

УДК 504.064.47; 504.054:622.816

Влияние высокомолекулярных компонентов нефти на почву и продукционный процесс растений картофеля

Л. А. ИГНАТЬЕВ

Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН,
проспект Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирск 630090 (Россия)

E-mail: arsey@issa.nsc.ru

(Поступила 09.09.13; после доработки 22.11.13)

Аннотация

Исследовано влияние различных концентраций высокомолекулярных компонентов нефти как отходов нефтедобычи на состояние почвы и продукционный процесс растений. В аспекте токсичности определены ее допустимые концентрации для нормальной жизнедеятельности растений. Установлено положительное влияние нефти на отдельные агрохимические свойства почвы, что открывает перспективы для разработки биологического способа утилизации нефтеотходов.

Ключевые слова: высокомолекулярные компоненты нефти, способы утилизации, токсичность, продукционный процесс растений, агрохимические свойства почвы, транслокационный эффект

ВВЕДЕНИЕ

Источниками высокомолекулярных компонентов нефти служат: а) ее разливы при авариях нефтесборной сети после испарения “легких” фракций; б) значительные объемы, содержащиеся на водной поверхности шламовых амбаров многолетней давности; в) выбросы на дневную поверхность как составной части геля в процессе гидравлического разрыва нефтеносных пластов; г) концентрирование в технологических амбарах при поступлении в результате ремонта нефтяных скважин. Эта нефть представлена углеводородами алкано-нафтенового и ароматического ряда в широких пределах по числу углеродных атомов. Из-за различного происхождения компонентный состав высокомолекулярной (“тяжелой”) нефти изменчив, однако специфика нефти по химическому составу в большей мере обусловлена географическим расположением нефтяных месторождений.

Исследователи в области рекультивации загрязненных нефтью территорий или ее утилизации как отхода нефтегазового производства чаще всего имеют дело с высокомолекулярной нефтью, поскольку легкие ее фракции испаряются в первые часы и дни с появлением на открытой поверхности. В работе [1] рассматривается рекультивация лесоболотных экосистем, загрязненных нефтью одного из месторождений среднего Приобья Западной Сибири, и приводится ее групповой состав. Доля парафино-нафтеновых углеводородов в ней составляет 72 %, ароматических – 13 %, смол – 11 %, асфальтенов – 4 %. Таким образом, на долю нефтяных углеводородов, которые могут быть подвержены биологическому разложению, приходится 85 %.

Современная технология утилизации такой нефти состоит в ее заделке на местах разлива на глубину до 1 м или высокотемпературном сжигании после сбора с поверхности разлива в виде нефтешламов, что сопряжено

с большими энергозатратами и загрязнением атмосферы поллютантами. В связи с этим необходимо разработать менее затратную и экологически безопасную технологию утилизации этого вида отходов нефтедобычи. Она может предполагать, к примеру, внесение отходов в поверхностный горизонт минеральной почвы с целью естественного окисления углеводородов, что трудно выполнимо в случае компактного скопления на почвенной или водной поверхности. Процесс разложения углеводородов может быть значительно ускорен благодаря усилению аэрации при их распределении в значительном объеме почвы и последующем культивировании на ней высших растений. Однако в этом случае необходимо определить допустимые концентрации “тяжелой” нефти в почве, обеспечивающие нормальную жизнедеятельность микроорганизмов и растений. Также целесообразно провести оценку возможного транспорта отдельных токсических элементов (в основном тяжелых металлов), специфичных для данного загрязнителя, из почвы в вегетативные органы растений.

С этой целью в 2009–2011 гг. нами были проведены полевые исследования в районе среднего Приобья Западной Сибири на территории нефтедобывающих компаний “РН-Юганскнефтегаз” и “Газпромнефть-Хантос” Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО-Югра). Для этой территории характерен гумидный климат с количеством годовых осадков 450–600 мм, низкой испаряемостью (400 мм/год) из-за высокой относительной влажности воздуха, чему способствуют низкие летние среднемесячные температуры воздуха. Сумма активных температур (среднесуточная выше 10 °С) в этом регионе не превышает 1400 °С при наиболее теплом периоде в июле месяце. Такие климатические условия обеспечивают созревание аборигенных видов растений, а из культурных – только многолетних трав и картофеля. Ускорению созревания растений способствует лишь большая продолжительность дня в летний период.

Этому региону свойственна и низкая температура почв, особенно болотно-торфяного типов и подтипов, что и обусловило выбор места проведения экспериментов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Полевые опыты закладывались на делянках площадью 3–6 м² при систематическом их расположении в трехкратной повторности [2] на дерново-подзолистой олиготрофной почве среднесуглинистого гранулометрического состава, приуроченной к повышенным элементам рельефа, непосредственно в границах кустовых оснований.

