МОДЕЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ НЕКОТОРЫХ БИОГЕОЦЕНОТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Е.И. Ковалева, А.С. Яковлев

МГУ им. М.В. Ломоносова

Увеличение объемов добычи нефти, ее токсичные свойства выводят проблему загрязнения почв нефтепродуктами в разряд серьезных экологических проблем. В настоящей работе обоснована модель экологического нормирования нефтезагрязненных почв по функции обеспечения почвой условий для биологической активности по отдельным биологическим показателям, чувствительным к нефтепродуктам, в частности каталазной активности и выживаемости энхитреид. Проведено нормирование нефтепродуктов в разных типах почв Сахалинской области: болотной верховой торфяной мощной, перегнойной подзолистой поверхностно-оглееной, аллювиальной луговой кислой и бурой лесной кислой оподзоленной в модельных рядах с разным уровнем загрязнения. Установление нормативной величины, при которой происходит изменение функционирования изучаемых почв, проводили по критерию изменения значений выбранных биологических показателей, соответствующих изменению скорости функционирования почв при увеличении концентрации нефти по модели "доза-эффект". За норматив качества почв по нефтепродуктам в регионах нефтедобычи использовали величину нефтепродуктов, приводящую к достоверному отклонению значений биологических показателей от фоновых значений, определенных по этим же биологическим показателям. За допустимое остаточное содержание нефтепродуктов в почвах, при котором почва сохраняет устойчивое функционирование и выполняет экологические функции, принято 30 % изменения функционирования почвы от фонового аналога по изученным биологическим показателям. Расчеты по нормированию содержания нефтепродуктов в почвах могут быть выполнены с помощью нелинейной модели регрессии, описываемой логистической кривой. Допустимое содержание нефтепродуктов для болотной верховой торфяной, перегнойной подзолистой поверхностно-оглееной, аллювиальной луговой кислой и бурой лесной кислой оподзоленной почв, при котором почвы сохраняют устойчивое состояние и выполняют биоценотические функции, установленные по интегральному показателю ИПБС и найденному как средневзвешенное геометрическое активности каталазы и выживаемости *Enchytraeus albidus*, составляет 46; 23; 13; 11 г/кг почвы соответственно.

Ключевые слова: нефтезагрязненные почвы, нормирование, экологические функции, норматив качества, предельно допустимое содержание нефтепродуктов, логистическая кривая

The Model of Environmental Rationing of Oil-Contaminated Soils by Changing Some Biogeocenotical Functions

E.I. Kovaleva, A.S. Yakovlev

Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia

The model of ecological rationing of oil-polluted soils is substantiated according to the function of providing the soil with conditions for biological activity according to separate biological indicators sensitive to oil products, in particular, catalase activity and survival of pot worms. Petroleum products were rationed in different types of soils of the Sakhalin region: high-moor peat bog; humus podzolic surface-glue; alluvial meadow acidic; brown forest acid podzolic in model series with different levels of pollution. The establishment of a standard value at which the functioning of the studied soils changes, was carried out according to the criterion of changing the values of selected biological parameters corresponding to the change in the rate of soil functioning with increasing oil concentration according to the dose-effect model. For the standard of soil quality for petroleum products in the regions of oil production, the value of petroleum products was used, leading to a significant deviation of the values of biological indicators from background values determined by the same biological indicators. For the permissible residual content of oil products in soils, in which the soil maintains stable functioning, performs environmental functions, a 30% change in the functioning of the soil from the background analogue according to the studied biological indicators was taken. Calculations on the rationing of oil content in soils can be performed using the non-linear regression model described by the logistic curve.

Keywords: oil-contaminated soils, rationing, environmental functions, quality standard, maximum permissible content of oil products, logistic curve

DOI: 10.18412/1816-0395-2018-11-34-39

Вопросы экологического нормирования качества почв и допустимого на них воздействия остаются актуальными и не до конца разработанными. Осуществление различных видов деятельности: добыча природных ресурсов, возделывание сельскохозяйственных культур, аварийные ситуации на производственных объектах и т.д., неизбежно приводят к негативному воздействию на компоненты природной среды и увеличению площадей загрязненных земель в Российской Федерации. В связи с этим встает вопрос о рекультивации земель и их восстановлении до состояния, безопасного для использования по их основному виду хозяйственной деятельности и целевого назначения, т.е. необходимо установить нормативные значения, до которых необходимо восстанавливать почвы. Острота проблемы связана как с отсутствием официально определенного порядка разработки нормативов качества почв и нормативов допустимого на них воздействия, так и научных подхо-

дов к их установлению. Согласно перечню поручений Президента Российской Федерации [1], для перехода России к модели экологически устойчивого развития требуется разработать нормативы качества почв и земель в зависимости от их природных особенностей, целевого назначения и величины предельных остаточных концентраций загрязняющих веществ в целях восстановления свойств почв исходя из географических, геологических, гидрологических особенностей их формирования и природного фонового состояния территорий и акваторий.

