

Использование интегрального коэффициента биологической активности почвы и индекса фитотоксичности для оценки фиторемедиации нефтезагрязнённых почв

© 2015. И. Э. Шарапова¹, к.т.н., вед. инженер, Е. М. Лаптева¹, к.б.н., зав. отделом, С. П. Маслова¹, д.б.н., с.н.с., Г. И. Табаленкова¹, д.б.н., в.н.с., А. В. Гарабаджиу², д.х.н., проректор,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт,
e-mail: scharapova@ib.komisc.ru

Предложены варианты расчёта интегрального коэффициента биологической активности почвы (ИК БАП) и индекса фитотоксичности (ИФТ) для оценки фиторемедиации выращиванием растений двукисточника тростниковидного (*Phalaroides arundinacea* (L) Rauschert) второго года жизни, высаженных в загрязнённую почву с исходным содержанием нефти 5 и 10%. На основе расчётов ИК БАП, включающих комплекс различных показателей в исследуемых слоях (0–10 см и 10–20 см) почвы, подтверждена эффективность корневищного способа фиторемедиации. Показано, что при различных уровнях нефтезагрязнения параметры ИК БАП, характеризующие степень очистки почвы, а также восстановление в ней биологических и физико-химических свойств, значительно выше в ризосферной зоне в отличие от отдалённой от корневой системы зоны. В результате расчётов ИФТ с использованием комплекса различных морфологических и биохимических характеристик растений отмечено, что 5%-ое нефтезагрязнение в меньшей степени ингибировало некоторые физиолого-биохимические параметры растений *P. arundinacea* по сравнению с 10%-ым нефтезагрязнением почвы. На основе показателей ИФТ установлено, что поллютант не оказал существенного влияния на рост и метаболизм растений многолетнего злака. Подтверждена устойчивость фитокультуры к токсическому воздействию высоких концентраций нефти в почве, а также перспективность её применения для целей биоремедиации.

The paper suggests possible evaluation methods of the integral coefficient of soil biological activity (IC SBA) and the phytotoxicity index (PTI) for accessing phytoremediation. For this, the plants of *Phalaroides arundinacea* (L) Rauschert of the second living year were planted into oil-polluted soil with oil content of 5 and 10%. Based on evaluation of IC SBA including numerous different indices in the study soil layers (0-10 and 10-20 cm) we confirmed rhizomes as an efficient remediation zone. At different oil pollution degrees, parameters of IC SBA which illustrate soil purification degree and restoration of its biological and physical-chemical properties were identified to be significantly higher in rhizosphere than in other plant zones. Based on evaluation of PTI using numerous different morphological and biochemical plant characteristics, we found 5% oil pollution to be less responsible for inhibition of certain physical-biological parameters of *P. arundinacea* compared with 10% oil pollution. The pollutant did not seriously affect growth and metabolism of the perennial grass. The phytoculture of *P. arundinacea* was resistant to toxic action of high oil concentrations and found promising for remediation purposes.

Ключевые слова: фиторемедиация, нефтезагрязнение, *Phalaroides arundinacea*, биологическая активность почвы (БАП), интегральный коэффициент БАП, индекс фитотоксичности.

Keywords: phytoremediation, oil pollution, *Phalaroides arundinacea*, biological soil activity (BSA), integral coefficient of BSA, phytotoxicity index.

В настоящее время предлагается широкий спектр биорекультивантов и способов их применения для очистки почвы от нефтяных углеводородов, в том числе использование различных растений [1]. Наиболее распространённым способом применения растений является посев семян на завершающих стадиях рекультивации почв с остаточным нефтезагрязнением до 5%, при этом наиболее перспективными видами считаются корневищные злаки [2].