Объектом исследования служили растения картофеля – культуры, дающей урожай в условиях низкой суммы активных температур и короткого вегетационного периода в регионе Среднего Приобья.

В качестве опытных вариантов выступали делянки, где в почву на глубину 0–20 см вносили тяжелую нефть в концентрациях 0.5–4.0 % в объемном соотношении. Контролем служил вариант без внесения нефти в почву.

Влияние нефти на свойства почвы определялось по биологической активности микроорганизмов [3], содержанию органического вещества (по Тюрину) и валового азота (по Кьельдалю), концентрации подвижных форм фосфора (по Кирсанову) и сумме обменных оснований по прописи Е. Б. Аринушкиной [4] с регистрацией их содержания на атомно-абсорбционном фотометре С-115. Влияние используемых концентраций нефти в почве определялось по массе вегетативных органов и урожаю клубней; содержание в них токсических элементов, в том числе тяжелых металлов, определялось с помощью атомно-эмиссионной спектрометрии на приборе Optima 2000 DV.

Оценка химического состава нефти производилась методом хроматографического анализа на хроматографе Clarus 500 с пламенно-ионизационным детектором. В качестве растворителей при экстракции углеводородов использовались: для низкокипящих алканов (С7–С15) – *n*-гексан, а высококипящих компонентов (С30–С35) – *n*-пентатриоконтанол. Молекулярный состав используемой нефти определяли по высоте и площади пиков на хроматограммах, существенное увеличение которых наблюдалось начиная с компонентов по числу углеродных атомов от 23–25 до 28–30. Дополнительно определяли объемную массу, которая составила 940–960 мг/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рекогносцировочном опыте 2009 г. исследована реакция растений на внесение в почву нефти в концентрациях 1, 2 и 4 %. Использовалась нефть, собранная с водной поверхности старого шламового амбара, который расположен в окрестностях г. Пыть-Ях (куст 526 нефтедобывающей компании “Рн-Юганскнефтегаз”).

Показателями влияния “тяжелой” нефти на почву в год ее внесения служила величина микробной биомассы [3]. Установлено, что в концентрациях нефти 1 и 4 % существенных отличий по этому показателю от контроля нет. Резкое увеличение микробной биомассы (8.4 против 3.8 мг/кг сухой почвы в контроле) наблюдалось при концентрации нефти, равной 2 %, и может быть обусловлено усилением углеродоксилирующей способности микроорганизмов. В этом случае логично ожидать и повышения продуктивности растений. Однако при содержании нефти, равном 1 %, урожай клубней картофеля оставался на уровне контрольного варианта, а при дальнейшем повышении концентрации нефти (2 и 4 %) продуктивность растений заметно упала, особенно в варианте с 4 %. Это может указывать на негативное воздействие нефти в таких концентрациях на физиологическое состояние растений.

Обнаруженный эффект нашел подтверждение в полевом мелкоделяночном опыте 2010 г., который был заложен в идентичных с опытом 2009 г. почвенно-экологических условиях (кустовое основание № 80 нефтегазовой

компании “Газпромнефть-Хантос”, в окрестностях г. Ханты-Мансийск). Для опыта использовалась высокомолекулярная нефть, поступающая на специализированный полигон по утилизации отходов нефтегазового производства главным образом из технологических амбаров. Ее характеристика приведена выше.

В данном опыте исследовано влияние нефти в концентрациях 0.5, 1 и 2 % на растения и почву. Установлено, что урожай клубней в расчете на один куст составил всего 54 % относительно контроля при 2 % содержании нефти (табл. 1); при 1 % нефти влияние не выявлено, а в случае 0.5 % нефти в почве урожай клубней вырос на 26 % относительно контроля. При этом масса клубней находилась в прямой корреляции с общей биомассой (вегетативные органы + клубни).

Наблюдения показывают, что при скоплении нефти в больших объемах на дневной поверхности (аварийные разливы, шламовые амбары) ее разложение (окисление) в естественных условиях занимает очень продолжительный период времени. Однако дисперсное распределение ее незначительной дозы в большом объеме почвы может улучшить условия аэрации и способствовать ускорению окислительного процесса углеводородов.

