
БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Общая биология

Экология

УДК 57.083:633.13:631.453(571.56-25)
DOI 10.31242/2618-9712-2018-24-2-76-86

Биотестирование фитотоксичности почвогрунтов г. Якутска с использованием тест-объекта овса посевного *Avena sativa* L.

В.Ю. Солдатова*, Е.Г. Шадрина**, С.Д. Карпова*

*Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета
им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

**Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия

Аннотация. Проведено биотестирование 63 проб почвы, отобранных на территории г. Якутска и 1 контрольной пробы из природного биотопа. Тест-объект овес посевной сорта «Покровский» проращивали на водной вытяжке и методом контактного биотестирования. Оценивали всхожесть семян на 3, 4 и 14 сутки, развитие надземной и подземной частей проростков, ингибирование тест-откликов и индекс токсичности фактора (ИТФ). Высокие показатели всхожести, развития надземной и подземной частей проростков отмечены в контрольной пробе. Для городских почвогрунтов характерна высокая вариабельность всех параметров. При проращивании на водной вытяжке на 3 сутки отмечено ингибирование всхожести до 72, на 4 – до 44 %, при контактном биотестировании эти показатели доходили до 100 %. Ингибирование развития вегетативных органов выражено слабо, а при проращивании на водной вытяжке в 30 % проб выражен стимулирующий эффект. Средний показатель ИТФ на территории города по 9 тест-функциям составил 0,73, что соответствует низкому уровню фитотоксичности, а по точкам варьировал от нормы (отсутствие токсического эффекта) до высокой токсичности. Большинство исследованных точек на территории г. Якутска характеризовалось средней и низкой фитотоксичностью почв. Относительно высокая токсичность отмечена в местах интенсивного движения автотранспорта и на улицах, где разрешен проезд грузовых автомобилей. Выявлена статистически значимая корреляционная зависимость исследуемых тест-откликов овса посевного от интенсивности автотранспортной нагрузки, более ярко выраженная при контактном биотестировании. Контактное биотестирование дает более высокие показатели ингибирования тест-откликов и ИТФ, это свидетельствует о наличии загрязнителей, не переходящих в водную фракцию, но негативно влияющих на всхожесть и развитие проростков.

Ключевые слова: биотестирование, овес посевной, всхожесть, индекс токсичности фактора, ингибирование развития, автотранспортная нагрузка.

Благодарности. Работа выполнена в рамках выполнения госзадания ИБПК СО РАН на 2018–2020 гг.

Bioassay of phytotoxicity of soils in Yakutsk using oat (*Avena sativa* L.) as test-object

V.Yu. Soldatova*, E.G. Shadrina**, S.D. Karpova*

*Institute of Natural Sciences of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

**Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia

Abstract. A bioassay of 63 samples of soil collected in the territory of Yakutsk and one control sample from an undisturbed biotope has been performed. Seeds of the oat cultivar «Pokrovskii» were germinated on aqueous extract and on soil. Germination capacity and development of seedling shoot and root were estimated separately on the 3rd, 4th, and 14th days; toxicity value (TV) was calculated. High figures of germination capacity and development of shoot and root were registered in the control sample. The soils from the city are characterized by high variability of all parameters. With the aqueous extract we observed inhibition of germination capacity of up to 72 % on the third day, up to 44 % on the fourth day, and in case of the contact bioassay (i.e. using soil per se) in some samples 100 % inhibition was observed. Inhibition of development of vegetative organs is less pronounced, and with aqueous extract in 30 % of the samples we registered stimulating effect. Average TV in the territory of the city (calculated using 9 parameters) was 0.73, which is a low level of phytotoxicity. In individual sites it varied between the normal level (no toxic effect) and high toxicity. Most examined sites in the territory of Yakutsk were characterized by average or low phytotoxicity of soil. Relatively high toxicity was registered in sites with high traffic load and on the streets open for truck transport. A statistically significant correlation between the analyzed parameters of the oat and intensity of traffic load was found, and it was more pronounced with the contact bioassay. The contact bioassay results in higher values of inhibition of the analyzed parameters and produces higher TV, which indicates the presence of pollutants that are absent from the water fraction but have a negative impact on germination capacity and development of seedlings.

Key words: bioassay, oat, germination capacity, toxicity, development inhibition, traffic load.

Acknowledgement. This investigation was carried out within the framework of the state assignment of IBPC SB RAS for 2018–2020.

Введение

Урбанизация – преобразование естественных ландшафтов под воздействием городской застройки – один из глобальных и закономерных процессов развития общества. В условиях урбанизации особое значение приобретает оценка качества (здоровья) среды, являющаяся одной из важнейших задач, как при планировании, так и при осуществлении любых мероприятий по природопользованию, охране природы и обеспечению экологической безопасности. Важным компонентом урбоэкосистем является почвенный покров, оценке состояния которого традиционно уделяется большое внимание. При этом надо учесть, что многокомпонентное загрязнение территории города затрудняет оценку антропогенного воздействия, поэтому для этих целей все шире применяются методы биоиндикации. В качестве одного из критериев используется фитотоксичность – свойство почвы угнетать рост и развитие высших растений [1].

Анализу влияния загрязнения на фитотоксичность городских почв с использованием разных тест-объектов посвящен ряд исследований, вы-

полненных на территории гг. Чита [2], Электростали [3], Воронеж [4], Днепропетровск [5], а также Ростовской [6] и Владимирской областей [7].

Город Якутск – административный центр Республики Саха (Якутия). Одним из основных источников загрязнения здесь является автотранспорт, дающий до 58 % валового выброса загрязняющих веществ [8]. В настоящее время в районе г. Якутска образовались полиэлементные техногенные геохимические аномалии во всех природных средах: атмосфере, поверхностных водах, почвенном покрове, которые распространяются далеко за пределы города [9–11]. На территории города ведутся биоиндикационные работы по оценке качества среды по величине показателя флуктуирующей асимметрии листа березы повислой [12, 13], оценке мутагенной активности почв с использованием в качестве тест-объекта лука-батун *Allium fistulosum* L. [14], а также исследования по оценке влияния пылевого загрязнения на некоторые биохимические, физиологические и цитогенетические показатели и качество семенного потомства дикорастущих травянистых растений

– клоповника безлепестного [15], ромашки аптечной [16], лебеды раскидистой [17].