Экологическое нормирование качества почв и допустимого на них антропогенного воздействия должно базироваться на принципах устойчивого функционирования почв, обеспечивающих благоприятную окружающую среду, экологическую безопасность и пригодность почв для хозяйственного использования, а также способность их к самовосстановлению в конкретных природно-климатических условиях [2]. Основы экологических функций почв заложены в работах Г.В. Добровольского и Е.Д. Никитина [3] и классифицированы на биогеоценотические (экосистемные) и глобальные функции. Почва является связующим звеном между всеми компонентами природной среды, выполняя глобальные природорегулирующие функции: литосферные, гидросферные, атмосферные и общебиосферные. Биогеоценотические функции почвы объединены в несколько групп по свойствам и почвенным режимам. Условно разделяя функции почв на внешние и внутренние, мы полагаем [4], что внешние или глобальные функции ориентированы на прямую — обратную миграционную и транслокационную связи с другими компонентами природной среды: водными объектами, атмосферным воздухом и др. В свою очередь, внутренние биогеоценотические функции обусловлены физическими, химическими и биологическими свойствами почв.

В оценке качества природных сред широко применяют подходы биодиагностики на основе методов биоиндикации и биотестирования. При использовании биологических методов в оценке качества почв очень важен выбор показателей, чувствительных к оцениваемому загрязняющему веществу, и установление параметров измерения [5, 6]. Нефть и нефтепродукты представляют собой специфические органические токсичные вещества, при попадании которых в компоненты природной среды происходят негативные изменения функционирования почв, что требует установления научно обоснованных норм содержания нефти и нефтепродуктов в почвах. Из многообразия биологических методов заслуживает внимания оценка токсичности почв путем измерения показателей роста и развития высших растений [7], поскольку позволяет получать достоверную информацию о качестве почв, обладает высокой чувствительностью, универсальностью, интегральностью и простотой. Почвенные беспозвоночные животные являются ключевыми компонентами природных экосистем, что дает преимущество их использования в качестве тест-организмов в экспериментах. Ферментативная активность может выступать маркером, отражающим направленность и интенсивность биологических процессов.

Таблица 1. Результаты изменения биологических откликов на разное содержание нефтепродуктов в исследованных почвах (Mean ± SD, n=9)

Table 1. Biological response as a function of petroleum product content of examined soils (Mean ± SD, =9)

