

УДК 630*114.34: 630*182

Л.А. Коваленко

Коваленко Людмила Андреевна родилась в 1947 г., окончила в 1970 г. Воронежский государственный университет, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры экологии и зооигиены Уральской государственной сельскохозяйственной академии, член-корреспондент АВН. Имеет более 100 печатных работ по изучению состояния биологической активности почвы в районах сильного антропогенного загрязнения.



ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЧВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ НА ТЕХНОГЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНОВ

Рассмотрено влияние поллютантов на ферментативную активность почвы в зонах промышленного загрязнения. Обосновано применение коэффициента каталазы почвы и суммарной активности фермента для выявления стадии и фазы стресса.

Ключевые слова: ферментативная активность, почвенная экосистема, аэротехногенные поллютанты, адаптационный синдром, экологический стресс.

Изучение лесных биогеоценозов, расположенных в зоне загрязнения аэротехногенными выбросами промышленных предприятий, с использованием методов определения биологической активности (ферментативная и микробиологическая) в лесных подстилках и почвах дает богатый материал для анализа состояния почвенных экосистем, прогнозирования уровня их функционирования, оценки устойчивости биогеоценоза в целом. Большой интерес для диагностики лесных почв в условиях промышленного загрязнения представляет определение их ферментативной активности, обусловленной интенсивностью микробиологических процессов почвенных микробиоценозов. Показатели активности ферментов отражают динамику катализируемых ими окислительных процессов в почвах. Одним из ферментов, уровень активности которого соответствует интенсивности дыхательного обмена в почве [6], является каталаза (КФ 1.11.1.6).

Работа выполнялась нами в 1989–1992 гг. и была продолжена в 1999–2001 гг. в районе Полевского криолитового завода (ПКЗ) на территории лесного массива Полевского лесхоза, расположенного в 65 км к юго-западу от г. Екатеринбурга. Проведены исследования также вблизи Богословского алюминиевого завода (БАЗ) (Красноуральский район Свердловской области, Карпинский лесхоз) и на участках Ревдинского, Билимбаевского лесхозов, находящихся в зоне загрязнения сульфатсодержащими поллютантами, солями тяжелых металлов, попадающими в почву от близко расположенного Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ).

В районе ПКЗ были заложены пять постоянных пробных площадей (ППП) в культурах сосны одного возраста на расстояниях 1; 1,5; 4 и

7 км в направлении господствующих северо-восточных ветров и на расстоянии 26 км от ПКЗ в юго-восточном направлении (условный контроль).

По лесорастительным условиям и гидротермическому режиму насаждения на всех ППП примерно одинаковы: тип леса – сосняк разнотравный, культуры сосны 30-летнего возраста; почвы серые лесные подзолистые, разной степени оподзоленности; состав древостоя 10С, с единичным включением березы, класс бонитета на ППП 4, 7 и 26 км – II, на ППП 1,0 и 1,5 км – IV, относительная полнота на ППП 1,0 и 1,5 км – 0,3 (распавшиеся культуры), на ППП 26 км – 0,9, на других – 0,8–0,9.

В районе исследований на территории Карпинского лесхоза выделены четыре ППП, расположенные в разных направлениях и на различных расстояниях от БАЗ: 4 км – в северо-западном, 5 км – в северо-восточном, 6 км – в юго-восточном, 11,5 км – в северо-восточном направлениях. Местоположение всех участков ровное. Тип леса сосняк-брусничник, сомкнутость 0,6–0,7.

В районе СУМЗ заложены три ППП на разном расстоянии: 2 и 6 км в направлении господствующих ветров, 24 км – в западном.

Образцы лесной подстилки и почвы отбирали из разрезов и прикопок на всех ППП по горизонтам O_1 , O_2 , A_1 в районе ПКЗ в течение четырех лет (1989–1992 гг.), а в районах БАЗ (1989 г.) и СУМЗ (1991 г.) – одного года. С каждой ППП отбирали по девять образцов одновременно в пяти повторностях способом «конверта» в каждый месяц вегетационного периода (с апреля по октябрь). Устанавливали полевую влажность образцов почвы.

Определяли активность ферментов: каталазы, целлюлазы (КФ 3.2.1.4) – гидролитического фермента, участвующего в разложении целлюлозы; полифенолоксидазы (КФ 1.10.3) – окислительного фермента, обеспечивающего один из процессов гумусообразования – разложение полифенольных соединений, в больших количествах содержащихся в растительном опаде хвойных; сульфатредуктазы (КФ 1.8.3), субстратом которой служат сульфатионы, попадающие в почву с аэротехногенными выбросами от ПКЗ, БАЗ, СУМЗ.

