

УДК 504.05:504.064(630.182)

**ИНДИКАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАРУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ  
ЭКОСИСТЕМ ТЕХНОГЕННЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ****Михайлова Т.А., Шергина О.В., Калугина О.В.***ФГБУН «Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН», Иркутск,  
e-mail: mikh@sifibr.irk.ru*

Исследовалось состояние лесных экосистем в одном из наиболее развитых промышленных регионов страны – Байкальском. Выявлены индикационные показатели, отражающие системный характер нарушений биогеоценозов и обнаруживающие высокий уровень взаимных корреляций. Показано, что ключевыми процессами в развитии биогеохимических нарушений являются изменения кислотно-щелочного баланса компонентов экосистем, усиление миграции и возрастание аккумуляции поллютантов в почве и ассимиляционных органах древесных растений (основных продуцентов), нарушение соотношений биогенных элементов в почвенном поглощающем комплексе и растительном организме. Выявленные индикационные показатели могут служить основой для разработки диагностической шкалы для оценки состояния лесов, нарушенных техногенным загрязнением.

**Ключевые слова:** лесные экосистемы, техногенное загрязнение, индикационные показатели системных нарушений

**INDICATED INDICES OF FOREST DISTURBANCE UNDER TECHNOGENIC  
POLLUTION****Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V.***Siberian Institute of Plant Physiology & Biochemistry, Irkutsk, e-mail: mikh@sifibr.irk.ru*

Forest ecosystems state has been studied in the one of large industrial regions of the country, Baikal region. Indices with high level of mutual correlations pointed to systemic character of biogeocenosis disturbance were detected. It was shown that the key processes in the biogeochemical disturbance were changes in acid-alkaline balance in ecosystem components, increase of migration and accumulation of pollutants in soil and assimilation organs arboreal plants (main producers), alteration in proportions biogenic elements in soil solution and plant assimilating phytomass. Indicated indices detected can use as a basis for elaboration a diagnostic scale for assessment of state forests disturbed by technogenic pollution.

**Keywords:** forest ecosystems, technogenic pollution, systemic disturbance indices

В современный период одним из существенных факторов дестабилизации состояния лесных экосистем является техногенная нагрузка [3; 4]. Этот фактор имеет особую значимость для Байкальского региона, поскольку лесам этой территории принадлежит ведущая роль в поддержании устойчивости всего регионального природного комплекса, включающего оз. Байкал. В то же время, уровень промышленного загрязнения воздушного бассейна здесь довольно высок вследствие сосредоточения крупных центров теплоэнергетики, цветной металлургии, топливной, химической и нефтехимической промышленности. В 2012-2013 гг. объем атмосферных выбросов загрязняющих веществ предприятиями региона составил более 800 тыс. т, при этом выраженной тенденции к его снижению не наблюдается [1]. Более того, в будущем высока вероятность усиления техногенного загрязнения, поскольку Байкальский регион перспективен для дальнейшего хозяйственного освоения. Возрастающий пресс техногенеза может значительно снизить средообразующий и продукционный потенциал лесов, и в такой ситуации актуальны исследования, позволяющие с наибольшей достоверностью

диагностировать изменение состояния этого важнейшего компонента биосферы.

С точки зрения биогеохимических процессов техногенное загрязнение – это нерегулируемый привнос с выбросами вещества, в том числе, элементов-поллютантов. Их поступление в лесную экосистему негативно сказывается на ее функционировании через нарушение миграции биогенных элементов в фито- и педоценозе, их усвоения растительными организмами, перераспределения в горизонтах почвенного профиля. В конечном итоге экосистемный дисбаланс элементов-биогенов может вызвать существенное ухудшение питательного статуса лесов, приводящее к их структурно-функциональной трансформации вплоть до распада биогеоценозов.

Цель данной работы – исследовать биогеохимические изменения в техногенно загрязняемых лесных экосистемах Байкальского региона и выявить индикационные показатели, отражающие системный характер их нарушений.

