

Е.В. Дубина-Чехович, младший научный сотрудник  
 О.Н. Бахмет, член-корреспондент РАН  
 Л.П. Евстратова, доктор сельскохозяйственных наук  
 А.Н. Солодовников, кандидат биологических наук  
 ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
 РФ, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11  
 E-mail: d-chehovich@yandex.ru

УДК 631.4

DOI: 10.30850/vrsn/2022/2/77-80

## БИОТЕСТИРОВАНИЕ ПОЧВ АГРОЛАНДШАФТА С ИНТЕНСИВНЫМ АЭРОТЕХНОГЕННЫМ ВЛИЯНИЕМ

При биотестировании с использованием тест-культур овса посевного (*Avena sativa* L.) и гороха посевного (*Pisum sativum* L.) проведена интегральная оценка техногенного воздействия на почву с разным расстоянием от источника загрязнения. Цель работы – дать характеристику фитотоксичности почв агроландшафта с интенсивным уровнем аэротехногенной нагрузки в условиях Карелии. Объект изучения – торфяные почвы на залежных мелиорированных сельскохозяйственных угодьях в зоне влияния промышленного горнодобывающего производства щебня из габбро-диабазов. В ходе исследований установлено, что при очень высоком уровне среднесуточной пылевой нагрузки (100 м – 2101,9 мг/(м<sup>2</sup> сут.); 200 – 1787,4; 300 – 1187,1 мг/(м<sup>2</sup> сут.)) происходит трансформация свойств почв осушенного агроландшафта вблизи горнодобывающего карьера. Высокое содержание элементов питания, слабкокислая реакция почвенного раствора при умеренно опасном суммарном уровне загрязнения почвы обусловила стимуляцию роста тест-культур при биотестировании (горох – на 58 %, овес – 41 %). Ингибирование развития проростков для исследованных проб выражено слабо. По мере удаления от карьера, несмотря на статистически значимое снижение массы пыли, пространственный градиент изменения анализируемых показателей гороха и овса по пробным площадям не обнаружен, что подтверждает ранее выявленный, одинаковый уровень аэротехногенного воздействия на почвенный покров. **Ключевые слова:** биотестирование, фитотоксичность, метод проростков, почвы, сельскохозяйственные угодья, загрязнение, горнодобывающая компания, Карелия.

E.V. Dubina-Chekhovich, Junior Researcher  
 O.N. Bakhmet, Corresponding member of the RAS  
 L.P. Evstratova, Grand PhD in Agricultural sciences  
 A.N. Solodovnikov, PhD in Biological sciences  
 FRC “Karelian Research Centre RAS”  
 RF, 185910, Respublika Kareliya, g. Petrozavodsk, ul. Pushkinskaya, 11  
 E-mail: d-chehovich@yandex.ru

## BIOTESTING OF AGRICULTURAL LANDSCAPE SOILS WITH INTENSIVE AEROTECHNOGENIC INFLUENCE

On the basis of biotesting using test cultures of oats (*Avena sativa* L.) and peas (*Pisum sativum* L.), an integral assessment of the anthropogenic impact on the soil at different distances from the source of pollution was carried out. The aim is to characterize the phytotoxicity of soils of the agricultural landscape with an intensive level of aerotechnogenic load in Karelia. The object of the study was peat soils on fallow reclaimed agricultural lands in the zone of influence of industrial mining production of crushed stone from gabbro-diabases. In the course of research, it was found that at a very high level of average daily dust load (100 m – 2101.9 mg/(m<sup>2</sup>\*day.); 200 – 1787.4; 300 – 1187.1 mg (m<sup>2</sup>\*day)) there is a transformation of soil properties of the drained agricultural landscape near the mining quarry. The high content of nutrients, the slightly acidic reaction of the soil solution with a moderately dangerous total level of soil contamination caused the stimulation of the growth of test crops during biotesting (peas – by 58 % and oats – by 41 %). Inhibition of the development of seedlings for the studied samples is weakly expressed. As we move away from the quarry, despite a statistically significant decrease in the dust mass, the spatial gradient of changes in the analyzed indicators of peas and oats in the sample areas was not detected, which confirms the previously identified, the same level of aerotechnogenic impact on the soil cover.