Исследования активности каталазы (АК) в лесной подстилке и почве сосновых насаждений (СН) в фоновых условиях и в зонах сильного и среднего промышленного загрязнения различными по химической природе поллютантами показали, что на всех ППП АК убывает вниз по профилю почвенного разреза. В подгоризонтах лесной подстилки АК изменяется в широких пределах в течение вегетационного периода, по годам и за весь период в целом как в зонах сильного и среднего загрязнения, так и в фоновых условиях. Суммирование показателей АК в подгоризонтах подстилки и верхнем горизонте почвы позволило более объективно оценить уровень окислительных процессов в почвенном профиле СН, выявить закономерное снижение АК в верхнем горизонте почвы (A_1) по мере приближения к источникам загрязнения на фоне усиливающейся либо значительно сниженной АК по всему почвенному профилю (табл. 1). По этой причине введен

коэффициент отношения АК в верхнем горизонте почвы к общей сумме показателей АК горизонтов почвенного профиля ($O_1 + O_2 + A_1$), который обозначен нами ККП (коэффициент каталазы почвы).

Анализ данных об изменении суммарной активности каталазы в почвенном профиле и показателя ККП в насаждениях, подвергавшихся длительному и хроническому, разной интенсивности воздействию промышленных поллютантов (табл. 1), позволил предложить эти показатели в качестве объективных критериев оценки состояния лесорастительных свойств почв [2]. Нами разработан экспресс-метод мониторинга почв в зонах техногенного

Таблица 1

Исследуемая зона загрязнения (ППП, км)	Характер загрязнения	Суммарная активность каталазы, $\text{см}^3\text{O}_2/\text{г}/\text{2мин}$	ККП, %
ПКЗ:			
ППП 1,0 км	Фтор- и серосодержащие поллютанты	$110,0 \pm 10,47$	$5,8 \pm 0,64$
« 1,5 «		$106,8 \pm 10,42$	$6,6 \pm 0,81$
« 4 «		$91,8 \pm 5,68$	$16,8 \pm 1,38$
« 7 «		$95,8 \pm 6,78$	$20,8 \pm 2,36$
БАЗ:			
ППП 4 км	То же	$63,4 \pm 6,28$	$26,9 \pm 2,51$
« 5 «			
« 6 «			
СУМЗ:			
Граница Европа–Азия, ППП 6 км	Транспортные эмиссии, серосодержащие поллютанты, соли тяжелых металлов	$26,4 \pm 2,14$	$33,7 \pm 3,87$
«Магнитка», ППП 2 км		$23,4 \pm 2,18$	$4,9 \pm 0,31$
Условно контрольные ППП:	Транспортные эмиссии, сульфатосодержащие соединения (незначительно)	$94,7 \pm 9,11$	$20,6 \pm 2,15$
26 км ПКЗ			
11,5 км БАЗ 24 км СУМЗ			

загрязнения. В основу метода положены показатели ККП и суммарной активности каталазы почвенного профиля пробных площадей, которые при нормальном функционировании почвенных экосистем в сосновых насаждениях Свердловской области имеют постоянные значения.

Эти показатели могут быть определены по выведенным нами формулам определения ККП и индекса (I) суммарной активности каталазы почвенного профиля исследуемых пробных площадей. Увеличение или уменьшение постоянных для серых лесных почв значений (принятых за норму) свидетельствуют о нарушении гомеостаза в почвенных экосистемах и могут рассматриваться как их ответная реакция на антропогенное воздействие.

Активность фермента определяют известным газометрическим методом [3, 5, 6], раздельно в образцах подгоризонтов подстилки (O_1, O_2) и почвы (A_1). Затем суммируют показатели активности каталазы почвенного про-

филия исследуемых постоянных пробных площадей (ППП). В качестве контрольных используют сходные по лесорастительным свойствам участки, расположенные вне зоны достоверного загрязнения промышленных и сельскохозяйственных предприятий. Суммарный показатель активности каталазы на контрольной пробной площади принимают за единицу. Индексом суммарной активности почвенного профиля исследуемой пробной площади является соотношение суммарной активности почвенного профиля исследуемой и контрольной пробных площадей. Для оценки состояния почвы используют также дополнительно введенный коэффициент каталазы почвы (ККП), полученный опытным путем на основании многолетних исследований в зонах техногенного загрязнения и влияния животноводческих объектов [4]. Коэффициент каталазной активности (ККП) и индекс суммарной активности каталазы почвенного профиля (I) для исследуемых почв определяют по формулам

$$\text{ККП} = \frac{C \cdot 100}{\sum(a + b + c)},$$

где a, b, c – показатели активности каталазы в подгоризонтах $0_1, 0_2$ и горизонте A_1 , $\text{см}^3\text{O}_2 \text{ }^{1r}/2 \text{ мин}$.

$$I = \frac{\sum(a + b + c)}{\sum(a_k + b_k + c_k)},$$

где a_k, b_k, c_k – показатели активности каталазы на контрольной пробной площади.