**Материалы и методы исследования**

Обследование лесных экосистем проводилось на фоновых и техногенно загрязняемых террито-

риях Байкальского региона<sup>1</sup> на пробных площадях, которые закладывались с учетом географического расположения источников загрязнения, регионального ветрового режима, специфики локальной циркуляции воздушных масс, особенностей рельефа и гидросети. В частности, исследовались лесные экосистемы, загрязняемые Иркутским, Шелеховским, Ангарско-Усольским промышленными центрами. Фоновые территории находились на расстоянии 100-250 км от промышленных центров и не попадали под основной перенос выбросов. Пробные площади (ПП) закладывались согласно принятым методикам [5] в преобладающих в регионе подтаежных лесах, в которых доминируют сосняки разнотравные и осоково-разнотравные преимущественно III класса бонитета. Всего было заложено 62 ПП, на каждой из которых проводился отбор растительных и почвенных образцов для последующего их анализа на содержание биогенных элементов и элементов-поллютантов (азота, фосфора, калия, магния, кальция, натрия, серы, фтора, хлора, алюминия, железа, марганца, цинка, меди, свинца, кадмия, ртути, мышьяка, никеля, лития, селена, бора, ванадия, бария, молибдена, хрома, стронция, тория, урана), а также определения показателей кислотно-основного баланса. Кроме того, на ПП проводили геоботанические описания, определяли таксационные характеристики, уровень дефолиации крон деревьев, морфоструктурные параметры древостоев. Элементный химический состав в растительных и почвенных образцах определяли с использованием приборного парка Байкальского аналитического центра (ЦКП) ИИЦ СО РАН по сертифицированным методикам, аналитические работы проведены к.х.н. О.А. Проидаковой, к.б.н. Л.В. Афанасьевой, М.С. Поляковой, Е.Н. Тараненко. Для статистической обработки полученных данных использовали компьютерные программы «Среда статистических вычислений R, MapInfo».

### Результаты исследования и их обсуждение

Из полученного большого комплекса данных с использованием корреляционного анализа вычленили наиболее информативные показатели, характеризующие

состояние лесной экосистемы. Основным критерием при их выявлении служило наличие высокого уровня взаимных корреляций (вычислялись коэффициенты корреляции Пирсона) и выявление регрессионной зависимости между ними. Наиболее тесно коррелирующими оказались показатели, отражающие кислотно-щелочной баланс в компонентах экосистем, усиление миграции и возрастание аккумуляции поллютантов в почве и ассимиляционных органах древесных растений (основных продуцентов), нарушение соотношений биогенных элементов в почвенном поглощающем комплексе и растительном организме.

При исследовании кислотно-щелочного баланса в компонентах техногенно загрязняемых лесных экосистем обнаружено, что в большинстве случаев наблюдается его выраженный сдвиг в сторону щелочных значений в органической подстилке, горизонтах почвенного профиля, корневой биомассе, травяном покрове; в ассимиляционных органах древесных растений этот тренд не такой резкий даже при сильном загрязнении (рис. 1). Вместе с тем, коэффициенты корреляции между показателями кислотно-щелочного баланса в почвенных горизонтах и хвое (листьях) древесных растений высоки и составляют 0,85 – 0,98.

Изменение кислотно-щелочного баланса приводит к усилению миграции и аккумуляции поллютантов в почвенных горизонтах. Параллельно выявляется повышение содержания элементов-загрязнителей в тканях древесных растений (хвоя, листьях). Подобные корреляции ( $r$  на уровне 0,75 – 0,92) обнаружены для серы, фтора, тяжелых металлов. Так, на примере свинца показано, что наибольший его уровень в ассимиляционных органах деревьев наблюдается при наиболее высоком его содержании в почвенных горизонтах (рис. 2, 3).

