

Н. Л. Ларионова, И. П. Бреус

ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДАМИ (Обзор литературы)*

Н. Л. Ларионова, И. П. Бреус

Казанский государственный университет

ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ГРУНТОВ, ЗАБРУДНЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДАМИ (Обзор литературы)

Розглянуто дані щодо впливу сирої нафти, її окремих фракцій та індивідуальних вуглеводнів (ВВ) на схожість насіння культурних та дикорослих рослин – представників 44 родів (90 видів і сортів). Аналіз літератури показав, що найбільшою фітотоксичністю характеризуються ґрунти, забруднені ароматичними, поліароматичними ВВ та ВВ легких фракцій нафти. В усіх розглянутих групах ВВ для більшості рослин спостерігається загальна тенденція зниження схожості з рідом ступеня забруднення ґрунту ВВ. Насіння рослин – представників родини *Poaceae* – у меншій мірі порівняно з *Fabaceae* піддається впливу забруднення середніми (3–6 %), високими (6–12 %) та дуже високими (понад 12 %) концентраціями сирої нафти, а також середніми та високими (4 % та більше) концентраціями дизельного пального.

Ключові слова: ґрунт, забруднення, вуглеводні, нафта, рослини, схожість насіння.

N. L. Larionova, I. P. Breus

Kazan State University

PHYTOTOXICITY OF THE SOILS CONTAMINATED BY HYDROCARBONS (The Review)

All the data connected with the influence of crude oil, its separate fractions and individual hydrocarbons (HC) on the germinating capacity of seeds of the cultivated and wild plants was reviewed. The literature review had shown, that soils contaminated by aromatic, polyaromatic HC and light oil fractions are characterized as the most phytotoxic ones. For the most of plants in all HC groups that were taken into consideration the increasing of HC soil's contamination degree led to the seed germination decreasing. It was found that seeds of plants of *Poaceae* (*Gramineae*) family unlike the representatives of *Fabaceae* (*Leguminosae*) family are more tolerant to soil contamination by average (3–6 %), high (6–12 %) and very high (more than 12 %) concentrations of crude oil, both with average and high (4 % and more) concentrations of diesel fuel. In the presence of low (up to 3–4 %) concentrations of crude oil and diesel fuel seeds' germinability of two of these families does not differ essentially.

Keywords: soil, contamination, hydrocarbons, oil, plants, germinating capacity.

Углеводороды (УВ) – одни из наиболее распространенных (по масштабам загрязнения), экологически опасных (по токсичности, длительности и устойчивости действия), но одновременно – одни из сравнительно малоизученных загрязнителей природной среды (*Light* ..., 1995; *Lewanovski et al.*, 1997; Гилязов, 1999). Они в большом количестве поступают в почву, открытые и грунтовые воды и атмосферу главным образом при добыче, транспортировке и переработке нефти, а также в результате выбросов промышленных предприятий и автотранспорта. Загрязнение УВ охватывает все компоненты экосистем, в том числе растительные сообщества (Шилова, 1988; Гетко, 1989; Пиковский, 1993; Динамика ..., 1997; Киреева, 2001a). В присутствии УВ угнетаются рост и развитие подавляющего большинства растений, однако степень влияния зависит от природы и концентрации УВ, а также от систематической принадлежности и биоморфы растения. Наиболее типичными и широко распространенными углеводородными загрязнителями являются нефть и нефтепродукты; в их состав входят алифатические, алициклические и ароматические УВ. В последнее время возрос также уровень загрязнения почв полиароматическими УВ (ПАУ), кото-

© Ларионова Н. Л., Бреус И. П., 2006

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 06-04-49098 и МНТЦ # 2419

рые обладают выраженным мутагенным и терратогенным действием и устойчивы к деструкции.

Растения подвержены воздействию УВ на всех этапах развития, особенно на ранних (Динамика ..., 1997). К основным путям воздействия УВ относят: 1) прямой токсический эффект за счет непосредственного контакта и взаимодействия; 2) косвенное влияние за счет ухудшения физических, химических и микробиологических свойств загрязненной УВ почвы (Anoliefo, Vwioko, 1995; Kummerova, Kmentova, 2004). Знание степени устойчивости растений необходимо для решения вопроса, с одной стороны, о возможности их возделывания на загрязненной почве, а с другой – об использовании их для восстановления нарушенного почвенного плодородия (фиторемедиация) (Cunningham, Ow, 1996; Pivetz, 2001). К настоящему времени эти вопросы исследованы недостаточно; подавляющее большинство работ в этой области посвящено неорганическим (нитраты, тяжелые металлы) и растворимым в воде органическим (пестициды) загрязнителям.

Анализ литературы показывает, что в отношении действия УВ на растения: а) недостаточно изучено их систематическое (видовое и сортовое) разнообразие; б) ограничено число исследованных почв (во многих работах тип почвы вообще не приводится); в) из углеводородных загрязнителей преимущественно исследована сырая нефть (причем часто ее состав и свойства не указываются), тогда как работ по загрязнению почвы нефтепродуктами значительно меньше, а из индивидуальных УВ изучают преимущественно ПАУ. Все эти причины, а также использование в работах разных условий (лабораторные, полевые опыты, обобщение данных природного мониторинга) и методик исследования диктуют необходимость обобщения имеющихся данных по устойчивости растений в условиях загрязнения почвы УВ. Не имея такого рода обобщений, трудно сопоставлять результаты выполненных работ, а значит, и разрабатывать агроэкологические рекомендации по выращиванию растений и их использованию для биотестирования и фиторемедиации.

В данной работе представлен обзор литературы, посвященной исследованию воздействия различных концентраций: 1) сырой нефти; 2) ее отдельных фракций (легких – 40–180 °С, средних – 140–350 °С и тяжелых – 350 °С и выше); 3) индивидуальных УВ (моно- и полиароматических) на всхожесть семян 90 видов и сортов культурных и дикорастущих растений.

Приведены данные для представителей 44 родов растений семейств: *Poaceae* (*Gramineae*) – 20 родов (25 видов); *Fabaceae* (*Leguminosae*) – 8 родов (10 видов); *Brassicaceae* (*Cruciferae*) – четыре рода (четыре вида); *Asteraceae* (*Compositae*) – три рода (три вида); *Solanaceae* – два рода (два вида); *Pinaceae* – два рода (два вида); *Caryophyllaceae* – один род (один вид); *Rosaceae* – один род (один вид); *Linaceae* – один род (один вид); *Amaranthaceae* – один род (один вид) и *Salicaceae* – один род (один вид) (таблица). Данные систематизированы по разделам в зависимости от типа УВ и его концентрации в среде. В каждом разделе конкретное растение характеризуется так, как приведено в оригинальной работе (родовым, видовым или сортовым названием); указаны условия наблюдений и степень депрессии всхожести, если они приведены в источнике. При описании влияния сырой нефти и дизельного топлива отдельно рассмотрены экспериментальные данные, касающиеся «состаренного» (*aged*) загрязнения, которых, в отличие от данных по «свежему» загрязнению, в литературе существенно меньше.

Среди цитируемых отечественных авторов следует особо отметить работы Киреевой Н. А. с сотр.; в них в различных экспериментальных условиях исследован широкий спектр растений под воздействием УВ разного типа (Киреева, 2001а, 2001б, 2001в).

Из зарубежных работ наиболее полный обзор литературных данных представлен в обзоре *Salanitro* (2001); *Adam* и *Duncan* проводили подробные экспериментальные исследования влияния дизельного топлива на всхожесть семян растений разных семейств (*Adam, Duncan, 1999; Adam, Duncan The effect ..., 2003; Adam, Duncan Influence ..., 2003*).