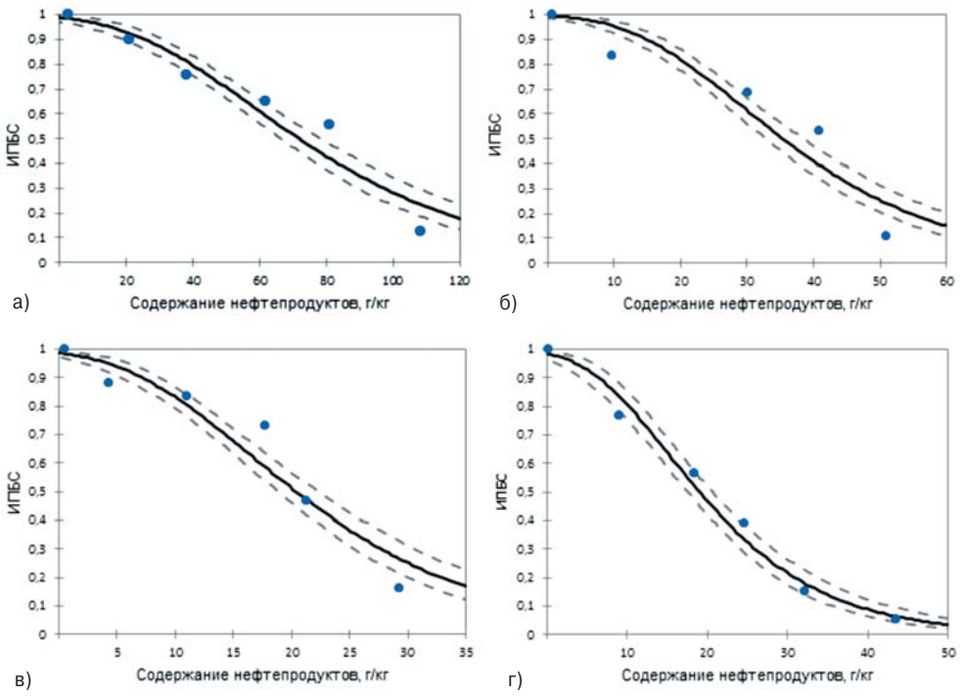
Содержание нефтепродуктов, г/кг, в модельных вариантах почв	Длина корней ячменя обыкновенного, мм	Численность энхитреид, шт.	Каталазная активность, млO_2/г почвы мин	Длина корней горчицы белой, мм
Болотная верховая торфяная мощная почва				
2,809 ± 0,388	46 ± 5 ab*	143 ± 2 a	1,3 ± 0,2 a	–
20,752 ± 2,445	50 ± 7 b	144 ± 4 a	1,1 ± 0,1 b	–
38,289 ± 1,012	43 ± 2 ab	106 ± 5 b	1,0 ± 0,01 b	–
61,703 ± 2,216	41 ± 11 a	89 ± 8 c	0,9 ± 0,01 d	–
80,797 ± 3,065	33 ± 2 c	72 ± 3 d	0,8 ± 0,01 cd	–
108,139 ± 5,489	29 ± 4 c	4 ± 1 e	0,7 ± 0,01 d	–
Перегнойно-подзолистая поверхностно-оглеяная почва				
0,716 ± 0,174	103 ± 12 a	56 ± 1 a	1,6 ± 0,4 a	–
5,717 ± 0,297	106 ± 16 a	56 ± 2 a	1,7 ± 0,2 a	–
9,603 ± 0,600	81 ± 20 b	49 ± 2 b	1,2 ± 0,1 b	–
30,178 ± 1,533	53 ± 20 c	37 ± 2 c	1,1 ± 0,1 b	–
40,387 ± 0,684	47 ± 10 c	30 ± 1 d	0,8 ± 0,1 c	–
50,883 ± 0,593	50 ± 9 a	3 ± 2 e	0,3 ± 0,0 d	–
Аллювиальная луговая кислая почва				
0,514 ± 0,035	60 ± 7 ab	10 ± 0 a	3,6 ± 0,7 a	50 ± 10 a
4,261 ± 0,093	75 ± 4 c	9 ± 0 ab	3,0 ± 0,2 b	46 ± 6 ab
10,991 ± 0,871	67 ± 4 bc	8 ± 0 b	2,9 ± 0,2 b	39 ± 8 abc
17,780 ± 0,635	60 ± 4 ab	6 ± 0 c	2,9 ± 0,3 b	35 ± 3 bc
21,259 ± 0,446	53 ± 18 ad	4 ± 1 d	2,0 ± 0,4 c	30 ± 4 cd
29,319 ± 0,793	43 ± 5 d	1 ± 0 e	1,4 ± 0,5 d	19 ± 3 d
Бурая лесная кислая оподзоленная почва				
0,236 ± 0,047	5 ± 2 a	10 ± 0 a	6,8 ± 2,0 a	5 ± 2 a
8,989 ± 0,644	6 ± 2 b	9 ± 0 b	4,1 ± 0,2 a	6 ± 2 ab
18,431 ± 0,659	3 ± 1 b	6 ± 1 bc	3,5 ± 0,2 b	3 ± 1 abc
24,629 ± 1,695	2 ± 1 a	3 ± 1 c	2,8 ± 0,2 c	2 ± 1 bc
32,215 ± 0,613	2 ± 1 a	1 ± 1 d	1,9 ± 0,1 d	2 ± 1 cd
43,528 ± 0,692	2 ± 1 a	0 ± 0 e	1,0	± 0,1 d

Примечание. Величины с разными буквами отличаются достоверно (LSD test, $p < 0,05$). Содержание нефтепродуктов на фоновых участках варьирует от 0,2 до 2,8 г/кг.

Цель настоящей работы — разработка модели нормирования нефтепродуктов в почвах на примере некоторых типов почв острова Сахалин с использованием биоценотических функций.