Применение биорекультивантов при очистке почвенных объектов от нефтезагряз-

нений направлено не только на снижение содержания нефтеуглеводородов, но и на восстановление нарушенной почвы, её биоремедиацию. А исследование реакции растений, используемых в качестве биорекультивантов, на основе различных физиолого-биохимических характеристик является важным показателем не только перспективности применения фитокультуры, но и эффективности способа фиторемедиации загрязнённой почвы. В связи с этим при оценке эффективности биорекультивационных работ важным аспектом

является определение параметров биологической активности почвы (БАП), которые позволяют диагностировать происходящие изменения в очищаемой почве и характеризуют степень и направленность её восстановления [3]. Однако по данным отдельных параметров (ферментативной активности, микробиологических данных, физико-химических свойств почв) сложно интерпретировать и оценивать получаемые результаты, в силу их разнокачественности и разнонаправленности ответной реакции живых организмов на изменение экологических условий почвенной среды. Поэтому в последнее время для комплексной оценки БАП всё чаще применяют интегральные показатели [4, 5], а для оценки реакции растений на загрязнение среды – индекс фитотоксичности (ИФТ), учитывающий различные характеристики роста и развития растений [6].

Ранее нами была показана возможность биоремедиации нефтезагрязнённой подзолистой почвы выращиванием растений двуклосточника тростниковидного (*Phalaroides arundinacea* (L) Rauschert) второго года жизни [7]. Кроме того, были проведены исследования реакции растений данного корневищного злака на токсическое воздействие нефтезагрязнения на основе определения морфологических и физиолого-биохимических параметров растений [8]. Показано, что нефтяное загрязнение в дозе 50 и 100 г/кг почвы в процессе фиторемедиации оказывает в различной степени влияние на рост и метаболизм растений двуклосточника тростниковидного, а также на изменение показателей биологической активности почвы и состава трофических групп микробиоты в системе «почва – растение».

Цель данной работы заключалась в оценке эффективности корневищного способа фиторемедиации при различных уровнях нефтезагрязнения на основе расчёта интегрального коэффициента биологической активности почвы и индекса фитотоксичности.

Материалы и методы

Вегетационный эксперимент проводили на опытном участке Института биологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, Республика Коми, средняя тайга). Детальное изложение методики проведения эксперимента представлено ранее в работе [7]. Сосуды без дна объёмом 10 л заглубляли в почву, заполняли чистой почвой и нефтезагрязнённой, слоем 0–20 см с дозами нефти 50 и 100 г/кг почвы (соответственно уровень загрязнения 5 и 10%). Растения *P. arundinacea*

второго года жизни пересаживали в сосуды в конце мая с очищенными от почвы корнями (по одному растению на сосуд). Контролем служила почва без нефти. По окончании вегетационного периода исследовали растительную массу и пробы почвы из общей (удалённой от корней пробы почвы) и ризосферной зоны, которые отбирались послойно (0–10 и 10–20 см) из выкопанных вместе с растениями вегетационных сосудов.

Реакцию растений на нефтезагрязнение почвы оценивали по морфологическим характеристикам, накоплению биомассы, содержанию пигментов, азота, активности пероксидазы, перекисного окисления липидов (ПОЛ). Концентрацию хлорофиллов *a* и *b* [9] и каротиноидов [10] измеряли на спектрофотометре Shimadzu UY-1700, содержание азота – на CHNS-O анализаторе EA-1110 [11]. Интенсивность ПОЛ определяли по содержанию малонового диальдегида (МДА) [12], активность пероксидаз (ПЕР) – по Михлину [13].

В образцах почв содержание остаточных нефтепродуктов определяли на анализаторе «Флюорат-02» [14], эмиссию CO₂ – на хроматографе «Цвет-800» [15], дегидрогеназную активность – по Хазиеву [16], агрохимические показатели (азот гидролизующий, подвижные формы калия и фосфора, обменные основания) – по общепринятым методиками [17]. Учёт численности физиологических групп микроорганизмов почвы проводили чашечным методом Коха [18].

Результаты и обсуждение

Согласно полученным результатам, выращивание растений двуклосточника тростниковидного на нефтезагрязнённой почве обусловило снижение за вегетационный период от начального уровня загрязнения более чем на 90% (табл. 1). Наиболее активно дегградация нефтеуглеводородов проходила в ризосферной зоне почвы, где к концу эксперимента была отмечена максимальная численность гетеротрофных микроорганизмов (в том числе углеводородокисляющих) и наиболее высокая активность фермента дегидрогеназы (АД).