Перечень культурных и дикорастущих растений, охарактеризованных в отношении влияния углеводородного загрязнения на всхожесть семян

Род	Вид	Сорт	Источник
1	2	3	4
Семейство Мятликовые (Poaceae) – Злаковые (Gramineae)*			
Кукуруза (<i>Zea L.</i>)	К. обыкновенная (Маис) (<i>Z. mays L.</i>)	Краснодарская-55	Chaîneau, 2003; Chaîneau, 1997; Dorn, 2000; Henner, 1999; Luis, 2001; Morel, 1997; Salanitro, 2001; Shen, 1994; Udo, 1975; Zaripova, 2001
Овес (<i>Avena L.</i>)	О. посевной (<i>A. sativa L.</i>)	Астор, Юбилейный, Скакун	Демиденко, 1983; Киреева и др. Биологическая ..., 2001; Baud-Grasset, 1993; Dorn, 2000; Gong, 2001; Hund, 1994; Salanitro, 2001; Sayles, 1999; Schwendinger, 1968
Пшеница (<i>Triticum L.</i>)	П. мягкая (<i>T. aestivum L.</i>)	Московская-35, Саратовская-33, Московская низкостеблевая	Куркина, 2004; Chaîneau, 2003; Dorn, 2000; Morel, 1997; Murphy, 1929; Salanitro, 2001
Ячмень (<i>Hordeum L.</i>)	Я. двурядный (<i>H. distichon L.</i>); Я. обыкновенный (<i>H. vulgare L.</i>)	Носовский-9, Уши, Роланд	Дедков, 1999; Киреева и др. Биологическая ..., 2001; Куркина, 2004; Шилова, 1988; Chaîneau, 2003; Chaîneau, 1997; Henner, 1999; Morel, 1997; Zaripova, 2001
Рожь (<i>Secale L.</i>)	Р. посевная (<i>S. cereale L.</i>)	Чулпан, Вересень	Дедков, 1999; Киреева, 2001а, 2001б, 2001в
Просо (<i>Panicum L.</i>)	П. посевное (<i>P. miliaceum L.</i>)	Быстрый	Киреева, 2001а, 2001б; Baud-Grasset, 1993; Zaripova, 2001
Рис (<i>Oryza L.</i>)	–	–	Dorn, 2000; Schwendinger, 1968; Wang, 1990
Ежовник (<i>Echinochloa Beauv.</i>)	Е. обыкновенный (Куриное просо) (<i>E. crusgalli (L.) Beauv.</i>)	–	Киреева, 2001в
Ежа (<i>Dactylis L.</i>)	Е. сборная (<i>D. glomerata L.</i>)	–	Adam, 1999, 2003
Канареечник (<i>Phalaris L.</i>)	К. канарский (Канареечное семя) (<i>P. canariensis L.</i>)	–	Adam, 1999, 2003
Тимофеевка (<i>Phleum L.</i>)	Т. луговая (<i>P. pratense L.</i>)	–	Дедков, 1999
Кострец (<i>Bromopsis Fourr.</i>)	К. безостый (<i>B. inermis (Leys.) Holub.</i>)	–	Орлов, 2002; Шилова, 1988
Костер (<i>Bromus L.</i>)	К. ржаной (<i>B. secalinus L.</i>)	–	Фахрутдинов, 2002

Продолжение таблицы

1	2	3	4
Овсяница (<i>Festuca</i> L.)	О. луговая (<i>F. pratensis</i> Huds); О. овечья (<i>F. ovina</i> L.); О. красная (<i>F. rubra</i> L.)	–	Шилова, 1988; Adam, 1999, 2003; Henner, 1999
Плевел (<i>Lolium</i> L.)	П. многолетний (Английский райграсс) (<i>L. perenne</i> L.); П. многоцветковый (Многоукосный райграсс) (<i>L. multiflorum</i> Lam.)	–	Adam, 1999, 2003; Henner, 1999; Salanitro, 2001
Полевица (<i>Agrostis</i> L.)	П. побегоносная (<i>A. stolonifera</i> L.); П. (<i>A. castellana</i> L.); П. (<i>A. pratensis</i> L.); П. тонкая (<i>A. capillaries</i> L.)	–	Adam, 1999, 2003
Пахучеколосник (Душистый колосок) (<i>Anthoxanthum</i> L.)	П. обыкновенный (<i>A. odoratum</i> L.)	–	Adam, 1999, 2003
Мятлик (<i>Poa</i> L.)	М. обыкновенный (<i>Poa trivialis</i> L.)	–	Adam, 1999, 2003
Лисохвост (<i>Alopecurus</i> L.)	Л. мышехвостниковидный (<i>A. myosuroides</i> Hunds.)	–	Adam, 1999, 2003
Споробол (<i>Sporobolus</i>)	С. (<i>S. ioclados</i> (Trin.) Nees)	–	Youssef, 2002
Донник (<i>Melilotus</i> Hill.)	Д. лекарственный (<i>Melilotus officinalis</i> (L.) Lam.)	–	Киреева, 2001а, 2001б
Клевер (<i>Trifolium</i> L.)	К. луговой (<i>T. pratense</i> L.); К. сомнительный (<i>T. dubium</i> Sibth.); К. белый (<i>T. album</i> L.); К. ползучий (<i>T. repens</i> L.)	–	Дедков, 1999; Adam, 1999, 2003; Chaîneau, 1997; Henner, 1999; Morel, 1997
Люцерна (<i>Medicago</i> L.)	Л. посевная (<i>M. sativa</i> L.); Л. хмелевидная (<i>M. lupulina</i> L.)	–	Adam, 1999, 2003; Henner, 1999; Salanitro, 2001
Горошек (<i>Vicia</i> L.)	Г. посевной (Вика) (<i>V. sativa</i> L.)	–	Фахрутдинов, 2002; Adam, 1999, 2003
Горох (<i>Pisum</i> L.)	–	–	Chaîneau, 2003
Соя (<i>Glycine</i> L.)	–	–	Salanitro, 2001; Wang, 1990
Фасоль (<i>Phaseolus</i> L.)	Ф. обыкновенная (<i>P. vulgaris</i> L.)	–	Gong, 2001
Люпин (<i>Lupinus</i> L.)	Л. белый (<i>L. albus</i> L.)	–	Henner, 1999
Семейство Капустовые (<i>Brassicaceae</i>) – Крестоцветные (<i>Cruciferae</i>)*			
Горчица (<i>Sinapis</i> L.)	–	–	Salanitro, 2001
Редька (<i>Raphanus</i> L.)	Р. посевная (Редис) (<i>R. sativus</i> L.)	Красный с белым кончиком	Киреева, 2001а
Клоповник (<i>Lepidium</i> L.)	К. посевной (Кресс-салат) (<i>L. sativum</i> L.)	Золотистый	Киреева, 2001а, 2001б; Орлов, 2002; Gong, 2001; Maila, 2002
Капуста (<i>Brassica</i> L.)	Рапс (<i>Brassica napus</i> f. <i>oleifera</i> Metzg.)	Rocket, Martina, Отрядненский	Куркина, 2004; Adam, 1999, 2003; Henner, 1999
	Репа, Турнепс (<i>Brassica rapa</i> L.)	–	Gong, 2001; Salanitro, 2001