**Keywords:** biotesting, phytotoxicity, method of seedlings, soils, agricultural land, pollution, mining company, Karelia.

Почва с неоднородностью ее органо-минеральной матрицы, сложным комплексом гуминовых веществ – непростой объект экологической оценки. [6] Комплексное влияние на почвенный покров физических, химических и других факторов при их комбинировании может ослабляться или усиливаться.

Химические анализы показывают лишь наличие «маркеров» – определенных концентраций поллютантов, что имеет крайне ограниченное значение для прогноза и оценки состояния живых организмов, сообществ, экосистемы в целом. [1, 6] Кроме того, существует ряд современных молекулярно-

биологических тестов состояния почвы, но в силу высокой технологической сложности и стоимости их применение ограничено. [8, 10]

Биотестирование по результатам исследования во многом приближается к химическим методам, но, в отличие от последних, оно экономически доступно, легко воспроизводимо и может реально оценить свойства среды, обусловленные наличием совокупности загрязняющих химических веществ. Определение токсичности загрязненных почв и степени воздействия изучаемого фактора на агрофитоценозы происходит с привлечением метода проростков, который показыва-

ет реакцию тест-культуры на наличие в почве загрязняющих веществ и позволяет выявить ингибирующее или стимулирующее влияние.

Цель работы – дать оценку фитотоксичности почв агроландшафта с интенсивным уровнем аэротехногенной нагрузки в условиях Карелии.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено в южной агроклиматической зоне Республики Карелия. Объект изучения – торфяные почвы на залежных мелиорированных сельскохозяйственных угодьях (228,5 га), где присутствует влияние промышленного горнодобывающего производства шебня из габбро-диабазов. В карьере, разрабатываемом с 2008 года площадью 160 га, расположены открытые участки дробления горной породы и рассева ее на фракции, ведутся погрузочно-разгрузочные работы. Воздушными потоками пыль распространяется от мест ее образования на большую часть водосборной площади сельскохозяйственных угодий.

Для оценки воздействия поллютантов отобраны образцы верхнего горизонта почвы ( $A_{\text{пах}}$ ) на глубине 0...20 см с пробных площадей на разном удалении от источника загрязнения (100, 200 и 300 м). Учитывали среднесуточный уровень пылевой нагрузки [11], который был установлен более ранними исследованиями, как очень высокий с постепенным снижением массы загрязняющих выбросов: 100 м от источника загрязнения – 2101,9 мг/(м<sup>2</sup>·сут.); 200 – 1787,4; 300 – 1187,1. [7] Выявлено, что накопление в почвах Fe, Mn, Ni, Cu, Co, Cr выше региональных значений в 1,5...13 раз, суммарный уровень загрязнения – умеренно опасный. [11]

Контроль – почва с тех же сельскохозяйственных угодий, но расположенных вдали от антропогенного влияния (1500 м), где значение показателей среднесуточной пылевой нагрузки приближено к нулю. Загрязненные и фоновые участки подобраны по принципу единообразия типа почв, растительности, сельскохозяйственному использованию и способу осушения.

На каждой пробной площади заложены полнопрофильные почвенные разрезы и отобраны образцы для определения агрохимических показателей (рН<sub>сод</sub>, зольность, содержание углерода и основных элементов питания растений). [3, 4] Строение профиля и морфологические горизонты изучали с помощью морфогенетического метода.

Фитотоксичность почв выявляли методом проростков семян овса посевного (*Avena sativa* L.) и гороха посевного (*Pisum sativum* L.). Равные по массе образцы почвы в трехкратной повторности помещали в чашки Петри. Первая серия опыта – в каждую чашку закладывали по 20 семян гороха посевного, вторая – по 30 семян овса посевного. Учет проводили на третий и седьмой день (энергия прорастания, общая всхожесть, длина надземной части и корней, масса растений) с расчетом среднего значения индекса токсичности почв (ИТФ) для каждой пробной площади. Выявляли токсичность загрязненной почвы по морфологическим признакам растений.

