

Фитомониторинг атмосферного загрязнения в Байкальском регионе

Т. А. МИХАЙЛОВА, О. В. КАЛУГИНА, О. В. ШЕРГИНА

*Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132
E-mail: mikh@sifibr.irk.ru*

АННОТАЦИЯ

Фитомониторинг атмосферного загрязнения проводили с использованием сосны обыкновенной в качестве высокочувствительного биоиндикатора. Образцы хвои отбирали на реперных участках по макротрансекте Саянск – Иркутск – Листвянка (общей протяженностью 320 км), охватывающей основные промышленные центры Байкальского региона и простирающейся до побережья оз. Байкал. В хвое определяли содержание неорганических поллютантов (серы, фторидов, тяжелых металлов и др.). Наибольший уровень атмосферного загрязнения зафиксирован на территориях Ангарского, Иркутского, Усольского, Шелеховского промцентров, меньшая степень загрязнения наблюдается в пределах Саянского и Черемховского промцентров. Полученные данные свидетельствуют, что большинство поллютантов достигает побережья оз. Байкал.

Ключевые слова: Байкальский регион, фитомониторинг, сосна обыкновенная, неорганические поллютанты.

Для Байкальского региона, характеризующегося мощным экономическим потенциалом, мониторинг атмосферного загрязнения имеет большую значимость. Здесь располагается более десяти крупных промышленных центров, ежегодный объем аэровыбросов от которых составляет около 600 тыс. т загрязняющих веществ [1]. Промышленное загрязнение воздушного бассейна в регионе рассматривается как особая угроза экосистеме оз. Байкал. Поэтому в законе РФ “Об охране озера Байкал” (1999 г.) особо выделена “зона атмосферного влияния”. Это территория шириной до 200 км на запад и северо-запад от озера, с которой возможен перенос выбросов промышленных предприятий, оказывающих негативное воздействие на экосистему озера [2].

В “зоне атмосферного влияния” сосредоточены наиболее мощные индустриальные центры Байкальского региона, расположен-

ные в пределах промышленных зон городов Иркутск, Шелехов, Ангарск, Усолье-Сибирское, Черемхово, Саянск и формирующие единый Иркутско-Саянский территориально-промышленный комплекс. Воздействие выбросов этих промцентров к началу 1990-х гг. привело к значительному перекрытию эмиссионных потоков и появлению обширной экологически неблагополучной территории с высоким уровнем загрязнения [3]. Процесс формирования негативной экологической обстановки в этом районе обусловлен также специфическими условиями климата и рельефа, способствующими наложению ингредиентов загрязнения атмосферного воздуха городов друг на друга [4]. Территориально Иркутско-Саянский промышленный комплекс входит в “зону атмосферного влияния” и далее простирается за ее пределы еще на 120 км на северо-запад.

Результаты анализа современных методов мониторинга техногенного загрязнения крупных регионов свидетельствуют в пользу применения для этих целей биологических индикаторов. В частности, при этом решается проблема отбора репрезентативного количества образцов, появляется возможность определения территориального распространения загрязненных воздушных масс, одновременно оценивается негативный эффект загрязнения для биоты [3, 5]. Вместе с тем выбор биоиндикатора – непростая задача, и для ее решения разработана целая система критериев, основным из которых является высокая чувствительность организма к воздействию техногенных поллютантов [6]. Поэтому в качестве биоиндикаторов предпочтительнее растительные организмы (продуценты), поскольку они обладают высокочувствительным фотосинтетическим аппаратом, которого нет у консументов и редуцентов [7].

Исходя из многолетних исследований состояния лесных экосистем Байкальского региона, в качестве биоиндикатора выбрана сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). По-

казано, что эта порода, помимо широкого распространения и важных лесобразующих функций, обладает высокой чувствительностью к техногенным поллютантам [8]. Установлена высокая степень корреляции между уровнем загрязнения атмосферного воздуха диоксидом серы, фтористым водородом, аэрозолями тяжелых металлов и аккумуляцией в хвое сосны соответствующих элементов – серы, фтора, свинца, ртути и др. [9, 10].

