
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ И РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СОСТОЯНИЕ ХВОЙНЫХ ЛЕСОВ БЕЛАРУСИ

С.А. Ламоткин, Е.Д. Скаковский, Л.Ю. Тычинская,
С.И. Шпак, О.А. Гайдукевич, С.В. Рыков,
О.В. Черняк, А.В. Воронин

Экологический Центр
Общество восстановления и охраны природы г. Москвы
Новинский бульвар, 28/35, Москва, Россия, 121069

Пагубное воздействие широкомасштабного загрязнения окружающей среды на лесные экосистемы привело к ухудшению санитарного состояния лесов Беларуси, снижению их биологической устойчивости, массовому размножению многих вредных насекомых и грибных болезней. Сосна обыкновенная — один из основных лесообразователей Беларуси — из-за высокой чувствительности к загрязнению широко применяется в качестве тест-объекта. Отбор образцов древесной зелени проводился с таким расчетом, чтобы охватить территории, подвергающиеся действию радиоактивных элементов, промышленных поллютантов, а также территории с минимальным количеством загрязнений, что позволило объективно оценить результат воздействия различных техногенных факторов на химический состав эфирного масла сосны и общее состояние хвойных лесов. Проведенные исследования показали, что сосновые леса Республики Беларусь испытывают различные стрессовые нагрузки, проявляющиеся в накоплении токсичных элементов и радионуклидов. Биохимический индикатор — компонентный состав эфирного масла — весьма чувствителен к изменению количества токсичных элементов и радионуклидов в хвое. Отмечается достаточно сходное влияния токсичных элементов и радионуклидов на данный процесс.

Ключевые слова: техногенные выбросы, радиоактивное загрязнение, состояние хвойных лесов Беларуси, биохимический индикатор, эфирные масла, радиометр.

Широкомасштабное загрязнение окружающей среды и его пагубное воздействие на лесные экосистемы привело к ухудшению санитарного состояния лесов Беларуси, снижению их биологической устойчивости, массовому размножению многих вредных насекомых и грибных болезней. Экологическую обстановку в Республике Беларусь усугубляет также тот факт, что в результате аварии на Чернобыльской АЭС около 25% площади лесов или 1,7 млн га подверглось радиоактивному загрязнению. В ряде работ отмечается, что радиоактивные и промышленные поллютанты оказывают существенное влияние на морфологию растений, в частности на рост, структуру хвои, строение годичных колец и т.д. [1; 2].

Любым морфологическим изменениям предшествуют изменения на химическом уровне в системе метаболизма [3. С. 129—134]. Это проявляется в зависимости концентраций отдельных соединений в тканях древесных растений от степени загрязненности окружающей среды. Сосна обыкновенная — один из основных лесообразователей Беларуси — из-за высокой чувствительности к загрязнению широко применяется в качестве тест-объекта. Авторы многих работ в качестве биохимического индикатора загрязнения территории промышленными поллютантами предлагают использовать изменение содержания отдельных компонентов эфирного масла сосны обыкновенной [4; 5].

Цель данной работы — сравнение влияния токсичных и радиоактивных элементов на химический состав эфирного масла сосен, произрастающих в Республики Беларусь.

Экспериментальная часть. Образцы древесной зелени отбирали в сосняках естественного происхождения с деревьев 40-летнего возраста в осенне-зимние месяцы — период максимального содержания эфирного масла в хвое [6]. Отбор образцов древесной зелени проводился с таким расчетом, чтобы охватить территории, подвергающиеся действию радиоактивных элементов, промышленных поллютантов, а также территории с минимальным количеством загрязнений. Такой выбор мест отбора образцов позволил объективно оценить результат воздействия различных техногенных факторов на химический состав эфирного масла сосны и общее состояние хвойных лесов.

Из отобранных образцов хвои по методике, предложенной в работе [7. С. 12—34], составляли сборную пробу от 35—40 деревьев, с которой и проводили дальнейшие эксперименты.

Определение содержания токсичных элементов Pb, Cd, Zn, Cu, Co, Ni, Mn, Cr в хвое осуществляли методом атомно-адсорбционного анализа по стандартной методике [8].

