

# ФИТОРЕМЕДИАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СОРГО ВЕНИЧНОГО ДЛЯ ОЧИСТКИ ЗЕМЕЛЬ ОТ УГЛЕВОДОРОДОВ НЕФТИ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

**ТУРКОВСКАЯ Ольга Викторовна**, ФГБУН Институт биохимии и физиологии растений  
и микроорганизмов РАН

**МУРАТОВА Анна Юрьевна**, ФГБУН Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН

**ДУБРОВСКАЯ Екатерина Викторовна**, ФГБУН Институт биохимии и физиологии растений  
и микроорганизмов РАН

**БОНДАРЕНКОВА Анастасия Дмитриевна**, ФГБУН Институт биохимии и физиологии растений  
и микроорганизмов РАН

**ЛЮБУНЬ Елена Валентиновна**, ФГБУН Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН

*Проанализированы результаты 12-летних вегетационных опытов, проведенных с целью оценки использования сорго веничного (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) для очистки почв и грунтов Саратовской области от загрязнений углеводородами нефти и тяжелыми металлами. Установлено, что культивирование сорго на загрязненных почвах и грунтах в лабораторных контролируемых условиях приводило к элиминации углеводородных загрязнителей на 21–98 %. При этом снижение концентрации нефти и нефтешламов происходило в первую очередь за счет убыли фракций парафинов, нафтенов и моно-, бициклических ароматических углеводородов. Наиболее успешно подвергались деградации дизельное топливо и фенантрен. Показана роль растения в проявлении ризосферного эффекта и процессах детоксикации поллютантов на основе сопряженного растительно-микробного метаболизма в ризосфере. Существенное внимание уделено особенностям фиторемедиации смешанных загрязнений углеводородов с металлами, показано взаимовлияние поллютантов на процессы их элиминации.*

**Введение.** Загрязнение земель нефтепродуктами и тяжелыми металлами (ТМ) является одной из глобальных экологических проблем, представляющих серьезную угрозу для окружающей среды, продовольственной безопасности и здоровья человека [5]. Названные группы загрязнителей зачастую присутствуют вместе, поскольку в состав нефти и пластовых вод нефтяных месторождений входит целый ряд так называемых «нефтяных» металлов, в том числе никель и кадмий. В этой связи в регионах, связанных с добычей, транспортированием и переработкой нефти, очистка территорий от комплексного металл-углеводородного загрязнения стоит очень остро.

Агропромышленный комплекс также способствует загрязнению почвы металлами, которые входят в состав используемых минеральных удобрений и пестицидов. Длительное и в больших дозах применение удобрений, в первую очередь фосфорных, сопряжено с риском увеличения содержания ТМ как в почве, так и в растениях [4]. В отличие от органических компонентов ТМ не подвергаются деградации. В связи с этим способ экстракции этих загрязнителей из почвы представляется практически единственным вариантом надежного обезвреживания сельскохозяйственных площадей.

Фиторемедиация, т.е. использование растений и ассоциированных с ними микроорганизмов для очистки загрязненных природных и хозяйственных объектов, является сравнительно новой, активно разрабатываемой биотехнологией. Она отличается экологичностью, относительно небольшими трудозатратами, следовательно, дешевизной по сравнению с физико-химическими и многими биологическими методами. Способность растений к фитоэкстракции неорганических и фитодеградации органических поллютантов обуславливает эффективность их использования в случае масштабных рассеянных и

смешанных загрязнений металлами и нефтепродуктами [9, 10]. В последние годы достигнуты значительные успехи в применении этой «зеленой» технологии.