Цель данной работы – на основе применения выбранного биоиндикатора (сосны обыкновенной) оценить уровень загрязнения атмосферного воздуха и дальность распространения загрязненных воздушных масс по макротрансекте Саянск – Иркутск – Листвянка, охватывающей крупные промышленные центры Байкальского региона и простирающейся до побережья оз. Байкал.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Натурные исследования проводились в 2010–2011 гг. на реперных участках макротрансекты (рис. 1), общая протяженность

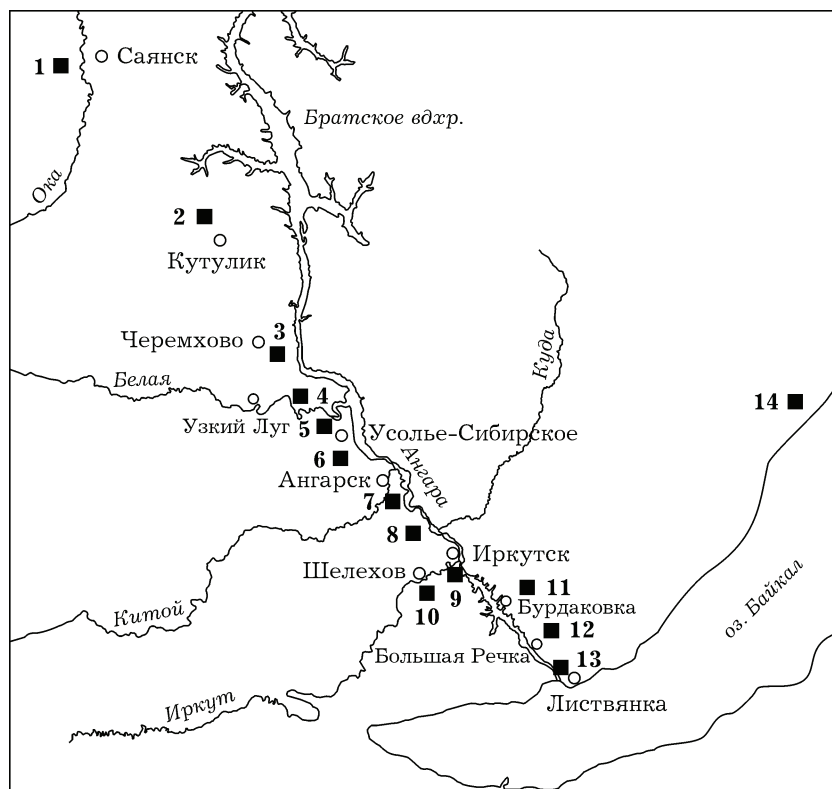


Рис. 1. Карта-схема расположения реперных участков по макротрансекте Саянск – Иркутск – Листвянка: темные квадраты – реперные участки

которой составила более 320 км. Реперные участки выбраны с учетом географического расположения источников загрязнения, регионального ветрового режима и специфики локальной циркуляции воздушных масс, особенностей рельефа и гидросети. На каждом реперном участке проводился отбор образцов хвои сосны для последующего анализа на содержание загрязняющих веществ. Поскольку спектр поступающих с выбросами поллютантов очень широк, проводить мониторинг загрязнения атмосферного воздуха по каждому из них не представляется возможным как по техническим, так и по финансовым причинам. Исходя из этого выбраны главные поллютанты-маркеры, адекватно отражающие масштаб загрязнения, его специфику и территориальный охват.

В районе работ преобладают подтаежные леса, в которых доминируют сосняки разнотравные и разнотравно-брусничные преимущественно III класса бонитета. Детальное обследование древостоев осуществлялось в соответствии с ОСТ [11]. На каждом реперном участке выбирали по 5–6 деревьев сосны 40-летнего возраста для отбора образцов хвои и определения ряда других параметров. В лабораторных условиях в хвое второго года жизни определяли содержание элементов: серы, фтора, алюминия, мышьяка, тяжелых металлов (свинца, кадмия, ртути, никеля, лития, бария, цинка, железа, ванадия, вольфрама, молибдена). Фоновые (контрольные) образцы хвои сосны отбирали на расстоянии 100–250 км от промцентров по направлениям, не подпадающим под основной перенос выбросов.