Определение S проводили методом нефелометрии по стандартной методике [9].

При определении содержания в хвое гамма-излучающих радионуклидов на начальном этапе проводилась проверка однородности пробы путем измерения мощности дозы с помощью дозиметра РКСБ-104. Отобранные образцы считались однородными по содержанию в них гамма-излучающих радионуклидов, если результаты измерений различались не более чем на 50% [10]. Степень загрязненности образцов радионуклидами определяли по величине удельной активности Cs^{137} и Sr^{90} . Содержание Cs^{137} в образцах хвои контролировалось по стандартной методике на радиометре РУГ-91М, а удельную активность изотопов Sr^{90} определяли на радиометре РУБ-91 [11. С. 35—79].

Эфирные масла выделяли методом гидродистилляции, а количественный выход определяли волюмометрически. Качественный и количественный анализ эфирного масла из хвои сосны обыкновенной проводили методом газо-жидкостной хроматографии на хроматографе Цвет-800. Для разделения компонентов использовали кварцевые капиллярные колонки длиной 70 м с жидкими фазами ПЭГ-2000 и SE-70. Идентификацию отдельных компонентов проводили с использованием эталонных соединений, а также на основании известных литературных данных по индексам удерживания [12. С. 229—254].

Обсуждение результатов. На рис. 1 представлена карта территории Республики Беларусь и места отбора проб, которые соотносили с крупными населенными пунктами Беларуси.

Образцы 1—3 отбирались непосредственно в промышленных зонах г. Минска, 4—10 отобраны с территории лесных массивов, подвергшихся наибольшему радиационному загрязнению [13], 11-й образец отобран в лесном массиве, расположенном в 40 км от г. Минска, а образцы 12—13 — в экологически чистых районах (заповедники, природоохранные зоны).

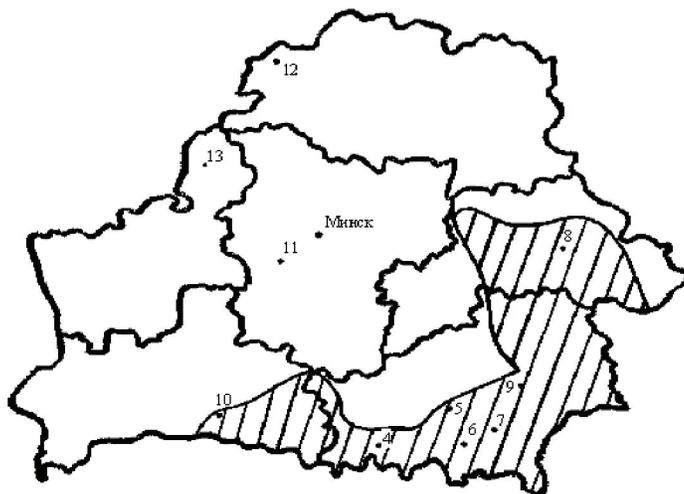


Рис. 1. Схема отбора образцов хвои сосны на территории Республики Беларусь образцы 1—3 отобраны непосредственно в г. Минск

Органы и части древесных растений различаются зольностью и химическим составом. Ассимилирующие органы играют роль регуляторного звена в функционировании растительного организма и весьма чувствительны к изменению условий произрастания. На основе химического состава ассимилирующих органов древесных растений может быть выявлен дефицит или токсичность элементов для растений.

Основным источником поступления радионуклидов в хвою является их миграция из почвы, при этом количество радионуклидов на поверхности хвои существенно и, как правило, не учитывается. Поэтому наблюдаемые значения активностей и величины мощности дозы обусловлены инкорпорированными радионуклидами и продуктами их распада. Следует также отметить, что в осенне-зимний период основные биохимические процессы в клетках хвои замирают, однако радиоактивный распад не останавливается, что приводит к накоплению продуктов радиоактивного распада и в конечном счете ведет к возрастанию стрессовой нагрузки на биомассу дерева [1].

В табл. 1 приведены характеристики радиационного загрязнения образцов хвои сосны.