Для проверки этого предположения в 2011 г. на тех же делянках опыта 2010 г. без дополнительного внесения нефти проведена повторная посадка картофеля (эффект последствия). Обнаружено (табл. 2), что урожай картофеля вырос на 13.5 % относительно контроля уже при концентрации нефти

ТАБЛИЦА 1

Продуктивность растений картофеля, выращенного на почве с различным содержанием “тяжелой” нефти (полевой опыт 2010 г.)

| Содержание нефти, % | Общая сырая биомасса (вегетативные органы + клубни) | | Масса клубней | | Отношение масс клубни/общая биомасса |
|---------------------|---|--------------|---------------|--------------|--------------------------------------|
| | г/куст | % к контролю | г/куст | % к контролю | |
| 0 | 200 | 100 | 110 | 100 | 0.55 |
| 0.5 | 249 | 124 | 137 | 126 | 0.55 |
| 1 | 177 | 88 | 106 | 96 | 0.60 |
| 2 | 115 | 57 | 60 | 55 | 0.52 |
| НСР ₀₅ | – | – | 34 | – | – |
| Cd | – | – | 14 | – | – |

Примечание. Здесь и в табл. 2: Cd – среднее квадратичное отклонение от среднееарифметических величин; прочерк означает, что математическая обработка не проводилась.

ТАБЛИЦА 2

Структура урожая картофеля 2011 г., выращенного на почве с внесением в 2010 г. нефти в различных концентрациях

| Показатели | Содержание нефти, % | | | | НСР ₀₅ | Cd |
|--------------------------------------|---------------------|------|------|------|-------------------|----|
| | 0 | 0.5 | 1 | 2 | | |
| Общая сырая биомасса: | | | | | | |
| г/куст | 282 | 237 | 283 | 167 | – | – |
| % к контролю | 100 | 84 | 100 | 59 | – | – |
| Масса клубней: | | | | | | |
| г/куст | 208 | 172 | 235 | 144 | 46 | 19 |
| % к контролю | 100 | 83 | 113 | 69 | – | – |
| Число клубней на один куст | 8.0 | 6.7 | 7.7 | 6.7 | – | – |
| Средняя масса клубня, г | 27 | 28 | 32 | 27 | – | – |
| Отношение масс клубни/общая биомасса | 0.74 | 0.73 | 0.83 | 0.82 | – | – |

Примечание. Обозн. см. табл. 1.

1 %. При этом масса клубней находилась в прямой корреляции с общей биомассой и средней массой одного клубня и не зависела от числа клубней в расчете на один куст и от соотношения по массе клубней/вегетативные органы, именуемого коэффициентом хозяйственного использования фотосинтеза (см. табл. 2).

Одновременно отмечается парадоксальное снижение продуктивности растений в опыте 2011 г. (см. табл. 2) при 0.5 % содержании нефти, хотя в опыте 2010 г. эта концентрация была оптимальной. Данный факт можно объяснить исходя из следующих представлений. При усилении воздействия на растения любого фактора внешней среды они претерпевают цепь изменений физиологического состояния в направлении: стимуляция функций [5] → спонтанная адаптация [6, 7] → обратимое повреждение [8] → гибель. Можно предположить, что в процессе окисления нефти в период с 2010 по 2011 гг. ее первоначальная концентрация постепенно снижалась. В опыте 2010 г. концентрация нефти, равная 0.5 %, могла индуцировать повышение устойчивости растений (адаптацию), что и способствовало увеличению их продуктивности в экстремальных экологических условиях бореальной зоны Западной Сибири. В опыте 2011 г. исходная концентрация в 0.5 % со временем уменьшилась и стала фактором стимуляции состояния, которое всегда связано со снижением устойчивости растений [9]. Это и обусловило уменьшение продуктивности растений для этого варианта в опыте 2011 г. Относительно показателей для 1 % содержания неф-

ти можно предположить, что при снижении исходной (1 %) концентрации нефти на протяжении года сформировались те же условия для адаптации растений, что и в опыте с 0.5 % нефти непосредственно в год ее внесения в почву.

Возможность достаточно быстрой минерализации (окисления) нефти при ее аварийных разливах подтверждается исследованиями, проведенными на территории Ямало-Ненецкого автономного округа [10]. Их результаты показали, что для практически полного окисления нефти в почве требуется один месяц при температуре 25–30 °С и искусственном внесении специфической микрофлоры, а в естественных условиях и при внесении в почву микробиологического препарата – два года при летних температурах 10–15 °С.