При отсутствии стресса $\text{ККП} = 20,6 \%$; $I = 1$.

Используя данный показатель, мы усматриваем в лесных почвах соновых насаждений развитие стресса или общего адаптационного синдрома (согласно теории Г. Селье [8]), специфического по характеру ответных реакций (изменение биологической активности лесной подстилки и почвы) и неспецифического по происхождению (возникающего под действием различных по химической природе поллютантов).

Хотя учение Г. Селье о стрессе и его стадиях касается высших организмов (человек и животные), оно имеет общебиологическое значение, поскольку выявленные им закономерности развития стресса применимы для любого живого организма, а также для биологических систем различного уровня интеграции, а значит, и для почвенных экосистем. Почва, как известно, является биокосным веществом, постоянно присутствующим в ней живые организмы осуществляют сложные биохимические процессы. Следовательно, изучать ее можно только в единстве с биотическим компонентом, т. е. как экосистему, которая заселена различными представителями почвенной биоты, включая микроорганизмы.

В лесной подстилке и почве, как и в любом живом организме, развитие адаптационного синдрома при хроническом действии различных по химической природе поллютантов протекает в несколько стадий, выделенных теорией Г. Селье. В первой стадии в организме происходят ощутимые изменения, свидетельствующие о серьезном нарушении естественных био-

логических процессов при действии стрессора. Во второй стадии для восстановления нормальной функции организма мобилизуются все его защитные резервы и восстанавливаются израсходованные энергетические запасы. Если же действие повреждающего фактора продолжается, то наступает третья стадия, в которой живой организм теряет резистентность, утрачивает адаптацию, в результате чего наступает его истощение и даже гибель.

При изучении интенсивности протекания гидролитических и окислительных реакций и особенностей микробиологических сукцессий в лесной подстилке и почве сосновых насаждений, подвергающихся длительному аэротехногенному загрязнению, нами выделена стадийность в процессе адаптации почвенных экосистем к антропогенному воздействию. По нашим представлениям, выявленные закономерности соответствуют учению об адаптационном синдроме и позволяют обозначить изменения биологической активности почв как экологический стресс почвенных экосистем.

Наиболее информативным способом определения разных стадий стресса является простой экспресс-метод определения показателей ККП и суммарной активности каталазы почвенного профиля. На основании полученных данных можно прогнозировать вероятность восстановления и нормализации лесорастительных свойств почв в зонах техногенного загрязнения.

При сравнении коэффициентов ККП лесных почв под сосновыми насаждениями в районах СУМЗ, БАЗ и ПКЗ проявились различия в степени протекания окислительных процессов (табл. 1). Так, в районе ПКЗ этот показатель на ППП 1,5 км изменялся от 3,6 до 13,0 %, в то время как на условно контрольной ППП 26 км от 12,7 до 31,6 %. В зоне промышленного загрязнения БАЗ колебания ККП на ППП 6 км резко возрастают от 6 до 27 %, на ППП 5 и 4 км от 21,4 до 37,0 %. На ППП 11,5 км коэффициент каталазы почвы составлял 14,5 ... 25,0 % и был примерно таким же, как на условно контрольной ППП в районе ПКЗ. В зоне СУМЗ наблюдалось низкое значение показателя ККП в районе «Магнитки» – 4,9 % (ППП 2 км) и намного превышающее контроль на границе Европа–Азия (33,7 %).

Следовательно, показатель ККП был одинаковым в фоновых условиях загрязнения (на условно контрольных ППП) в районах исследований ПКЗ, СУМЗ и на значительном удалении от источника загрязнения БАЗ (11,5 км). Уровень суммарной активности каталазы был высоким в каждом из почвенных профилей контрольных пробных площадей. В зонах сильного загрязнения показатель ККП либо резко понижался на фоне высокой (ПКЗ, ППП 1,5 км) или значительно сниженной (СУМЗ, ППП 2 км) суммарной активности каталазы по сравнению с условным контролем, либо превышал контрольный уровень при значительно сниженной суммарной активности каталазы (БАЗ, ППП зоны загрязнения; СУМЗ, ППП 6 км). Это являлось отражением возникающего адаптационного синдрома (стресса).

Развитие стресса проявлялось в зоне загрязнения ПКЗ на ППП 1,5 км в резком снижении по сравнению с контролем показателя ККП (более чем в 3 раза) при увеличении на 12,8 % суммарной активности каталазы

в почвенном профиле, т. е. повышении ее в подстилке и уменьшении в почве, что говорит о низком уровне окислительных процессов в почве и высоком в подстилке.