Как видно из табл. 1, образцы хвои 4—10 значительно больше загрязнены радионуклидами Sr^{90} и Cs^{137} , чем остальные образцы. Полученные данные хорошо согласуются со значениями коэффициентов перехода изотопов из почвы в древесину [14]. Более высокое содержание Cs^{137} во всех образцах по сравнению со Sr^{90} легко объясняется различной скоростью миграции данных радионуклидов в почве.

Содержание токсичных элементов в хвое сосен отобранных образцов, характеризующее собой специфику поглощения растениями загрязнителей, представлено в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики радиационного загрязнения хвои сосны

№ образца	Район произрастания	Удельная активность А (Si^{90}), Бк/кг	Удельная активность А (Cs^{137}), Бк/кг	Мощность дозы гамма-излучения, м ³ /ч
1	Минск, промзона тракторного завода	19	10	0,12
2	Минск, ТЭЦ-3	22	14	0,11
3	Минск, промзона МАЗа	17	12	0,11
4	Лельчицы	410	620	0,24
5	Калинковичи	390	600	0,3
6	Наровля	405	556	0,38
7	Хойники	160	305	0,22
8	Чаусы	146	388	0,18
9	Речица	13	38	0,17
10	Пинск	21	28	0,12
11	Негорелое	11	10	0,09
12	Браслав	24	20	0,10
13	Островец	18	10	0,09

Таблица 2

Содержание токсичных элементов в хвое сосен, произрастающих в различных регионах Республики Беларусь

№	Содержание элементов в хвое, мг/100г а.с.д.								
	S	Cd	Co	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn	Cr
1	107,5	0,0023	0,0155	0,710	0,178	0,1866	2,614	6,526	0,2352
2	169	0,0040	0,0201	0,620	0,172	0,1422	2,418	6,810	0,143
3	101,6	0,0068	0,0331	0,373	0,335	0,0701	3,086	39,044	0,032
4	95,1	0,0044	0,0102	0,181	0,080	0,0129	3,410	20,942	—
5	96,9	0,0044	0,0104	0,238	0,075	0,0154	3,121	21,537	0,0002
6	83,2	0,0031	0,0101	0,164	0,078	0,0118	3,610	26,481	—
7	94,7	0,0043	0,0127	0,218	0,235	0,016	2,666	37,989	—
8	94,1	0,0064	0,0129	0,316	0,101	0,071	4,98	24,92	0,0001
9	90	0,0036	0,0076	0,297	0,134	0,0188	3,359	22,169	0,0091
10	97,3	0,0037	0,0079	0,273	0,113	0,022	3,268	31,918	0,012
11	89,5	0,0043	0,0167	0,281	0,161	0,0267	2,456	20,988	0,0045
12	94,2	—	0,0043	0,271	0,288	0,0046	3,062	6,321	—
13	92,3	—	0,0034	0,276	0,291	0,0029	4,02	13,21	—

Как видно из табл. 2, количество токсичных элементов максимально в образцах 1—3, что хорошо согласуется с данными по оценке экологической обстановки в г. Минске [15].

Высокое содержание S в образце 2 объясняется непосредственной близостью места отбора к ТЭЦ-3, где основным токсическим веществом, содержащимся в выбросах, является сернистый газ [16].

В образцах 4—10 содержание токсичных элементов не превышает значений, полученных для образцов 12—15, отобранных в экологически чистых зонах.

Для образцов 4—10 основным источником стрессовой нагрузки являются инкорпорированные радионуклиды, а для 1—3 — токсичные элементы. Интересно отметить, что изменение содержания Zn в зольных остатках не соответствует закономерностям для Pb, Cr, Cu, что хорошо согласуется с данными работы [17], где указывается на антагонизм ряда элементов в общей системе обмена микроэлементов в растениях. Количество токсичных элементов, содержащихся в хвое образца 11, незначительно превышает их содержание в образцах 12—13. Это легко объясняется тем, что лесной массив примыкает к городу со стороны, свободной от промышленных объектов, а также располагается с наветренной стороны города, что также способствует снижению стрессовой нагрузки на деревья [15].