Параметры дыхательной активности почв при 5% уровне загрязнения к концу эксперимента достигли уровня контрольного варианта. Однако при 10%-ом уровне загрязнения эмиссия CO₂ из почвы была достоверно ниже, по сравнению с контролем. Это свидетельствует о том, что восстановление жизнедеятельности микробиоты до уровня контроля ещё не произошло.

Анализ агрохимических показателей (табл. 1) свидетельствует о неоднозначности изменения параметров накопления биофильных элементов в почве к концу эксперимента. В зоне, удалённой от корневой системы растений (общие пробы почвы), на глубине 0–10 см наблюдали снижение легкогидролизуемого азота, а также подвижных форм фосфора и калия в вариантах с нефтезагрязнением (особенно в варианте с исходным 10%-ым уровнем загрязнения). В слое почвы на глубине 10–20 см отмечена обратная картина. В ризосферной зоне на всех глубинах нефтезагрязнённых почв происходит повышение содержания легкогидролизуемого азота, по сравнению с контролем. Следует отметить, что содержание подвижных форм фосфора и калия в ризосферной зоне почвы достигало уровня контроля только при 10%-ом уровне загрязнения. При 5%-ом загрязнении отмечается достоверное снижение этих элементов, по сравнению с контролем, в верхнем 0–10 см слое и возрастание – в нижнем

10–20 см слое почвы. Изменения в содержании обменных форм кальция и магния как в общей пробе почвы, так и в ризосферной зоне имели сходные тенденции – возрастание содержания ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в вариантах с нефтезагрязнением. Возможно, в процессе деструкции нефти и последовательного снижения уровня нефтезагрязнения под влиянием корневой системы растений происходит повышение выделения корневых экссудатов, что способствует усилению активности почвенной микробиоты. Особенно усиление метаболических процессов растительно-микробного комплекса отмечено в ризосферной зоне почвы, что объясняет повышение здесь уровня содержания легкогидролизуемого азота, а также обменных форм кальция и магния.

Учитывая сложность интерпретации данных, полученных в эксперименте с растениями двухкосточника тростниковидного, для оценки эффективности биоремедиации почвы при различных уровнях нефтезагрязнения нами пред-

Таблица 1

Влияние нефтяного загрязнения на физико-химические и биологические параметры почв