Всхожесть и энергию прорастания семян тест-растений определяли по общепринятым методикам. [5] Измерения длины подземной и надземной частей растений проводили с помощью линейки (с

точностью до 1 мм), взвешивание – на аналитических весах II-го высокого класса точности «ВЛТЭ – 150» (ГО 01 039). Энергию прорастания семян (процент проросших семян за определенный срок) рассчитывали по формуле:  $V = a/v \times 100$  (%), где  $a$  – число проросших семян;  $v$  – общее число семян, взятых для опыта. Всхожесть – количество нормально проросших семян (имеют корешок не менее длины семени и росток не менее половины длины семени), выраженное в процентах к пробе, взятой для анализа.

Индекс токсичности оцениваемого фактора почв (энергия прорастания, всхожесть, длина побегов и корней, масса проростков) определяли по каждой тест-культуре для получения сопоставимых результатов, затем рассчитывали по формуле:  $ИТФ = TФ_0 / TФ_k$ , где  $TФ_0$  – среднее значение показателя в опыте;  $TФ_k$  – среднее значение показателя в контроле.

Класс токсичности исследуемых почв оценивали по шкале токсичности (табл. 1).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Мелиорированные сельскохозяйственные угодья, расположенные вблизи источника загрязнения (горнодобывающий и перерабатывающий карьер), представлены низинными болотными почвами. Мощность корнеобитаемого слоя ( $T_0, T_1, T_2$ ) колеблется от 25 до 35 см. Верхняя часть пахотного горизонта очень сухая, имеет серый цвет из-за минеральной пыли антропогенного характера, структура рыхлая, пронизана большим количеством корней растущих и полуразложившихся многолетних кормовых растений и их надземной части. Мощность горизонтов  $T_3, T_4$  – 25(35)...70 см. Торфяная толща хорошо разложившаяся, состоит из комбинации светлых и бурых фрагментов, встречаются крупные трещины, по которым стекают поверхностные воды.

Представленный в исследовании темно-гумусовый торфяной горизонт от 70 см и ниже – влажный, перегнойно-торфяной с вкраплениями неразложившейся коры деревьев и древесины, погребенных при мероприятиях по осушению болотного массива. В связи с сезонной гипертрофией водного режима, границы перехода нижележащих горизонтов размыты.

Длительное техногенное воздействие (более 13 лет) способствует накоплению поллютантов в почве, вызывает изменения ее агрохимических характеристик. Учитывая, что в Карелии торфяники характеризуются кислой реакцией среды, на фоне аэротехногенного загрязнения меняются их кислотно-щелочные показате-

Таблица 1.

Шкала токсичности почв [1]

Величина ИТФ	Класс токсичности
>1,10	VI (стимуляция)
0,91...1,10	V – норма
0,71...0,90	IV – низкая токсичность
0,50...0,70	III – средняя токсичность
<0,50	II – высокая токсичность
Среда не пригодна для жизни	I – сверхвысокая токсичность, вызывающая гибель

**Таблица 2.**  
**Агрохимическая характеристика пахотного горизонта торфяной низинной почвы вблизи горнодобывающего карьера**

Расстояние от карьера, м	Зольность, %	Подвижное соединение, мг/кг		N, мг/кг	С, %	N/C	Среднее значение pH <sub>кд</sub>
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O				
100	27,2	114,6	384,9	1,8	37,9	21,0	5,3
200	19,3	175,6	343,0	1,7	39,8	23,4	4,7
300	21,7	207,2	342,7	1,7	38,5	22,6	4,6
1500	12,4	128,3	244,8	1,7	30,5	17,0	4,5