Объекты и методы исследования

В экспериментах по нормированию нефтепродуктов в почвах использовались образцы почв, отобранные с глубины 0–10 см в границах почвенного горизонта: фоновые в качестве контрольного варианта и образцы почв, содержащие разные концентрации сырой нефти (табл. 1). Образцы представляли



Зависимости ИПБС (отклонение от контроля, доли ед,) от содержания нефтепродуктов (г/кг) в образцах почв, полученные с использованием log-log модели:
а – болотная верховая торфяная почва; *б* – перегнойная подзолистая поверхностно-оглеенная почва; *в* – аллювиальная луговая кислая бурой лесной кислой оподзоленной почва; *г* – бурая лесная кислая оподзоленная почва

IPBS (deviation from the control, u. fraction) as a function of petroleum product content (g/kg) of soil samples obtained using the log-log model:
a – swamp peat topsoil; b – podzolic humus gleyed topsoil; c – alluvial meadow sour brown forest sour podzolized soil; d - brown forest sour podzolized soil

разные типы почв Сахалинской области: болотная верховая торфяная мощная почва; перегнойная подзолистая поверхностно-оглееная; аллювиальная луговая кислая; бурая лесная кислая оподзоленная почва. Название почв приводится по [8]. Постановка модельных экспериментов выполнена в трех повторностях.

В почвах определяли содержание органического углерода бихроматным методом, общий азот — титриметрическим методом, общий фосфор и калий — фотометрическим методом; pH водной вытяжки — потенциометрическим методом. Суммарное содержание нефтепродуктов в почвах измеряли ИК-спектрометрическим методом на анализаторе КН-2м (ПНДФ 16.1:2.2.22-98).

Активность каталазы определена газометрическим методом по Галстяну [9]. Биотестирование с использованием червей *Enchytraeus albidus* выполнялось в соответствии с ISO 16387:2014. Тест-параметром установления токсичности нефти служила выживаемость, оцениваемая в кратковременном опыте (3 недели). В соответствии с Международным стандартом ISO 11269-2, рекомендующим использовать два вида растений (однодольные и двудольное) в качестве тест-культур при фитотестировании почв, использовали ячмень обыкновенный *Hordeum vulgare* и горчицу белую *Sinapis alba*. Исследование каждого образца почвы по биологическим показателям проводилось в трех повторностях.

Статистическую обработку данных проводили с помощью пакета Statistica 10. Значимость и достоверность различий оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа и попарного сравнения средних величин с использованием критерия Фишера (Fisher LSD test). Нормирование нефтепродуктов в изучаемых почвах о. Сахалин через биоценотическую функцию выполняли с использованием показателя, который отражает функционирование почв через внутренние биоценотические связи — интегральный показатель биологического состояния (ИПБС), представляющий собой безразмерный индекс. Для преобразования размерных величин измеренных биологических показателей в безразмерный интегральный индекс ИПБС выполняли процедуру усреднения в виде средневзвешенной геометрической [10]. Расчеты по нормированию содержания нефтепродуктов в почвах проводили с помощью нелинейной модели регрессии, описываемой log-log кривой и аппроксимирующей зависимость "доза-эффект" в программе XLSTAT-Ecology. Уравнение лог-логистической модели регрессии имеет вид: $\varphi(x) = 1 - \exp[-\exp(\beta X)]$.

Результаты исследований и обсуждение

Торф болотной верховой торфяной мощной почвы характеризуется низкой степенью разложения и высокой емкостью поглощения (нефтеемкость 426,01 г/кг), состоит преимущественно из слаборазложившихся тканей сфагновых мхов. Зольность торфа составляет 2,82 %, pH — 5,5, обеспеченность элементами питания низкая (содержание общего азота — 42,4 мг/кг; P_2O_5 — менее 2 мг/кг; K_2O — 23,60 мг/кг). Содержание органического углерода в органоминеральном горизонте перегнойно-подзолистой поверхностно-оглееной супесчаной почвы составляет 2,64 %, pH — 5,6, обеспеченность азотом, фосфором, калием низкая (N — 15,30 мг/кг; P_2O_5 — 10 мг/кг; K_2O — 26,40 мг/кг соответственно). Гумусово-аккумулятивный горизонт аллювиальной луговой кислой почвы среднесуглинистый по гранулометрическому составу, pH 5,0, содержание органического углерода 1,02 %. Горизонт характеризуется низким содержание азота (71,9 мг/кг), высоким содержание подвижного фосфора (441,0 мг/кг) и очень высоким содержанием обменного калия (1184,5 мг/кг). Для грубогумусного перегнойного горизонта бурой лесной кислой оподзоленной почвы типично накопление неразложившихся растительных остатков, зольность составляет 30,27 %, потери при прокаливании 69,73 %. Значение pH водной вытяжки A_1 — 4,3. Гумусовый горизонт характеризуется

Таблица 2. Вероятное изменение функционирования почв, оцененное по изменению биологических показателей при различном содержании нефтепродуктов с помощью лог-логистической кривой

Table 2. Probable change in soil performance, as estimated by the change in biological indicators, as a function of petroleum product content using log-log curve