Показатели	Слой почвы, см	Уровень исходного нефтезагрязнения почвы					
		0% (контроль)		5%		10%	
		I	II	I	II	I	II
Дегидрогеназная активность, мг ТФФ/24 час/г почвы	0-10	0,78±0,04	0,96±0,05	3,36±0,17	4,81±0,24	3,36±0,17	4,56±0,23
	10-20	0,62±0,04	0,48±0,03	1,92±0,09	3,12±0,16	2,88±0,14	3,84±0,19
Дыхательная активность (эмиссия CO_2), ммоль CO_2 /час/г почвы	0-10	280±22	400±28	280±22	450±33	230±18	360±24
	10-20	200±16	290±21	220±18	230±19	160±12	180±15
Подвижные формы P_2O_5 , мг/100 г почвы	0-10	31,6±1,6	35,6±1,8	17,3±0,9	13,5±0,7	13,6±0,7	37,5±1,8
	10-20	5,84±0,25	6,2±0,3	8,0±0,4	9,2±0,5	12,9±0,6	9,1±0,4
Подвижные формы K_2O , мг/100 г почвы	0-10	23,5±1,2	41,4±2,1	19,4±0,9	19,4±0,9	15,8±0,8	41,1±2,1
	10-20	8,1±0,4	8,3±0,4	11,3±0,6	24,0±1,2	13,7±0,7	10,7±0,5
Азот гидролизуемый, мг/100 г почвы	0-10	4,53±0,23	3,75±0,18	4,35±0,23	5,1±0,3	3,36±0,16	5,1±0,3
	10-20	3,71±0,18	4,06±0,21	4,05±0,21	5,1±0,3	3,15±0,15	4,33±0,23
Обменный Ca^{2+} , ммоль/100 г почвы	0-10	6,0±0,3	4,6±0,2	8,6±1,6	8,64±0,4	7,55±0,4	7,1±0,4
	10-20	5,37±0,27	5,7±0,3	8,9±0,4	8,94±0,4	7,8±0,4	9,1±0,5
Обменный Mg^{2+} , ммоль/100 г почвы	0-10	1,21±0,10	0,89±0,04	2,07±0,12	1,92±0,11	2,42±0,15	2,26±0,10
	10-20	1,11±0,06	1,22±0,06	2,07±0,12	2,03±0,12	2,48±0,15	2,61±0,16
Общая микробная численность (гетеротрофы), млн. КОЕ/г почвы	0-10	25,3±0,5	26,3±0,5	26,7±0,5	33,1±0,5	23,4±0,5	29,8±0,5
	10-20	21,6±0,5	24,1±0,5	22,8±0,5	26,3±0,5	20,8±0,5	25,3±0,5
Концентрация углеводородов нефти, мг/кг почвы	0-10	170±50*	180±60*	2900±850	200±60	3800±1000	1600±450
	10-20	150±45*	140±40*	600±180	540±150	1200±350	1500±450
Убыль нефти в почве, %	0-10	-*	-*	94,2	99,6	96,2	98,4
	10-20	-*	-*	98,8	98,5	98,3	98,5

Примечание. I – общая, отдалённая от корней проба почвы; II – проба почвы из ризосферной зоны; * – незагрязнённая нефтью почва (фон).

ложен вариант формулы расчёта интегрального коэффициента биологической активности почв (ИК БАП). Данная формула расчёта основана на принципах определения ИК БАП [4, 5]. В формуле ИК БАП [4], разработанной для засоленных почв, учитываются как биотические, так и абиотические параметры:

$$ИК = \frac{(P_1 + P_2 + \dots + P_n) \cdot H}{(Z_s \cdot n)} \quad (1)$$

где ИК – интегральный коэффициент БАП;

$P_1 \dots P_n$ – показатели ферментативной активности и т.п., %;

H – содержание гумуса, %;

Z_s – суммарное содержание солей в почве, %;

n – число используемых показателей.

Фоновое значение (контроль) каждого из показателей предлагается принимать за 100% и по отношению к нему в процентах выражать значение этого же показателя в других рассматриваемых вариантах, затем суммировать относительные значения всех показателей для каждого варианта в средний оценочный балл [5]:

$$B_n = \frac{B_{\phi}}{B_0} \cdot 100, \quad (2)$$

где B_n – относительный балл n -ого показателя, %;

B_{ϕ} – фактическое значение n -ого показателя;

B_0 – значение показателя в незагрязнённой почве.

$$B_{cp} = \frac{(B_1 + \dots + B_n)}{n}, \quad (3)$$

где B_{cp} – средний оценочный балл показателей, %;

$B_1 \dots B_n$ – относительные баллы различных показателей, %;

n – число используемых показателей.

Отмечалось [4], что при необходимости количество параметров, вводимых в формулу расчёта (1), можно дополнять и изменять. В соответствии с этим формула (1) нами была несколько модифицирована: в числитель вместо суммы показателей введён средний оценочный балл показателей БАП (3), в котором учтены различные биологические (эмиссия CO_2 , дегидрогеназная активность, общая микробная численность) и агрохимические показатели почвы, оказывающие влияние на активность и жизнедеятельность почвенной биоты. Величина засоленности (Z_s , %) в формуле (1) заменена нами на величину остаточного со-

держания нефтепродуктов (ОСНП, %). Величина содержания гумуса, в связи с тем что оценивали эффект очистки-биоремедиации нефтезагрязнённой почвы, содержащей соответственно значительное количество органического углерода, из формулы (1) исключена. Таким образом, модифицированная формула расчёта ИК БАП, которую мы предлагаем использовать для оценки эффективности способа биоремедиации – очистки почвы от нефти, имеет следующий вид:

$$ИК\ БАП = \frac{B_{cp}}{ОСНП}, \quad (4)$$

где B_{cp} – средний оценочный балл показателей, рассчитанный в соответствии с формулами (2) и (3), %;

ОСНП – остаточное содержание нефтепродуктов в почве, %.