Окончание таблицы

1	2	3	4
Семейство Сложноцветные (Asteraceae) – (Compositae)*			
Рудбекия (Rudbeckia L.)	Р. шерстистая (R. hirta L.)	–	Дедков, 1999
Подсолнечник (Helianthus L.)	П. однолетний (H. annuus L.)	Передовик	Дедков, 1999; Morel, 1997
Латук (Молокан) (Lactuca L.)	Л. посевной (Салат) (L. sativa L.)	–	Baud-Grasset, 1993; Chaîneau, 2003; Dorn, 2000; Gong, 2001; Morel, 1997; Sayles, 1999
Семейство Пасленовые (Solanaceae)			
Перец (Capsicum L.)	П. однолетний (мексиканский) (C. annuum L.)	–	Anoliefo, 1995
Томат (Lycopersicon Mill.)	Т съедобный (Помидор) (L. esculentum Miller)	–	Anoliefo, 1995
Семейство Сосновые (Pinaceae)			
Сосна (Pinus L.)	С. обыкновенная (P. sylvestris L.)	–	Дедков, 1999; Невзоров, 1976
Ель (Picea A. Dietr.)	Е. обыкновенная (P. abies (L.) Karst.)	–	Nicolotti, 1998
Семейство Гвоздичные (Caryophyllaceae)			
Звездчатка (Stellaria L.)	З. средняя (Мокрица) (S. media (L.) Vill.)	–	Киреева, 2001 ⁶
Семейство Розовые (Rosaceae) – Розоцветные*			
Кровохлебка (Sanguisorba L.)	К. малая (Sanguisorba minor (L.) Scop.)	–	Adam, 1999, 2003
Семейство Льновые (Linaceae)			
Лен (Linum L.)	Л. обыкновенный (Linum usitatissimum L.)	Viking, Elise	Adam, 1999, 2003
Семейство Амарантовые (Amaranthaceae)			
Амарант (Amaranthus L.)	А. багряный (A. cruentus L.)	–	Zaripova, 2001
Семейство Ивовые (Salicaceae)			
Тополь (Populus L.)	Т. черный (Осокорь) (P. nigra L.)	–	Nicolotti, 1998

ВЛИЯНИЕ СЫРОЙ НЕФТИ НА ВСХОЖЕСТЬ СЕМЯН

Среди работ по оценке влияния сырой нефти на прорастание семян преобладают исследования растений семейств злаковых (в обзоре рассмотрены 27 видов и сортов) и, с достаточно большим отставанием от них, – бобовых (8 видов и сортов). Встречаются также работы по всхожести растений семейств крестоцветных (в обзоре – четыре вида и сорта), сложноцветных (три вида), сосновых (два вида), гвоздичных (один вид) и ивовых (один вид).

Излагаемый ниже материал систематизирован в зависимости от действия на всхожесть семян низких ($\leq 3\%$), средних (3–6%), высоких (6–12%) и очень высоких (более 12%) концентраций нефти в почве (градиация уровня нефтяного загрязнения основана на рекомендациях Гилязова (Гилязов, 1999)). В ряде работ содержание нефти выражают в л/м² (Невзоров, 1976; Шилова, 1988; Киреева, 2001а, 2001б, 2001в), рассматривая низкий (2–8 л/м²), средний (7–16 л/м²) и высокий (22–25 л/м²) уровни загрязнения почвы. Эти интервалы концентраций отнесены нами в соответствующие подразделы (А)–(В).

А. Всхожесть семян при низкой степени загрязнения почв нефтью

При низких концентрациях нефти всхожесть семян кукурузы снизилась, по данным работы *Potential ...* (2001), на 40%, а по данным работы *Bioremediation ...*, (2003) (в лабораторных опытах в бурой глинистой почве Турис Harpludalf, загрязненной нефтью *Villeperdue*) – на 100%; такую же депрессию отмечали для пшеницы, ячменя, гороха, латука. Для редиса (крестоцветные) в полевом опыте на серой лесной почве депрессия составляла только 16% (Киреева, 2001а), а для кресс-салата – 30% (*Evaluation ...*, 2001). В повторных опытах в тех же условиях в работе *Evaluation ...* (2001) указывается, однако, на отсутствие ингибирующего влияния нефтяного загрязнения на всхожесть кресс-салата; авторы объясняют это существенным варьированием содержания нефти в образце загрязненной почвы.

Всхожесть дикорастущих растений при загрязнении снижалась: куриного проса – на 23–48%, звездчатки – на 22–35% (Киреева и др. Рост ..., 2001); в полевых опытах на легкой пылеватой супесчаной почве, загрязненной товарной нефтью, всхожесть костреча безостого и овсяницы луговой снизилась на 44–57% (Шилова, 1988). Даже при низком уровне загрязнения дерново-боровогой почвы семена сосны и трав в ней практически не прорастали, однако при этом их жизнеспособность сохранялась (Невзоров, 1976). В связи с этим авторы работы считают, что причиной наблюдаемого эффекта является не столько токсичность самой нефти, сколько приобретение загрязненной почвой гидрофобных свойств. В вегетационных опытах наблюдали задержку появления всходов ячменя (сорт Уши), в отличие от озимой пшеницы (сорт Московская низкостеблевая) (Куркина, 2004).

В ряде работ указывается на практически полное отсутствие депрессии всхожести семян при низких концентрациях сырой нефти. Такой эффект обнаружили для пшеницы, кукурузы (*Murphy*, 1929; *Udo, Fayemi*, 1975; *Wang, Bartha*, 1990; *Salanitro*, 2001); риса (*Schwendinger*, 1968) и овса (*Schwendinger*, 1968; Киреева и др. Биологическая ..., 2001; *Evaluation ...*, 2001) – злаковые; а также донника (бобовые) – в лабораторном опыте на темно-серой лесной почве, загрязненной тюменской товарной нефтью (Киреева и др. Биологическая ..., 2001; Киреева и др. Влияние ..., 2001); соевых бобов (*Salanitro*, 2001) и фасоли (*Evaluation ...*, 2001) – бобовые; тополя черного (ивовые) и ели обыкновенной (сосновые) – в вегетационных опытах на почве елового леса в Швандене, *Caton Glarus*, Швейцария (*Nicolotti, Egli*, 1998); кресс-салата и репы (крестоцветные) – в вегетационных опытах на почве *Umweltschutz Ost*, Берлин (*Evaluation ...*, 2001).

В работе *Dorn, Salanitro* (2000) не обнаружили существенных различий в фитотоксичности разных почв, загрязненных нефтью (*Norwood*, Техас – $C_{орг} 0,3\%$ и $pH 4,1$; и коммерческий субстрат *Vaccto* – $C_{орг} 29\%$ и $pH 8,2$), в отношении всхожести семян. Авторы считают, что фитотоксичность почвы в отношении всхожести определяется главным образом типом нефти (содержанием УВ различных классов). Наиболее токсичной была «легкая» нефть (*Gulf of Mexico*): снижение всхожести семян ку-

курузы, пшеницы, овса, риса (все злаковые) и латука (сложноцветные) отмечали только при ее концентрациях более 2,5 %. Для «средней» нефти (*Gulf of Mexico*) снижение всхожести семян этих растений наблюдали только при концентрациях более 3–5 %, а для «тяжелой» (Южная Калифорния) – более 9 %.

Б. Всхожесть семян при средней степени загрязнения почв нефтью

При среднем уровне загрязнения нефтью всхожесть семян культурных злаков снижалась: кукурузы – на 40 % (*Potential ...*, 2001), а овса (сорта Астор и Юбилейный) только на 20–25 % (в лабораторных опытах и в темно-серой лесной почве при загрязнении товарной тюменской нефтью (Киреева, 2001а) и в черноземе среднесуглинистом при загрязнении парафинистой нефтью Битковского месторождения (Демиденко, 1983)). На примере овса (сорт Юбилейный) был сделан вывод о связи снижения степени прорастания семян с изменением физико-химических свойств почвы (Демиденко, 1983). В сосудах с загрязнением они отмечали гнилостный запах, свидетельствующий об анаэробных условиях, вызванных вытеснением нефтью воздуха из почвенных пор, а также снижением содержания кислорода в почве вследствие возрастания активности углеводородокисляющих микроорганизмов.