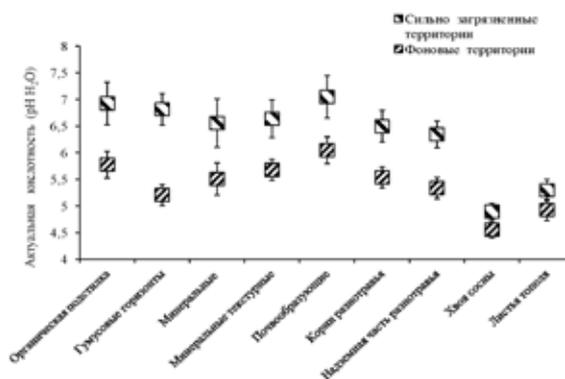


Рис. 1. Изменение фактической кислотности компонентов лесных экосистем на фоновых и загрязненных территориях

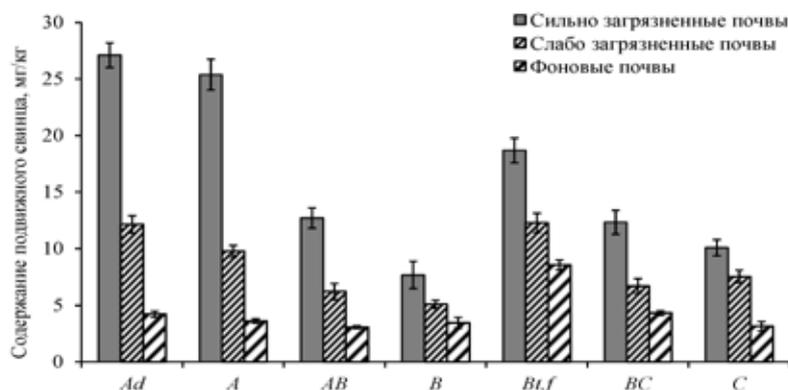


Рис. 2. Содержание подвижных форм свинца в генетических горизонтах техногенно загрязненных и фоновых почв

На фоновых территориях теснота связей между содержанием тяжелых металлов в почве и их концентрацией в хвое деревьев невысока, а для свинца и кадмия корреляции не значимы. Это свидетельствует о хорошей буферной способности фоновых почв по отношению к тяжелым металлам, препятствующей избыточному их проникновению в ассимиляционные органы растений.

Аккумуляция элементов-поллютантов вызывает резкое нарушение соотношений биогенных элементов в ассимиляционных органах древесных растений, этот процесс усиливается при параллельно наблюдаемом изменении их количественного состава

в почвенном поглощающем комплексе (ППК) [7]. Так, для всех генетических горизонтов загрязненных почв выявлены прямые корреляционные связи между содержанием обменных форм кальция и ионами элементов-поллютантов (серы, свинца) (рис. 4). Это свидетельствует о связывании обменного кальция ионами этих элементов, следовательно о снижении их доступности для корневого поглощения растениями [6]. Подобные корреляции выявляются также для магния, калия, натрия (табл. 1). В ассимиляционных органах древесных растений возрастание доли серы и особенно свинца вызывает сильное уменьшение долей калия, магния, фосфора, марганца (табл. 2).

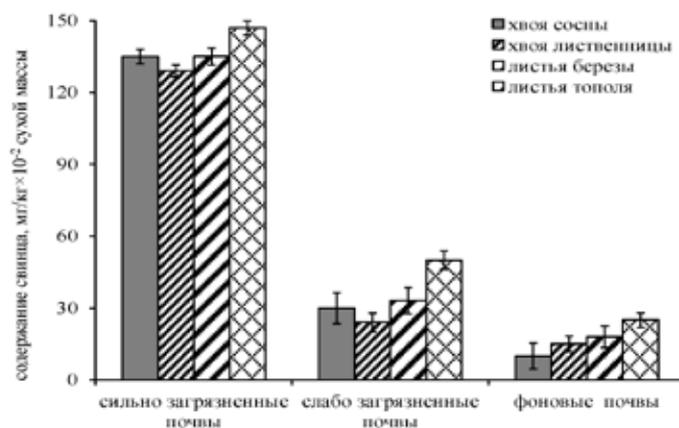


Рис. 3. Содержание свинца в ассимиляционных органах древесных растений, произрастающих на загрязненных почвах