Предложенная нами формула расчёта ИК БАП (4) даёт возможность оценить восстановительный потенциал загрязнённой почвы по комплексу различных показателей, а также оценить эффективность способа применения фитокультуры в качестве биорекультиванта.

Использование ИК БАП позволило сравнить степень восстановления почвенных процессов в различных зонах и слоях при выращивании растений *P. arundinacea* на почве с 5 и 10% уровнями нефтезагрязнения в течение одного вегетационного периода (рис. 1). Как видно, наиболее низкими значениями ИК БАП (23–33) характеризуются общие (удалённая от корневой системы растения зона) пробы почв из верхнего 0–10 см слоя. В то же время более глубокие слои почвы (10–20 см) характеризуются величинами ИК БАП на уровне 97–117. В ризосферной зоне почвы значения ИК БАП существенно выше, при этом различия между глубиной отбора проб менее выражены. В варианте с исходным 5%-ым уровнем

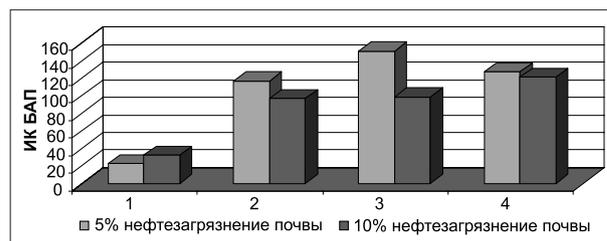


Рис. 1. Показатели интегрального коэффициента биологической активности почвы (ИК БАП) в общих пробах (1 – слой 0–10 см; 2 – слой 10–20 см) и пробах ризосферной зоны почвы (3 – слой 0–10 см; 4 – слой 10–20 см) при фиторемедиации с различными уровнями нефтезагрязнения.

нефтезагрязнения степень восстановления почвенных процессов наиболее высокая – ИК БАП составляет 128–151. В вариантах с исходным 10% загрязнением значения ИК БАП находятся на уровне 99 (0–10 см слой почвы) и 122 (10–20 см слой почвы). Очевидно, растения *P. arundinacea*, образующие мощную сеть подземных корневищ (на глубину до 20 см) и большой запас вегетативных меристем [8], способствуют интенсивному метаболизму растительно-микробного комплекса, снижению содержания нефтезагрязнения и повышению биологической активности почвы.

Таким образом, на основании расчётов ИК БАП показано, что при фиторемедиации нефтезагрязнённой почвы выращиванием корневищного злака *P. arundinacea* за один вегетационный сезон происходит активная деструкция нефти и восстановление как биологических процессов, так и физико-химических показателей в ризосферной зоне почвы, тогда как в верхнем 0–10-сантиметровом слое удаленной от корневой системы зоне почвы (общие пробы) эти процессы протекают существенно менее интенсивно как при 5%, так и при 10%-ом исходном нефтезагрязнении. Т.е. для биоремедиации удалённой от корней почвы одного вегетационного сезона недостаточно.

Известно, что адаптация растений к стрессовым условиям, как правило, сопровождается торможением роста и развития при концентрации нефти 3–5% [19, 20]. На основе изучения физиолого-биохимических характеристик растений *P. arundinacea* показана реакция корневищного злака на различные уровни нефтезагрязнения почвы (табл. 2). В опыте с растениями *P. arundinacea* при 5 и 10%-ом нефтезагрязнении не обнаружено

существенных изменений морфологических параметров надземной части растений (высота, число листьев, надземных побегов). Отмечено усиление накопления сухой биомассы растений при 5%-ом загрязнении за счёт увеличения массы корневищ и корней. Стимуляция роста корневой системы может быть результатом биодеструкции нефти, которое осуществляется за счёт биологической активности растительно-микробного комплекса.