Всхожесть дикорастущих злаковых снижалась по сравнению с контролем: на 32–42 % – для куриного проса (Киреева, 2001б) и на 80–93 % – для овсяницы луговой и костреца безостого (Шилова, 1988) (в полевых опытах при загрязнении легкой пылевой супеси товарной нефтью). В микрополевых опытах на иллювиальном подзоле всхожесть костра ржаного снижалась значительно меньше: на 65 %, а вики посевной – еще меньше: на 43 % (Фахрутдинов, 2002). Всхожесть семян донника (бобовые) при загрязнении темно-серой лесной почвы товарной тюменской нефтью снижалась только на 23 %; редиса (крестоцветные) и звездчатки (гвоздичные) в полевых опытах на серой лесной почве – на 22–32 % (Киреева, 2001а, 2001б, 2001в). В вегетационных опытах в загрязненной сырой нефтью почве елового леса в Швандене (Швейцария) регистрировали (качественно) снижение всхожести семян ели обыкновенной (*Nicolotti, Egli*, 1998). Авторы этой работы считают, что существенный, а подчас и летальный эффект – это следствие прямого контакта нефти с тканями растений, а снижение их роста и биомассы связано с изменениями в микробной популяции загрязненной почвы. Большинство авторов отмечают, что всходы растений на загрязненной почве обычно недружные, вялые, со слабо развитыми листовыми пластинками (Киреева, 2001а; Фахрутдинов, 2002).

В. Всхожесть семян при высокой степени загрязнения почв нефтью

В лабораторных условиях при высоком уровне загрязнения темно-серой лесной почвы тюменской товарной нефтью всхожесть как ячменя, так и овса сорта Астор снижались на 50 % (Киреева, 2001а), а овса сорта Юбилейный на черноземе среднесуглинистом при загрязнении парафинистой нефтью Битковского месторождения – на 100 % (Демиденко и др., 1983). Практически полное отсутствие всхожести при высоком содержании нефти в почве наблюдали и для семян ячменя (сорт Уши) и пшеницы (Московская низкостеблевая) (Куркина и др., 2004), а также редиса (Киреева, 2001а) (в полевых условиях на серой лесной почве при загрязнении тюменской товарной нефтью).

Всхожесть дикорастущих злаковых растений в загрязненной почве снижалась от 39–65 % для куриного проса (Киреева, 2001в) до 96–99 % для овсяницы луговой и костреца безостого (Шилова, 1988) (в полевых опытах на легкой пылевой супеси, загрязненной товарной нефтью). Всхожесть донника (бобовые) и звездчатки (гвоздичные) в аналогичных условиях была несколько выше – снижение 30–36 % и 35–46 %, соответственно (Киреева, 2001а, 2001в). В работе В. П. Дедков и др. (1999) регистрировали (качественно) хорошее прорастание в загрязненной почве семян многих растений семейств злаковых, бобовых, сложноцветных и сосновых. Наиболее устойчивыми к нефтяному загрязнению почвы оказались ячмень (сорт Роланд), рожь (сорт Вересень) и тимофеевка луговая – все злаковые; клевер луговой (бобовые); подсолнечник (сорт Передовик) и рудбекия шерстистая (оба – сложноцветные) и сосна обыкновенная (сосновые). Однако другими авторами в полевых условиях было пока-

зано, что загрязненная нефтью дерново-боровая почва непригодна для прорастания семян сосны и трав (Невзоров, 1976).

Г. Всхожесть семян при очень высокой степени загрязнения почв нефтью

При очень высокой загрязненности почвы нефтью всхожесть семян овса сорта Скакун в лабораторных опытах на серой лесной, загрязненной тюменской товарной нефтью, почве снижалась на 60 %, овса сорта Астор – на 95 % (Киреева, 2001a, 2001б), а сорта Юбилейный на черноземе среднесуглинистом при загрязнении парафинистой нефтью Битковского месторождения – на 100 % (Демиденко, 1983). В работе Н. А. Киреевой (2001б) сообщается также о снижении всхожести проса (сорт Быстрый) на 80 %; ржи (сорт Чулпан) и кукурузы (Краснодарская-55) на 60 %; ячменя (сорт Носовский-9) на 50 % (в работе И. И. Шиловой (1988), однако для ячменя наблюдали депрессию 100 %, пшеницы (сорта Московская-35 и Саратовская-33) – на 40 %.

Из дикорастущих растений семена куриного проса и звездчатки практически не всходили, всхожесть семян кресс-салата снижалась на 60 %, тогда как донника (бобовые) – только на 40 % (Киреева, 2001a, 2001б, 2001в). В вегетационных опытах хорошо прорастали семена рапса озимого (сорт Отрадненский, крестоцветные), что, по мнению авторов, указывало на его большую устойчивость к нефтяному загрязнению по сравнению с растениями ячменя (сорт Уши) и озимой пшеницы (сорт Московская низкостеблевая), семена которых в этих условиях практически не всходили (Куркина, 2004).

Д. Эффект «старения» нефтяного загрязнения почвы

В ряде работ указывается на значительное снижение фитотоксичности почвы, загрязненной нефтью, при т.н. «состаренном» (*aged*) загрязнении (по истечении определенного времени с момента загрязнения). Так, в полевых условиях при низких, средних и высоких концентрациях тюменской нефти фитотоксичность серой лесной почвы для редиса через 1–12 месяцев снижалась на 36–95 % в сравнении со свежезагрязненным контролем, причем в наибольшей степени – при низких уровнях загрязнения (Киреева, 2001a). Авторы связывают этот эффект с улетучиванием наиболее токсичных легких фракций нефти. В полевых опытах с многократными посевами на легкой пылевой супеси, загрязненной товарной нефтью, всхожесть семян овсяницы луговой и костреца безостого также увеличивалась при «состаренном» в течение одного года загрязнении: для разных уровней загрязнения – в 1,1–42 раза в сравнении со свежезагрязненной почвой (Шилова, 1988).

В лабораторных опытах на бурой глинистой почве *Hapludalf*, загрязненной нефтью *Villeperdue* (*Marne*, Франция), за 1,3 года токсическое влияние низких концентраций нефти на всхожесть семян пшеницы, ячменя и гороха резко снизилось: от 100%-ной депрессии до нулевой (*Bioremediation ...*, 2003). При этом в случае кукурузы и латука при старении сохранялся незначительный токсический эффект (снижение всхожести соответственно 3 и 10 %). При низких концентрациях «состаренное» загрязнение не оказало фитотоксичного действия на всхожесть семян кукурузы (при 1,2 % нефти) и горчицы (при 0,8 %) (*Salanitro*, 2001). При повторных посевах семян на одну и ту же загрязненную почву ингибирующее действие нефти на растения семейства злаковых (6 видов), бобовых (три вида) и сложноцветных (один вид) снижалось (Дедков, 1999). С другой стороны, ряд авторов отмечают, что даже при «старении» (в течение 1–5 лет) нефтяного загрязнения сохраняется его токсический эффект на всхожесть семян костреца безостого, кресс-салата, сосны и ячменя (депрессия более 50 %) (Невзоров, 1976; Киреева, 2001a; Орлов, 2002).

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ НЕФТИ НА ВСХОЖЕСТЬ СЕМЯН

Влияние различных фракций нефти на прорастание семян изучали для представителей семейств злаковых (в обзоре приведены данные для 16 видов и сортов), бобовых (8 видов и сортов), крестоцветных (пять видов и сортов), сложноцветных (два вида), льновых (два сорта), пасленовых (два вида), амарантовых (один вид) и розоцветных (один вид). Большинство работ посвящено выявлению эффекта средних

(140–350 °С) фракций нефти: лигроина, керосина, газойля, солярового масла. Из них наиболее исследовано влияние солярового масла, представляющего дизельное топливо (ДТ) – самый распространенный (из перечисленных) нефтепродукт, загрязняющий почву. Влияние ДТ изучали в диапазоне концентраций 0,5–12 %. Работы, связанные с изучением влияния легких (40–180 °С – петролейный эфир, бензин) и тяжелых (350 °С и выше – мазут, дистиллятные и остаточные масла) фракций, встречаются редко. Следует отметить и тот факт, что в большинстве работ вид нефтепродукта и его характеристики вообще не указываются.