Вопросы фиторемедиации все больше привлекают внимание исследователей [11]. Известно, что растительные виды обладают различным фиторемедиационным потенциалом. В этой связи выявление и изучение перспективных растений является основой успешной биотехнологии. С этой точки зрения привлекательными являются сорговые культуры [8, 13]. Они обладают такими характеристиками, как исключительная засухо-, жаро- и солеустойчивость, а также нетребовательность к почвам, что актуально для засушливых условий Поволжья. Эти растения образуют обильную зеленую биомассу до 200–300 см в высоту и мощную корневую систему, проникающую на глубину до 200–260 см и распространяющуюся в стороны на 120 см. При этом корни имеют большую разветвленность в вертикальном и горизонтальном направлениях, обеспечивая растение влагой и питательными веществами из глубоких горизонтов [6].

Высокая физиологическая пластичность позволяет сорго при остром недостатке влаги впадать в состояние «анабиоза» и переживать неблагоприятные условия с последующим возобновлением роста [6]. Также важным аспектом является возможность возделывания этой культуры на одном месте два-три года подряд без значительного накопления вредителей и возникновения болезней. Это чрезвычайно важно для технологии фиторемедиации, предполагающей многократное культивирование растений до достижения необходимой степени удаления из почвы загрязняющих веществ. Следует обратить внимание на сорго веничное, являющееся технической культурой, используемой для производства веников, что выделяет его среди других видов в плане пищевой безопасности.



Цель представленной работы – анализ полученных в ходе многолетних вегетационных опытов данных изучения способности сорго веничного удалять из почвы углеводороды нефти и ТМ.

**Методика исследований.** В течение 12 лет исследовали фиторемедиационные характеристики сорго веничного (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) [12, 14, 17]. Вегетационные опыты проводили на разных субстратах – почве или песке. Почвы типичные для Саратовского региона: черноземы южный (с территории близ Саратовского НПЗ) и выщелоченный (из Новобурасского района), а также каштановая почва (из Энгельсского района). Были апробированы различные загрязнители: нефть, нефтешлам, дизельное топливо, фенантрен, гексадекан, кадмий и никель. Варьировали их концентрации, сочетания, продолжительность экспериментов и режим влажности.

Пластмассовые вегетационные сосуды объемом 1–2 л заполняли грунтом, в который предварительно вносили те или иные загрязняющие вещества, г/кг: сырую нефть (15,0), нефтешлам (6,8; 15,0; 15,6 и 16,0), дизельное топливо (10,0), фенантрен (0,01 или 0,1) или гексадекан (5,0). Металлы вносили в виде солей:  $CdCl_2 \times 2,5 H_2O$  и  $Ni_2SO_4 \cdot 2,5 \times 7 H_2O$ . Вносили их в пересчете на металл в концентрациях, превышающих предельно допустимые (ПДК) в 4,5–15 раз: кадмий (2,24; 15,2 и 30,0 мг/кг), никель (20,0 мг/кг). ПДК для кадмия в песчаном грунте составляет 0,5 мг/кг, в почве – 2,0 мг/кг, для никеля – 4,0 мг/кг. В опытах со смешанным загрязнением использовали почву с нефтешламом (16 г/кг) и кадмием (30 мг/кг) или песок с гексадеканом (5 г/кг) и никелем (20 мг/кг). Для улучшения азотного питания в часть сосудов вносили мелко минеральное удобрение – аммиачную селитру ( $NH_4NO_3$ ) из расчета 0,8 г/кг на весь период эксперимента. Контролем служили незагрязненные и незасеянные грунты.

Семена сорго веничного были получены в НИИСХ «Юго-Востока» и в Российском научно-исследовательском и проектно-технологическом институте сорго и кукурузы (г. Саратов). Посев семян осуществляли в увлажненный грунт через 5–7 дней после загрязнения. Вегетационные опыты проводили в течение 21–119 сут. в фитокомнате с контролируемыми условиями: температура составляла 23–25 °С, освещенность – 8000 лк, продолжительность светового периода – 14 ч, темного – 10 ч. Полив осуществляли отстоянной водопроводной водой или средой Ruakura [18], до 50–80 % от полной влагоемкости. Через 30 сут. культивирования сорго осуществляли моделирование засухи, снижая полив до 30 % от полной влагоемкости. Для каждого варианта повторность была трехкратной. Растения в опыте со смешанным загрязнением (нефтешлам + кадмий) выращивали в условиях теплицы при температуре 24–28/20–22 °С и при естественном освещении в течение 53 сут.