Почва как чрезвычайно гетерогенная среда с большим количеством питательных элементов методически представляет собой сложный объект для биотестирования, причем большая часть методик биотестирования основана на анализе водной вытяжки, но для адекватной оценки почвенных образцов необходимо оценивать в биотест-системе и твердую фазу почв [18]. В связи с этим целью нашей работы была экотоксикологическая оценка почвогрунтов г. Якутска с применением двух методических подходов биотестирования – водной вытяжки почв и контактного биотестирования с использованием в качестве тест-объекта овса посевного *Avena sativa* L. Овес посевной – однолетнее травянистое растение, относящееся к семейству злаки Poaceae, широко используемый в сельском хозяйстве вид, неприхотливый к почвам и климату, с коротким (75–120 дней) вегетационным периодом, всходы могут переносить небольшие заморозки, семена могут прорасти при 2° С, поэтому культура с успехом разведена в северных областях [19], а также применяется в биотестировании [20].

Материал и методы исследования

В летний период 2016 г. было собрано 63 образца почв из разных районов г. Якутска и 1 контрольная проба (природный биотоп на территории Ботанического сада ИПБК СО РАН). Почвенные образцы отбирались методом прикопок на глубину 10 см. Токсичность почв оценивали на основе водной вытяжки почв и контактного тестирования почвенных образцов. В качестве тест-объекта использовали семена *Avena sativa* (сорт «Покровский») из одной партии и одного года.

Для приготовления почвенной вытяжки 1 часть воздушно-сухой, просеянной через сито почвы, взбалтывали с 4 частями дистиллированной воды в течение 15 мин, полученную смесь отстаивали сутки, затем опять взбалтывали и фильтровали через бумажный фильтр. В чашки Петри помещали бумажный фильтр, на который раскладывали семена в количестве 50 штук и приливали почвенную вытяжку. Перед посевом производили отбор семян по массе, отбрасывая слишком тяжелые и слишком легкие, чтобы нивелировать влияние качества семян на ход эксперимента.

При контактном биотестировании почву просеивали через сито с квадратными отверстиями размером от 4 до 5 мм для удаления крупных фрагментов, затем просеянным образцом почвы (примерно 200 г) заполняли сосуды высотой 15

см. Сразу после заполнения сосудов почвой готовили лунки глубиной от 10 до 15 мм, клали по одному семени в каждую лунку и тщательно заравнивали почву. Проращивали на специальных полках с осветителями в оранжерее Ботанического сада Института естественных наук. Поддерживался 16-часовой световой день с температурой 23±3 °С.

Тест-функции. При проращивании на водной вытяжке проращивание осуществляли в течение 4 суток, рассматривали два показателя всхожести на 3 и 4 сутки, а в конце эксперимента оценивалось угнетение развития вегетативных органов: при измерении проростка выделено по две градации: для корешка менее или более 4 см, для надземной части проростка менее или более 1,5 см. Для оценки ингибирования развития вычисляли процент проростков с угнетением роста надземной и подземной частей. При контактном биотестировании в качестве тест-реакций изучены всхожесть семян (соответственно 3, 4 и 14 сутки эксперимента), а также длина надземной и подземной частей проростка и сухая биомасса на 14 сутки. Опыты проводили в трехкратной повторности. Линейные промеры надземной и подземной частей проростков измеряли линейкой с точностью до 1 мм, весовые – на весах Госметр ВЛТЭ-500 с точностью до 0,01 г.

Согласно ГОСТ 12038-84, для овса посевного оценку всхожести семян следует начинать с 4 суток проращивания, причем всхожесть на 4 сутки расценивается как энергия прорастания, т.е. способность давать в полевых условиях дружные и ровные всходы, обычно это показатель, превышающий 50 % [21]. Однако нами отмечены высокие результаты всхожести уже на 3 сутки эксперимента, что особенно ярко выражено при контактном биотестировании, поэтому мы считаем целесообразным в данном исследовании рассматривать эти показатели, не дифференцируя на собственно всхожесть и энергию прорастания.

Всхожесть семян рассчитывали по формуле:

$$B = (a/b) \times 100 \%, \quad (1)$$

где а – число проросших семян; b – общее число семян, взятых для проращивания.

Процент ингибирования тест-отклика растений вычисляли по формуле:

$$I = 100\% - \frac{K_1 \times 100}{K_2}, \quad (2)$$

где I – процент ингибирования тест-отклика растений (%); K₁ – среднее значение тест-отклика растений в опыте; K₂ – среднее значение тест-отклика растений в контроле.

Индекс токсичности фактора (ИТФ) вычисляли по формуле:

$$\text{ИТФ} = (T_{\text{Ф01}}/T_{\text{Фк1}} + T_{\text{Ф02}}/T_{\text{Фк2}} + T_{\text{Ф03}}/T_{\text{Фк3}} + \dots)/n, \quad (3)$$

где $T_{\text{Ф0}}$ – значение регистрируемой функции в опыте; $T_{\text{Фк}}$ – значение регистрируемой функции в контроле; n – количество тест-функций. Эко-токсикологическую оценку почв проводили с использованием шкалы Р.Р. Кабирова с соавторами [22] (табл. 1). Индекс токсичности почвогрунтов рассчитывали с применением от 4 до 9 показателей (табл. 2). Предварительные расчеты показали, что показатель сухой вегетативной массы не является независимым (зависит от длины надземной и подземной частей проростка), поэтому в расчете ИТФ данный параметр не использовали.

Оценка транспортной нагрузки проводилась на 19 участках в часы пик (с 8 до 9 ч утра). Подсчитывалось число автомашин, проезжающих по улице в обе стороны за 15 мин в трехкратной повторности, затем производился расчет среднего и перерасчет на количество автомашин в час [23].