Элементный химический состав в растительных образцах определяли общепринятыми методами атомно-абсорбционной спектрофотометрии, пламенной фотометрии, фотокolorиметрирования [12, 13]. Чтобы проследить проявление токсического эффекта техногенных эмиссий для живых организмов, параллельно на каждом реперном участке по комплексу параметров оценивалась степень угнетения деревьев сосны [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показали превышение содержания серы в хвое на всех об-

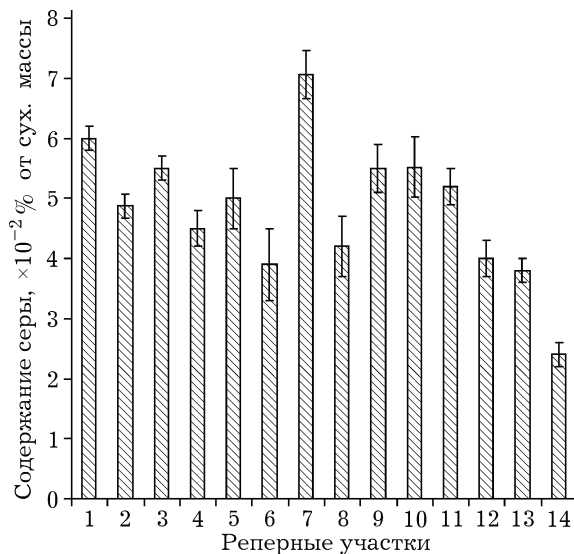


Рис. 2. Содержание серы в хвое сосны обыкновенной на реперных участках макротрансекты Саянск – Иркутск – Листвянка: 1 – г. Саянск, 2 – пос. Кутулик, 3 – г. Черемхово, 4 – пос. Узкий Луг, 5 – г. Усолье-Сибирское, 6 – пос. Ясачная, 7 – г. Ангарск, 8 – пос. Мегет, 9 – г. Иркутск, 10 – г. Шелехов, 11 – пос. Бурдаковка, 12 – пос. Большая Речка, 13 – пос. Листвянка, 14 – фоновые территории

следованных реперных участках от Саянска до побережья оз. Байкал. По-видимому, это объясняется широким распространением диоксида серы, поскольку этот поллютант присутствует в атмосферных выбросах практически всех промышленных предприятий, а также поступает от локальных источников. В наибольшей степени серосодержащими выбросами загрязнена территория вблизи Ангарского промцентра, высокий уровень регистрируется также в окрестностях Саянского, Черемховского, Иркутского, Шелеховского промцентров (рис. 2).

При анализе данных о накоплении фтора в хвое сосны обнаружено, что оно максимально на территории, прилегающей к алюминиевому заводу (Шелеховский промцентр) – наиболее мощному источнику фторсодержащих выбросов. Вместе с тем загрязнение фторидами не концентрируется только вблизи этого промцентра: показано, что перенос эмиссий от алюминиевого завода осуществляется на расстояние от 15 до 60 км по разным направлениям (рис. 3). Кроме того, обнаружено, что фториды выбра-

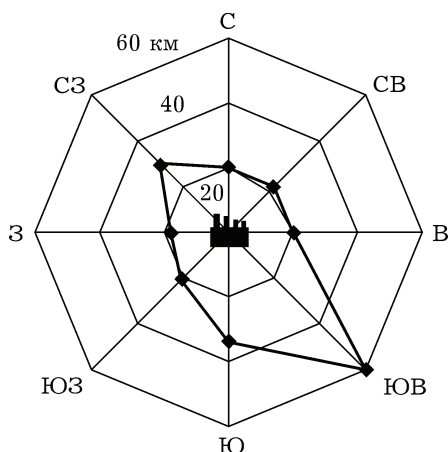


Рис. 3. Распространение фторсодержащих эмиссий по разным румбам от Шелеховского промцентра

сываются еще целым рядом предприятий (химическими комбинатами, ТЭЦ и др.), хотя и в гораздо меньших объемах, чем алюминиевыми заводами. Например, повышенный в 2–3 раза уровень фтора регистрируется в хвое сосны вблизи Иркутского, Ангарского, Усольского и Черемховского промцентров.