Аналогичное снижение показателя ККП по сравнению с контрольным уровнем в районе СУМЗ (ППП 2 км), напротив, может свидетельствовать о глубоком подавлении окислительных процессов и истощении адаптивных возможностей почвы, поскольку средняя суммарная активность почвенного профиля существенно ниже (в 4 раза) по сравнению с контролем. Превышение контрольного показателя ККП в 1,3 раза в районе БАЗ на фоне уменьшения активности каталазы в почвенном профиле (в 1,5 раза) может свидетельствовать о подавлении окислительных процессов в подстилке при несколько возросшем уровне его в верхнем горизонте почвы. Однако превышение показателя ККП в районе СУМЗ (ППП 6 км) в 1,5 раза по сравнению с контролем при резком снижении суммарной активности каталазы в почвенном профиле (в 3,5 раза) позволяет говорить о глубоком подавлении окислительных процессов в подгоризонтах подстилки. В то же время сохраняется (и даже несколько повышена) активность фермента в верхнем горизонте почвы, что свидетельствует об истощении защитных механизмов в лесной подстилке данной ППП.

Разнонаправленность изменения ККП и суммарной активности каталазы почвенного профиля в зонах промышленного загрязнения характеризуется как глубину стресса, вызванного поллютантами, так и разные стадии развития адаптационного синдрома.

Таким образом, выявленные закономерности позволили предположить о развитии адаптации почвенных экосистем к контаминантам как о стресс-реакции биологической системы или о развитии «общего адаптационного синдрома» почвенной экосистемы.

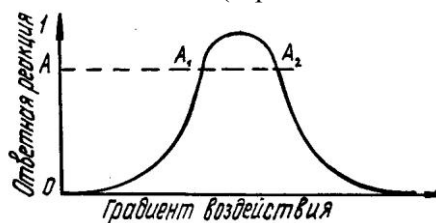
Первой стадии стресса в почвах сосновых насаждений соответствуют изменения ферментативной активности лесной подстилки и почвы в зоне среднего загрязнения фторидами и сульфатсодержащими соединениями. Вторая стадия развивается в зоне сильного загрязнения данными поллютантами, третья обнаружена в зоне критического загрязнения сульфатсодержащими соединениями и солями тяжелых металлов.

Согласно нашим представлениям о развитии экологического стресса снижение ККП по сравнению с контролем на фоне высокой активности каталазы почвенного профиля соответствует второй стадии стресса, т. е. усилению окислительных процессов в лесной подстилке как одному из механизмов адаптации, направленному на восстановление энергетических запасов почвы, израсходованных на ликвидацию нарушений. Вредные поллютанты воздействуют не одновременно на все компоненты лесного биогеоценоза, поэтому каждая стадия адаптационного синдрома развивается постепенно, поэтапно, в несколько фаз.

Нами выделены две фазы в развитии каждой стадии стресса, обусловленные характером почвенного профиля в сосновых насаждениях, под-

вергающихся длительному хроническому воздействию различных по химической природе поллютантов, в том числе отходов животноводства [2, 4].

Экосистема почвы лесного биогеоценоза, вследствие стратификации почвенного профиля на подгоризонты подстилки и горизонты почвы, складывается этими структурными элементами, различными по видовому составу обитающих в них живых организмов, качественным и количественным показателям состояния микробиоценозов в этих структурах, физико-химическим свойствам, биологической активности и др. Поэтому почвенную экосистему лесного биогеоценоза можно представить как интегральную систему, объединяющую множество более мелких: экосистемы подгоризонтов подстилки (O_1, O_2, O_3), горизонтов почвы (A_1, A_2, B). В каждой из них процессы адаптации к различным контаминантам (аэротехногенные поллютанты, различные ксенобиотики, отходы животноводческих хозяйств и т. п.) происходят в соответствии с общими закономерностями по типу кривых Шелфорда (при влиянии любых экологических факторов) и Куражковского – премудрая кривая (при действии антропогенных факторов – см. рисунок).



Лесные подстилки в первую очередь подвергаются воздействию поллютантов, содержание которых там во много раз больше, чем в нижележащих горизонтах почвы (табл. 2). В результате и адаптация к контаминантам в подстилке развивается раньше.