**Таблица 3.**  
**Энергия прорастания и всхожесть семян гороха и овса на разных расстояниях от карьера**

Вариант (число проростков)	Показатель	Единица измерения	Расстояние от горного карьера, м				НСР <sub>05</sub>
			100	200	300	1500*	
Горох	энергия прорастания	шт. / %	13,3 / 66,5	13,0 / 64,8	14,0 / 70,3	11,7 / 58,3	3,7
	всхожесть	шт. / %	15,3 / 76,7	11,8 / 58,8	12,5 / 62,5	12,0 / 60,0	
Овес	энергия прорастания	шт. / %	27,0 / 89,8	28,0 / 93,3	25,2 / 84,0	25,2 / 83,9	3,3
	всхожесть	шт. / %	26,8 / 89,3	26,9 / 89,7	28,6 / 95,3	23,9 / 79,7	

Примечание. \* – расстояние до фоновой площадки; НСР<sub>05</sub> – наименьшая существенная разница.

тели. Интенсивные пылевые выбросы СаО подщелачивают торфяную почву (табл. 2).

О повышении содержания минеральной габбро-диабазальной пыли в торфяной почве сельскохозяйственных угодий может свидетельствовать максимальное значение зольности непосредственно около карьера по сравнению с пробными площадями, удаленными от него на 200 и 300 м.

На первой пробной площадке (100 м) уровень рН изменяется от 4,5 до 6,5, второй (200) – от 4,2

до 5,6, третьей (300 м) – от 4,0 до 5,6. Слабокислая реакция торфяной почвы благоприятная для роста и развития большинства многолетних кормовых трав.

По результатам лабораторного исследования энергия прорастания семян *P. sativum* и *A. sativa* на 4...19 % выше в вариантах с загрязнением почв, чем в контроле (табл. 3). Аналогичная тенденция установлена и по всхожести семян, которая в вариантах загрязнения почв превышала фоновый показатель на 4...27 %.

Статистически значимых различий по энергии прорастания обеих тест-культур не выявлено (НСР<sub>05</sub>=3,7), а по всхожести семян гороха отмечены различия между образцами, отобранными на расстоянии: 100 и 200 м от карьера, 100 и 1500 м (НСР<sub>05</sub>=3,2). Отсутствуют достоверные различия по всхожести семян овса.

Масса зародышевых корней гороха на загрязненных и фоновых почвах больше ростков на 23...61 % (табл. 4). Усиленное формирование корневой системы в условиях загрязнения происходит из-за сокращения биомассы надземных органов и рассматривается, как вынужденная потребность организма увеличить поверхность корней и сохранить в надземной части растения нетоксичные концентрации загрязняющих веществ. [9, 12] В отличие от проростков гороха, линейные показатели корней овса на загрязненных почвах меньше длины стеблей на 12...27 %, а масса надземной части овса, наоборот, на 27...59 % больше корней.

При расчете индекса токсичности (ИТФ) выявлено, что более 58 % зародышевых корешков и ростков растений гороха, как по линейным показателям, так и по массе, испытывало стимулирующее воздействие (VI класс токсичности). Особенно проявилась реакция на расстоянии 100 м от карьера (81 % образцов), активизирующее влияние в 25 и 50 % отмечено на расстоянии 200 и 300 м, соответственно. Для роста и развития растений гороха наиболее благоприятны почвы близкие по реакции к нейтральным, с хорошей обеспеченностью гумусом, известью, фосфором, калием и марганцем. [2] Почвенные условия с высоким со-

