

УДК 632.122.2:581.52:631.46(470.21)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ ПОД ПОСЕВАМИ КОСТРЕЦА И ВОПРОСЫ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ

© 2012 Н.А. Киреева¹, А.С. Григориади¹, В.В. Водопьянов², Л.Л. Водопьянова²¹ Башкирский государственный университет, г. Уфа² Уфимский государственный авиационный технический университет

Поступила в редакцию 09.05.2012

Показана возможность использования растений костреца *Bromopsis inermis* для фиторемедиации серой лесной почвы, загрязненной нефтью и продуктами ее первичной переработки. В работе представлены данные по исследованию сообщества углеводородокисляющих микроорганизмов в ризосфере растений и зоне, свободной от корней, фитотоксичности рекультивируемой почвы под посевами фитомелиорантов и математического моделирования содержания нефтяных углеводородов в почве.

Ключевые слова: фитотоксичность, фиторемедиация, серая лесная почва, нефть, бензиновая фракция, вакуумный газойль, вакуумный остаток, углеводородокисляющие микроорганизмы, математическая модель

Нефтяные углеводороды являются одними из наиболее экологически опасных загрязнителей природной среды и, в первую очередь, почвы. В связи с этим встает острый вопрос о восстановлении нарушенных экосистем. Из существующих методов рекультивации почв при умеренной степени загрязнения наиболее эффективными считаются биологические способы очистки, среди которых все большую популярность приобретают приемы фиторемедиации, основанные на использовании объединенного метаболического потенциала микроорганизмов и растений [1-5].

Цель исследования: экспериментальное и математическое моделирование для выявления особенностей микробно-растительных взаимодействий в условиях углеводородного загрязнения и оценка степени очистки почвы и повышения биологической активности почвы.

Объекты и методы исследования. Для выявления особенностей микробно-растительных взаимодействий были поставлены модельные опыты на серой лесной почве, загрязненной сырой нефтью, бензиновой фракцией, вакуумными газойлем и остатком в концентрациях 1 и 5% масс. В качестве фитомелиоранта использовали растения костреца безостого (*Bromopsis inermis*). Кострец является засухоустойчивым, холодостойким многолетним злаком, характеризующийся мощной корневой системой. В качестве контроля использовали растения, растущие на незагрязненной почве. Учет численности микроорганизмов проводили через 30, 60 и 90 суток с момента загрязнения по общепринятой методике посева

почвенной суспензии на соответствующие агаризованные питательные среды [6]. Остаточные углеводороды в почве определяли весовым методом [7]. Повторность опыта 3-х кратная.

Результаты и их обсуждение. В ходе эксперимента было проведено наблюдение за динамикой численности углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ) в загрязненных почвах под посевами костреца. Данная группа организмов является основной, ответственной за разложение поллютантов углеводородного происхождения. Из полученных данных видно, что на всем протяжении эксперимента наблюдалось увеличение численности УОМ при фитомелиорации в сравнении с нереккультивируемыми образцами почв без растений (рис. 1). При этом численность УОМ в ризосфере фитомелиорантов на несколько порядков превышала численность УОМ в эдафосфере (под растениями). В зависимости от концентрации поллютанта различалась динамика численности УОМ. Так, при выращивании костреца на почвах, загрязненных в концентрации 1%, через месяц после внесения поллютанта в концентрации 1% численность УОМ увеличилась и сохранялась на достигнутом уровне до окончания эксперимента. При увеличении концентрации загрязнителей численность данной группы микроорганизмов увеличивалась постепенно и максимального значения достигала через 90 сут. Наибольшая численность УОМ в образцах почвы, рекультивируемых с помощью костреца, отмечена при загрязнении сырой нефтью.

Стимуляция микробиологической активности почвы подтверждается анализом содержания остаточных нефтяных углеводородов. Высокая биodeградационная активность обусловлена быстрой адаптационной способностью почвенных микроорганизмов к новому субстрату, внесенному при загрязнении продуктами перегонки нефти. Через 90 суток в загрязненной почве (5% масс) в отсутствии растений произошло разложение углеводородов вакуумного газойля, бензиновой фракции и вакуумного остатка на 24, 29 и 34% соответственно.