По окончании культивирования растения извлекали из сосудов, побеги отделяли от корней, корни отмывали от почвы водопроводной водой. Биомассу растений взвешивали, высушивали до постоянной массы в сушильном шкафу при 70 °С для последующих анализов. Содержание кадмия и никеля в растительной биомассе или в почве определяли на атомно-абсорбционном спектрометре Thermo Scientific iCE 3500 (США) [12]. Содержание углеводородов нефти в почве определяли гравиметрически после их экстракции  $CCl_4$  [14]. Для анализа фенантрена в песке отбирали навески грунта – 50 г. Экстрагировали хлороформом и

анализировали с помощью УФ-спектрофотометрии и ВЭЖХ. Определяли также численность микроорганизмов в ризосферной и незасеянной почве [14].

Все полученные экспериментальные данные подвергали статистической обработке, вычисляя средние значения, для сравнения которых использовали показатели стандартного отклонения и доверительного интервала при  $P \leq 0,05$ . Вычисления проводили в программе Microsoft Excel 2007 (Microsoft, США).

**Результаты исследований.** Присутствие в почве углеводородных загрязнений оказывало фитотоксический эффект, проявляющийся в снижении всхожести семян, накоплении биомассы, нарушении фотосинтеза и других физиолого-биохимических процессах. Эти эффекты зависели от концентрации загрязнителей, типа и состояния почвы и вида растений. В случае с сорго веничным показано, что фитотоксичностью обладали все исследованные загрязнители, что тормозило, но не препятствовало росту растений [1, 2, 12, 14, 16].

Культивирование сорго в загрязненных грунтах в контролируемых условиях фитокомнаты в течение от 2 до 4 месяцев во всех вариантах приводило к элиминации углеводородных загрязнителей на 21–98 % (табл. 1).

К разложению наиболее устойчивы многокомпонентные поллютанты – сырая нефть и нефтешлам. Нефть при загрязнении ею почвы 15 г/кг за 70 сут. разрушалась на 33 %. Убыль нефтешлама в близкой концентрации (15,6 г/кг) за 72 сут. составила 35 %. Безусловно, это связано с наличием в них таких устойчивых к разложению компонентов, как высокомолекулярные парафины, многокольцевые полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), смолы и асфальтены. Фракционный состав загрязнителей до и после эксперимента показал, что снижение содержания нефти и нефтешламов происходило в первую очередь за счет убыли фракций парафинов, нафтенов и моно-, бициклических ароматических углеводородов [12].

Иначе обстояли дела с таким нефтепродуктом, как дизельное топливо, представляющим собой смесь насыщенных разветвленных и неразветвленных алканов C8–C26 и низкомолекулярных моно- и бициклических ароматических веществ. При исходной концентрации 10 г/кг его максимальное разрушение в почве под сорго за 70 сут. составило 94 % (см. табл. 1). В этом опыте было установлено, что внесение минерального удобрения (аммиачной селитры) существенно повышало элиминацию дизельного топлива и под растениями, и в незасеянной почве на 48 и 61 % соответственно, показывая значимость азота для развития почвенных углеводородокисляющих микроорганизмов [16]. Как видно из представленных данных, без азотной подкормки очистка почвы под растением улучшалась в 2 раза относительно незасеянного контроля, а в случае подкормки всего на 12 %.

Исследование биодеградации представителя ПАУ фенантрена показало почти полную его деградацию уже за 60 дней [1]. Следует отметить, что это вещество использовалось в опытах в значительно меньших концентрациях по сравнению с предыдущими субстратами с той целью, чтобы приблизиться к реальному содержанию ПАУ в нефти. Кроме того, ПАУ характеризуются высокой токсичностью и мутагенностью.