Эффект легких фракций нефти

В работе М. Ю. Гилязова (1999) отмечают сильное фитотоксичное действие легких фракций нефти. Для семян редиса наблюдали полное ингибирование всхожести при загрязнении почвы бензином в концентрации 0,5 % и выше (Киреева, 2001а). Предполагают, что входящие в состав легких фракций УВ, особенно низкомолекулярные, могут легко проникать через мембраны внутрь клеток растения (*Schwendinger*, 1968; *Gunter et al.*, 1996). Однако из-за летучести действие легких фракций не бывает долговременным (Орлов и др., 2002). Так, в лабораторных опытах при загрязнении бензином серой лесной почвы всхожесть семян редиса снижалась на 40 % (как через один месяц при 0,5 % бензина, так и через три месяца при 5 и 8 % бензина) и практически полностью (на 98–99 %) – через 6 месяцев (как при 0,5 %, так и при 5 и 8 % бензина в почве) (Киреева, 2001а).

Эффект средних фракций нефти (дизельное топливо)

Низкая степень загрязнения (концентрации до 4 %). В одной из наиболее подробных экспериментальных работ (*Adam, Duncan*, 1999) рассмотрена всхожесть широкого спектра культурных и дикорастущих растений – злаковых (11 видов), бобовых (6 видов), крестоцветных (два вида), льновых (два вида), розоцветных (один вид) – на почве, загрязненной дизельным топливом. Однако при этом не указаны тип почвы и методики экспериментов. Установлено, что при 2,5 % ДТ в почве всхожесть семян злаковых изменялась в широком диапазоне: от эффекта стимуляции (на 4–27 %) до значительной депрессии (вплоть до 82 %). Для разных сортов льна обыкновенного (льновые) отмечали как снижение (на 11 %), так и стимуляцию всхожести; всхожесть семян кровохлебки уменьшилась на 18 %. При той же концентрации ДТ всхожесть семян большинства бобовых не снижалась или снижалась мало (на 6–10 %), однако у клевера белого снижалась на 47 %. С другой стороны, в более позднем исследовании те же авторы в вегетационных опытах при 1,5%-ном загрязнении ДТ компоста *John Innes* отмечали снижение всхожести и вики и райграса – на 13 и 31 % соответственно (*Adam, Duncan. The effect ...*, 1999). Помимо ингибирования всхожести авторы указывают на снижение скорости прорастания семян в загрязненной почве (*Adam, Duncan*, 1999; *Adam, Duncan. Influence ...*, 2003).

В вегетационных опытах на загрязненном ДТ выщелоченном черноземе наблюдали снижение всхожести амаранта: при 0,5, 1 и 2 % ДТ – соответственно на 10, 45 и 60 % (*The influence ...*, 2001). Более устойчивой в этих условиях была кукуруза (злаковые): всхожесть семян соответственно 88, 73 и 50 %. В тех же условиях при 2 % ДТ всхожесть семян проса и ячменя снижалась на 40 %. Другими авторами было установлено, что при концентрациях разных видов ДТ от 0,3 до 4,0 % всхожесть семян латука, ячменя и клевера снижалась в среднем на 50 %, а кукурузы: при 3 % ДТ – на 20 %, при 4 % ДТ – на 30 % (*The role ...*, 1997). ДТ с повышенным содержанием ароматических УВ для кукурузы было более токсичным: всхожесть семян снижалась при 1 % ДТ – на 20 %, при 2 % ДТ – на 40 %.

Средняя и высокая степень загрязнения (концентрации 4 % и более). Загрязнение ДТ средней степени оказывало существенное ингибирующее влияние на всхожесть семян большинства растений. Всхожесть семян злаковых разных видов при загрязнении ДТ 5 % снижалась на 36–60 % (для кукурузы, райграса, полевицы *Castellana*) и на 80–100 % – для овса, ячменя, проса, ежи сборной, канареечника канарского, полевицы побегообразующей, пахучеколосника обыкновенного, мятлика обыкновенного) (*Adam, Duncan*, 1999; *The influence ...*, 2001); для амаранта и крово-

хлебки отмечали значительное снижение всхожести – около 90 %. Всхожесть семян бобовых снижалась несколько меньше, чем злаковых: на 11–34 % – у клевера лугового, люцерны посевной, вики и на 55–82 % – у клевера (сомнительный, горный) (Adam, Duncan, 1999). Наибольшую устойчивость по этому показателю проявляли растения семейства крестоцветных: даже при 5 % ДТ они имели всхожесть 95 % (Adam, Duncan, 1999; Adam, Duncan Influence ..., 2003). Авторы наблюдали существенные видовые различия во всхожести семян в пределах родов полевицы, овсяницы, льна, клевера и люцерны – от стимуляции до сильного ингибирования прорастания.

В работе *The role ...* (1997) показано, что в широком диапазоне концентраций разных видов ДТ (4–9 %) всхожесть семян бобов, пшеницы и подсолнечника снижалась значительно – в среднем на 50 %. В тех же условиях всхожесть семян кукурузы обратно пропорционально зависела от концентрации ДТ: снижаясь при 5 % ДТ на 40 %, при 6 % ДТ на 50 %, при 7 % ДТ на 60 %, при 8 % ДТ на 70 %, при 9 % ДТ на 80 %, при 10 % ДТ на 85 %, при 11 % ДТ на 90 %, при 12 % ДТ на 100 %. Как и в случае низких концентраций ДТ, более токсичным было ДТ, содержавшее ароматические УВ: при 4–6 % ДТ всхожесть семян кукурузы снижалась более чем на 80 %, при 8 % ДТ – более чем на 90 %, при 10 % ДТ – полностью ингибировалась. В работе *Adam, Duncan. Influence ...* (2003) токсический эффект ДТ на прорастание семян объясняют: а) изменением физических свойств загрязненной почвы (УВ формируют пленку на поверхности семян, которая является барьером, затрудняющим поступление воды и кислорода в семена) и б) проникновением низкомолекулярных УВ через мембраны клетки внутрь растения.

В отличие от влияния нефти для ДТ существенно больше данных о практически полном отсутствии депрессии всхожести семян многих растений в широком диапазоне концентраций ДТ в почве: вплоть до 5 % (Adam, Duncan, 1999; Salanitro, 2001; Adam, Duncan. Influence ..., 2003); для некоторых видов установлен даже эффект стимуляции прорастания семян. Показано, что ДТ в концентрациях 0,1 % не снижало всхожесть кукурузы (злаковые), а в концентрации 1,4 % – люцерны (бобовые), райграса (злаковые) и репы (крестоцветные) (Shen, Bartha, 1994; Salanitro, 2001). В других работах не отмечали снижения всхожести семян кукурузы – при 1 % ДТ (как и клевера) (Chaineau et al., 1997), и даже при 2 % ДТ (*The role ...*, 1997). Всхожесть семян растений различных семейств: злаковых (кукурузы, проса (*The influence ...*, 2001), риса (Wang, Bartha, 1990) и ячменя (Salanitro, 2001; *The influence ...*, 2001)); бобовых (соевых бобов (Wang, Bartha, 1990)); сложноцветных (латука (Salanitro, 2001)) и амарантовых (амаранта (*The influence ...*, 2001)) не снижалась при концентрации ДТ менее 0,5 %; а всхожесть семян овса (злаковые) составляла 90 % даже при 2 % ДТ (Киреева, 2001а). Приводятся также данные о стимуляции (2–27 %) всхожести семян некоторых видов злаковых и бобовых на почве, загрязненной 0,5, 1, 2,5 и 5 % ДТ, а для ряда других видов бобовых, а также семейств крестоцветных и льновых – об отсутствии токсического эффекта ДТ (всхожесть 100 %) (Adam, Duncan, 1999; Adam, Duncan Influence ..., 2003). С другой стороны, авторы работы *The role ...* (1997) не прослеживали зависимости всхожести растений от их систематической принадлежности.