Биологический показатель	Вероятное изменение функции почв, %	Содержание нефтепродуктов в почвах, г/кг							
		болотная верховая торфяная мощная		перегнойно-подзолистая поверхностно-оглееная		аллювиальная луговая кислая		бурая лесная кислая оподзоленная	
		среднее значение	доверительный интервал*	среднее значение	доверительный интервал*	среднее значение	доверительный интервал*	среднее значение	доверительный интервал*
Выживаемость энхитреид	50	66,9	63,0/71,6	34,7	32,2/37,7	17,5	15,7/19,8	19,0	17,8/20,3
	40	59,5	55,7/63,5	30,1	27,7/32,6	14,1	12,6/15,7	17,2	16,0/18,4
	30	52,1	48,3/55,9	25,5	23,3/27,9	11,4	10,1/12,6	15,6	14,4/16,7
	20	44,3	40,1/48,1	20,7	18,3/23,0	9,1	7,9/10,1	14,0	12,8/15,1
	10	34,7	29,5/39,0	14,8	12,0/17,2	6,8	5,8/7,8	12,3	11,0/13,4
	5	27,7	21,5/32,5	10,4	7,2/13,1	5,6	4,6/6,5	11,2	9,9/12,3
Активность каталазы	50	104,9	91,8/125,1	36,9	34,2/40,1	34,8	26,2/53,8	14,6	11,9/17,2
	40	83,3	73,4/97,4	31,9	29,5/34,7	20,9	16,7/28,2	10,7	8,0/12,9
	30	62,1	54,0/71,8	27,0	24,7/29,5	12,7	10,2/15,8	7,8	5,3/9,9
	20	39,6	30,0/47,9	21,9	19,3/24,2	7,5	5,5/9,3	5,6	3,4/7,6
	10	11,9	-3,9/22,7	15,5	12,4/18,1	3,9	2,4/5,3	3,8	2,0/5,5
	5	–	-/-	10,8	7,2/13,7	2,4	1,3/3,5	2,8	1,3/4,3
ИПБС	50	71,8	66,5/78,3	35,4	32,8/38,4	20,4	18,9/22,3	19,1	176/20,7
	40	61,2	56,4/66,5	30,7	28,3/33,3	17,3	15,9/18,9	16,1	14,7/17,6
	30	50,7	46,1/55,4	26,0	23,7/28,4	14,3	13,0/15,7	13,3	11,7/14,8
	20	39,6	34,5/44,2	21, 1	18,6/23,4	11,1	9,7/12,5	10,3	8,5/11,8
	10	25,9	19,5/31,2	14,9	12,1/17,5	7,2	5,4/8,7	6,5	4,3/8,3
	5	15,8	8,1/22,0	10,5	7,1/13,3	4,3	2,2/6,1	3,8	1,2/5,8

*Числитель – нижняя граница, знаменатель – верхняя.

очень высоким содержанием валовых форм азота (336,2 мг/кг), что также может быть связано с большим количеством растительного опада. Обеспеченность почв фосфором и калием может быть охарактеризована как очень высокая — 939,3 и 1568,9 мг/кг соответственно. Характеристики изученных почв лежат в пределах региональных значений данных типов почв [11].

Содержание нефтепродуктов в почвах в зависимости от типа почв варьирует от 0,2 до 2,8 г/кг на фоновых участках (см. табл. 1). Указанные концентрации нефтепродуктов в почвах можно рассматривать как фоновые значения, что увязывается с данными о фоновом содержании нефтяных углеводородов в почвах территории острова Сахалин, приведенными в литературных источниках [11].

Данные по измерению биологических откликов (выживаемость энхитреид, каталазная активность, длина корней ячменя обыкновенного и горчицы белой) на различные дозы нефтепродуктов в почвах приведены в табл. 1. Результаты фитотестирования в эксперименте показали отсутствие всхожести горчицы белой как в контрольных, так и в нефтезагрязненных образцах болотной верховой торфяной и перегнойно-подзолистой поверхностно-оглееной почв, что свидетельствует о свойствах почв, не пригодных для произрастания данной культуры (образцы почв представлены торфом, кислая реакция среды, низкое содержание общего азота, фосфора и калия).