Например, II стадия (усиление окислительных процессов) адаптационного синдрома в подгоризонтах лесной подстилки может быть выявлена, когда в почве (горизонт A_1) окислительные процессы еще подавлены (I стадия), по сравнению с контролем (ПКЗ) – первая фаза II стадии стресса. Ко II же стадии можно отнести такое состояние почвенной экосистемы, когда в верхнем горизонте повышаются окислительные процессы (развивается II стадия), а в лесной подстилке они

График изменения одной переменной при возрастающем действии другой

Таблица 2

Горизонт	Накопление фтора в зоне влияния ПКЗ на расстоянии, км				
	1	1,5	4	7	26
O_1	227	225	85	53	5,2
O_2	877	804	165	155	5,0
A_1	37	29	19	10	1,4

уже снижены (БАЗ), т. е. наблюдается вторая фаза II стадии (см. табл. 1). Дальнейшее снижение уровня суммарной каталазной активности почвенного профиля при повышении показателя ККП по сравнению с контролем свидетельствует о переходе в III стадию стресса (СУМЗ, ППП 6 км). Для первой ее фазы характерно резкое подавление окислительных процессов в лесной подстилке (III стадия) и сохраняющееся усиление их в верхнем го-

ризонте почвы (II стадия). Переход во вторую фазу III стадии синдрома адаптации (истощение) сопровождается резким подавлением окислительных процессов в лесной подстилке и верхнем горизонте почвы (СУМЗ, ППП 2 км). Следовательно, III стадия стресса в почвах исследуемых территорий характеризуется низкими показателями как суммарной активности каталазы в почвенном профиле, так и ККП, что означает истощение защитных механизмов адаптации во всех подуровнях почвенной экосистемы лесного биогеоценоза.

Таким образом, по изменению показателей ККП и суммарной каталазной активности в почвенном профиле сосновых насаждений в зонах сильного промышленного загрязнения были выделены II и III стадии адаптационного синдрома, каждая из которых протекала в двух фазах.

Подтверждением развития разных стадий стресса в почвах в районах с разной степенью промышленного загрязнения является изменение численности микроорганизмов различных трофических групп [1] и активности ферментов целлюлазы, полифенолоксидазы и сульфатредуктазы. Так, согласно данным сотрудников проблемной лаборатории Уральской государственной лесотехнической академии, в условиях сильного промышленного загрязнения ПКЗ, БАЗ, СУМЗ сосновых насаждений при действии различных по химической природе поллютантов выявлен различный характер сукцессий микробоценозов в подгоризонтах лесной подстилки и почве, направленных на поддержание системы в стабильном состоянии.

Данные сукцессии выразались в соотношении псевдомонад, бациллярных форм бактерий и пигментного микрококка в лесных подстилках и почвах районов загрязнений; различиях в численности выделяемых штаммов микроорганизмов; снижении общего содержания микрофлоры по сравнению с почвами контрольных ППП; увеличении численности анаэробных клостридий, предположительно участвующих в детоксикации почвы в зонах загрязнения (СУМЗ).

Активное размножение олигонитрофильных бактерий, при наличии контаминантов в почвах ППП в районах ПКЗ и БАЗ, по нашему мнению, свидетельствует о развитии II стадии адаптационного синдрома, в то время как снижение их численности в районе СУМЗ на ППП 2 и 6 км, а также уменьшение на этих ППП общего содержания микроорганизмов в 32 и в 12 раз указывают на развитие III стадии. Значительное подавление биологической активности в почвенных экосистемах сосновых насаждений в зоне влияния СУМЗ подтверждают наши данные об изменении уровня активности целлюлазы лесной подстилки и почвы. Согласно этим исследованиям, существует тесная корреляционная связь ($r = 0,97$) между общим содержанием микроорганизмов и суммарной активностью фермента целлюлазы в почвенном профиле, особенно заметно выраженная на условно контрольной ППП [2]. Существенно сниженная численность микроорганизмов в верхних горизонтах почв ППП 2 и 6 км в районе СУМЗ в июле 1991 г., по сравнению с таковой в микробоценозах района ПКЗ на ППП 1,0 и 1,5 км, соответствовала значительно более низкой активности целлюлазы в районе СУМЗ. Вы-

деленные нами стадии и фазы развития экологического стресса в почвенных экосистемах сосновых насаждений техногенных зон обусловлены разными уровнями загрязнения почв промышленными поллютантами. Об этом, в частности, можно судить по изменению активности сульфатредуктазы (табл. 3), коррелирующей с концентрацией сульфат-ионов, накапливаемых в почве в середине вегетационного периода.

Нами установлено, что при повышении концентрации сульфат-ионов в определенных интервалах (БАЗ, СУМЗ) активность фермента почв возрастает, и наоборот; в то же время относительно высокие концентрации сульфат-иона подавляют активность фермента. Наибольшая активность фермента выявлена на пробных площадях, где уровень адаптации интегральной экосистемы почвы соответствует II стадии (БАЗ, ПКЗ), тогда как при III его стадии активность фермента подавлена (СУМЗ, ППП 2 км).