Известно, что основным механизмом фиторемедиации нефтезагрязненной почвы является ризодеградация – утилизация углеводородов ризосферным



## Деградация углеводородных загрязнений в корневой зоне сорго веничного в вегетационных экспериментах

Загрязнитель	Исходная концентрация, г/кг	Субстрат для культивирования	Продолжительность вегетации, сут.	Убыль загрязнителя, %		
				незасеянная почва	почва под сорго	улучшение
Нефть сырая в условиях оптимальной влажности	15,0	Почва каштановая	70	18	33	15
Нефть сырая в условиях моделируемой засухи	15,0	Почва каштановая	70	9	29	20
Нефтешлам	6,8	Чернозем южный	119	31	39	8
Нефтешлам	15,6	Чернозем южный	72	34	35	1
Дизельное топливо (без удобрений)	10,0	Чернозем выщелоченный	70	23	46	23
Дизельное топливо (с аммиачной селитрой)	10,0	Чернозем выщелоченный	70	84	94	10
Фенантрен	0,01	Песок	60	91	95	4
Фенантрен	0,1	Песок	60	68	98	30
Нефтешлам	16,0	Чернозем выщелоченный	53	н.о.	21	н.о.
Нефтешлам в присутствии Cd <sup>2+</sup> 30 мг/кг	16,0	Чернозем выщелоченный	53	н.о.	28	н.о.

Примечание: н.о. – не определено (здесь и далее).

микробным сообществом. При этом растение посредством корневых экссудатов регулирует численность и функциональный состав микроорганизмов-деструкторов и участвует в биохимических реакциях деградации поллютантов в ризосфере [18]. Благодаря корневым экссудатам микробные популяции и их активность в 5–100 раз выше в ризосфере по сравнению с незасеянной почвой [7]. Такое индуцированное растениями увеличение численности микроорганизмов и их активности называется «ризосферным эффектом», который и приводит к усилению деградации органических загрязнителей в ризосфере.

На примере сравнительного анализа почвенной микрофлоры в исследованиях с нефтешламом (6,8 г/кг) показано, что численность гетеротрофов возросла в ризосфере сорго в 4,8 раза относительно незасеянной почвы, а углеводородокисляющих микроорганизмов – в 12 раз (табл. 2). В загрязненной нефтешламом ризосфере сорго наблюдалось также увеличение численности микроорганизмов, разрушающих ПАУ с преобладанием деструкторов нафталина и фенантрена, что свидетельствовало о большей биодоступности этих соединений по сравнению с другими ПАУ [15].

Таблица 2

**Численность микроорганизмов в незасеянной почве и в ризосфере сорго веничного при загрязнении нефтешламом в концентрации 6,8 г/кг (КОЕ/г сухой почвы)**

Вариант опыта	Исходное содержание (0 сут.)	Конечное содержание (119 сут.)
Численность гетеротрофных микроорганизмов		
Незасеянная почва	2,6×10 <sup>7</sup>	3,1×10 <sup>7</sup>
Ризосфера сорго	2,6×10 <sup>7</sup>	3,7×10 <sup>7</sup>
Численность углеводородокисляющих микроорганизмов		
Незасеянная почва	2,48×10 <sup>6</sup>	1,21×10 <sup>7</sup>
Ризосфера сорго	2,48×10 <sup>6</sup>	1,75×10 <sup>7</sup>

Следует отметить, что в случае культивирования сорго на черноземных почвах убыль нефтепродуктов в контрольных вариантах без засева была также высока, что связано с высокой численностью микроорганизмов аборигенного почвенного микробиоценоза, который реагирует на внесение загрязнителя всплеском развития популяции углеводородокисляющих микроорганизмов. Поэтому агротехническая обработка

загрязненной почвы с целью поддержания оптимальной влажности и воздухообмена, а также внесение минеральных удобрений могут привести к достаточно высокой степени очистки, даже при отсутствии растений. Однако в случае неблагоприятных условий окружающей среды, в первую очередь по влажности и температуре, растения, поддерживая ризосферных бактерий за счет своих корневых экссудатов, обеспечивают более высокие показатели удаления загрязнителей. В условиях моделируемой засухи элиминация нефти в почве без растений снизилась на 9 % относительно оптимальной влажности, а в почве под сорго лишь на 4 % (см. табл. 1). При этом деградация нефти в незасеянной почве была на 15 и 20 % ниже, чем во влажных и сухих условиях соответственно [2].