Данные корреляционного анализа откликов биотестов в зависимости от содержания нефтепродуктов в почвах не выявили достоверной корреляционной связи нефтепродуктов и биологического отклика для показателя "длина корней ячменя обыкновенного" при фитотестировании нефтезагрязненных проб бурой лесной кислой оподзоленной почвы (R^2 = -0,363, $p > 0,136$). Установлена достоверная корреляция нефтепродуктов с каталазной активностью (R^2 = -0,8 ÷ -0,9; $p < 0,001$) и выживаемостью энхитреид (R^2 = -0,9; $p < 0,001$) в экспериментах со всеми изученными почвами в модельных вариантах. В дальнейшем при нормировании нефтепродуктов в почвах использовали только биологические отклики, имеющие достоверную корреляционную связь с нефтепродуктами.

Статистически обработанные результаты продемонстрировали достоверное изменение активности каталазы, выживаемости энхитреид ($p < 0,05$) в зависимости от содержания нефтепродуктов в исследованных почвах. Достоверное снижение каталазной активности фиксировалось при концентрации нефтепродуктов 20,7; 9,6; 4,2; 18,4 г/кг; достоверная выживаемость энхитреид установлена при содержании нефтепродуктов 38,2; 9,6; 10,9; 8,9 г/кг в болотной верховой торфяной, перегнойной подзолистой поверхностно-оглееной, аллювиальной луговой кислой, бурой лесной кислой оподзоленной почвах соответственно (см. табл. 1). Результаты измерения длины корней ячменя продемонстрировали неоднозначность (см. табл. 1), хотя установлена корреляционная зависимость для данного показателя с нефтепродуктами. Достоверное изменение длины корня для горчицы белой фиксировалось при концентрациях нефти равной 17,7 и

24,6 г/кг в аллювиальной луговой кислой и бурой лесной кислой оподзоленной почвах соответственно (см. табл. 1).

При нормировании нефтепродуктов в почвах, приуроченных к территории месторождений нефти, где вероятно ее диффундирование в компоненты природной среды, предлагаем за норматив качества почв по нефтепродуктам принимать достоверное отклонение значений биологических показателей от среднего значения, определенного для почв фоновой территории по этим же биологическим показателям. В то же время под допустимым остаточным содержанием нефтепродуктов (ДОСНП) в почве понимаем такое содержание, при котором почва продолжает сохранять устойчивое функционирование. Более высокие концентрации нефтепродуктов в почве будут приводить к изменению ее функционирования и необратимой деградации. В данной работе рассмотрено функционирование почв в условиях нефтяного загрязнения по функции обеспечения почвой условий для биологической активности по отдельным биологическим показателям, чувствительным к нефтепродуктам, в частности каталазной активности и выживаемости энхитреид. Эти показатели рассматриваются нами в качестве интегральных значений их биоценотического (внутреннего) функционирования. Установление нормативной величины, при которой происходит изменение функционирования изучаемых почв, проводили по критерию изменения значений выбранных биологических показателей, соответствующих изменению скорости функционирования почв при увеличении содержания нефти по модели "доза-эффект". Используя уравнение, описывающее логистическую кривую, для каждого почвенного ряда рассчитаны вероятные изменения функционирования почв, измеренные по активности каталазы и выживаемости энхитреид, при разном содержании нефтепродуктов в почвах (табл. 2).

Согласно предлагаемой модели, достоверное снижение выживаемости энхитреид (см. табл. 1) находится в следующем диапазоне значений содержания нефтепродуктов в почвах, г/кг: 21,5–32,5 для болотной верховой торфяной; 7,2–13,1 для перегнойной подзолистой поверхностно-оглееной; 4,6–6,5 для аллювиальной луговой кислой; 9,9–12,3 для бурой лесной кислой оподзоленной (см. табл. 2). Тогда вероятное изменение биогеоценотической функции почв в эксперименте, а именно условий существования живых почвенных организмов, оцененных по выживаемости энхитреид в зависимости от уровня содержания нефтепродуктов, происходит на уровне 5 % потери качества почв (см. табл. 2). Достоверное изменение активности каталазы лежит в следующих расчетных диапазонах содержания нефтепродуктов в почвах, г/кг: 3,9–22,7 для болотной верховой торфяной; 7,2–13,7 для перегнойной подзолистой поверхностно-оглееной; 1,3–3,5 для аллювиальной луговой кислой; 5,3–9,9 для бурой лесной кислой оподзоленной (см. табл. 2). Установленное достоверное снижение активности каталазы на содержание нефтепродуктов можно транслировать как вероятное изменение функционирования почв на 10; 5; 5; 30 % соответственно, установленное по этому биологическому показателю (см. табл. 2). Болотная верховая торфяная почва начинает изменять свое качество при снижении функционирования почвы, определенной по каталазной активности, на 10 % в отличие от перегнойной подзолистой поверхностно-оглееной и аллювиальной луговой кислой, поскольку торф верховой является мощным сорбентом и аккумулирует фракции нефтепродуктов. Изменение каталазной активности в бурой лесной кислой оподзоленной почве (горизонт А1) не совпадает с найденной закономерностью изменения функционирования, рассчитанной по каталазной активности для гумусовых горизонтов перегнойной подзолистой поверхностно-оглееной, аллювиальной луговой кислой, что, вероятно, объясняется особыми условиями в грубогумусном перегнойном горизонте, характеризующимся высоким содержанием органического углерода и высокой обеспеченностью азотом, фосфором и калием, способствующими обитанию живых организмов.