**Таблица 4.**  
**Длина и масса корневой и надземной частей тест-культур на разных расстояниях от карьера**

Расстояние от горного карьера, м	Горох				Овес			
	корни	ИТФ	стебли	ИТФ	корни	ИТФ	стебли	ИТФ
Длина, см								
Фон (контроль)	4,6±0,8	–	2,4±0,3	–	7,5±0,7	–	7,2±0,7	–
100	7,8±0,5*	С**	7,8±0,2*	С	7,2±0,7	Н	8,7±0,9	С
200	5,0±0,6	Н	3,1±0,2	С	6,7±0,6	НТ	8,9±0,6	С
300	5,9±0,7	С	2,0±0,3	НТ	9,2±0,2*	С	10,5±0,4*	С
НСР <sub>05</sub>		1,83		0,6		1,6		1,3
Масса, мг								
Фон (контроль)	101,4±14,5		81,3±5,4		66,1±8,7		64,5±10,0	
100	146,5±6,0*	С	118,7±5,0*	С	46,4±4,3*	СТ	75,7±7,9	С
200	118,6±13,5	С	73,6±7,7*	НТ	69,0±5,1	Н	94,5±5,5*	С
300	136,5±13,2*	С	92,9±3,4	С	60,8±3,9	Н	93,9±5,2*	С
НСР <sub>05</sub>		33,5		24,0		17,9		20,2

Примечание. \* достоверное различие с фоновыми почвами; \*\* С – стимулирующее влияние; Н – норма; НТ – низкая токсичность; СТ – средняя токсичность.

держанием CaO и Mn (1,5...2 раза больше ПДК), слабокислой реакцией почвенной среды ( $pH_{\text{сол}} = 5,3$ ), высокой обеспеченностью подвижными соединениями фосфора и калия оказали стимулирующий эффект на ростовые показатели тест-культуры.

К IV классу (низкая токсичность) относится 21 % образцов растений гороха, остальные распределены равнозначно (по 12 %) по двум классам средней токсичности.

Наибольшее количество проростков овса (46 %) испытывают стимулирующее влияние, 33 % образцов принадлежат к классу нормы, а 17 и 4 % – низкой и средней токсичности. По сравнению с фоновой, на загрязненных площадках, отмечена стимуляция (длина, масса) вегетативной части растений на 20...46 %. Интенсивное ингибирующее воздействие на массу зародышевых корешков овса посевого отмечено на расстоянии 100 м от карьера.

Анализ тест-функций гороха и овса при оценке фитотоксичности почвы показал высокую вариабельность всех параметров. В целом в тестовой группе растений показатели длины и массы больше, чем в фоновой. При умеренной степени загрязнения и превышении макро- и микроэлементов в 1,5...2,0 раза больше ПДК происходит стимуляция ростовых показателей культуры.

Для большинства почвенных образцов по обоим объектам установлен VI класс фитотоксичности, для которого характерно стимулирующее воздействие. Пространственный градиент изменения анализируемых показателей гороха и овса по пробным площадям не обнаружен, что подтверждает ранее выявленный, одинаковый уровень аэротехногенного воздействия на почвенный покров в сложившихся условиях.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование: учеб. пособие / Под ред. О.П. Мелеховой и Е.И. Сарапульцевой. – М.: «Академия», 2008. – 288 с.
2. Галаутина, Г.Г. Технология производства продукции растениеводства / Г.Г. Галаутина, М.Г. Объектов, В.Е. Долгодворов // Под ред. проф. Галаутиной Г.Г. – М.: Колос, 1995. – 448 с.
3. ГОСТ 17.4.1.02-83 Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнений. – М.: Стандартинформ, 2008.
4. ГОСТ 26207-91 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. – М.: Издательство стандартов, 1992.
5. ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения жизнеспособности. Сб. ГОСТов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.
6. Добровольский, Г.В. Биодиагностика в экологической оценке почв и сопредельных сред / Г.В. Добровольский, В.А. Терехова, Ю.Ю. Дгебуадзе // Поволжский экологический журнал. – 2013. – № 4. – С. 365–367.
7. Дубина-Чехович, Е.В. Природные воды и почвы агроландшафта под воздействием аэротехногенного загрязнения / Е.В. Дубина-Чехович, О.Н. Бахмет, А.В. Мингалеев // Мелиорация и водное хозяйство. – № 1. – 2020. – С. 32–39.