Таким образом, в зависимости от места произрастания сосен существенно изменяется содержание в хвое и токсичных элементов, и радионуклидов, что в конечном итоге свидетельствует о степени благополучия лесных массивов в целом.

Соответственно цели исследования в дальнейшем было проведено сопоставление результатов элементного анализа с протеканием процессов метаболизма на примере изменения химического состава эфирных масел, выделенных из хвои отобранных образцов древесной зелени сосны обыкновенной.

Общее содержание эфирного масла в ассимиляционном аппарате сосновых насаждений изменялось в пределах 1,0—1,4% а.с.д. и зависело от места отбора образцов хвои. Как правило, содержание эфирного масла в более загрязненных образцах 1—10 превышало на 20—30% содержание эфирного масла в «чистых» образцах 11—13, что хорошо согласуется с данными работы [4].

Общая картина изменения компонентного состава эфирного масла сосны в зависимости от степени загрязненности образцов хвои представлена в табл. 3.

Как правило, при рассмотрении составов эфирных масел принято выделять фракции моно-, сескви- и кислородсодержащих терпеновых углеводов. Такое разделение связано прежде всего с различными путями биосинтеза и выполняемыми ими функциями. Как видно, во всех выделенных маслах доминируют монотерпеновые углеводороды и минимально содержание кислородсодержащих соединений. Полученные результаты несколько расходятся с данными, представленными в работе [18]. Это, на наш взгляд, легко объясняется зависимостью компонентного состава эфирных масел от таких показателей, как род дерева и место произрастания. Полученные нами данные по составу эфирного масла, выделенного из хвои сосен, произрастающих в наиболее экологически чистых местах (образцы 12, 13), хорошо согласуются с результатами работ [4; 19], где приведены результаты анализа состава эфирного масла *Pinus silvestris*, наиболее распространенной на европейской территории. Отметим, что в образцах, загрязненных как токсичными элементами, так и радионуклидами, повышено содержание спиртов, что указывает на увеличение окислительных процессов, протекающих с участием терпеноидов эфирных масел.

Традиционно суммарной характеристикой эфирного масла является показатель преломления. Как видно из табл. 3, его численные значения для эфирных масел, выделенных из отобранных образцов, существенно изменяются.

**Содержание терпеновых углеводородов в эфирном масле сосен,
произрастающих в различных регионах Республики Беларусь,
величины показателя преломления эфирных масел сосен**

Соединение	№ Образца												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	n(D) ²⁰												
	1,4951	1,4948	1,4893	1,4887	1,4896	1,4888	1,4871	1,4878	1,4891	1,4840	1,4842	1,4839	1,4844
Содержание компонентов, %													
Трициклен	1,1	1,3	1,2	1,9	2,1	2,2	1,5	1,9	1,3	0,8	1,0	0,8	1,0
α-пинен	68,6	65,1	57,9	55,4	67,0	61,6	44,3	46,9	57,7	36,9	45,1	32,3	28,8
Камфен	4,9	4,6	3,6	7,6	5,5	7,1	5,5	6,3	5,4	2,6	2,8	3,1	3,4
Фенхен	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
Сабинен	0,2	0,2	0,7	1,0	0,2	0,5	0,6	1,0	0,4	0,7	0,7	1,2	1,3
β-пинен	3,0	4,1	1,9	4,6	3,1	4,1	3,0	5,0	2,9	10,5	2,3	6,0	8,1
Мирцен	2,3	5,6	3,1	3,4	7,2	2,5	3,3	2,7	3,0	3,2	2,7	2,8	2,7
α-фелландрен	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1
3-карен	2,7	6,4	21,9	16,8	3,8	16,6	30,0	19,3	18,1	33,1	34,7	41,0	45,0
α-терпинен	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2
p-цимол	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,6	0,1
Лимонен	12,0	5,6	2,0	5,8	9,6	2,7	3,1	4,8	4,1	5,3	2,6	4,2	3,0
γ-терпинен	3,3	4,3	3,5	0,5	0,7	0,2	0,6	1,2	0,5	1,1	2,9	1,3	1,2
Терпинолен	0,8	1,0	2,8	2,1	0,4	1,6	3,7	1,9	2,9	3,9	3,9	4,3	4,2
Всего монотерпеноидов	45,6	44,8	44,4	46,1	46,0	45,6	48,1	48,1	50,0	57,4	56,9	62,2	59,9
Всего кислородсодержащих соединений	2,6	2,6	3,0	2,7	2,5	2,5	2,4	2,3	2,4	2,1	2,0	1,9	2,0
Всего сесквитерпеноидов	51,8	52,6	52,6	51,2	51,5	48,3	49,5	49,6	47,6	40,5	41,1	35,9	38,1