Анализ данных изменения биологической активности подстилки и почвы сосновых насаждений района ПКЗ (1989–1992 гг.) на ППП, удаленных от источника загрязнения на 4 и 7 км, позволил убедиться в развитии I стадии стресса (табл. 4). Так, суммарная численность колоний различных физиологических групп микроорганизмов, выросших на специализирован-

Таблица 3

Район исследования	Расстояние от источника загрязнения, км	Направление по розе ветров	Концентрация SO_4 , мг/л	Суммарная активность фермента, мг-экв $SO_4/100$ г	Стадия стресса (фаза)
ПКЗ	1,5	СВ	$8,0 \pm 1,4$	$103,5 \pm 6,41$	II (1)
	26	ЮВ	0	$43,6 \pm 3,24$	Нулевая
БАЗ	5	СВ	$19,8 \pm 2,8$	$68,6 \pm 5,56$	II (2)
	11,5	ЮВ	$4,7 \pm 0,8$	$73,7 \pm 5,63$	Нулевая
СУМЗ	2	СВ	$24,8 \pm 3,7$	$43,1 \pm 3,15$	III (2)
	24	З	$5,3 \pm 0,9$	$95,3 \pm 7,23$	Нулевая

Таблица 4

Расстояние от источника загрязнения, км	Месяц	Горизонт	Содержание основных групп микроорганизмов, тыс./1г абс. сухой почвы					Суммарная активность каталазы, КПП, %	Пределы колебаний за период вегетации
			Мясо-пептонный агар	Эшби-агар (для роста олигонитрофилов)	Крахмало-аммиачный агар	Сусло-агар (для роста микромицетов)	Общее содержание микроорганизмов на ППП/контроль (ППП 26 км)		
4	Май	O ₁	135 ± 12,2	688 ± 71,4	675 ± 64,9	0	1496/1597	90,2	78,0...102,2
		O ₂	2746 ± 284	325 ± 31,4	1964 ± 189	25 ± 2,7	5060/3413		
		A ₁	1401 ± 139	1426 ± 148,4	1240 ± 121	1 ± 0,08	4068/1653		
	Июнь	O ₁	2033 ± 189	3436 ± 384,3	3436 ± 341	49 ± 4,1	8955/3357	13,5	8,7...18,3
		O ₂	101 ± 12,4	4176 ± 398,3	22 ± 1,9	310 ± 29	4609/6111		
		A ₁	183 ± 19,4	2937 ± 311,8	1468 ± 139	48 ± 3,2	4636/4662		
	Август	O ₁	82 ± 10,2	68 ± 5,7	127 ± 11,9	0	277/86	–	–
		O ₂	71,9 ± 7,5	451 ± 47,3	784 ± 79,2	10 ± 1,2	1317/1653		
		A ₁	21 ± 1,2	0	235 ± 21,7	0	267/568		
7	Май	O ₁	525 ± 53,4	333 ± 31,2	10 ± 1,1	2 ± 0,2	871/1597	93,0	85,2...100,8
		O ₂	146 ± 14,9	351 ± 34,8	274 ± 28,1	1 ± 0,1	772/3143		
		A ₁	818 ± 71,9	410 ± 39,9	57 ± 4,8	0,5 ± 0,05	1285/1653		
	Июнь	O ₁	30 ± 2,7	2361 ± 251,4	394 ± 33,9	0,8 ± 0,1	2772/4662	19,5	17,5...21,5
		O ₂	164 ± 14,6	3478 ± 341,2	85 ± 7,9	16 ± 1,4	3740/6110		

Август	A ₁	24 ± 1,8	2971 ± 289,7	168 ± 15,4	9 ± 1,1	2772/4662	-	-
	O ₁	471 ± 39,1	160 ± 14,7	41 ± 4,2	1 ± 0,1	673/86		
	O ₂	1268 ± 134	437 ± 41,3	28 ± 1,9	96 ± 7,7	1829/1653		
	A ₁	41 ± 3,2	355 ± 34,9	6 ± 0,5	0	402/568		

ных плотных питательных средах, в образцах подстилки и почвы ППП 7 км, по сравнению с условно контрольной ППП 26 км, была существенно снижена в подгоризонтах лесной подстилки, особенно в подгоризонте O_2 и верхнем горизонте почвы в весенне-летний период. При этом суммарная активность каталазы в 1991 г. по почвенному профилю существенно не отличалась от контроля, при некотором снижении ККП.

Суммарная каталазная активность почвенного профиля и коэффициент ККП за 4 года исследований на ППП 7 км не отличались от условно контрольной ППП 26 км. Из этого следует, что подавление численности микроорганизмов поллютантами не сопровождалось усилением окислительных процессов в почве. Поэтому выявленные сдвиги в почве ППП 7 км могут быть отнесены, по нашему мнению, к первой фазе I стадии стресса.