Статистическая обработка результатов проводилась в программах Microsoft Excel и

Statistica-9, значимость различий оценивалась с применением критерия Стьюдента с поправкой Бонферони для множественных сравнений, корреляционные связи – с применением рангового коэффициента корреляции Спирмена.

Результаты и обсуждение

Биотестирование водных вытяжек почвы.

Всхожесть семян овса посевного на 3 сутки эксперимента при проращивании на водных вытяжках почв варьировала от 26 до 93 %, причем самый высокий процент наблюдался в контрольной точке (природный биотоп, территория Ботанического сада), тогда как для проб, собранных на территории города, отмечено снижение этого показателя, наиболее сильно выраженное в пятнадцати точках, приуроченных к центральной части города, району ГРЭС, помехохранилищу ОАО «Якутская птицефабрика» и Хатынг-Юряхскому шоссе. Всхожесть семян на 3 сутки для этих проб была ниже 50 %, что соответствует высокой степени токсичности. Максимальные показатели всхожести (81–90 %) наблюдались в трех пробах, отобранных в районе Покровского тракта (застройка частного сектора), Радиоцентра и ул. Пояркова. Всхо-

Т а б л и ц а 1

Оценочная шкала токсичности почв [22]

Estimation scale of soil toxicity [22]

Класс токсичности	ИТФ	Пояснения
VI (стимуляция)	>1,10	Фактор оказывает стимулирующее действие на тест-объект. Величина тест-функции превышает контрольные значения
V (норма)	0,91–1,10	Фактор не оказывает существенного влияния на развитие тест-объектов
IV (низкая)	0,71–0,90	Фактор оказывает влияние на развитие тест-объектов. Разная степень снижения величины тест-функций в опыте по сравнению с контролем
III (средняя)	0,51–0,70	
II (высокая)	< 0,50	
I (сверхвысокая)	-	Гибель тест-объекта

Т а б л и ц а 2

Показатели, использованные для расчета ИТФ

Parameters used for calculating toxicity index

Субстрат	Показатели	ИТФ-В	ИТФ-К	ИТФ-9
Водная вытяжка	Всхожесть, 3 сутки	+	-	+
	Всхожесть, 4 сутки	+	-	+
	Корешки длиной менее 4 см, %	+	-	+
	Проростки длиной менее 1,5 см, %	+	-	+
Контактное биотестирование (почвенные пластинки)	Всхожесть, 3 сутки	-	+	+
	Всхожесть, 4 сутки	-	+	+
	Всхожесть, 14 сутки	-	+	+
	Длина проростка, мм	-	+	+
	Длина корешка, мм	-	+	+

Обозначения: ИТФ-В – индекс токсичности фактора по 4 показателям при проращивании на водной вытяжке почвогрунтов; ИТФ-К – индекс токсичности фактора по 5 показателям при контактном биотестировании (на почвенных пластинках); ИТФ-9 – индекс токсичности фактора по 9 показателям (суммарно для водной вытяжки и контактного биотестирования).

жесть на 4 сутки варьировала от 54 до 97 %, но основная доля проб проявила всхожесть 71–90 % (рис. 1). Уровень корреляционных связей между всхожестью семян на 3 и на 4 сутки можно охарактеризовать как невысокий – коэффициент ранговой корреляции Спирмена 0,39, но статистически значимый ($p < 0,01$).

Кроме того, нами оценивалось ингибирование развития вегетативных органов путем измерения длины корешка и стебелька на 4 сутки эксперимента, отмечены тесные статистически значимые корреляционные связи между угнетением надземной и подземной частей проростков (по критерию Спирмена 0,77, $p < 0,001$), а также слабые, хотя и статистически значимые связи между ингибированием всхожести и долей слабо развитых корешков и надземной части проростков (0,26 и 0,33 соответственно при уровне значимости $p < 0,05$). Ингибирование развития вегетативных органов варьировало весьма зна-

чительно: в пределах от –36,9 до 88,1 %. Отрицательное значение показателя ингибирования означает наличие стимулирующего эффекта по сравнению с контрольной пробой, оно проявилось в 32 % проб, слабый ингибирующий эффект отмечен в 30 % проб, тогда как ингибирование выше 50 % – всего в 22 % проб (рис. 2). Это свидетельствует о том, что присутствие водорастворимых форм загрязнителей в исследованных пробах не оказывает существенного влияния на развитие вегетативных органов данного тест-объекта.

Контактное биотестирование почвогрунтов.

По результатам биотестирования при посеве на почвенные пластинки отмечено значительное варьирование всхожести на 3 сутки – от 0 до 93 %, из них 6 проб характеризовались нулевой всхожестью, в 35 пробах – менее 50 %, и лишь 2 пробы – свыше 90 % (рис. 1). На 4 сутки всхожесть варьировала от 0 до 100 %, причем поло-

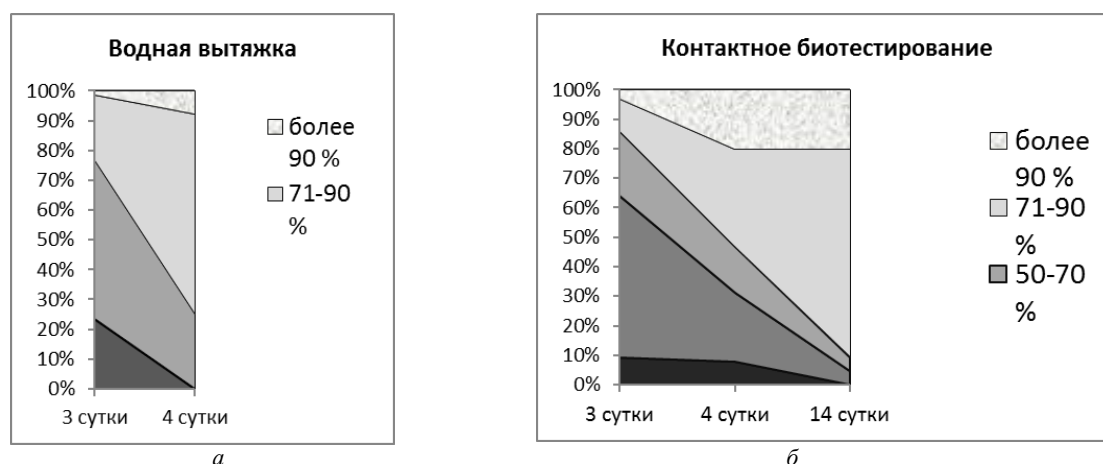


Рис. 1. Показатели всхожести семян овса посевного на водной вытяжке почв (а) и при контактном биотестировании (б)