В настоящее время достаточно убедительно показано участие растений в ризодеградации не только посредством стимуляции микроорганизмов, но и благодаря собственным механизмам детоксикации поллютантов с участием вне- и внутриклеточных растительных ферментов, в результате чего обеспечивается сопряжение растительно-микробного метаболизма поллютантов в ризосфере [21].

Культивирование растений в присутствии ТМ также показывает угнетение их роста и развития. При содержании Cd<sup>2+</sup>, соответствующем 15 ПДК, снижается прирост подземной и надземной биомассы растений в среднем на 50 % [12]. Тем не менее, сорго продемонстрировало хорошую фито-экстрагирующую способность в отношении катионов Cd<sup>2+</sup> и Ni<sup>2+</sup> (табл. 3).

Анализ накопления кадмия в биомассе сорго показал, что этот металл преимущественно аккумулируется в корнях растений, что согласуется с литературными данными [20]. Однако при малой исходной дозе металла (2,24 мг/кг) содержание кадмия в побегах было несколько выше, чем в корне (см. табл. 3). Самый высокий уровень накопления кадмия в корнях сорго (1003 мг/кг) наблюдался в опыте с песком, загрязненным этим металлом в большой концентрации – 15,2 мг/кг, что соответствует 15 ПДК в песчаном грунте. Известна более высокая подвижность ТМ в песке, поскольку гумус почвы образует устойчивые комплексы с катионами металлов, препятствуя их транслокации в растения. По представленным данным, аккумуляция кадмия варьирует в зависимости





Накопление тяжелых металлов в тканях сорго веничного

Металл	Исходная концентрация, мг/кг	Субстрат для культивирования сорго	Продолжительность вегетации, сут.	Содержание в растении, мг/кг сухой массы		Удаление из грунта, %
				корень	побег	
Cd <sup>2+</sup>	2,24 (4,5 ПДК)	Песок	42	16	20	н.о.
Cd <sup>2+</sup>	15,2 (15 ПДК)	Песок	49	1003	35	52
Cd <sup>2+</sup>	30 (15 ПДК)	Чернозем выщелоченный	53	80	24	22
Cd <sup>2+</sup> (в присутствии нефтешлама, 16 г/кг)	30 (15 ПДК)	Чернозем выщелоченный	53	20	4	14
Ni <sup>2+</sup>	20 (5 ПДК)	Песок	21	–	380	н.о.
Ni <sup>2+</sup> (в присутствии гексадекана, 5 г/кг)	20 (5 ПДК)	Песок	21	–	340	н.о.

от среды культивирования и исходной концентрации металла. Это свидетельствует о сложных механизмах взаимодействий в системе почва – микроорганизмы – растение – загрязнитель и необходимости проведения более детальных исследований с целью их понимания и оптимизации возможных технологических процессов.

Высокой экстрагирующей активностью обладало сорго в отношении никеля. Известно, что этот металл, особенно в высоких концентрациях в среде, может легко перемещаться через флоэму и ксилему сосудов, тем самым двигаясь от корня до верхних частей растений. Эта легкость передвижения никеля по растению отличает его от других металлов, таких как кадмий [3], что и было продемонстрировано нами в данном исследовании. Накопление этого металла в побегах сорго составляло 380 мг/кг сухой массы. Это характеризует высокий фиторемедиационный потенциал сорго в отношении никеля, поскольку утилизация надземной биомассы является менее трудоемким процессом в сравнении с извлечением корня.