В то же время на ППП 4 км суммарное содержание микроорганизмов значительно выше по сравнению с контрольной ППП 26 км, но значительно ниже суммарная активность каталазы и коэффициент ККП за счет небольшого замедления окислительных процессов в подстилке и почве (табл. 4). Усредненные показатели ККП и суммарной активности каталазы почвенного профиля ППП 4 км за четыре года исследований (см. табл. 1) подтверждаются результатами исследований за 1991 г. (табл. 4). Очевидно, данный характер изменений в биологической активности почвенного профиля можно отнести ко второй фазе I стадии стресса, развивающегося в почвенной экосистеме.

Иначе говоря, при I стадии экологического стресса почвенные экосистемы находятся в начальной его стадии и обладают большими адаптационными возможностями для восстановления и стабилизации.

При II стадии стресса почвенные экосистемы находятся в критическом состоянии, обусловленном воздействием поллютантов, но они обладают достаточными адаптационными способностями к восстановлению нормального функционирования нарушенной поллютантами экосистемы.

Таблица 5

Срок проведения исследований	Расстояние от СУМЗ, км	Активность каталазы, $\text{cm}^3\text{O}_2 \cdot 1\text{r} / 2 \text{ мин.}$			
		в подгоризонтах		в горизонте A_1	суммарная
		O_1	O_2		
Середина лета 1991 г.	2	$9,7 \pm 0,87$	$8,3 \pm 0,51$	$2,0 \pm 0,15$	$20,0 \pm 1,53$
	6	$8,6 \pm 0,51$	$8,9 \pm 0,53$	$8,9 \pm 0,68$	$26,4 \pm 1,72$
	24	$26,4 \pm 1,84$	$46,9 \pm 2,74$	$20,7 \pm 1,51$	$94,0 \pm 5,39$
Осень (сентябрь) 1991 г.	2	$15,1 \pm 1,37$	$12,6 \pm 1,17$	$1,2 \pm 0,14$	$28,9 \pm 1,43$
	6	$10,4 \pm 1,25$	$11,0 \pm 1,34$	$9,4 \pm 0,61$	$30,8 \pm 3,21$
	24	$29,5 \pm 2,21$	$47,5 \pm 3,95$	$19,0 \pm 1,04$	$96,0 \pm 7,20$
Середина лета 2001 г.	2	$1,0 \pm 0,08$	$1,4 \pm 0,06$	$0,3 \pm 0,01$	$2,7 \pm 0,15$
	6	$3,8 \pm 0,34$	$1,7 \pm 0,11$	$1,7 \pm 0,18$	$7,2 \pm 0,63$
	24	$32,8 \pm 2,75$	$38,2 \pm 3,34$	$19,5 \pm 1,75$	$90,5 \pm 8,35$

Осень (сентябрь) 2001 г.	2	1,4 ± 0,09	1,6 ± 0,07	0,4 ± 0,03	3,4 ± 0,23
	6	4,0 ± 0,4	4,6 ± 0,36	2,7 ± 0,11	11,3 ± 1,15
	24	31,9 ± 2,63	48,1 ± 3,37	20,5 ± 1,75	100,5 ± 8,35

Таблица 6

Расстояние от ПКЗ, км	Активность каталазы, см ³ O ₂ ^{1г} /2 мин			КПП, %	Стадия (фаза) стресса в почвен- ном профиле
	в горизонте A ₁	в подгори- зонтах 0 ₁ +0 ₂	суммарная		
0,25	1,5 ± 0,22	25,1 ± 2,51	26,5 ± 2,65	5,7	III(2)
0,75	21,0 ± 2,01	31,0 ± 2,99	52,0 ± 4,88	40,0	III(1)
1,0	22,0 ± 1,84	50,0 ± 3,74	72 ± 4,51	30,0	II(2)
1,5	15,1 ± 1,37	105,0 ± 9,17	120 ± 10,2	12,5	II(1)
2,0	14,0 ± 1,25	110,0 ± 10,34	124 ± 12,1	11,3	II(1)
2,5	13,5 ± 1,21	104,5 ± 9,95	118 ± 11,04	11,4	II(1)
4,0	16,0 ± 1,14	70,0 ± 6,31	86,0 ± 8,48	18,6	I(2)
6,5	20,0 ± 1,09	65,0 ± 5,37	85,0 ± 6,37	23,4	I(1)
7,0	20,3 ± 1,88	60,7 ± 5,26	81,0 ± 7,31	24,0	I(1)
13,5	20,5 ± 1,75	80,0 ± 6,34	100,5 ± 8,35	20,5	Нет стресса
14,0	20,8 ± 1,64	81,2 ± 6,54	102,0 ± 9,34	20,4	Нет стресса
26,0	21,0 ± 1,78	81,0 ± 2,14	102 ± 10,04	20,6	Нет стресса

III стадия, особенно вторая фаза ее развития, свидетельствует о глубоких нарушениях и необратимости почвообразовательных процессов, что подтверждается нашими исследованиями на ППП 2 и 6 км в районе СУМЗ, проведенными в 2001 г. (табл. 5).