Рассчитаны диапазоны содержания нефтепродуктов, влияющие на значения интегрального индекса ИПБС, с использованием уравнения лог-логистической модели. Кривые зависимости индекса ИПБС от концентрации нефтепродуктов в образцах почв, полученные с использованием log-log модели, приведены на рисунке. За норматив качества по нефтепродуктам принимаем среднее значение отклонения функционирования почв, определенное по индексу ИПБС, равное 5 %. Тогда согласно выполненным расчетам в лог-логистической модели регрессии, величина норматива качества, установленная по интегральному индексу ИБПС, равна 15,8; 10,5; 4,3; 3,8 г/кг для болотной верховой торфяной, перегнойной подзолистой поверхностно-оглееной, аллювиальной луговой кислой и бурой лесной кислой оподзоленной почв соответственно (см. табл. 2). За содержание нефтепродуктов, определяемое нами как допустимое остаточное содержание нефтепродуктов в почвах, при котором почва сохраняет устойчивое функционирование и выполняет экологические функции, предлагаем вслед за авторами [12] принимать 30 %-ные изменения функционирования экосистемы, что соответствует уровню риска наступления ее деградации. Допустимое содержание нефтепродуктов, установленное по интегральному показателю ИПБС, при котором почвы сохраняют устойчивое состояние и выполняют биоценотическую функцию, для болотной верховой торфяной, перегнойной подзолистой поверхностно-оглееной, аллювиальной луговой кислой и бурой лесной кислой оподзоленной почв составляет 50,7; 26,0; 14,3; 13,3 г/кг соответственно (см. табл. 2).

Заключение

Предложена модель экологического нормирования нефтезагрязненных почв по изменению биогеоценотической функции, определяемой по способности почвой обеспечивать допустимый уровень биологической активности по отдельно выбранным био-

логическим показателям. Для оценки и нормирования уровня загрязнения почв нефтепродуктами предлагаем использовать биологические показатели, имеющие достоверную корреляционную связь с содержанием нефтепродуктов в почве. В частности, такими биологическими показателями служат активность каталазы и выживаемость *Enchytraeus albidus*. Данные биологические показатели могут применяться при нормировании нефтепродуктов с учетом почвенных свойств. За норматив качества почв по нефтепродуктам в регионах нефтедобычи предлагается использовать величину, соответствующую содержанию нефтепродуктов, приводящему к первому достоверному отклонению значений биологических показателей от фоновых значений, определенных по этим же биологическим показателям, с увеличением содержания нефтепродуктов в почве. В свою очередь, за ДОСНП в почвах, при котором почва все еще сохраняет устойчивое функционирование и выполняет экологические функции, принимается 30 %-ное изменение функционирования почвы от фонового принятого аналога по биологическим показателям. Расчеты по нормированию содержания нефтепродуктов в почвах могут быть выполнены с помощью нелинейной модели регрессии, описываемой логистической кривой, аппроксимирующей зависимость "доза-эффект".