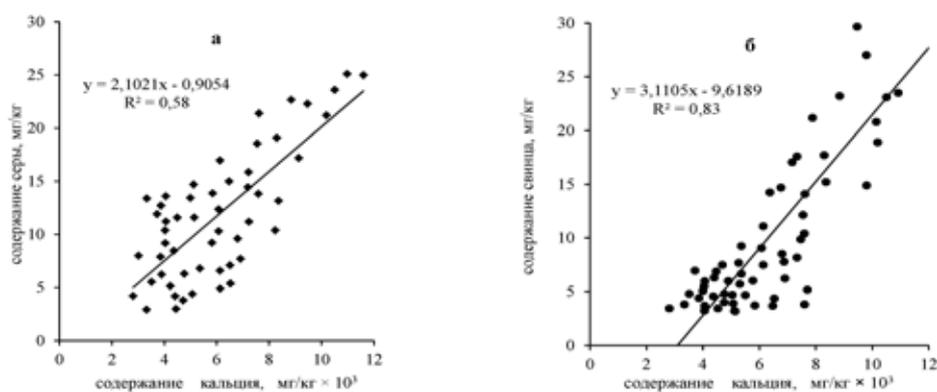


Рис. 4. Зависимости между содержанием подвижных форм серы (а), свинца (б) и обменных форм кальция в горизонтах сильно загрязненных почв

Биогеохимические нарушения в лесных экосистемах в конечном итоге приводят к изменению питательного статуса основных продуцентов (древесных растений) и уменьшению их морфоструктурных параметров и в целом ростовых характеристик [2; 8]. Так, установлены тесные связи меж-

ду снижением уровня основных биогенных элементов (азота, фосфора, калия, магния, кальция) и уменьшением массы и длины побегов, продолжительности жизни хвои, количества зеленой хвои в кронах (коэффициенты корреляции составляют от 0,64 до 0,82).

Таблица 1

Значимые коэффициенты корреляции между содержанием подвижной серы и катионов ППК в генетических горизонтах загрязненных и фоновых почв (P=0,05, n=62)

Почвенные горизонты	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Почвы загрязненных территорий			
Органические	0,65	0,82	0,72
Органо-аккумулятивные	0,75	0,92	0,81
Текстурные	0,64	0,80	0,78
Почвообразующие	0,58	0,62	0,58
Почвы фоновых территорий			
Органические	0,52	0,50	0,68
Органо-аккумулятивные	0,58	0,46	0,59
Текстурные	0,40	0,39	0,65
Почвообразующие	0,37	0,38	0,52

Таблица 2

Изменение соотношений\* элементов в хвое и листьях деревьев на загрязненных и фоновых территориях

Соотношение элементов	Сосна			Береза		
	Сильно загрязненные почвы	Слабо загрязненные почвы	Фоновые почвы	Сильно загрязненные почвы	Слабо загрязненные почвы	Фоновые почвы
[P]:[Pb]	69:31	82:18	96:4	74:26	89:11	92:8
[Mg]:[Pb]	64:36	80:20	91:9	78:22	85:15	96:4
[K]:[Pb]	52:48	79:21	93:7	69:31	84:16	92:8
[Mn]:[Pb]	55:45	70:30	94:6	71:29	82:18	97:3
[P]:[S]	84:16	86:14	90:10	85:15	86:14	89:11
[Mg]:[S]	89:11	94:6	96:4	88:12	95:5	96:4
[K]:[S]	76:24	81:19	88:12	77:23	82:18	87:13
[Mn]:[S]	65:35	84:16	89:11	82:18	92:8	94:6

\*Соотношения вычислялись как процентная доля каждого элемента от суммы концентраций двух элементов в сухом веществе хвои.