Fig. 1. Germination capacity of oat seeds on aqueous extract from soils (a) and with contact bioassaying (b)

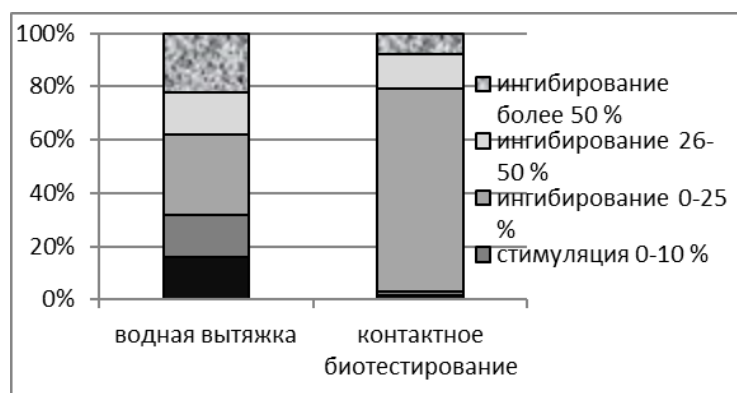


Рис. 2. Ингибирование развития проростков овса посевного при прощивании на водной вытяжке и при контактном биотестировании

Fig. 2. Inhibition of development of oat seedlings on aqueous extract from soils and with contact bioassaying

вина проб характеризовалась показателем свыше 50 %, а 20 % проб – свыше 90 %. В конце опыта (14 суток) всхожесть варьировала от 10 до 100 %, в большинстве проб – не ниже 50 %; исключение составили пробы, отобранные в микрорайоне Борисовка-2, на ул. Красноярова и Хатынг-Юряхском шоссе. В целом корреляция показателей прорастания семян была значительно выше, чем при проращивании на водной вытяжке почв – для всхожести на 3–4 сутки коэффициент Спирмена составил 0,84, для всхожести на 3 и 14 сутки – 0,72, для всхожести на 3 и 4 сутки – 0,64 (значимость во всех случаях превышала $p < 0,0001$).

Развитие вегетативных органов при проращивании на почвенных пластинках оценивали по длине корешка и надземной части проростка, а также по сухой вегетативной массе проростка на 14 суток. Длина корешка варьировала от 0,52 до 14,7 см, надземной части – от 0,78 до 28,2 см. Максимальные показатели длины корешка отмечены в контрольной пробе и в пробе, отобранной в микрорайоне Птицефабрики, а надземной части проростка – в пробе, отобранной на территории городского Парка культуры и отдыха. Минимальные показатели развития проростков наблюдались в пробах, отобранных на улицах Красноярова, Курнатовского, Хатынг-Юряхском шоссе и Объездном шоссе (район свалки снега). Высокую степень фитотоксичности почвогрунтов в этих пробах можно объяснить тем, что в некоторых точках происходит локальное загрязнение, кроме того, здесь разрешен проезд грузового автотранспорта, а на ул. Красноярова шло строительство многоэтажного дома, в связи с чем наблюдались высокая запыленность и большое число большегрузных автомобилей. Показатели развития надземной и подземной частей проростков статистически значимо коррелировали между собой, хотя уровень связей был ниже, чем для всхожести (коэффициент Спирмена 0,54, $p < 0,001$). При этом надо отметить, что ингибирование развития при контактном биотестировании проявилось значительно сильнее, чем при проращивании на водной вытяжке почв (рис. 2), в целом оно варьировало в пределах от –15,7 до 96,1 %, причем стимулирующий эффект отмечен всего для 4 % проб, слабое ингибирование – для 76 %.

Оценка эффективности использования тест-реакций. Нами выявлены значительные различия в показателях всхожести при проращивании на разных субстратах: например при проращивании на водной вытяжке всхожесть на третьи сутки выше 50 % наблюдалась в 76,6 % проб, ни в одной пробе не отмечено нулевой, а на 4 сутки все пробы характеризовались всхо-

жестью выше 50 %, тогда как при контактном биотестировании нулевая всхожесть отмечена в 9 % проб, свыше 50 % – в 65 % проб, всхожесть на 4 сутки по всем параметрам была ниже, и даже на 14 сутки структура показателей всхожести была ниже, чем таковая для водной вытяжки на 4 сутки. На наш взгляд, это свидетельствует о наличии в почве загрязнителей, которые не экстрагируются водной вытяжкой и выявляются только при контактном биотестировании.

При сопоставлении показателей всхожести и развития проростков овса посевного на разных типах субстратов выявлен достаточно высокий уровень коррелированности большинства тест-откликов. Поскольку по сути мы имеем дело с двумя группами откликов (вытяжка – почвенные пластинки), можно утверждать, что загрязнение почвы влияет на исследуемые функции независимо от способа проращивания. В обеих выборках процент проклюнувшихся на 3 сутки семян влияет на все последующее развитие – всхожесть на 4 и 14 сутки, а также, в меньшей степени, на развитие вегетативных органов (рис. 3).

