. Нетрусова А.И. М.: Академия, 2005. 608 с.
11. Звягинцев Д.Г., Асеева И.Б., Бабьева И.П., Мирчинк Т.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1980. 224 с.
12. Колесниченко А.В., Марченко А.И., Побежимова Т.П., Зыкова В.В. Процессы биодegradации в нефтезагрязненных почвах. М.: Промэкобезопасность, 2004. 194 с.

Self-Cleaning Ability of Different Types of Soils in Azerbaijan Depending on Their pH

S. I. Nadjafova^{a, #}, F. Sh. Keyseruxskaya^a, and Z. P. Hasanova^a

^aInstitute of Microbiology of NAS of Azerbaijan
M. Mushviga str. 103, Baku AZ 1004, Republic of Azerbaijan

[#]E-mail: nadjafovas@yahoo.com

The results of laboratory modeling of the intensity of self-cleaning processes of three types of soils are presented: yellow-earth, gray-brown and chestnut. The results showed that with a change in soil pH towards an increase in acidity or alkalinity, a decrease in the total number of functional groups of microorganisms and respiration rate is observed. The most intensive process of decomposition in the soil of crude oil took place in chestnut soil with a pH of 7.2. In accordance with the pH indicators, the self-cleaning ability of soils in case of contamination with crude oil can be arranged in descending order: chestnut (pH 7.2) > gray-brown (pH 8.2) > yellow earth (pH 5.9). In case of contamination of yellow-earth soils, their self-cleaning capacity will be extremely insufficient and operational measures will be required to accelerate the natural processes of self-cleaning processes of these soils in order to prevent degradation of their physico-chemical and biological properties and their accelerated biorehabilitation using modern reclamation methods.

Key words: various types of soil, soil pH, self-cleaning, self-cleaning acceleration, reclamation techniques.