Загрязнение почвы нефтью в концентрации 5 и 10% оказало существенное влияние на физиолого-биохимические показатели растений *P. arundinacea*. Выявлено снижение содержания зелёных и жёлтых пигментов, общего азота и содержания аминокислот в органах растений. Показано разное влияние поллютанта на компоненты антиоксидантной системы листьев и корневищ. В листьях опытных растений происходило накопление продуктов ПОЛ и снижение активности пероксидаз, что говорит о повреждении клеточных мембран, деструкции фотосинтетических пигментов. Корневища в отличие от листьев не испытывали сильного окислительного стресса, о чём свидетельствует отсутствие изменений в уровне МДА и повышенная активность пероксидаз. Можно предположить, что корневища многолетнего злака характеризуются более эффективной антирадикальной защитой, по сравнению с листьями.

Для оценки перспективности применения растений *P. arundinacea* в качестве биорекультиванта использовали расчёт показателей фитотоксичности [6] в соответствии с приведённой ниже формулой:

$$\Phi = \frac{ПК - ПО}{ПК} \cdot 100\% , (5)$$

Таблица 2
Влияние нефтяного загрязнения почвы на физиолого-биохимические характеристики растений *Phalaroides arundinacea*

Показатель	Орган растения	Уровень исходного нефтезагрязнения почвы		
		0% (контроль)	5%	10%
Хлорофиллы <i>a+b</i> , мг/г сырой массы	листья	1,67 ± 0,1	1,36 ± 0,009*	0,91 ± 0,006**
Каротиноиды, мг/г сырой массы	листья	0,79 ± 0,05	0,69 ± 0,02	0,36 ± 0,03***
Активность пероксидаз, J ₂ /г сырой массы	листья	20,12 ± 0,17	14,33 ± 1,4*	15,25 ± 0,85*
	корневища	6,19 ± 0,46	8,90 ± 0,60*	12,20 ± 0,30*
Содержание МДА, нмоль/г сырой массы	листья	41,32 ± 6,81	73,15 ± 2,38*	46,16 ± 6,46
	корневища	29,87 ± 3,36	25,28 ± 6,17	26,39 ± 4,5
Содержание азота, мг/г сухой массы	листья	30,7 ± 3,4	25,3 ± 4,0	20,2 ± 0,4*
	корневища	12,5 ± 1,3	10,8 ± 1,3	9,4 ± 1,3
	корни	14,1 ± 2,0	8,4 ± 0,4*	8,5 ± 1,1*
Сухая масса, г/растение	надземная часть	12,3	14,7	11,8
	корневища	22,5	30,6	20,2

Примечание. Различия между контролем и опытом достоверны при $P \leq 0,05$, ** – при $P \leq 0,01$, *** – при $P \leq 0,001$.

Таблица 3

Фитотоксичность при выращивании растений *Phalaroides arundinacea* на нефтезагрязнённой почве

Показатель	Орган растения	Фитотоксичность, %	
		5% нефтезагрязнения	10% нефтезагрязнения
Хлорофиллы <i>a+b</i> , мг/г сырой массы	листья	18,5	45,5
Каротиноиды, мг/г сырой массы	листья	12,7	54,4
Активность пероксидаз, J ₂ /г сырой массы	листья	28,8	24,2
	корневища	-43,8	-97,1
Содержание МДА, нмоль/г сырой массы	листья	-77,0	-11,7
	корневища	15,4	11,7
Содержание азота, мг/г сухой массы	листья	17,6	34,2
	корневища	13,6	24,8
	корни	40,4	39,7
Сухая масса, г/растение	надземная часть	-19,5	4,1
	корневища	-36,0	10,2

Примечание – отрицательное значение фитотоксичности означает стимуляцию.