Интересно отметить, что для эфирных масел, выделенных из загрязненных образцов, независимо от источника загрязнения величина показателя преломления существенно превышает значения для экологически чистых образцов (11—13). Как видно из табл. 3, содержание α-пинена, 3-карена, камфена, мирцена, β-пинена, лимонена доминирует в монотерпеновой части во всех образцах, и изменяется сложным образом в зависимости от уровня загрязнения участка. При увеличении техногенной нагрузки содержание α-пинена, камфена, лимонена возрастает, и снижается содержание 3-карена и β-пинена, причем данная тенденция наблюдается как для образцов, загрязненных радионуклидами (4—10), так и для образцов, отобранных в городской черте (1—3), что указывает на подобие процессов биосинтеза терпеновых углеводородов в стрессовых ситуациях под воздействием различных загрязнений. На наш взгляд, изменение содержания монотерпеноидов следует связывать не только с влиянием на биосинтез освещенности лесных массивов [20], а также учитывать защитные механизмы деревьев проявляющиеся, например, в увеличении содержания α-пинена в загрязненных образцах в качестве вторичного метаболита, обладающего защитными свойствами для сосны в стрессовых ситуациях [21]. Следует также отметить динамику изменения количества

α-пинена и 3-карена. Как видно, содержание этих компонентов изменяется анти-батно. Такая тенденция хорошо согласуется с результатами работ других авторов [4; 18]. Уменьшение количества 3-карена связывают с его повышенной реакционной способностью в окислительных процессах, количество которых, как отмечалось ранее, увеличивается с возрастом техногенной нагрузки.

Таким образом, проведенные исследования показали, что сосновые леса Республики Беларусь испытывают различные стрессовые нагрузки, проявляющиеся в накоплении токсичных элементов и радионуклидов. Отмечено, что биохимический индикатор — компонентный состав эфирного масла — весьма чувствителен к изменению количества токсичных элементов и радионуклидов в хвое. Механизм влияния различных элементов на биосинтез терпеноидов достаточно сложен, однако отмечается некоторое подобие влияния токсичных элементов и радионуклидов на данный процесс.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гродзинский Д.М., Коломиец К.Д., Булах А.А. Антропогенная радионуклидная аномалия и растения. — Киев. Лыбидь, 1991.
- [2] Мусаев Е.К. Сезонный рост и строение годичных колец сосны обыкновенной в зоне чернобыльской катастрофы // Лесоведение. — 1996. — № 1. — С. 16—29.
- [3] Биохимические индикаторы стрессового состояния древесных растений / Н.Е. Судачкова, И.В. Шейн, Л.И. Романова и др. — Новосибирск: Наука. Сиб. отделение РАН, 1997.
- [4] Фуксман И.Л., Пойкалайнен Я., Шредерс С.М. и др. Физиолого-биохимическая индикация состояния сосны обыкновенной в связи с воздействием промышленных поллютантов // Экология. — 1997. — № 3. — С. 213—217.
- [5] Сотникова О.В., Степень Р.А. Эфирные масла сосны как индикатор загрязнения среды // Химия растительного сырья. — 2001. — № 1. — С. 79—84.
- [6] Степень Р.А. Экологическая и ресурсная значимость летучих терпенов сосняков средней Сибири // Химия растительного сырья. — 1999. — № 2. — С. 125—129.
- [7] Чернодубов А.И., Дерюжкин Р.И. Эфирные масла сосны. — Воронеж: Изд-во ВГУ, 1990.
- [8] Атомно-эмиссионный анализ с индукционной плазмой // Итоги науки и техники. Сер. аналит. х. Т. 2. 1990.
- [9] Ринькис Г.Я., Рамане Х.К., Куницкая Т.А. Методы анализа почв и растений. — Рига: Зинатне, 1987.
- [10] СТБ 1053-98. Радиационный контроль. Отбор проб пищевых продуктов. Общие требования. — Мн.: Госстандарт, 1998.
- [11] Лобач Д.И., Тимощенко А.И., Штомпель В.П. Методические и информационные материалы для проведения практикума по дозиметрии. — Мн.: Гидрометеиздат, 1999.
- [12] Хефтман Э. Хроматография. — М.: Мир, 1986.
- [13] Стратегический план развития лесного хозяйства Беларуси. — Мн.: БГТУ, 1997.
- [14] Тихомиров Ф.А., Щилов А.И. Последствия радиоактивного загрязнения лесов в зоне влияния аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. — 1997. — Т. 36. — № 4. — С. 664—672.
- [15] Состояние окружающей среды и природопользование в городе Минске / Под ред. А.Н. Боровикова, В.М. Бурака, А.П. Гриценко и др. — Мн.: БелНИЦ «Экология», 2000.
- [16] Шумейко П.Г., Осипов В.И. Влияние атмосферного загрязнения на корреляционные связи между биохимическими показателями деревьев на примере сосны обыкновенной // Успехи современной биологии. — 1992. — Т. 113. Вып. 4. — С. 507—511.