Эффект «старения» загрязнения почвы дизельным топливом. Эффект «старения» исследован в работе *Adam, Duncan. Influence ...* (2003). В лабораторных опытах на компосте *John Innes* (исходное загрязнение компоста 2,5 и 5 % ДТ) в условиях состарившегося (три недели) загрязнения всхожесть семян злаковых растений (душистого колоска обыкновенного, овсяницы овечьей и овсяницы красной) не снижалась относительно контроля. Наблюдаемый эффект авторы объяснили достаточно быстрым испарением токсичных летучих УВ.

Эффект тяжелых фракций нефти

Автор работы Н. А. Киреева (2001а) отмечает, что тяжелые фракции нефти практически не оказывают фитотоксического действия даже при высоких концентрациях. Так, депрессия всхожести семян редиса (крестоцветные) в почве, загрязненной гудроном, крекинг-остатком, ДГФ (дистиллятом коксования тяжелой газойлевой

фракции крекинг-остатка) и асфальтитом в концентрациях 0,5, 5 и 8 %, уже через три дня после загрязнения составляла 1,4–1,8 %, а при старении загрязнения (через 6 месяцев) токсичность практически полностью отсутствовала. Однако в другом исследовании в лабораторных опытах в почве, загрязненной отработанным смазочным маслом (концентрация 1 %), на 15-й день всхожесть семян жгучего стручкового перца и помидора съедобного (оба пасленовые) снизилась на 13 и 17 % соответственно (Anoliefo, Vwioko, 1995). При этом с ростом концентрации масла всхожесть семян помидора снижалась намного сильнее, чем семян перца: при 2 % масла – на 48 %, при 3 % – на 57 % к контролю. При концентрации смазочного масла 4 % семена помидора вообще не всходили, в то время как всхожесть семян перца составляла 75 %, а при 5 % масла в почве не всходили семена обоих растений. Наблюдаемый эффект авторы связывают с нарушением водно-физических свойств загрязненной почвы (образование корки, недостаток кислорода, заполнение пор УВ) и потерей семенами жизнеспособности, однако можно также предположить, что это также может быть обусловлено высоким содержанием тяжелых металлов в отработанном масле (Anoliefo, Vwioko, 1995). В лабораторных опытах в чашках Петри на сельскохозяйственной почве, загрязненной жидким гудроном, всхожесть семян ячменя (злаковые) и рапса (крестоцветные) существенно зависела от концентрации загрязнителя (Phytotoxicity ..., 1999). Если при концентрации гудрона 1,4 % всхожесть семян не ингибировалась, то при 5 % она составляла менее 50 %, а при 14 % семена практически не всходили. Авторы показали, что основной вклад в снижение всхожести семян при загрязнении жидким гудроном вносят летучие соединения.

ВЛИЯНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ВСХОЖЕСТЬ

Экспериментальных работ по оценке влияния индивидуальных УВ на всхожесть растений меньше по сравнению с нефтью и нефтепродуктами существенно. В некоторых из них авторы не только констатируют факт токсического эффекта, но и обсуждают его возможные механизмы. Ниже рассмотрены результаты исследований воздействия ароматических и полиароматических УВ на всхожесть семян представителей злаковых (6 видов и сортов), бобовых (три вида и сорта), крестоцветных (два вида) и сложноцветных (один вид).

В работе Cape (2003) отмечено, что экспозиция семян растений в атмосфере в присутствии летучих органических УВ (алканы и моноароматические соединения (бензол, толуол, ксилол и др.) существенно не влияло на всхожесть. Установлено, что моноядерные УВ (бензол и его гомологи) оказывают более быстрое токсическое воздействие на растительный организм, чем ПАУ (Пиковский, 1993). ПАУ медленнее проникают через мембраны и действуют более длительное время (являются хроническими токсинами). Имеются данные о проникновении 3 и 4 кольцевых ПАУ в некоторые однодольные растения и о возможности их последующего метаболизма (Gunter et al., 1996). Считают, что фитотоксичность ПАУ проявляется как вследствие непосредственной физиологической токсичности, так и опосредованно – в результате ухудшения свойств загрязненной почвы (Kummerova, Kmentova, 2004). Кроме того, отмечают, что свет существенно увеличивает токсичность флуорантена, антрацена, фенантрена, бензо(a)пирена, пирена и нафталина (Photoinduced ..., 1996; Kummerova, Kmentova, 2004). В работе The role ... (1997) установлено, что жидкие легкие ароматические и нафтенные УВ являются более токсичными по сравнению со средними топливными фракциями. Так, на почве, загрязненной нафтенными УВ, всхожесть кукурузы уже при 1 % УВ составляла только 5 %, а при 2 % отмечали ее полное ингибирование. При загрязнении ПАУ (вегетационные опыты на индустриальной почве, Secunda, Южная Африка) семена кресс-салата уже практически не всходили при концентрации выше 0,1 % (Maila, Cloete, 2002). В вегетационных опытах на другой почве (суглинок, Pretoria, Южная Африка), искусственно загрязненной ПАУ (0,005–0,1 %), всхожесть семян кресс-салата на третий день существенно снижалась с ростом уровня загрязнения, составляя: при 0,005 % – около 80 % к контролю, при 0,015 % – 60 %, при 0,03–0,05 % – 25 %, а при 0,1 % – менее 20 % (Maila, Cloete, 2002).

Учитывая, что ПАУ обладают высокой токсичностью даже в малых дозах (менее 0,1 % в почве), большинство авторов исследуют область их очень низких концентраций, не снижающих всхожесть семян. В лабораторных опытах в чашках Петри при загрязнении высокомолекулярными ПАУ: нафталином, фенантеном, флуорантеном, крезолом и бензо(*a*)пиреном (концентрация растворов 0,02 %) – через 5 дней не было выявлено снижения всхожести люпина, люцерны посевной, клевера лугового (все бобовые), кукурузы, ячменя, овсяницы красной, райграсса (все злаковые) и рапса (крестоцветные) (*Phytotoxicity ...*, 1999). Однако в случае нафталина при этом отмечали задержку прорастания семян, предполагая – из-за его летучести и высокой растворимости. С другой стороны, в работе *Youssef* (2002) нафталин (двухъядерный ароматический УВ) в концентрации всего 0,0007 % вызывал полное ингибирование всхожести споробола (как предполагалось, вследствие гибели зародыша). В отличие от нафталина, антрацен (трехъядерный ароматический УВ) был существенно менее токсичен (снижение всхожести споробола на 44 % при концентрации 0,0014 %). В присутствии бензо(*a*)пирена в первые дни загрязнения всхожесть растений даже возрастала; авторы предполагают, что бензо(*a*)пирен и продукты его деградации могут выступать в качестве стимуляторов роста и ссылаются на аналогичные эффекты в других работах. Отсутствие токсичности высокомолекулярных ПАУ они подтверждают и тем, что в лабораторных опытах на сельскохозяйственной почве, загрязненной бензо(*a*)антраценом, бензо(*a*)пиреном и дибенз(*a, h*)антраценом в концентрациях 0,003–0,016 %, ими не было выявлено ингибирования всхожести семян люпина. В лабораторных опытах на индустриальных почвах (вблизи нефтеперерабатывающих заводов) с содержанием ПАУ 0,16–0,32 % всхожесть семян кукурузы, райграсса и ячменя при свежем загрязнении была существенно меньше, чем в контроле, однако после 6 суток уже практически сравнялась с ним (*Phytotoxicity ...*, 1999). Состарившееся загрязнение других индустриальных (вблизи коксохимических предприятий) почв, содержавших более 0,015 % ПАУ, также не оказывало ингибирующего влияния на всхожесть.