Киреева Наиля Ахняфовна, доктор биологических наук, профессор кафедры биохимии и биотехнологии. E-mail: vodop@yandex.ru

Григориади Анна Сергеевна, кандидат биологических наук, ассистент кафедры биохимии и биотехнологии. E-mail: nysha111@yandex.ru

Водопьянов Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры математики. E-mail: vodop@yandex.ru

Водопьянова Лия Лизмовна, аспирантка

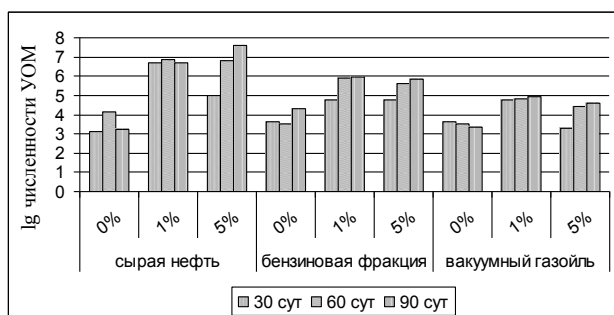


Рис. 1. Численность УОМ в ризосфере *Bromopsis inermis*, произрастающих на загрязненной почве

Выращивание фитомелиорантов на почвах с первоначальным загрязнением 1% привело к значительному снижению содержания поллютантов в почве (рис. 2). Практически полное разложение вакуумного остатка наблюдалось под посевами костреца. Минимальный эффект наблюдался в образцах, загрязненных сырой нефтью, однако и в этом случае показатель на 20% превышал таковой в вариантах опыта без фиторемигрантов. При внесении в почву различных продуктов первичной переработки нефти убыль углеводородов была на одном уровне и составляла 57%. Многочисленными исследованиями установлено, что загрязнение нефтью и нефтепродуктами приводит к замедлению роста и

развития растений [8-10]. Негативное воздействие поллютантов на растения происходит из-за изменения физико-химических свойств почвы, главным образом, в результате увеличения гидрофобности и заполнения нефтью почвенных капилляров, а также прямого токсического действия углеводородов нефти (фитотоксичности) и развития в ней микромицетов, образующих токсины. Фитотоксичность почв под посевами фитомелиорантов была ниже, чем нерекультивируемых во всех вариантах опыта. Максимальное снижение фитотоксичности отмечалось в образцах с использованием фитомелиорантов для очистки от вакуумного остатка (табл. 1).

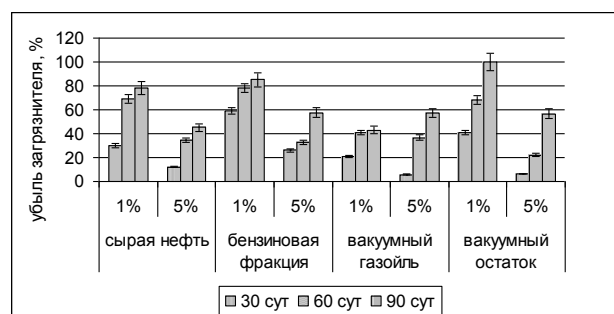


Рис. 2. Деграляция нефтяных углеводородов в почве под посевами костреца

Таблица 1. Фитотоксичность почвы, загрязненной продуктами первичной переработки нефти в концентрации 5%, под посевами костреца к семенам редиса, УКЕ

Варианты опытов	Время отбора проб, сут		
	30	60	90
контроль	90,9±5,6	0	90,9±9,8
бензиновая фракция			
без растений	727,5±54,2	454,6±18,7	363,7±18,7
с растением	454,6±15,3	363,7±23,8	272,7±9,5
вакуумный газойль			
без растений	727,5±23,8	727,5±36,7	954,8±18,7
с растением	454,6±23,8	272,7±54,2	272,7±18,7
вакуумный остаток			
без растений	886,6±23,8	954,8±18,7	1023±36,7
с растением	545,6±18,7	363,7±36,7	181,8±12,5