При исследовании распространения аэрозолей тяжелых металлов по макротрансекте выявлены участки с высокой их концентрацией, а также мало загрязненные тяжелыми металлами территории. Так, результаты определения содержания ртути в хвое сосны свидетельствуют, что сильное загрязнение этим токсикантом концентрируется вблизи крупных химических предприятий (Саянский и Усольский промцентры), несколько повышенное – на территориях других промцентров. На побережье Байкала загрязнения не выявлено (рис. 4). Обнаружено, что загрязнение свинцом охватывает практически всю территорию исследуемых городов (Иркутска, Шелехова, Ангарска и других), а не только участки, прилегающие к автомагистралям. Это особенно показательно для г. Иркутска, где выбросы автотранспорта составляют до 60 % от всего объема загрязняющих веществ (рис. 5). При определении концентраций других тяжелых металлов и алюминия также обнаружено повышенное их содержание в хвое сосны по макротрансекте, вплоть до

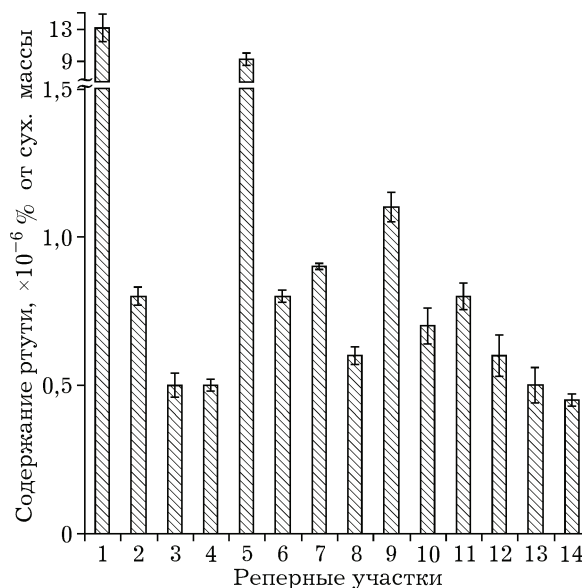


Рис. 4. Содержание ртути в хвое сосны на реперных участках: 1 – г. Саянск, 2 – пос. Кутулик, 3 – г. Черемхово, 4 – пос. Узкий Луг, 5 – г. Усолье-Сибирское, 6 – пос. Ясачная, 7 – г. Ангарск, 8 – пос. Мегет, 9 – г. Иркутск, 10 – г. Шелехов, 11 – пос. Бурдаковка, 12 – пос. Большая Речка, 13 – пос. Листвянка; 14 – фоновые территории

побережья оз. Байкал (табл. 1). Наиболее высокие значения большинства элементов обнаруживаются на территориях Иркутского и Ангарского промцентров. Так, концентрация вольфрама превышает фоновый уровень более чем в 30 раз, лития – до 16 раз, нике-

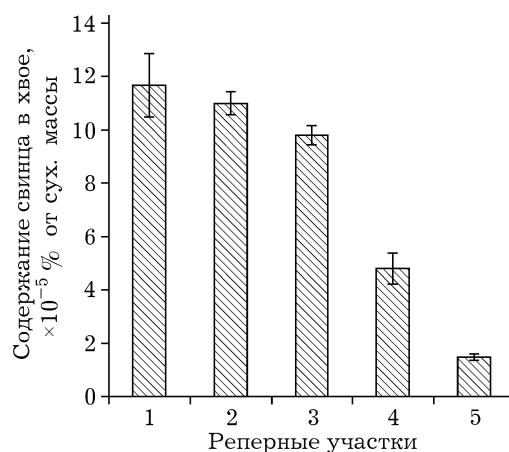


Рис. 5. Содержание свинца в хвое сосны на территории г. Иркутска: 1 – центр города, 2 – северо-западная часть города, 3 – восточная часть города, 4 – городские окраины; 5 – фоновые территории

Накопление микроэлементов в хвое сосны обыкновенной на реперных участках макротрансекты Саянск – Иркутск – Листвянка, % от сухой массы