Важным аспектом исследования являлась фиторемедиация смешанных загрязнений углеводородов с металлами. Обращает на себя внимание следующее: присутствие дополнительного загрязнителя (в случае кадмия – нефтешлама, в случае никеля – гексадекана) снижает экстрагирующую металлы активность растения (см. табл. 3). Нефтешлам уменьшал накопление кадмия в корнях сорго в 4 раза, а в побегах – в 6 раз. Гексадекан снижал накопление никеля в побегах сорго на 10 %. Вместе с тем, присутствие кадмия увеличивало элиминацию нефтяных углеводородов в загрязненной почве на 7 % (см. табл. 1) за счет убыли фракций парафинов, нафтенов и моно-, бициклических ароматических углеводородов [12]. Следует подчеркнуть, что взаимовлияние компонентов смешанных загрязнений является актуальнейшим аспектом исследований процессов фиторемедиации и самоочищения природных объектов, требующим в связи с многогранностью и сложностью задач междисциплинарного подхода.

Таким образом, выявленный фиторемедиационный потенциал сорго веничного в совокупности с его хозяйственно-биологическими особенностями способен обеспечить эффективное применение этой культуры для очистки почвы, загрязненной нефтепродуктами и ТМ.

**Заключение.** Анализ результатов вегетационных опытов, проведенных нами в течение 12 лет, выявил существенную вариабельность показателей очистки. Культивирование сорго веничного на загрязненных по-

чвах и грунтах в лабораторных контролируемых условиях в течение от 2 до 4 месяцев приводило к элиминации углеводородных загрязнителей на 21–98 %. При этом снижение концентрации нефти и нефтешламов происходило в первую очередь за счет убыли фракций парафинов, нафтенов и моно-, бициклических ароматических углеводородов. Наиболее успешно подвергались деградации дизельное топливо и фенантрен, что, вероятно, являлось следствием высокой численности микроорганизмов-деструкторов в корневой зоне растений.

Высокая способность сорго экстрагировать тяжелые металлы выражалась в накоплении кадмия (до 1003 мг/кг сухой биомассы) преимущественно в корнях и никеля (до 380 мг/кг) в побегах растений. Выявленной особенностью удаления смешанных загрязнений углеводородов с металлами оказалось их существенное взаимовлияние. Так, присутствие органических поллютантов снижало экстракционную способность сорго в отношении кадмия и никеля, а кадмий, напротив, повышал деградацию нефтешлама.

Следует учесть, что эксперименты проводили в лабораторных условиях, что не вполне отвечает физиологическим потребностям этой культуры. Тем не менее в большинстве проведенных экспериментов показаны достаточно высокие фиторемедиационные показатели сорго веничного для отдельных нефтяных углеводородов и ТМ, а также их композиций. Исследования свидетельствуют о перспективах использования сорго веничного для фиторемедиации загрязненных земель Саратовской области.

*Работа выполнена частично при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-05062.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние нефтяного загрязнения на растения в условиях пониженной влажности // Е.В. Дубровская [и др.] // Экобиотех. – 2019. – Т. 2. – № 3. – С. 389–399.
2. Изменение ростовых и физиолого-биохимических параметров сорго веничного в присутствии фенантрена / Е.В. Дубровская [и др.] // Физиология растений. – 2014. – Т. 61. – № 4. – С. 565–573.
3. Курамынина З.М., Смирнова Ю.В., Хайруллин Р.М. Токсичность кадмия и никеля для растений *Sinapis alba*, инокулированных эндофитными штаммами *Bacillus subtilis* // Физиология растений. – 2018. – Т. 65. – № 2. – С. 133–142.
4. Медведев И.Ф., Деревягин С.С. Тяжелые металлы в экосистемах. – Саратов: Ракурс, 2017. – 178 с.
5. Павлов П.Д., Решетников М.В., Ерёмин В.Н. Оценка состояния загрязнения почвенного покрова тяжелыми





металлами (на примере Александровского полигона захоронения ТБО г. Саратова) // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 1. – С. 21–23.