Литература

1. **Перечень** поручений по итогам заседания Государственного совета по вопросу "Об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений", 24 января 2017 года [Электронный ресурс]. URL: http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/53775.
2. **Ковалева Е.И., Яковлев А.С.** Научные подходы к нормированию загрязнения почв нефтепродуктами. Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 10. С. 50–57.
3. **Добровольский Г.В., Никитин Е.Д.** Функции почв в биосфере и экосистемах. М., Наука, 1990. 259 с.
4. **Ковалева Е.И., Яковлев А.С.** Экологические функции болотных экосистем (на примере острова Сахалин). Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 12. С. 32–37.
5. **Терехова В.А.** Биотестирование почв: подходы и проблемы. Почвоведение. 2011. № 2. С. 190–198.
6. **Kovaleva E.I., Yakovlev A.S., Nikolaenko (Kegiyan) M.G., Makarov A.O., Makarov A.A.** Ecological Evaluation of Oil-Contaminated Soils (Sakhalin) Using Enchytraeidae. Eurasian soil science. 2017. № 50(3). P. 350–358.
7. **Терехова В.А., Воронина Л.П., Николаева О.В., Бардина Т.В., Калмацкая О.А., Кирюшина А.П., Учанов П.В., Креславский В.Д., Васильева Г.К.** Применение фитотестирования для решения задач экологического почвоведения. Использование и охрана природных ресурсов в России. 2016. № 3. С. 36–41.
8. **Классификация** и диагностика почв СССР. М., Колос, 1977. 224 с.
9. Галстян А.Ш. Унификация методов определения ферментативной активности почв. Почвоведение. 1978. № 2. С. 107–114.
10. **Пен Р.Ж., Менчер Э.М.** Статистические методы в целлюлозно-бумажном производстве Изд. Лесная промышленность, 1973. 120 с.
11. **Щеглов А.И., Цветнова О.Б.** Содержание и распределение нефтяных углеводородов в почвах фоновых территорий о. Сахалин. Проблемы региональной экологии. 2009. № 5. С. 49–53.
12. **Виноградов Б.В., Орлов В.П., Снакин В.В.** Биотические критерии выделения зон экологического бедствия России. Изв. РАН. Сер. геогр. 1993. № 5. С. 77–89.

References

1. **Perechen'** poruchenii po itogam zasedaniya Gosudarstvennogo soveta po voprosu "Ob ekologicheskom razvitii Rossiiskoi Federatsii v interesakh budushchikh pokolenii", 24 yanvarya 2017 goda [Elektronnyi resurs]. URL: http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/53775.
2. **Kovaleva E.I., Yakovlev A.S.** Nauchnye podkhody k normirovaniyu zagryazneniya pochv nefteproduktami. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2016. T. 20. № 10. S. 50–57.
3. **Dobrovol'skii G.V., Nikitin E.D.** Funktsii pochv v biosfere i ekosistemakh. M., Nauka, 1990. 259 s.
4. **Kovaleva E.I., Yakovlev A.S.** Ekologicheskie funktsii bolotnykh ekosistem (na primere ostrova Sakhalin). Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2017. T. 21. № 12. S. 32–37.
5. **Terekhova V.A.** Biotestirovanie pochv: podkhody i problemy. Pochvovedenie. 2011. № 2. S. 190–198.
6. **Kovaleva E.I., Yakovlev A.S., Nikolaenko (Kegiyan) M.G., Makarov A.O., Makarov A.A.** Ecological Evaluation of Oil-Contaminated Soils (Sakhalin) Using Enchytraeidae. Eurasian soil science. 2017. № 50(3). P. 350–358.
7. **Terekhova V.A., Voronina L.P., Nikolaeva O.V., Bardina T.V., Kalmatskaya O.A., Kiryushina A.P., Uchanov P.V., Kreslavskii V.D., Vasil'eva G.K.** Primenenie fitotestirovaniya dlya resheniya zadach ekologicheskogo pochvovedeniya. Ispol'zovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii. 2016. № 3. S. 36–41.
8. **Klassifikatsiya** i diagnostika pochv SSSR. M., Kolos, 1977. 224 s.
9. **Galstyan A.Sh.** Unifikatsiya metodov opredeleniya fermentativnoi aktivnosti pochv. Pochvovedenie. 1978. № 2. S. 107–114.
10. **Pen R.Zh., Mencher E.M.** Statisticheskie metody v tsellyulozno-bumazhnom proizvodstve Izd. Lesnaya promyshlennost', 1973. 120 s.
11. **Shcheglov A.I., Tsvetnova O.B.** Soderzhanie i raspredelenie neftyanykh uglevodorodov v pochvakh fonovykh territorii o. Sakhalin. Problemy regional'noi ekologii. 2009. № 5. S. 49–53.
12. **Vinogradov B.V., Orlov V.P., Snakin V.V.** Bioticheskie kriterii vydeleniya zon ekologicheskogo bedstviya Rossii. Izv. RAN. Ser. geogr. 1993. № 5. S. 77–89.

Е.И. Ковалева – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник, МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991 Россия, г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 12, e-mail: katekov@mail.ru ● А.С. Яковлев – д-р биол. наук, зав. кафедрой, e-mail: yakovlev_a_s@mail.ru

E.I. Kovaleva – Cand. Sci. (Biol.), Senior Research Fellow, Lomonosov Moscow State University, 119991 Russia, Moscow, Leninsky Gory 1, bld. 12, e-mail: katekov@mail.ru ● A.S. Yakovlev – Dr. Sci. (Biol.), Head of Department, e-mail: yakovlev_a_s@mail.ru