В работе *Salanitro* (2001) описаны условия, при которых не снижалась всхожесть растений при загрязнении почвы ПАУ, в молекулярной структуре которых от 2 до 6 ароматических колец. Отсутствие ингибирования всхожести авторы наблюдали: для проса, овса (оба злаковые) и салат-латука (сложноцветные) при концентрациях ПАУ 0,04–0,2 % (*Baud-Grasset et al.*, 1993; *Hund, Traunspurger*, 1994; *Land ...*, 1999).

ВЫВОДЫ

Тип углеводородного загрязнителя. Наиболее токсичны для культурных и дикорастущих растений ароматические и полиароматические УВ (при концентрации 0,005–0,12 % они вызывают депрессию всхожести семян от 20 до 100 %), а также УВ легких фракций нефти (при 0,5 % бензина снижение всхожести 100 %). УВ средних (дизельное топливо) и тяжелых фракций нефти менее токсичны (при концентрациях до 5 % снижение всхожести на 0–50 % и 0–60 % соответственно). Токсичность сырой нефти значительно варьирует от ее состава и содержания в почве (при концентрациях до 6 % снижение всхожести в среднем до 40 %).

Концентрация углеводородного загрязнителя. Для большинства растений с ростом степени загрязнения почвы УВ во всех рассмотренных группах наблюдается общая тенденция снижения всхожести. Для низких (до 3 %), средних (3–6 %), высоких (6–12 %) и очень высоких (более 12 %) концентраций сырой нефти усредненная (по каждой группе) депрессия всхожести семян растений составляет 32, 43, 70 и 76 %; для низких (до 4 %), средних и высоких (4 % и более) концентраций ДТ – 17 и 56 % соответственно. В случае ДТ для некоторых растений наблюдают стимуляцию прорастания семян – при 2,5 % (2–27 % для растений льна *Elise*, люцерны, вики, полевицы, райграсса и овсяницы) и даже при 5 % ДТ (4–20 % для льна *Elise* и люцерны).

Специфика растения. В каждой из рассмотренных групп углеводородных загрязнителей можно на видовом уровне выделить растения, имеющие наименьшую депрессию всхожести. Однако неполнота описания объектов и условий экспериментов часто приводит к противоречивым выводам; в таких случаях их следует рассмат-

ривать только как ориентировочные. Еще в большей степени это относится к выводам относительно сортовой специфики растений. На уровне семейств сравнительно определенные выводы можно сделать только для представителей злаковых и бобовых (в условиях загрязнения нефтью и ДТ) – в связи с их значительно большей изученностью. Приведенные данные показывают, что при низком (до 3 %) уровне загрязнения почвы нефтью всхожесть растений обоих семейств отличается незначительно (в среднем по группе: 75 % для бобовых и 65 % для злаковых), а при средних, высоких и очень высоких концентрациях нефти всхожесть бобовых по сравнению со злаковыми достоверно выше (соответственно 75 и 60 %, 68 и 32 %, 65 и 29 %). Подобная закономерность прослеживается и при действии ДТ: при его концентрациях до 4 % всхожесть семян злаковых и бобовых существенно не отличается (в среднем по группе 86 и 97 %), а при более высоких концентрациях (4 % и более) всхожесть бобовых значительно выше, чем злаковых (59 и 28 %).

Трудность выявления достоверных связей устойчивости растений с их систематической принадлежностью (депрессия всхожести может сильно варьировать даже среди видов, принадлежащих к одному семейству, включая бобовые и злаковые) показывает, что в основе таких различий лежит целый ряд факторов. В качестве наиболее вероятных из них можно предположить:

а) морфологическое и анатомическое строение семени (состав, строение и проницаемость семенных оболочек, площадь поверхности семени, содержание и тип запасных веществ, химический состав семян) (Шилова, 1988; Николаева, 1999; *Kumterova, Kmentova*, 2004),

б) физиолого-биохимические факторы (потребность в воде и кислороде при прорастании, тип прорастания, ингибирование ферментов) (Николаева, 1999; *Kumterova, Kmentova*, 2004), а также

в) генетические особенности растений (*Anoliefo, Vwioko*, 1995).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Гетко Н. В.** Растения в техногенной среде: Структура и функции ассимиляционного аппарата. – Минск: Наука и техника, 1989. – 208 с.
- Гилязов М. Ю.** Агроэкологическая характеристика нарушенных при нефтедобыче черноземов и приемы их рекультивации в условиях Закамья Татарстана: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – Саратов, 1999. – 42 с.
- Дедков В. П.** Исследование возможности использования растений для рекультивации земель, загрязненных нефтью / В. П. Дедков, Н. И. Туркин, Г. Н. Чупахина // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования: Тр. 3-го Междунар. симп. – Пушкино: Изд-во РУДН, 1999. – Т. 5. – С. 641-642.
- Демиденко А. Я.** Изучение питательного режима почв, загрязненных нефтью / А. Я. Демиденко, В. М. Демурджан, Л. Д. Шеянова // Агрехимия. – 1983. – № 9. – С. 100-103.
- Киреева Н. А.** Биологическая активность нефтезагрязненных почв / Н. А. Киреева, В. В. Водопьянов, А. М. Мифтахова. – Уфа: Гилем, 2001а. – 376 с.
- Киреева Н. А.** Влияние загрязнения нефтью на фитотоксичность серой лесной почвы / Н. А. Киреева, А. М. Мифтахова, Г. Г. Кузяхметов // Агрехимия. – 2001б. – № 5. – С. 64-69.
- Киреева Н. А.** Рост и развитие сорных растений в условиях техногенного загрязнения почвы / Н. А. Киреева, А. М. Мифтахова, Г. Г. Кузяхметов // Вестник Башкирского университета. – 2001в. – № 1. – С. 32-34.
- Куркина М. В.** Влияние нефтяного загрязнения на рост растений и содержание триоз / М. В. Куркина, Н. А. Гречина, Т. С. Маргалова // Роль ботанических садов в сохранении и обогащении биологического разнообразия видов: Тез. докл. Междунар. науч. конф., посв. 100-летию бот. сада Калининградского гос. ун-та. – Калининград: Изд-во Калинингр. гос. ун-та, 2004. – С. 203-205.
- Максименко О. Е.** Динамика восстановления растительности антропогенно нарушенного сфагнового болота на территории нефтепромысла в Среднем Приобье / О. Е. Максименко, Н. А. Червяков, Т. И. Каркишко, Н. В. Глотов // Экология. – 1997. – № 4. – С. 243-247.
- Невзоров В. М.** О вредном воздействии нефти на почву и растения // Изв. вузов. Лесной журнал. – 1976. – № 2. – С. 164-165.
- Николаева М. Г.** Биология семян / М. Г. Николаева, И. В. Лянгузова, Л. М. Поздова. – СПб.: БИН РАН, 1999. – 232 с.