Оценка фитотоксичности городских почвогрунтов. По итогам биотестирования почвогрунтов г. Якутска средний показатель ИТФ-9 по городу составил 0,73, что соответствует низкому уровню токсичности (табл. 3), с варьированием от 0,33 до 0,99 по отдельным точкам. При этом не отмечено значений ИТФ, соответствующих крайним – I и VI – классам, а подавляющее большинство проб характеризуется средней и низкой токсичностью. Кроме того, не обнаружено пространственного градиента загрязнения почвенного покрова по районам города, т.е. участки с благополучным качеством почвогрунтов чередуются с точками с высокой токсичностью, это может свидетельствовать о неравномерности загрязнения почвенного покрова. Шесть проб, характеризующихся относительно высокой токсичностью (II класс), отобраны в непосредственной близости от автодорог с разрешенным проездом большегрузного автотранспорта (Хатынг-Юряхское шоссе, перекрестки Вилюйский тракт – Окружная автодорога и ул. Чайковского и Ильменской, микрорайон Борисовка-2), в зоне влияния строительства (ул. Красноярова), в районе свалки снега (Вилюйский тракт).

Анализ тест-откликов овса посевного на водной вытяжке и на почвенных пластинках дал сходные результаты (табл. 4), но ИТФ-В (при проращивании на водной вытяжке) характеризовался несколько более высокими результатами, а ИТФ-К (при контактном биотестировании)

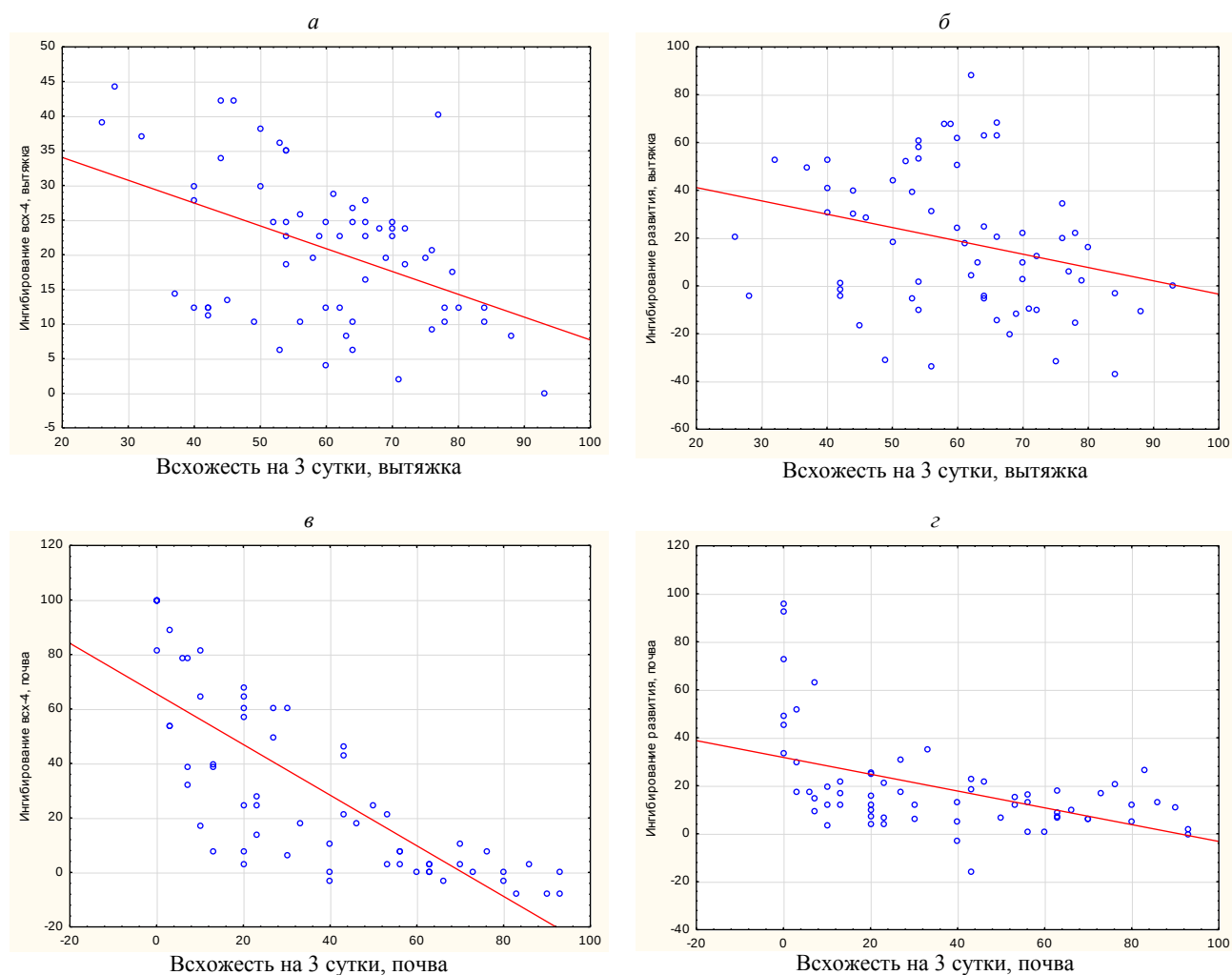


Рис. 3. Влияние всхожести семян овса посевного на 3 сутки эксперимента на дальнейшее развитие проростков

Fig. 3. Influence of germination capacity of oat seeds on third day on further development of seedlings

Т а б л и ц а 3

Показатели токсичности почвогрунтов г. Якутска по прорастанию и развитию проростков овса посевного
Toxicity of soils of Yakutsk city graded by germination and development of oat seedlings

Класс токсичности	Индексы токсичности при разных способах подсчета, М±m			
	n	ИТФ-9	ИТФ-К	ИТФ-В
Среднее по городу	63	0,73 ± 0,02	0,71 ± 0,03	0,76 ± 0,02
Limit	-	0,33–0,99	0,04–1,01	0,45–1,13
I (сверхвысокая)	-	-	-	-
II (высокая)	6	0,40 ± 0,02	0,21±0,06	0,64±0,04
III (средняя)	21	0,63 ± 0,01	0,64±0,02	0,60±0,03
IV (низкая)	28	0,83 ± 0,01	0,81±0,02	0,85±0,02
V (норма)	8	0,93 ± 0,01	0,94 ± 0,03	0,95±0,02
VI (стимуляция)	-	-	-	-

Обозначения: n – число проб; М – среднее арифметическое; m – ошибка среднего.