Реперный участок	Al · 10 ⁻²	Fe · 10 ⁻²	Zn · 10 ⁻³	Ba · 10 ⁻⁴	Ni · 10 ⁻⁴	Li · 10 ⁻⁴	V · 10 ⁻⁵	Mo · 10 ⁻⁶	W · 10 ⁻⁶	Cd · 10 ⁻⁶
г. Саянск	2,6 ± 0,1	2,2 ± 0,1	4,2 ± 1,0	4,9 ± 0,7	15,7 ± 3,8	6,9 ± 0,4	2,9 ± 0,1	14,9 ± 0,4	1,8 ± 0,2	2,1 ± 0,1
пос. Кутулик	2,1 ± 0,5	1,4 ± 0,1	4,0 ± 0,4	4,3 ± 0,4	2,7 ± 0,2	3,0 ± 0,2	2,1 ± 0,2	6,9 ± 0,9	1,5 ± 0,1	2,2 ± 0,1
г. Черемхово	4,4 ± 0,1	4,2 ± 0,1	4,0 ± 0,1	7,9 ± 0,7	5,4 ± 0,4	17,7 ± 2,8	9,3 ± 0,1	11,0 ± 0,7	2,3 ± 0,3	2,4 ± 0,1
пос. Узкий Луг	2,9 ± 0,5	2,9 ± 0,5	4,4 ± 0,1	5,2 ± 1,0	3,6 ± 0,4	3,2 ± 0,2	5,7 ± 0,1	12,2 ± 0,6	1,1 ± 0,1	1,7 ± 0,2
г. Усолье-Сибирское	2,1 ± 0,4	3,2 ± 0,1	5,2 ± 1,1	14,3 ± 0,9	4,8 ± 1,2	8,2 ± 0,9	7,4 ± 0,1	34,8 ± 2,8	5,0 ± 1,0	4,9 ± 0,3
пос. Ясачная	1,4 ± 0,2	2,0 ± 0,1	5,9 ± 0,6	2,4 ± 0,4	2,0 ± 0,6	1,8 ± 0,6	3,7 ± 0,1	13,9 ± 0,7	1,5 ± 0,1	0,9 ± 0,1
г. Ангарск	2,4 ± 0,4	3,5 ± 0,1	4,7 ± 0,1	4,9 ± 0,4	17,6 ± 3,4	5,8 ± 0,9	6,8 ± 0,1	45,8 ± 2,3	12,6 ± 1,0	1,8 ± 0,3
пос. Мегет	3,6 ± 0,7	2,4 ± 0,2	3,3 ± 0,1	5,2 ± 0,2	1,7 ± 0,2	4,1 ± 0,3	7,0 ± 0,2	30,9 ± 0,1	7,1 ± 0,3	3,1 ± 0,1
г. Иркутск	4,2 ± 0,5	5,6 ± 0,4	4,6 ± 0,2	7,7 ± 0,6	2,6 ± 0,6	6,7 ± 0,4	14,1 ± 2,0	37,2 ± 6,0	8,9 ± 0,8	4,5 ± 0,3
г. Шелехов	3,0 ± 0,5	1,9 ± 0,1	4,4 ± 0,3	8,7 ± 1,3	4,1 ± 0,8	11,4 ± 1,4	4,8 ± 0,1	10,3 ± 1,8	1,1 ± 0,1	4,7 ± 0,3
пос. Бурдаковка	5,0 ± 0,4	2,3 ± 0,1	4,3 ± 0,5	8,4 ± 1,8	8,9 ± 1,1	13,7 ± 0,6	4,8 ± 0,1	7,3 ± 1,1	1,1 ± 0,2	5,6 ± 0,3
пос. Большая Речка	2,6 ± 0,4	1,1 ± 0,1	3,8 ± 0,3	6,4 ± 0,6	3,2 ± 0,7	3,4 ± 0,7	2,0 ± 0,3	8,0 ± 0,3	1,0 ± 0,1	3,8 ± 1,0
пос. Листвянка	2,2 ± 0,1	1,5 ± 0,1	3,1 ± 0,1	3,9 ± 0,9	2,9 ± 0,1	6,6 ± 0,3	2,7 ± 0,1	6,7 ± 0,8	0,6 ± 0,1	3,0 ± 0,8
Фоновые территории	1,2 ± 0,1	0,8 ± 0,1	2,4 ± 0,3	2,1 ± 0,1	1,3 ± 0,3	1,1 ± 0,4	1,8 ± 0,1	4,2 ± 0,4	0,4 ± 0,1	1,5 ± 0,3