8. Заболотских, В.В. Экспресс-диагностика токсичности почв, загрязненных нефтепродуктами / В.В. Заболотских, А.В. Васильев, С.Н. Танких // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 14. – № 1(3). – 2012. – С. 734–738.
9. Ильина, В.Б. Тяжелые металлы – защитные возможности почв и растений – урожай / В.Б. Ильина, М.Д. Степановой // Химические элементы в системе почва-растение – урожай. – Новосибирск: Наука. – С. 73–92.
10. Пробоподготовка в экологическом анализе: практическое руководство / Ю.С. Другов, А.А. Родин. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Бином. Лаб. знаний, 2009. – с. 855.
11. Саэт, Ю.Е. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М: Недра, 1990. – 335 с.
12. Шунелько, Е.В., Экологическая оценка городских почв и выявление уровня токсичности тяжелых металлов методом биотестирования / Е.В. Шунелько, А.И. Федорова // Вестник Воронежского государственного университета. География. Геоэкология. – 2002. – № 1. – С. 93–104.

#### LIST OF SOURCES

1. Biologicheskij kontrol' okruzhayushchej sredy: bioindikaciya i biotestirovanie: ucheb. posobie / Pod red. O.P. Melekhovoj i E.I. Sarapul'cevoj. – M.: «Akademiya», 2008. – 288 s.
2. Galautina, G.G. Tekhnologiya proizvodstva produkcii rastenievodstva / G.G. Galautina, M.G. Ob»ektov, V.E. Dolgodvorov // Pod red. prof. Galautinoj G.G. – M.: Kolos, 1995. – 448 s.
3. GOST 17.4.1.02-83 Ohrana prirody. Pochvy. Klassifikaciya himicheskix veshchestv dlya kontrolya zagryaznenij. – M.: Standartinform, 2008.
4. GOST 26207-91 Pochvy. Opredelenie podviznyh soedinenij fosfora i kaliya po metodu Kirsanova v modifikacii CINAO. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1992.
5. GOST 12038-84 Semena sel'skoxozyajstvennyh kul'tur. Metody opredeleniya zhiznesposobnosti. Sb. GOSTov. – M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2004.
6. Dobrovolskij, G.V. Biodiagnostika v ekologicheskoj ocenke pochv i sopredel'nyh sred / G.V. Dobrovolskij, V.A. Terekhova, Yu.Yu. Dgebuadze // Povolzhskij ekologicheskij zhurnal. – 2013. – № 4. – S. 365–367.
7. Dubina-Chekhovich, E.V. Prirodnye vody i pochvy agrolandschafta pod vozdejstviem aerotekhnogennogo zagryazneniya / E.V. Dubina-Chekhovich, O.N. Bahmet, A.V. Mingaleev // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo. – № 1. – 2020. – S. 32–39.
8. Zabolotskih, V.V. Ekspress-diagnostika toksichnosti pochv, zagryaznennyh nefteproduktami / V.V. Zabolotskih, A.V. Vasil'ev, S.N. Tankih // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – T. 14. – № 1(3). – 2012. – S. 734–738.
9. Il'ina, V.B. Tyazhelye metally – zashchitnye vozmozhnosti pochv i rastenij – urozhaj / V.B. Il'ina, M.D. Stepanovoj // Himicheskie elementy v sisteme pochva-rastenie – urozhaj. – Novosibirsk: Nauka. – S. 73–92.
10. Probopodgotovka v ekologicheskom analize: prakticheskoe rukovodstvo / Yu.S. Drugov, A.A. Rodin. – 3-e izd., dop. i pererab. – M.: Binom. Lab. znaniy, 2009. – s. 855.
11. Saet, Yu.E. Geohimiya okruzhayushchej sredy / Yu.E. Saet, B.A. Revich, E.P. Yanin i dr. – M: Nedra, 1990. – 335 s.
12. Shunel'ko, E.V., Ekologicheskaya ocenka gorodskih pochv i vyyavlenie urovnya toksichnosti tyazhelyh metallov metodom biotestirovaniya / E.V. Shunel'ko, A.I. Fedorova // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geoekologiya. – 2002. – № 1. – S. 93–104.