– заниженными, в основном за счет более низких показателей всхожести и ЭП. Сравнение

ИТФ по классу фитотоксичности показало, что существенные различия проявляются только

Т а б л и ц а 4

Корреляция показателей токсичности почвогрунтов г. Якутска при проращивании на водных вытяжках и почвенных пластинках

Correlation of toxicity index of soils of Yakutsk city when using aqueous extract and soil plates

Показатели	ИТФ-В	ИТФ-К	ИР-В	ИР-К
ИТФ-В	1,00	0,54	-0,95	-0,25
ИТФ-К	0,00001	1,00	-0,49	-0,72
ИР-В	0,00001	0,00005	1,00	0,23
ИР-К	0,05	0,00001	Нет	1,00

Примечание. Обозначения ИТФ-В, ИТФ-К – см. табл. 2, ИР-В – ингибирование развития на водной вытяжке, ИР-К – ингибирование развития на почвенных пластинках.

Над диагональю – значения рангового критерия корреляции Спирмена, под диагональю – уровень статистической значимости.

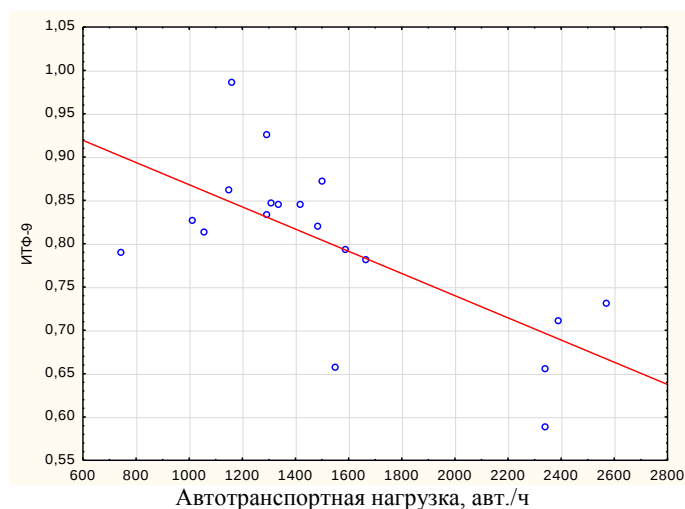


Рис. 4. Зависимость ИТФ городских почвогрунтов г. Якутска от интенсивности автотранспортной нагрузки

Fig. 4. Dependence of TI of urban soils of Yakutsk city on traffic load

при тестировании проб II класса – с высоким индексом, именно для этой группы контактное тестирование дает статистически значимо заниженные результаты, а водная вытяжка – завышенные (t-критерий Стьюдента 5,96, $p < 0,001$), тогда как суммарный показатель ИТФ-9 представляет собой усредненное значение для двух первых.

Надо отметить, что, несмотря на различия в оценке почв с высоким уровнем токсичности, ИТФ для водной вытяжки и контактного биотестирования, будучи независимыми показателями, тем не менее проявляют статистически значимые корреляционные связи (табл. 5). Показатели ингибирования развития, т.е. угнетения роста проростков, проявляют значимую отрицательную корреляционную зависимость с показателями ИТФ.

Для анализа влияния автотранспортной нагрузки нами проведен подсчет интенсивности движения автотранспорта в 19 точках на территории города, при этом статистически значимые

Т а б л и ц а 5
Корреляция индексов токсичности почв г. Якутска

Correlation of toxicity indexes of soils of Yakutsk city

Корреляция	Коэффициент Спирмена	Уровень значимости
Авто & ИТФ-В	-0,45	–
Авто & ИТФ-К	-0,61	$p < 0,01$
Авто & ИТФ-9	-0,60	$p < 0,01$

Обозначения: ИТФ-В, ИТФ-К, ИТФ-9 см. табл. 2.

корреляционные связи с интенсивностью автотранспортной нагрузки отмечены для ИТФ-К и ИТФ-9, тогда как для ИТФ, рассчитанного только по тест-реакциям овса на водной вытяжке, корреляции не достигали статистически значимого уровня (рис. 4). На наш взгляд, это свидетельствует о наличии загрязнителей, слабо экстрагирующихся водной вытяжкой почв.

Выводы

Анализ тест-функций овса посевного при оценке фитотоксичности почвогрунтов г. Якутска показал высокую вариабельность всех параметров. Для контрольной точки (почва из природного биотопа) отмечены наиболее высокие показатели всхожести, а также развития надземной и подземной частей проростков, причем всхожесть на 3 и 4 сутки эксперимента близка для двух способов проращивания (на водной вытяжке – 93 и 97 % соответственно, при контактном биотестировании – оба показателя по

93 %). Для городских почвогрунтов всхожесть семян на 3 сутки эксперимента на водной вытяжке варьировала от 26 до 93 %, на 4 сутки – от 54 до 97 %, а по результатам контактного биотестирования – от 0 до 93 % и от 0 до 100 % соответственно. Ингибирование развития вегетативных органов проростков для исследованных проб выражено слабо, а при прорастивании на водной вытяжке в значительной доле проб отмечен стимулирующий эффект. Не выявлено пространственного градиента изменения анализируемых показателей по районам города, это может свидетельствовать о неравномерности загрязнения почвенного покрова.

Средний показатель ИТФ почвогрунтов на территории города по 9 тест-функциям составил 0,73, что соответствует низкому уровню фитотоксичности, а по точкам варьировал от нормы (отсутствие токсического эффекта) до высокой токсичности. Большинство исследованных точек на территории г. Якутска характеризовалось средней и низкой фитотоксичностью почв. Относительно высокая токсичность отмечена в местах интенсивного движения автотранспорта и на улицах, где разрешен проезд грузовых автомобилей. Выявлена статистически значимая корреляционная зависимость исследуемых тест-откликов овса посевного от интенсивности автотранспортной нагрузки, более ярко выраженная при контактном биотестировании.

Большинство исследуемых тест-функций при двух способах прорастивания характеризовалось статистически значимыми уровнями корреляций, но в целом контактное биотестирование дает более высокие показатели ингибирования развития и фитотоксичности исследованных городских почвогрунтов.