где Φ – фитотоксичность, ингибирование соответствующего параметра растения, %;

PK – величина параметра в контроле (в соответствующих единицах измерения);

PO – величина параметра в опытном варианте (в соответствующих единицах измерения).

На основе проведённых расчётов, в которых были использованы различные физиолого-биохимические показатели растений *P. arundinacea*, отмечено многостороннее воздействие высоких уровней нефтяного загрязнения почвы (табл. 3). Отмечено, что 5%-ое нефтезагрязнение в меньшей степени ингибировало, а по отдельным физиолого-биохимическим показателям даже стимулировало рост и параметры жизнедеятельности растений по сравнению с 10%-ым нефтезагрязнением почвы.

Для комплексной оценки устойчивости *Phalaroides arundinacea* к токсическому воздействию различных уровней нефтезагрязнения предложен индекс фитотоксичности (ИФТ), который соответствует среднему оценочному баллу (Бср) по [5] и рассчитывается с учётом формул (2) и (3). Для расчёта ИФТ используются различные физиолого-биохимические параметры. Показатели при выращивании растений в незагрязнённой почве (контрольный вариант) принимаются за 100%. Относительные баллы отражают реакцию растений на воздействие уровней нефтезагрязнения почвы (рис. 2).

В результате проведённых расчётов установлено, что показатель ИФТ при 10%-ом нефтезагрязнении почвы незначительно меньше показателя ИФТ при 5%-ом загрязнении, показатель которого в свою очередь практически равен 100%, т.е. равен показателю, принятому

для выращенных в незагрязнённой почве (контроль) растений (рис. 2). Это означает, что поллютант не оказал существенного влияния на рост растений при концентрациях нефтезагрязнения почвы до 10%.

Таким образом, результаты расчёта комплексных показателей индекса фитотоксичности свидетельствуют о том, что растения *P. arundinacea*, высаженные корневищами, устойчивы к токсическому воздействию высоких концентраций нефти в почве.

Выводы

1. Предложен вариант расчёта интегрального коэффициента биологической активности почвы (ИК БАП), представляющего собой модификацию формул, применяемых для

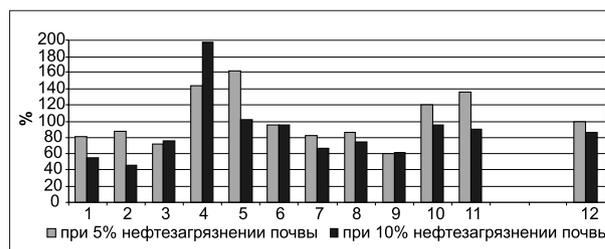


Рис. 2. Относительные баллы физиолого-биохимических показателей растений *P. arundinacea*, выращенных при различных уровнях нефтезагрязнения почвы, и индекс фитотоксичности (ИФТ). Условные обозначения: содержание пигментов в листьях: 1 – хлорофиллы *a+b*, 2 – каротиноиды; активность пероксидаз: 3 – листья, 4 – корневища; содержание МДА: 5 – листья, 6 – корневища; содержание азота: 7 – листья, 8 – корневища; сухая масса: 9 – корни, 10 – надземная часть, 11 – корневища; 12 – индекс фитотоксичности (ИФТ) растений.

мониторинга природных и нарушенных почв. Показано, что ИК БАП может служить показателем степени восстановления интенсивности биологических и физико-химических процессов в нефтезагрязнённых почвах, что позволяет более надёжно оценить эффективность способа биоремедиации почвы;

2. На основе интегрального коэффициента биологической активности почвы подтверждена эффективность применения в качестве биорекултиванта при различных уровнях (5–10%) нефтезагрязнения растений *P. arundinacea*, высаженных корневищами. Показано, что степень очищения и восстановления нефтезагрязнённой почвы в ризосферной зоне значительно выше, чем в отдалённой от корней её части.