Исследования, проведенные в зоне загрязнения СУМЗ (ППП 2 и 6 км) позволили обнаружить III стадию стресса почвенных экосистем данной территории, но они были бы неполными, без представления модели развития экологического стресса на примере какого-либо района загрязнения аэротехногенными поллютантами.

Исследования в зоне влияния ПКЗ, проведенные в 2001 г. на тех же ППП и на дополнительных пробных площадях, расположенных вблизи завода, подтвердили закономерность развития экологического стресса в почвенных экосистемах техногенных территорий и могут служить моделью этого процесса (табл. 6).

Анализ данных об изменении биологической активности в почвах сосновых насаждений техногенных территорий промышленных районов Свердловской области с применением обобщающих показателей позволил разработать принципиальную схему развития адаптации к различного рода поллютантам в почвенных экосистемах (табл. 7).

Обнаруженные процессы определяют уровни деградации почв на земной поверхности. Кроме того, биоиндикация состояния почвенных экосистем методом ферментативного анализа в условиях сильного техногенного загрязнения позволяет установить пределы толерантности почвенной биоты к уровню контаминантов в почве, что может служить основанием

для разработки нормативов предельно допустимой нагрузки на почвы техногенных территорий, а также для экологического нормирования.

Предложенный метод экспресс-диагностики лесных почв, позволяющий выявить необходимость рекультивационных мероприятий и не тре-

Таблица 7

Г почвенного профиля	ККП, %	Стадия стресса			Стадия (фаза) стресса в почвенном профиле
		в экосистемах лесных подстилок (подгоризонты O ₁ , O ₂)	в экосистемах почв (горизонт A ₁)	в почвенных микробеценозах	
1,0	20,6 ± 2,15	Нет стресса	Нет стресса	Нет стресса	Нет стресса
0,9	20,8 ± 3,38	I	Нет стресса	I	I(1)
0,9...1,1	16,8 ± 2,98	I	I	II	I(2)
1,1...1,3	8,6 ± 2,81	II	II	II	II(1)
0,6...0,8	26,9 ± 2,51	III	II	III	II(2)
0,2...0,5	33,0 ± 6,87	III	II	III	III(1)
0,2...0,3	4,8 ± 0,48	III	III	Сукцессия*	III(2)

* Увеличение численности анаэробной микрофлоры при резко сниженном содержании (на три и более порядков) всех других физиологических групп микроорганизмов. Фактически это гибель аборигенных и формирование техногенных микробеценозов [1].

бующий больших экономических затрат, может быть применен и в других почвенных условиях РФ для оценки степени деградации лесных почв под влиянием техногенного фактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко Л.А. Дестабилизация микробеценозов при развитии адаптационного синдрома в почвах лесных биогеоценозов Свердловской области, подверженных техногенному загрязнению / Л.А. Коваленко // Сб. докл. конф. «Продовольственная безопасность – 21 век». – Т. 2. – Екатеринбург: УрГСХА, 2000. – С. 212–236.
2. Коваленко Л.А. Суммарная активность каталазы и коэффициент каталазы почвы как показатели стрессового воздействия различных по химической природе поллютантов на почвы сосновых насаждений в зонах загрязнений / Л.А. Коваленко, Л.Г. Бабушкина, Н.М. Шебалова // Биологическая рекультивация нарушенных земель: матер. Междунар. совещ. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – С. 113–124.
3. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.С. Звягинцева. – М.: Изд-во МГУ, 1980. – С. 145–219.
4. Судаков В.Г. Состояние биологической активности почвы в зонах загрязнения отходами свиноводства / В.Г. Судаков, Л.А. Коваленко, Г.А. Сюндюков // Сб. науч. статей фак-та технологии животноводства. – Екатеринбург: УрСХА, 2000. – С. 88–100.
5. Хазиев Ф.Х. Ферментативная активность почв / Ф.Х. Хазиев. – М.: Знание, 1976. – 276 с.
6. Щербакова Т.А. Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества / Т.А. Щербакова. – Мн.: Наука и техника, 1983. – 222 с.
7. Selye H. A syndrome produced by diverse noxious agents // Natur. – London, 1936.
8. Selye H. Perspective in Stress Reseach // J. Biol. a Medicin. – 1959. – N 11.

Уральская государственная
сельскохозяйственная академия
Поступила 07.07.04

L.A. Kovalenko

Assessment of Soil Ecosystem State for Forest Biogeocenoses on Technogenic Territories in Industrial Regions

The influence of pollutants on enzymatic soil activity in industrial pollution zones is analyzed. The use of soil catalase and total enzyme activity for revealing stress stage and phase is substantiated