Литература

1. Wang X., Sun C., Gao S., Wang L., Shuokui H. Validation of germination rate and root elongation as indicator to assess phytotoxicity with *Cucumis sativus* // Chemosphere. 2001. Vol. 4, № 8. P. 1711–1721.
2. Ефименко Е.А., Манукян Е.О. Токсичность почвы городской среды // Альманах современной науки и образования. 2009. Ч. 1, № 11 (30). С. 129–132.
3. Блинова З.П. Биотестирование почвенного покрова городских территорий с использованием проростков *Raphanus Saivus* // Вестник МГОУ. Серия Естественные науки. 2014. № 1. С. 18–23.
4. Назаренко Н.Н., Корецкая И.И., Свистова И.Д. Биоиндикация транспортных зон г. Воронежа // Вестник ВГУ. Серия География. Геоэкология. 2015. № 1. С. 46–50.
5. Яковичина Т.Ф. Экоотоксикологическая оценка городских почв методом биотестирования // Universum: химия и биология. 2015. № 8 (16). С. 3. Электронный ресурс, код доступа: свободный. URL: <http://7universum.com/ru/>.
6. Налета Е.В., Колесников С.И., Казеев К.Ш. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на фитотоксические свойства почв городов Ростовской области // Научный журнал КубГАУ. 2015. № 112 (08). С. 1–11.
7. Чеснокова С.М., Савельев О.В., Губская С.В. Оценка фитотоксичности и ферментативной активности почв городских ландшафтов, загрязненных тяжелыми металлами (на примере г. Судогда) // Успехи современного естествознания. 2016. № 2. С. 187–191.
8. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2015 г. Якутск, 2016. 534 с.
9. Макаров В.Н. Эколого-геохимический мониторинг окружающей среды г. Якутска // Наука и образование. 2013. № 3. С. 95–100.
10. Саввинов Д.Д., Макарова М.П., Тимофеев А.Г., Ковальский Д.В. Микроэлементы в почвах пригородной зоны г. Якутска // Наука и образование. 2014. № 2. С. 7–10.
11. Сивцева Н.Е., Легостаева Я.Б., Макаров В.С., Васильев Н.Ф. Экологическая оценка состояния территории г. Якутска по суммарному показателю загрязнения почвенного покрова // Вестник СВФУ. 2011. Т. 8, № 2. С. 30–35.
12. Солдатова В.Ю., Шадрина Е.Г. Флуктуирующая асимметрия березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.) как показатель качества городской среды // Проблемы региональной экологии. 2007. № 5. С. 70–74.
13. Шадрина Е.Г., Солдатова В.Ю., Макаров В.С. Биоиндикационная оценка качества среды // Якутск. Историко-картографический атлас. Новосибирск: Наука, 2017. 240 с.
14. Пудова Т.М., Шадрина Е.Г. Биотестирование загрязнения почвенного покрова урбанизированных территорий по показателям всхожести и мутагенной активности лука-батуна *Allium fistulosum* L. (на примере г. Якутска) // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 2. Дата публикации 21.04.2017. Код доступа: свободный. URL: <https://science-education.ru/article/view?id=26346>.
15. Прокопьев И.А., Журавская А.Н., Филипова Г.В. Влияние техногенного пылевого загрязнения на изменение физиолого-биохимических адаптаций и радиоустойчивость семенного потомства клоповника безлестного (*Lepidium apetalum* Wild.) // Сибирский экологический журнал. 2013. Т. 20, № 2. С. 248–253.

16. Прокопьев И.А., Филиппова Г.В., Шеин А.А., Габышев Д.В. Влияние городского техногенного загрязнения на морфологические, биохимические характеристики и семенную продуктивность ромашки аптечной // Экология. 2014. № 1. С. 22–29.

17. Филиппова Г.В., Прокопьев И.А., Шеин А.А. Влияние техногенного пылевого загрязнения на физиологические и цитогенетические характеристики семенного потомства лебеды раскидистой (*Atriplex patula* L.) // Наука и образование. 2015. № 3. С. 89–93.

18. Терехова В.А. Биотестирование почв: подходы и проблемы // Почвоведение. 2011. № 2. С. 190–198.

19. Кияк Г.С. Растениеводство. Киев: Высшая школа, 1971. 352 с.

20. ГОСТ ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений. М.: Стандартинформ, 2010. 36 с.

21. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М.: Стандартинформ, 2011. 30 с.

22. Кабиров Р.Р., Сагитова А.Р., Суханова Н.В. Разработка и использование многокомпонентной тест-системы для оценки токсичности почвенного покрова городской территории // Экология. 1997. № 6. С. 408–411.

23. Федорова А.И., Никольская А.Н. Практикум по экологии и охране окружающей среды. М.: ВЛАДОС, 2003. 288 с.

References

1. Wang X., Sun C., Gao S., Wang L., Shuokui H. Validation of germination rate and root elongation as indicator to assess phytotoxicity with *Cucumis sativus* // Chemosphere. 2001. V. 4, № 8. P. 1711–1721.

2. Efimenko E.A., Manukyan E.O. Toksichnost' pochvy gorodskoj sredy // Al'manakh sovremennoj nauki i obrazovaniya. 2009. Ch. 1, № 11 (30). P. 129–132.

3. Blinova Z.P. Biotestirovanie pochvennogo pokrova gorodskikh territorij s ispol'zovaniem pro-rostkov *Raphanus Sativus* // Vestnik MGOU. Seriya «Estestvennye nauki». 2014. № 1. P. 18–23.

4. Nazarenko N.N., Koretskaya I.I., Svistova I.D. Bioindikatsiya transportnykh zon g. Voronezha // Vestnik VGU, seriya: Geografiya. Geoekologiya. 2015. № 1. P. 46–50.

5. Yakovishina T.F. Ekotoksikologicheskaya otsenka gorodskikh pochv metodom biotestirovaniya // Universum: Khimiya i biologiya. 2015. № 8 (16). p. 3. Elektronnyj resurs, kod dostupa: svobodnyj, URL: <http://7universum.com/ru/>.