Следует отметить, что в загрязняемых лесных экосистемах сильным фактором-синергистом техногенеза является высокий уровень рекреационной нагрузки, что часто наблюдается на урбанизированных территориях. В этом случае большую информативность приобретают физико-механические показатели верхних горизонтов почв.

С одной стороны, происходит выраженное их изменение, а с другой – выявляются высокие корреляции между ними и параметрами древесных растений (табл. 3). Это дает основание рассматривать физико-механические показатели почв также как индикационные в условиях высокой рекреационной нагрузки.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между морфоструктурными параметрами крон деревьев лиственницы и физико-механическими показателями верхних горизонтов почв при загрязнении и высокой рекреационной нагрузке ( $P=0,05$ ,  $n=20$ )

Параметры крон деревьев	Физико-механические показатели почв				
	Нарушение структуры	Влажность	Пористость	Аэрация	Плотность
Уровень дефолиации	0,78	-0,72	-0,77	-0,88	0,75
Масса хвои одного побега	-0,63	0,64	0,72	0,75	-0,76
Количество брахибластов на побеге	-0,64	0,61	0,57	0,60	-0,68
Длина побегов	-0,53	0,54	0,60	0,64	-0,67
Длина хвои	-0,68	0,78	0,77	0,76	-0,70

### Заключение

При исследовании биогеохимических изменений в техногенно загрязняемых лесных экосистемах Байкальского региона выявлены индикационные показатели, характеризующиеся высоким уровнем взаимных корреляций и взаимообусловленным изменением в фито- и педоценозе. Наиболее тесно коррелирующими оказались показатели, отражающие кислотно-щелочной баланс в компонентах экосистем, усиление миграции и возрастание аккумуляции поллютантов в почве и ассимиляционных органах древесных растений (основных продуцентов), нарушение соотношений биогенных элементов в почвенном поглощающем комплексе и растительном организме. Комплекс эти показателей отражает системный характер нарушений техногенно загрязняемых лесных экосистем. В условиях высокого уровня рекреационной нагрузки (как фактора-синергиста техногенеза) большую информативность приобретают физико-механические показатели верхних горизонтов почв, обнаруживающие высокие корреляции с морфоструктурными параметрами древесных растений. Выявленные индикационные показатели могут служить основой для оценки питательного статуса лесов и разработки диагностической шкалы состояния лесных экосистем, нарушенных техногенным загрязнением.

*Исследования выполнялись при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-44-04067).*

### Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области за 2012 год». – Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2013. – 337с.
2. Михайлова Т.А., Шергина О.В. Питательный статус древесных растений как интегральный показатель состояния урбоэкосистемы // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». – 2011. – Т. 4, № 2. – С. 66-73.
3. Цветков В.Ф., Цветков И.В. Промышленное загрязнение окружающей среды и лес. – Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. – 311 с.
4. Air Pollution, Global Change and Forests in the New Millennium [By D.F. Karnosky et al.]. USA: Elsevier Science, 2003. – 492 p.
5. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests / UNECE, ICP Forests Programme Coordinating Centre. [Hamburg], 2010. URL: <http://www.icp-forests.org/Manual.htm> (дата обращения 15.12.2014).
6. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Berezhnaya N.S. Biogeochemical Redistribution of Industry-Caused Sulphur in an Urban Ecosystem // Chemistry for Sustainable Development. – 2007. – V. 15, № 3. – P. 351-358.
7. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V. Accumulation and migration of elements-pollutants in «soil-plant» system within urban territory // Natural Science. – 2013. – V. 5, № 6. – P. 705-709.
8. Trowbridge P., Bassuk N. Trees in the urban landscape: site assessment, design and installation. – New York, 2004. – 207 p.