6. Царев А.П., Морозов Е.В. Агробиологические основы выращивания и использования сорговых культур в Поволжье. – Саратов, 2011. – 244 с.

7. Atlas R.M., Bartha R. Microbial Ecology: Fundamentals and Applications. – California: Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. 1997, 533 p.

8. Banks M.K., Kulakow P., Schwab A.P., Chen Z., Rathbone K. Degradation of crude oil in the rhizosphere of *Sorghum bicolor* // Int. J. Phytorem., 2003, Vol. 5, No. 3, P. 225–234.

9. Cristaldi A., Conti G.O., Jho E.H., Zuccarello P., Grasso A., Copat C., Ferrante M. Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review // Environmental Technology and Innovation, 2017, Vol. 8, P. 309–326.

10. Germida J.J., Frick C.M., Farrell R.E. Phytoremediation of oil-contaminated soils // Developments in Soil Science, 2002, Vol. 28, Part 2, P. 169–186.

11. Guozhu M., Shi T., Zhang S., Crittenden J., Guo S., Du H. Bibliometric analysis of insights into soil remediation // Journal of Soils and Sediments, 2018, Vol. 18, No. 7, P. 2520–2534.

12. Lyubun Y., Muratova A., Dubrovskaya E., Sungurtseva I., Turkovskaya O. Combined effects of cadmium and oil sludge on sorghum: growth, physiology, and contaminant removal // Environmental Science and Pollution Research, 2020, Vol. 27, No. 18, P. 22720–22734.

13. Metwali M.R., Gowayed S.M., Al-Maghrabi O.A., Mosleh Y.Y. Evaluation of toxic effect of copper and cadmium on growth, physiological traits and protein profile of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L.) // World Applied Sciences Journal, 2013, Vol. 21, No. 3, P. 301–304.

14. Muratova A.Yu., Dmitrieva T.V., Panchenko L.V., Turkovskaya O.V. Phytoremediation of oil-sludge-contaminated soil // Int. J. Phytorem., 2008, Vol. 10, No. 6, P. 486–502.

15. Muratova A., Golubev S., Wittenmayer L., Dmitrieva T., Bondarenkova A., Hirche F., Merbach W., Turkovskaya O. Effect of the polycyclic aromatic hydrocarbon phenanthrene on root exudation of *Sorghum bicolor* (L.) Moench // Environ. Experim. Bot., 2009, Vol. 66, No. 3, P. 514–521.

16. Muratova A.Yu., Golubev S.N., Dubrovskaya E.V., Pozdnyakova N.N., Panchenko L.V., Pleshakova E.V., Chernyshova M.P., Turkovskaya O.V. Remediation abilities of different plant species grown in diesel-fuel-contaminated leached chernozem // Appl. Soil Ecol., 2012, Vol. 56, P. 51–57.

17. Muratova A., Lyubun Y., German K., Turkovskaya O. Effect of cadmium stress and inoculation with a heavy-metal-resistant bacterium on the growth and enzyme activity of *Sorghum bicolor* // Environ. Sci. Pollut. Res., 2015, Vol. 22, P. 16098–16109.

18. Phillips L.A., Greer C.W., Farrell R.E., Germida J.J. Plant root exudates impact the hydrocarbon degradation potential of a weathered-hydrocarbon contaminated soil // Appl. Soil Ecol., 2012, Vol. 52, P. 56–64.

19. Smith G.S., Johnston C.M., Cornforth I.S. Comparison of nutrient solutions for growth of plants in sand culture // New Phytol., 1983, Vol. 94, P. 537–548.

20. Soudek P., Petrová Š., Vaňková R., Song J., Vaněk T. Accumulation of heavy metals using *Sorghum* sp. // Chemosphere, 2014, Vol. 104, P. 15–24.