6. Naleta E.V., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh. Vliyanie zagryazneniya tyazhelymi metallami na

fitotoksicheskie svojstva pochv gorodov Rostovskoj oblasti // Nauchnyj zhurnal KubGAU. 2015. № 112 (08). P. 1–11.

7. Chesnokova S.M., Savel'ev O.V., Gubskaya S.V. Otsenka fitotoksichnosti i fermentativnoj aktivnosti pochv gorodskikh landshaftov, zagryaznennykh tyazhelymi metallami (na primere goroda Sudogda) // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2016. № 2. P. 187–191.

8. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushej sredy Respubliki Sakha (Yakutiya) v 2015 g. Yakutsk, 2016. 534 p.

9. Makarov V.N. Ekologo-geokhimicheskij monito-ring okruzhayushej sredy goroda Yakutsk // Nauka i obrazovanie. 2013. № 3. P. 95–100.

10. Savvinov D.D., Makarova M.P., Timofeev A.G., Koval'skij D.V. Mikroelementy v pochvakh prigorodnoj zony g. Yakutsk // Nauka i obrazovanie. 2014. № 2. P. 7–10.

11. Sivtseva N.E., Legostaeva Ya.B., Makarov V.S., Vasil'ev N.F. Ekologicheskaya otsenka sostoyaniya territorii g. Yakutsk po summarnomu pokazatelyu zagryazneniya pochvennogo pokrova // Vestnik SVFU. 2011. V. 8, № 2. P. 30–35.

12. Soldatova V.Yu., Shadrina E.G. Fluktuiruyushchaya asimmetriya berezy ploskolistnoj (*Betula platyphylla* Sukacz) kak pokazatel' kachestva gorodskoj sredy // Problemy regional'noj ekologii. 2007. № 5. P. 70–74.

13. Shadrina E.G., Soldatova V.Yu., Makarov V.S. Bioindikatsionnaya otsenka kachestva sredy // Yakutsk. Istoriko-kartograficheskij atlas. Novosibirsk: Nauka, 2017. 240 p.

14. Pudova T.M., Shadrina E.G. Biotestirovanie zagryazneniya pochvennogo pokrova urbanizirovannykh territorij po pokazatelyam vskhozhesti i mutagennoj aktivnosti luka-batuna *Allium fistulosum* L. (na primere g. Yakutsk) // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2017. № 2. Data publikatsii 21.04.2017. Kod dostupa: svobodnyj. URL: <https://science-education.ru/article/view?id=26346>.

15. Prokop'ev I.A., Zhuravskaya A.N., Filippova G.V. Vliyanie tekhnogenogo pyl'evogo zagryazneniya na izmenenie fiziologo-biokhimicheskikh adaptatsij i radioustojchivost' semennogo potomstva klopovnika bezlepestnogo (*Lepidium apetalum* Wild.) // Sibirskij ekologicheskij zhurnal. 2013. V. 20, № 2. P. 248–253.

16. Prokop'ev I.A., Filippova G.V., Shein A.A., Gabyshev D.V. Vliyanie gorodskogo tekhnogenogo zagryazneniya na morfologicheskie, biokhimicheskie kharakteristiki i semennuyu produktivnost' romashki aptechnoj // Ekologiya. 2014. № 1. P. 22–29.

17. Filippova G.V., Prokop'ev I.A., Shein A.A. Vliyanie tekhnogenogo pyl'evogo zagryazneniya

na fiziologicheskie i tsitogeneticheskie kharakteristiki semennogo potomstva lebedy raskidistoj (*Atriplex patula* L.) // Nauka i obrazovanie. 2015. № 3. P. 89–93.

18. Terekhova V.A. Biotestirovanie pochvy: podkhody i problemy // Pochvovedenie. 2011. № 2. P. 190–198.

19. Kiyak G.S. Rasteniyevodstvo. Kiev: Vysshaya shkola, 1971. 352 p.

20. GOST ISO 22030-2009 Kachestvo pochvy. Biologicheskie metody. Khronicheskaya fitotoksichnost' v otnoshenii vysshikh rastenij. M.: Standartinform, 2010. 36 p.

21. GOST 12038-84. Semena sel'skokhozyajstvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhesti. M.: Standartinform, 2011. 30 p.

22. Kabirov R.R., Sagitova A.R., Sukhanova N.V. Razrabotka i ispol'zovanie mnogokomponentnoj test-sistemy dlya otsenki toksichnosti pochvennogo pokrova gorodskoj territorii // Ekologiya. 1997. № 6. P. 408–411.

23. Fedorova A.I., Nikol'skaya A.N. Praktikum po ekologii i okhrane okruzhayushej sredy. M.: VLADOS, 2003. 288 p.

Поступила в редакцию 19.04.2018

Об авторах

СОЛДАТОВА Виктория Юрьевна, кандидат биологических наук, доцент, Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, 677027, Якутск, ул. Белинского, 58, <http://orcid.org/0000-0003-4777-0072>, solvik75@mail.ru;

ШАДРИНА Елена Георгиевна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, <http://orcid.org/0000-0002-9660-0072>, e-shadrina@yandex.ru;

КАРПОВА Сахая Даниловна, студентка, Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, 677027, Якутск, ул. Белинского, 58 677027, Якутск, ул. Белинского, 58, sakhaya.karpova@mail.ru.

About the Authors

SOLDATOVA Viktoria Yurievna, Candidate of Biological Sciences, Assistant professor, Institute of Natural Sciences of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinsky St., Yakutsk, 677027, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-4777-0072>, solvik75@mail.ru;

SHADRINA Elena Georgieva, Doctor of Biological Sciences, Chief Research Scientist, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenin Ave., Yakutsk, 677980, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-9660-0072>, e-shadrina@yandex.ru;

KARPOVA Sakhaya Danilovna, Student, Institute of Natural Sciences of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinsky St., Yakutsk, 677027, Russia, sakhaya.karpova@mail.ru.