3. Использование индекса фитотоксичности, рассчитанного на основе комплекса физиолого-биохимических характеристик растений, свидетельствует об устойчивости многолетнего злака *P. arundinacea* к токсическому воздействию высоких концентраций нефти. Доказана перспективность корневищного способа фиторемедиации нефтезагрязнённой почвы с использованием двукисточника тростниковидного второго года жизни для целей биоремедиации.

Благодарность

Авторы признательны д.б.н. И.Б. Арчевой за ценные советы и консультации при постановке экспериментов.

Список литературы

1. Кураков А.В., Ильинский В.В., Котелевцев С.В., Садчиков А.П. Биоиндикация и реабилитация экосистем при нефтяных загрязнениях. М.: «Графикон», 2006. 336 с.
2. Евдокимова Г.А., Мозгова Н.П., Михайлова И.В. Способы биоремедиации почв Кольского Севера при загрязнении дизельным топливом // *Агрохимия*. 2009. С. 61–66.
3. Киреева Н.А., Водошнянов В.В., Мифтахова А.М. Биологическая активность нефтезагрязнённых почв. Уфа: Гилем, 2001. 376 с.
4. Гельцер Ю.Г., Можарова Н.В., Волкова Э.В. Применение интегральных показателей биологической активности почв при крупномасштабном почвенно-экологическом картировании // *Микроорганизмы в сельском хозяйстве*. Пушцино, 1992. С. 37–38.
5. Девятова Т.А. Биологические принципы мониторинга и диагностики загрязнения почв // *Вестник*

ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2005. №1. С. 105–106.

6. Методы экспериментальной микологии: Справочник / Под. ред. В.И. Билай. Киев: Наук. Думка, 1982. 550 с.

7. Шарапова И.Э., Маслова С.П., Табаленкова Г.Н., Лаптева Е.М. Биоремедиация нефтезагрязнённой почвы при выращивании корневищного злака двукисточника тростниковидного // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2011. №11. С. 42–47.

8. Маслова С.П., Табаленкова Г.Н. Реакция корневищного злака *Phalaroides arundinacea* на загрязнение почвы нефтью // *Агрохимия*. 2010. № 8. С. 66–71.

9. Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // *Биохимические методы в физиологии растений*. М. 1971. С. 154–170.

10. Маслова Т.Г., Попова И.А., Попова О.Ф. Критическая оценка спектрофотометрического метода количественного определения каротиноидов // *Физиология растений*. 1986. 33. № 3. С. 615–619.

11. Методика выполнения измерений содержания углерода и азота в образцах почвы, растений, животных, природных материалов, органических соединений методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110(CHNS-O). Сыктывкар: Ин-т биологии КНЦ УрО РАН. 2006. 12 с.

12. Лукаткин А.С. Холодовое повреждение теплолюбивых растений и окислительный стресс. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2002. 208 с.

13. Ермаков А.И., Арасимович В.В., Смирнова-Иконникова М.И., Мурри И.К. Методы биохимического исследования растений. М.-Л.: Сельхозгиз, 1952. 520 с.

14. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв на анализаторе жидкости «Флюорат-02». ПНД Ф16.1.21–98. М., 1998. 15 с.

15. Назаров С.К., Сивков М.Д. Методы измерения и расчета баланса углерода естественных фитоценозах. (Сер. препринтов «Новые научные методики». Коми НЦ УрО РАН; Вып. 43). Сыктывкар. 1992. 16 с.

16. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.

17. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Издание 2. перераб. М.: МГУ, 1970. 487 с.

18. Градова Н.Б., Бабусенко Е.С., Горнова И.Б., Гусарова Н.А. Лабораторный практикум по общей микробиологии. М. 1999. 130 с.

19. Киреева Н.А., Мифтахова А.М., Салахова Г.М. Рост и развитие яровой пшеницы на нефтезагрязнённых почвах и при биоремедиации // *Агрохимия*. 2006. №1. С. 85–90.

20. Седых В.Н., Игнатъев Л.А. Влияние отходов бурения и нефти на физиологическое состояние растений // *Сибирский экологический журнал*. 2002. № 1. С. 47–53.