При построении кинетических моделей фиторемигранции, необходимо учитывать, что процесс ризодеградации может протекать одновременно с фитодеградацией, фитотрансформацией и фитоиспарением [11]. При этом часть загрязнения может минерализоваться почвенными микроорганизмами, часть поллютантов может оставаться в водной фазе почвы, часть — находиться в биодоступной форме, связанной с твердой почвенной матрицей, а некоторое количество загрязнения может находиться в труднодоступной форме в виде связанных остатков. С учетом ранее разработанных математических моделей [12] изменение содержания поллютантов

можно описать представленной ниже моделью. Расчеты по программе в математическом пакете Mathematica 8.0 при различных значениях параметров показали феноменологическое совпадение модели с результатами экспериментов.

Выводы: проведенное исследование показало, что использование костреца безостого для очистки загрязненной почвы оказалось эффективным. Наибольший эффект достигался при детоксикации продуктов переработки нефти: помимо снижения содержания углеводородов, отмечалось увеличение численности УОМ и снижение фитотоксичности в почве.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_w(t)}{dt} = -C_w(t) \cdot \left(\lambda M_0 + \frac{C_w(t)}{u_1 + C_w(t)} \right) \cdot \frac{\mu Y(t)}{u_2 + Y(t)}, \\ \frac{dY(t)}{dt} = \eta \cdot Y(t) \cdot (\beta S(t) + F_1(t) - Y(t) + h), \\ \frac{dA_{aq}(t)}{dt} = -k_1 A_{aq} + k_2 A_{fs}, \\ \frac{dA_{fs}(t)}{dt} = k_3 A_{aq} - k_4 A_{fs} + k_5 A_{ss}, \\ \frac{dA_{ss}(t)}{dt} = k_6 A_{fs} - k_5 A_{ss}, \\ F_1(t) = A_{aq}(t) + A_{fs}(t) + A_{ss}(t) + C_w(t), \\ S(t) = \alpha_s \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{140}\right) \cdot \left(\frac{\sin(140 - t)}{2} + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{1}{F(t) + 1}, \\ F(t) = F_0 \exp\left(-\alpha S_0 \left[\frac{k\lambda}{\mu} (e^{-\lambda t} - 1) + \left(1 - \frac{k}{\mu}\right) \delta(e^{-\delta t} - 1) \right] \right) \end{array} \right.$$