ТАБЛИЦА 3

Влияние внесения высокомолекулярных фракций нефти на отдельные агрохимические свойства олиготрофной почвы (полевой опыт 2011 г.)

| Показатели | Содержание в сухой почве при содержании нефти в почве, % | | | |
|--|--|-------|-------|-------|
| | 0 | 0.5 | 1 | 2 |
| N валовый, % | 0.029 | 0.028 | 0.029 | 0.031 |
| C органический, % | 0.82 | 1.34 | 2.75 | 1.98 |
| P ₂ O ₅ , мг/100 г | 3.10 | 2.25 | 4.70 | 5.70 |
| Сумма обменных оснований, мг-экв/100 г: | | | | |
| K | 0.11 | 0.15 | 0.09 | 0.09 |
| Na | 0.50 | 0.52 | 0.46 | 0.48 |
| Ca | 0.85 | 0.77 | 0.58 | 1.36 |
| Mg | 0.22 | 0.20 | 0.17 | 0.19 |

ТАБЛИЦА 4

Содержание токсических элементов и тяжелых металлов в клубнях картофеля, выращенного на почве с различным содержанием нефти (полевой опыт 2009 г.), мг/кг

| Элементы | Характеристика и норма СанПиН 2.3.2.560–96 | Содержание нефти, % | | | |
|----------|--|---------------------|------|------|------|
| | | 0 | 1 | 2 | 4 |
| Медь | 5.0 | 2.0 | 1.4 | 0.4 | 1.9 |
| Свинец | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.2 |
| Кадмий | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.04 |
| Никель | н/д | 0.6 | 0.4 | 0.2 | 0.7 |
| Ванадий | н/д | <0.4 | <0.4 | <0.4 | <0.4 |
| Мышьяк | 0.2 | <0.4 | <0.4 | <0.4 | <0.4 |

Примечание. н/д – нет данных.

Другая причина повышения продуктивности растений картофеля в отдельных вариантах – влияние высокомолекулярных фракций нефти на физико-химические свойства олиготрофной почвы. Анализ почвенных образцов, отобранных в опыте 2011 г., показывает, что с возрастанием концентрации нефти в почве при отсутствии существенных различий с контролем по содержанию валового азота и сумме обменных оснований (K, Na, Ca, Mg) повышается содержание органического углерода и подвижных форм фосфора (табл. 3). Последнее может положительным образом влиять на водно-физические свойства почвы и оптимизацию минерального питания растений.

Известно, что нефть характеризуется повышенным содержанием никеля и ванадия. В этой связи мы исследовали возможность транспорта отдельных токсических элементов и тяжелых металлов из почвы в вегетативные органы растений. Установлено (табл. 4), что специфический перенос данных элементов отсутствует.

Необходимо отметить, что при концентрации 2 % урожай клубней в год внесения нефти в почву уменьшился на 46 % (см. табл. 1), а через один год – уже на 31 % (см. табл. 2). По-видимому, это обусловлено быстрой минерализацией высокомолекулярной нефти за счет алкано-нафтеновых компонентов и снижения исходной ее концентрации в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментальных исследований установлено, что допустимое содержание “тяжелой” нефти в почве для обеспечения нормальной жизнедеятельности картофеля не превышает 1 % в объемных соотношениях нефть/почва. При внесении данного количества высокомолекулярных компонентов в почву возрастает содержание органического вещества и подвижных форм фосфора. Установлено, что перенос токсичных и тяжелых элементов из почвы в вегетативные органы растений не происходит.

Логическим продолжением исследований в данном направлении должны стать производственные испытания, направленные на замену техногенного способа утилизации высокомолекулярных компонентов нефти (нефтешламов) биологическим с использованием принципа “разбавления” нефтяных отходов посредством внесения их в поверхностный горизонт минеральной почвы на повышенных элементах рельефа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Алексеева Т. П., Бурмистрова Т. И., Сысоева Л. Н., Трунова Н. М., Стахина Л. Д. // Нефтяное хоз-во. 2010. № 1. С. 111–114.
- 2 Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М: Колос, 1965. 421 с.
- 3 Brookes P. C., Landman A., Pruden G., Jenkinson D. S. // Soilbiol. Biochem. 1985. Vol. 17. P. 837–842.
- 4 Аринушкина Е. Б. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
- 5 Илиев П. // Стимуляция растений. София, 1969. С. 81–90.
- 6 Александров В. Я. Клетки, макромолекулы и температура. Л.: Наука, 1975.
- 7 Удовенко Г. В. Солеустойчивость культурных растений. М.: Колос, 1977. 216 с.
- 8 Альтерготт В. Ф. // Физиология приспособления и устойчивость растений при интродукции. Новосибирск: Наука, 1969. С. 169–186.
- 9 Игнатьев Л. А. Реакция растений на повреждающее действие абиотических факторов и регуляция их продуктивности в условиях неустойчивой погоды: Автореф. дис. д-ра биол. наук. Новосибирск, 1994.
- 10 Алексеев А. Ю., Забелин В. А., Шестопалов А. М. // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. Новосибирск: Наука, 2011. С. 158–159.