- Орлов Д. С.** Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении: Уч. пособие / Д. С. Орлов, Л. К. Садовникова, И. Н. Лозановская. – М.: Высш. шк., 2002. – 334 с.
- Пиковский Ю. И.** Природные и техногенные потоки углеводов в окружающей среде. – М.: МГУ, 1993. – 208 с.
- Фахрутдинов А. И.** Влияние вариантов рекультивации нефтезагрязненной почвы на рост и развитие растений // *Материалы межвуз. конф. мол. ученых.* – СПб.: Рос. гос. пед. ун-т им. А. И. Герцена, 2002. – С. 32-33.
- Шилова И. И.** Биологическая рекультивация нефтезагрязненных земель в условиях таежной зоны // *Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем: Сб. ст.* – М.: Наука, 1988. – С. 159-168.
- Adam G.** Effect of diesel fuel on growth of selected plant species / G. Adam, H. J. Duncan // *Environmental Geochemistry and Health.* – 1999. – Vol. 21. – P. 353-357.
- Adam G.** The effect of diesel fuel on common vetch (*Vicia sativa* L.) plants / G. Adam, H. Duncan // *Environmental Geochemistry and Health.* – 2003. – Vol. 25. – P. 123-130.
- Adam G.** Influence of diesel fuel on seed germination / G. Adam, H. Duncan // *Environmental Pollution.* – 2003. – Vol. 120. – P. 363-370.
- Anoliefo G. O.** Effects of spent lubricating oil on the growth of *Capsicum annum* L. and *Lycopersicon esculentum* Miller / G. O. Anoliefo, D. E. Vwioko // *Environmental Pollution.* – 1995. – Vol. 88. – P. 1361-364.
- Baud-Grasset F.** Evaluation of the bioremediation of a contaminated soil with phytotoxicity tests / F. Baud-Grasset, S. Baud-Grasset, S. I. Safferman // *Chemosphere.* – 1993. – Vol. 26. – P. 1365-1374.
- Cape J. N.** Effects of airborne volatile organic compounds on plants / J. N. Cape // *Environmental Pollution.* – 2003. – Vol. 122. – P. 145-157.
- Chaîneau C. H.** Bioremediation of a crude oil-polluted soil: biodegradation, leaching and toxicity assessments / C. H. Chaîneau, C. Yepremian, J. F. Vidalie, J. Ducreux, D. Ballerini // *Water, Air, and Soil Pollution.* – 2003. – Vol. 144. – P. 419-440.
- Chaîneau C. H.** Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons / C. H. Chaîneau, J. L. Morel, J. Oudot // *Journal of Environmental Quality.* – 1997. – Vol. 26. – P. 1478-1483.
- Cunningham S. D.** Promises and Prospects of Phytoremediation. / S. D. Cunningham, D. W. Ow // *Plant Physiology.* – 1996. – Vol. 110. – P. 715-719.
- Dorn P. B.** Temporal ecological assessments of oil contaminated soils before and after bioremediation / P. B. Dorn, J. P. Salanitro // *Chemosphere.* – 2000. – Vol. 40. – P. 419-426.
- Edwards N. T.** Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the terrestrial environment / N. T. Edwards // *Journal of Environmental Quality.* – 1983. – Vol. 26. – P. 427-441.
- Gong P.** Evaluation and refinement of a continuous seed germination and early seedling growth test for the use in the ecotoxicological assessment of soils / P. Gong, B.-M. Wilke, E. Strozzi, S. Fleischmann // *Chemosphere.* – 2001. – Vol. 44. – P. 491-500.
- Gunter T.** Effects of ryegrass on biodegradation of hydrocarbons in soil / T. Gunter, U. Dornberger, W. Fritsche // *Chemosphere.* – 1996. – Vol. 33, № 2. – P. 203-215.
- Henner P.** Phytotoxicity of ancient gaswork soils. Effect of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on plant germination / P. Henner, M. Schiavon, V. Druelle, E. Lichtfouse // *Organic Geochemistry.* – 1999. – Vol. 30. – P. 963-969.
- Hund K.** Ecotox-evaluation strategy for soil bioremediation exemplified for a PAH-contaminated site / K. Hund, W. Traunspurger // *Chemosphere.* – 1994. – Vol. 29. – P. 371-390.
- Kummerova M.** Photoinduced toxicity of fluoranthene on germination and early development of plant seedling / M. Kummerova, E. Kmentova // *Chemosphere.* – 2004. – Vol. 56. – P. 387-393.
- Lewanowski J.** Schadstoffe im Boden / J. Lewanowski, St. Leitschut, V. Kop. – Berlin: Springer, 1997. – 375 p.
- Luis F. L.** Potential of phytoremediation in Mexican oil contaminated soil / F. L. Luis, M. L. Irene, Q. A. Elizabeth, E. A. Hernandez et. al. // *In-Situ and On-Site Bioremediation Symp.: Poster Abstr. of the 6-th Internat. symp. A6. Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons.* – San Diego, 2001.
- Maila M. P.** Germination of *Lepidium sativum* as a method to evaluate polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) removal from contaminated soil / M. P. Maila, T. E. Cloete // *International Biodeterioration and Biodegradation.* – 2002. – Vol. 50. – P. 107-113.
- Morel J. L.** The role of plants in the remediation of contaminated soils / J. L. Morel, C. H. Chaîneau, M. Schiavon, E. Lichtfouse // *Bioavailability of Organic Xenobiotics in the Environment: Practical Consequences for the Environment: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Bioavailability of Organic Xenobiotics in the Environment* (eds.: Ph. Baveye, J.-C. Block V.V. Goncharuk). – Prague, 1997. – P. 429-449.

- Murphy H. F.** Some effects of crude petroleum on nitrate production, seed germination, and growth / H. F. Murphy // *Soil Science*. – 1929. – Vol. 27. – P. 117-120.
- Newell C.** Light Nonaqueous Phase Liquids / C. Newell, S. Acree, R. Ross, S. Huling // *Ground Water Issue* – 1995. EPA/540/S-95/500. U.S.EPA. R.S. Kerr Environ. Res. Lab. – Ada, OK. – 28 p.
- Nicolotti G.** Soil contamination by crude oil: impact on the mycorrhizosphere and on the revegetation potential of forest trees / G. Nicolotti, S. Egli // *Environmental Pollution*. – 1998. – Vol. 99. – P. 37-43.
- Pivetz B. E.** Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites / B. E. Pivetz // *Ground Water Issue*. – 2001. EPA/540/S-01/500. U.S.EPA. R. S. Kerr Environ. Res. Lab. – Ada, OK. – 36 p.
- Ren L.** Photoinduced effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on *Brassica napus* (Canola) during germination and early seedling development / L. Ren, L. F. Zeiler, D. G. Dixon, B. M. Greenberg, // *Ecotoxicology of Environmental Safety*. – 1996. – Vol. 33. – P. 73-80.
- Salanitro J. P.** Bioremediation of PHCs in soil / J. P. Salanitro // *Advances in agronomy*. – 2001. – Vol. 72. – P. 53-105.
- Sayles G. D.** Land treatment of PAH-contaminated soil: Performance measured by chemical and toxicity assays / G. D. Sayles, C. M. Acheson, M. J. Kupferle, Y. Shan et al. // *Environmental Science and Technology*. – 1999. – Vol. 33. – P. 4310-4317.
- Schwendinger R. B.** Reclamation of soil contaminated with oil / R. B. Schwendinger // *Journal of the Institute of Petroleum*. – 1968. – Vol. 54. – P. 182-197.
- Shen J.** On-site bioremediation of soil contaminated by No.2 fuel oil / J. Shen, R. Bartha // *International Biodeterioration and Biodegradation*. – 1994. – Vol. 33. – P. 61-72.
- Udo E. J.** The effect of oil pollution of soil on germination, growth and nutrient uptake of corn / E. J. Udo, A. A. Fayemi // *Journal of Environmental Quality*. – 1975. – Vol. 4. – P. 537-540.
- Wang X.** Effects of bioremediation on residues, activity and toxicity in soil contaminated by fuel spills / X. Wang, R. Bartha // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1990. – Vol. 22. – P. 501-505.
- Youssef T.** Evidence for reduced post-spill recovery by the halophyte *Sporobolus iocladius* (Nees ex Trin.) Nees in oil-contaminated sediments / T. Youssef // *Marine Pollution Bulletin*. – 2002. – Vol. 44. – P. 334-339.
- Zaripova S. K.** The influence of soil planting on dissipation of hydrocarbons in leached chernozem / S. K. Zaripova, O. S. Norina, O. A. Sofinskaja, I. P. Breus // *In-Situ and On-Site Bioremediation Symp.: Poster abstr. of the 6-th Internat.symp. A 6. Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons*. – San Diego, 2001.

Надійшла до редколегії 12.11.05