где $C_w(t)$ – концентрация загрязнителя в ризосфере растений; $Y(t)$ – численность УОМ; $A_{aq}(t)$ – концентрация поллютанта в почвенном растворе; $A_{fs}(t)$ – концентрация поллютанта в твердой фазе почвы, адсорбированного обратимо; $A_{ss}(t)$ – концентрация поллютанта в твердой фазе почвы, образующего связанные остатки; $S(t)$ – плотность питательных веществ, выделяемых растениями в ризосфере; $F(t)$ – функция фитотоксичности; M_0 – численность микроорганизмов при $t = 0$; λ , u_1 , u_2 , μ , η , β , h , $k_{1...6}$, t – коэффициенты модели, характеризующие размножение, обратимую адсорбцию загрязнителя в твердой фазе почвы, обратимую десорбцию загрязнителя с твердой фазы почвы, образование связанных остатков, медленную десорбцию связанных остатков, минерализацию загрязнителя в водной фазе, минерализацию загрязнителя в сорбированной форме, содержание влаги в почве, транспирационный поток, сорбцию загрязнителя корнями, диффузионные ограничения в переносе загрязнения из твердой фазы в водный раствор, объемная плотность почвы, время, в мес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Anderson, T.A. Bioremediation in the rhizosphere / T.A. Anderson, E.A. Guthrie, B.T. Walton // Environ. Sci. Technol. 1993. V. 27, № 13. P. 2630-2636.
2. Schnoor, J.E. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants / J.E. Schnoor, L.A. Licht, S.C. McCutcheon et al. // Environ. Sci. Technol. 1995. V. 29, № 7. P. 318-323.
3. Joner, E.J. Nutritional constraints to degradation of PAN in a simulated rhizosphere / E.J. Joner, S.C. Corgie, N. Amellal, C. Leyval // Soil Biol. Biochem. 2002. V. 34, № 6. P. 859-864.
4. Турковская, О.В. Биодegradация органических поллютантов в корневой зоне растений / О.В. Турковская, А.Ю. Муратова // Молекулярные основы взаимоотношений ассоциированных микроорганизмов с растениями. – М.: Наука, 2005. С. 180-208.
5. Суюндуков, Я.Т. Роль фитомелиорации в воспроизводстве плодородия черноземов Зауралья (Башкирия) / Я.Т. Суюндуков, Б.М. Миркин, Ш.Р. Абдуллин и др. // Почвоведение. 2007. №10. С. 1217-1225.
6. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. – М.: МГУ, 1991. 304 с.
7. McGill, W.B. Determination content of oil contaminated soil / W.B. McGill, M.J. Rowell // Sci. Total. Environ. 1980. V. 14, №3. P. 245-253.
8. Udo, E.J. The effect of oil pollution of soil on generation, growth and nutrient uptake of corn / E.J. Udo, A.A. Fayemi // J. Environ. Quality. 1975. V. 4, №4. P. 537-540.
9. Хазиев, Ф.Х. Влияние нефтяного загрязнения на некоторые компоненты агроэкосистемы / Ф.Х. Хазиев, Е.И. Тишкина, Н.А. Киреева, Г.Г. Кузьяметов // Агрохимия. 1988. № 2. С.56-61.
10. Назаров, А.В. Изучение причин фитотоксичности нефтезагрязненных почв / А.В. Назаров, С.А. Иларионов // Альтернативная энергетика и экология. 2005. №1. С.60-65.
11. Кузнецов, А.Е. Прикладная экибиотехнология: учебное пособие: в 2 т. Т. 2 / А.Е. Кузнецов, Н.Б. Градова, С.В. Лушиников и др. – М.: БИНОМ Лаборатория знаний, 2010. 485 с.
12. Водопьянов, В.В. Математическое моделирование процессов в антропогенно нарушенных почвенных биосистемах / В.В. Водопьянов, М.Б. Гузаиров, Н.А. Киреева. – М.: Машиностроение, 2010. 232 с.

MODELING THE HYDROCARBONS DEGRADATION UNDER BROMOPSIS INERMIS CROPS AND PHYTOREMEDIATION QUESTIONS

© 2012 N.A. Kireeva¹, A.S. Grigoriady¹, V.V. Vodopyanov², L.L. Vodopyanova²

¹ Bashkir State University, Ufa

² Ufa State Aviation Technical University

Possibility of using the plants of *Bromopsis inermis* for phytoremediation of gray forest soil polluted by oil and products of its primary processing is shown. In work are submitted data on research of hydrocarbon oxidizing community of microorganisms in rhizosphere of plants and zone free from roots, phytotoxicity of recultivated soil under crops of phytomeliors and mathematical modeling of oil hydrocarbons content in the soil.

Key words: *phytotoxicity, phytoremediation, gray forest soil, oil, petrol fraction, vacuum gasoil, vacuum rest, hydrocarbon oxidizing microorganisms, mathematical model*

Nailya Kireeva, Doctor of Biology, Professor at the Biochemistry and Biotechnology Department. E-mail: vodop@yandex.ru
Anna Grigoriady, Candidate of Biology, Assistant at the Biochemistry and Biotechnology Department.

E-mail: nysha111@yandex.ru

Vladimir Vodopyanov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Mathematics Department. E-mail: vodop@yandex.ru
Liya Vodopyanova, Post-graduate Student