21. Turkovskaya O., Muratova A. Plant-bacterial degradation of polyaromatic hydrocarbons in the rhizosphere // Trends in Biotechnology, 2019, Vol. 37, No. 9, P. 926–930.

**Турковская Ольга Викторовна**, д-р биол. наук, проф., зав. лабораторией экологической биотехнологии, ФГБУН Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН. Россия.

**Муратова Анна Юрьевна**, д-р биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической биотехнологии, ФГБУН Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН. Россия.

**Дубровская Екатерина Викторовна**, канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической биотехнологии, ФГБУН Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН. Россия.

**Бондаренкова Анастасия Дмитриевна**, канд. биол. наук, научный сотрудник лаборатории экологической биотехнологии, ФГБУН Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН. Россия.

**Любунь Елена Валентиновна**, канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической биотехнологии, ФГБУН Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН. Россия.

410049, г. Саратов, просп. Энтузиастов, 13.

Тел.: (8452) 97-04-44.

**Ключевые слова:** сорго вечноное (*Sorghum bicolor*); фиторемедиация; нефть; нефтешлам; фенантен; кадмий; никель.

#### PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF SORGHUM BICOLOR FOR SOIL DECONTAMINATION FROM OIL HYDROCARBONS AND HEAVY METALS

**Turkovskaya Olga Viktorovna**, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of Laboratory of the Environmental Biotechnology, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Russian Academy of Sciences, Russia.

**Muratova Anna Yurievna**, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of Laboratory of the Environmental Biotechnology, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Russian Academy of Sciences, Russia.

**Dubrovskaya Ekaterina Viktorovna**, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of Laboratory of the Environmental Biotechnology, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Russian Academy of Sciences, Russia.

**Bondarenkova Anastasia Dmitrievna**, Candidate of Biological Sciences, Scientific Researcher of Laboratory of the Environmental Biotechnology, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Russian Academy of Sciences, Russia.

**Lyubun Elena Valentinovna**, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of Laboratory of the Environmental Biotechnology, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Russian Academy of Sciences, Russia.

**Keywords:** *Sorghum bicolor*; phytoremediation; oil; oil sludge; phenanthrene; cadmium; nickel.

**The results of vegetation experiments carried out over 12 of years in order to assess the application of *Sorghum bicolor* (L.) Moench for soil clean up from oil hydrocarbons and heavy metals in**

**the Saratov Region are given. It was found that the cultivation of sorghum in contaminated soils under controlled conditions for 2 to 4 months led to the elimination of hydrocarbon pollutants by 21–98%. The decrease in the concentration of oil and oil sludge occurred primarily due to the reduction of the content of paraffins and naphthenes fractions. The degradation of diesel fuel and of phenanthrene as an individual polycyclic aromatic hydrocarbon was most successful. The role of the plant in the manifestation of the rhizosphere effect and of the pollutant detoxification was suggested to be based on the coupled plant-microbial metabolism of pollutants in the rhizosphere. The high extracting activity of sorghum towards heavy metals such as cadmium and nickel was revealed. Sorghum plant can accumulate up to 1003 mg of metals per kg of dry biomass. It was shown that cadmium predominantly accumulated in the sorghum roots. High concentrations of nickel accumulated in the plant shoots. Special attention is paid to phytoremediation of mixed pollution of soil with hydrocarbons and metals. A significant mutual influence of petroleum hydrocarbons and heavy metals on their elimination from soil has been established. The presence of organic pollutants reduces cadmium and nickel extraction capacity of sorghum. In contrast, cadmium increased the degradation of oil sludge. The data obtained emphasize the need for more detailed studies of the mutual influence of the components of mixed pollution in order to understand and predict the cleaning up processes in the environment. In general, taking into account the economic and biological characteristics of sorghum crops, it was concluded that the application of sorghum is promising for phytoremediation of contaminated soil in the Saratov Region.**