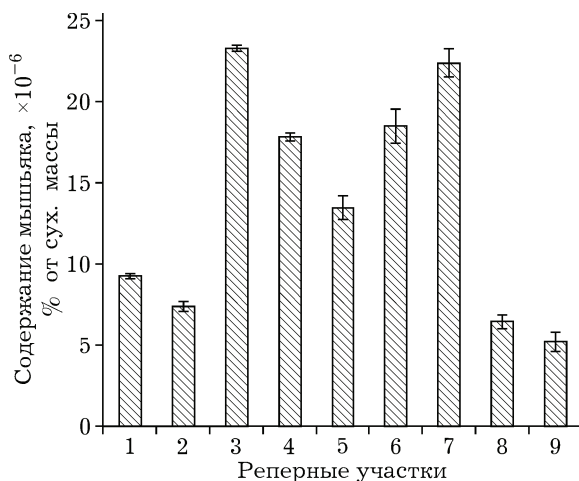


Рис. 6. Содержание мышьяка в хвое сосны на реперных участках макротрансекты Саянск – Иркутск – Листвянка: 1 – г. Саянск, 2 – пос. Кутулик, 3 – г. Черемхово, 4 – пос. Узкий Луг, 5 – г. Усолье-Сибирское, 6 – пос. Ясачная, 7 – г. Ангарск, 8 – пос. Мегет, 9 – г. Иркутск

ля – до 14 раз, молибдена – до 9 раз, ванадия – до 8 раз, железа и бария – до 7 раз, алюминия и кадмия – до 4 раз, цинка – до 3 раз. В пробах хвои сосны довольно высокой оказалась и концентрация мышьяка (рис. 6).

Воздействие промышленных эмиссий привело к нарушению жизненного состояния сосновых древостоев практически на всех реперных участках исследуемой макротрансекты. Об этом свидетельствуют изменения ряда репрезентативных показателей ассимилирующей фитомассы древостоев (табл. 2). На их основе рассчитывался обобщенный индекс состояния ассимилирующей фитомассы сосны на каждом реперном участке. Индекс выражается в единицах, нормированных относительно фоновых значений, принятых за 10 баллов, метод расчета изложен в [14].

Показано, что низкий индекс состояния ассимилирующей фитомассы деревьев выявляется практически по всей макротрансекте, на побережье оз. Байкал (пос. Листвянка) он также ниже фонового. Таким образом, негативное воздействие поллютантов на биоту проявляется не только вблизи промцентров, но и на удаленных территориях, находящихся в пределах досягаемости техногенных эмиссий.

Показатели состояния ассимилирующей фитомассы деревьев сосны на реперных участках макротрансекты Саянск – Иркутск – Листвянка

Реперный участок	Репрезентативный показатель				Индекс состояния ассимилирующей фитомассы, баллы
	доля зеленой хвои в кроне дерева, %	масса хвои на побегах второго года жизни, г	содержание хлорофиллов в хвое побега второго года жизни, мг	соотношение белкового и небелкового азота в хвое	
г. Саянск	45	6,0 ± 0,6	16,4 ± 1,1	3,4 ± 0,2	4,9
пос. Кутулик	50	3,0 ± 0,8	20,3 ± 1,4	4,5 ± 0,3	5,3
г. Черемхово	50	4,0 ± 0,4	15,2 ± 0,6	4,3 ± 0,4	5,0
пос. Узкий Луг	55	5,9 ± 0,9	19,7 ± 2,4	4,6 ± 0,7	5,9
г. Усолье-Сибирское	40	6,4 ± 0,6	12,2 ± 0,8	3,4 ± 0,3	4,5
пос. Ясачная	50	5,1 ± 0,4	17,3 ± 1,8	3,5 ± 0,4	4,9
г. Ангарск	40	4,6 ± 0,4	11,5 ± 0,8	3,4 ± 0,2	4,2
пос. Мегет	55	8,6 ± 0,7	12,7 ± 1,3	5,1 ± 0,8	6,1
г. Иркутск	40	4,7 ± 0,4	12,2 ± 0,4	3,7 ± 0,2	4,4
г. Шелехов	45	5,4 ± 0,6	12,0 ± 0,9	4,2 ± 0,5	4,8
пос. Бурдаковка	60	4,7 ± 0,7	31,8 ± 4,6	4,7 ± 0,7	6,7
пос. Большая Речка	65	5,4 ± 0,6	28,4 ± 3,8	5,7 ± 0,6	7,2
пос. Листвянка	60	7,4 ± 0,2	22,6 ± 1,6	4,2 ± 0,4	6,5
Фоновые территории	≥ 70	16,2 ± 1,2	38,4 ± 2,4	6,6 ± 0,3	10,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование сосны обыкновенной в качестве высокочувствительного биоиндикатора позволило оценить уровень техногенного загрязнения атмосферного воздуха вдоль макротрансекты Саянск – Иркутск – Листвянка, проходящей через основные промцентры Байкальского региона, и показать возможность переноса неорганических поллютантов до побережья оз. Байкал. Результаты свидетельствуют, что наиболее загрязнены территории Ангарского, Иркутского, Усольского, Шелеховского промцентров, меньшая степень загрязнения наблюдается в пределах Саянского и Черемховского промцентров. В поселках Кутулик, Узкий Луг, Ясачная, Мегет и Листвянка уровень загрязнения атмосферного воздуха также повышен вследствие переноса эмиссионных потоков от крупных центров. Согласно полученным данным, побережья оз. Байкал достигает большинство поллютантов, в том числе диоксид серы, фториды, аэрозоли тяжелых металлов.