- [17] *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. — М.: Мир, 1989.
- [18] *Степень Р.А., Коловский Р.А., Калачева Г.С.* Влияние техногенных выбросов на состояние пригородных лесов Красноярска // *Экология*. — 1996. — № 6. — С. 410—414.
- [19] *Левин Э.Д., Репях С.М.* Переработка древесной зелени. — М.: Лесная промышленность, 1984.
- [20] *Фуксман И.Л., Пойкалайнен Я., Шредерс С.М. и др.* Физиолого-биохимическая индикация состояния сосны обыкновенной в связи с воздействием промышленных поллютантов // *Экология*. — 1997. — № 3. — С. 213—217.
- [21] *Рощина В.Д., Рощина В.В.* Выделительная функция высших растений. — М.: Наука, 1989.

INFLUENCE OF TECHNOGENIC EXHAUSTS AND NUCLEAR POLLUTION ON THE CONIFEROUS FORESTS OF BELARUS

**S.A. Lamotkin, E.D. Skakovskii, L.Yu. Tychinskaya,
S.I. Shpak, O.A. Gajdukevich, S.V. Rykov,
O.V. Chernyak, A.V. Voronin**

Ecological center

Society of rehabilitation and nature protection of Moscow
Novinsky Boulevard, 28/35, Moscow, Russia, 121069

The large-scale environment pollution and its fatal influence on forest ecosystems has led to deterioration of a sanitary condition of forests in Belarus, to reduction of their biological resistance, to mass reproduction of many destructive insects and fungous diseases. The common pine — one of the basic forest creators in Belarus — is widely used as object for test due its high sensitivity to contamination. A number of works offer to use alterations in content of separate ingredients of an essential oil of a common pine as biochemical indicators of terrain industrial pollution. It is necessary to note also, that the basic biochemical processes in needles cells fade during the autumn-winter period, and radioactive disintegration does not stop, that causes the accumulation of radioactive products and, finally, leads to increase of stressful loading on the tree biomass. It was note, that the biochemical indicator — essential oil componential composition — is rather sensitive to quantitive changes of toxic elements and radioactive nuclides in conifer needle. The mechanism of influence of various elements on biosynthesis terpenoids is complicated enough, however some similarities in influence of toxic elements and radioactive nuclides on the process is marked.

Key words: technogenic exhausts , nuclear pollution, coniferous forests of Belarus, biochemical indicator, essential oils, radiometer.