Анализы по элементному составу растений были сделаны в отделении “Ультрамикроанализ”

Лимнологического института СО РАН Байкальского аналитического центра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области за 2010 год. Иркутск: ООО “Форвард”, 2011. 400 с.
2. Федеральный закон “Об охране озера Байкал” от 01 мая 1999 г. № 94-ФЗ // Рос. газ. 1999. С. 4.
3. Михайлова Т. А. Влияние промышленных выбросов на леса Байкальской природной территории // География и природ. ресурсы. 2003. № 1. С. 51–59.
4. Антипов А. Н., Батуев А. Р. Экологический атлас урбанизированного региона // Региональный экологический атлас. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 223–266.
5. Горшков А. Г., Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Верещагин А. Л. Хвоя сосны как тест-объект для оценки распространения органических поллютантов в региональном масштабе // Докл. АН. 2006. Т. 408, № 2. С. 247–249.
6. Илькун Г. М. Загрязнители атмосферы и растений. Киев: Наук. думка, 1978. 246 с.
7. Николаевский В. С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. М.: Изд-во Моск. ун-та леса, 1998. 192 с.
8. Mikhailova T. A. The physiological condition of pine trees in the Prebaikalia (East Siberia) // Forest Pathology. 2000. Vol. 30. P. 345–359.

9. Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Игнатъева О. В., Афанасьева Л. В. Изменение баланса элементов в хвое сосны обыкновенной при техногенном загрязнении // Сиб. экол. журн. 2003. № 6. С. 755–762.
10. Mikhailova T. A., Kalugina O. V., Shergina O. V. Phytomonitoring of technogenic fluorides in Baikal region // Fluorine notes. 2011. N 3 (76).
11. ОСТ 16128-90. Пробные площади лесоустроительные. М.: ГОСЛЕСХОЗ СССР, 1990. 8 с.
12. Пройдакова О. А., Цыханский В. Д., Матвеева Л. Н., Гормашева Т. С., Халтуева В. К. Физико-химические методы при определении макро- и микроэлементов в объектах окружающей среды // Геохимия техногенеза. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. С. 124–130.
13. Методы биохимического исследования растений / под ред. А. И. Ермакова. Л.: Агропромиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. 430 с.
14. Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Суворова Г. Г., Игнатъева О. В., Шергина О. В. Трансформация ассимиляции углерода в древостоях, ослабленных промышленными эмиссиями // Сиб. экол. журн. 2005. № 4. С. 745–751.

Phytomonitoring of Atmospheric Pollution in the Baikal Region

T. A. MIKHAILOVA, O. V. KALUGINA, O. V. SHERGINA

*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, SB RAS
664033, Irkutsk, Lermontov str., 132
E-mail: mikh@sifibr.irk.ru*

Phytomonitoring of atmospheric pollution was performed using Scotch pine as a highly sensitive bioindicator. Pine needle samples were collected in reference sites along the 320 km Sayansk-Irkutsk-Listvyanka transect passing through the major industrial centers of Baikal region and stretching to the shores of Lake Baikal. The concentrations of inorganic pollutants such as sulfur, fluorides, heavy metals etc. in needles were determined. The highest level of atmospheric pollution was detected at the territories of the Angarskiy, Irkutskiy, Usolskiy, Shelekhovskiy industrial centers, lower pollution is observed within the Sayan and Cheremkhovo industrial centers. The data show that the majority of pollutants reach the Baikal shore.

Key words: the Baikal region, phytomonitoring, scotch pine, inorganic pollutants.