

УДК 630.425:630.187.1

С. А. Ламоткин¹, Е. Д. Скаковский², Е. В. Гиль¹¹Белорусский государственный технологический университет²Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси**ВЛИЯНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДРЕВЕСНОЙ ЗЕЛЕНИ
PICEA ABIES L. KARST НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭФИРНОГО МАСЛА**

Проведен отбор образцов древесной зелени *Picea abies* L. Karst с территорий с различными уровнями радиоактивного загрязнения с деревьев, выбранных методом рандомизации, в осенне-зимние месяцы. Радиационное загрязнение территории контролировали путем измерения мощности дозы гамма-излучения радионуклидов радиометром. Степень загрязненности радионуклидами образцов древесной зелени определяли по величине удельной активности Cs¹³⁷ и Sr⁹⁰. В результате исследований показано, что ель европейская, произрастающая на территории с высоким уровнем радиоактивного загрязнения, аккумулирует в хвое значительное количество радиоактивных элементов. Загрязнение хвои радиоактивными элементами приводит к изменению процессов биосинтеза вторичных метаболитов, что выражается в общем снижении содержания эфирного масла в ассимиляционном аппарате ели европейской. Эфирное масло выделяли из древесной зелени методом гидродистилляции, выход оценивали вольюметрически. Состав компонентов эфирного масла анализировали методами спектроскопии ЯМР и газожидкостной хроматографии.

Ключевые слова: ель обыкновенная (*Picea abies* L.), эфирное масло, состав, спектроскопия ЯМР, хроматография, радиационное загрязнение.

S. A. Lamotkin¹, E. D. Skakovskiy², Ye. V. Gil¹¹Belarusian State Technological University²Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus**INFLUENCE OF RADIOACTIVE POLLUTION OF WOODY GREENS
OF *PICEA ABIES* L. KARST ON CHARACTERISTICS OF ESSENTIAL OIL**

There are selected samples of woody greens *Picea abies* L. Karst from areas with different levels of radioactive contamination from trees selected by randomization in the autumn-winter months. Radiation pollution of the territory was monitored by measuring the dose rate of gamma radiation of radionuclides by a radiometer. The degree of radionuclide contamination of woody samples was determined by the value of the specific activity of Cs¹³⁷ and Sr⁹⁰. It was shown that European spruce growing in a territory with a high level of radioactive contamination accumulates a significant amount of radioactive elements in needles. Contamination of needles with radioactive elements leads to a change in the processes of biosynthesis of secondary metabolites, which is reflected in a general decrease in the content of essential oil in the assimilation apparatus of European spruce. Essential oil was isolated from green wood by hydrodistillation, the yield was estimated by volume. The composition of the essential oil components was analyzed by NMR spectroscopy and gas-liquid chromatography.

Key words: *Picea abies* L., essential oil, composition, NMR spectroscopy, chromatography, radioactive pollution.

Введение. Лес – составная часть растительных ресурсов, использующихся как сырьевая база для лесной, деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной промышленности, строительной индустрии, выполняющих важные рекреационные и средообразующие функции. Площадь, покрытая лесами в Республике Беларусь, составляет порядка 8260,9 тыс. га. При этом в последние годы наблюдается тенденция накопления запасов древесины [1]. В составе лесов Беларуси преобладают хвойные насаждения семейства сосновых (*Pinaceae*) рода сосны (*Pinus*), ели (*Picea*), пихты (*Abies*), а также семейства кипарисовых (*Cupressaceae*) рода можжевельника

(*Juniperus*) и туй (*Thuja*), составляющие более 60% лесного фонда.

Ель европейская (обыкновенная) (*Picea abies* L. Karst) – типовой вид вечнозеленых деревьев из рода Ель семейства Сосновые (*Pinaceae*) [2]. Широко распространена в северо-восточной части Европы, где растет сплошными лесными массивами. Еловые насаждения *Picea abies* L. Karst занимают 9,6% от лесов республики, что составляет 669,9 тыс. га [3]. Ель европейская является второй по значимости хвойной породой в видовом составе лесов Республики Беларусь.

Комплексное и рациональное использование растительных ресурсов предполагает включение

в процесс производства всей биомассы растения. Несмотря на применение современной технологии и техники, в настоящее время фактически используется только стволовая часть, составляющая 60–65% биомассы дерева, а древесная зелень – лесосечные отходы – как правило, не перерабатывается. Однако при рациональной системе хозяйствования древесная зелень может рассматриваться в качестве потенциального источника сырья при производстве широкого спектра лесохимической продукции [4]. Особое место среди сырья, выделяемого из древесной зелени растений, имеющего широчайшее значение для различных направлений науки и промышленности, принадлежит терпеновым углеводородам. Этот класс природных химических соединений формирует эфирные масла и живы в разных растениях.

Как отмечается, такие показатели, как биологическая активность, содержание, состав и свойства смесей терпеновых углеводородов, выделяемых из растительного сырья, существенно изменяются в рамках различных родов растений, а также весьма чувствительны к морфологическим, климатическим, сезонным факторам [4]. Исходя из этого, очевидно, что качество производимой на основе эфирных масел продукции напрямую зависит от содержания в них отдельных терпеновых углеводородов.

Обратной стороной технического прогресса является резкое ухудшение экологической обстановки в связи с постоянно нарастающей промышленной деятельностью человека. Ежегодно увеличивается количество поступающих в атмосферу промышленных выбросов, что, естественно, негативным образом сказывается на состоянии биогеоценозов. В условиях возрастания техногенного загрязнения окружающей среды деревья испытывают широкий спектр антропогенных стрессов. Под воздействием техногенных факторов происходят изменения как морфологии растений [5], так и направлений биосинтеза компонентов древесины, что ведет к изменению концентраций отдельных соединений в древесных тканях. Такие изменения в цепях биосинтеза химических соединений древесины приводят к существенным изменениям химического состава эфирного масла [6].

Экологическую обстановку в Республике Беларусь усугубляет тот факт, что в результате аварии на Чернобыльской АЭС около 40 тыс. км² территории было загрязнено радиоактивными выбросами. Хорошо известно пагубное влияние радиоактивного загрязнения на морфологию растений [7]. При этом, как показано в работах [8, 9], основной вклад в облучения растений в настоящее время вносят инкорпорированные радионуклиды Cs¹³⁷ и Sr⁹⁰, которые больше всего

скапливаются в хвое (листьях), затем в коре, ветвях, меньше всего их в древесине [10–12]. Повышенное содержание радиоактивных элементов оказывает существенное влияние на процессы биосинтеза органических веществ в тканях растений. В частности, изменяется содержание в тканях растений хлорофилла, каротиноидов, жирных кислот, крахмала и белка [13–16].

В связи с вышесказанным целью данной работы являлось исследование содержания инкорпорированных радионуклидов в хвое ели европейской и их влияние на процесс биосинтеза терпеновых углеводородов эфирного масла.

Методика эксперимента. Для изучения влияния радиоактивных элементов отбор древесной зелени проводился с деревьев, относящихся к преспевающим древостоям 4-го класса, возрастом 40–60 лет. Древесную зелень хвойных растений отбирали в насаждениях с 20–30 деревьев, выбранных методом рандомизации (случайного выбора), срезали ветки равномерно с четырех сторон. Древесную зелень отбирали в осенне-зимние месяцы. В это время выход эфирного масла достигает максимального значения, а его состав стабилизируется [17, 18].

Влажность хвои определяли путем отгонки воды из древесной зелени с неполярным растворителем по методике [19].

Радиационное загрязнение территории контролировали путем измерения мощности дозы гамма-излучения радионуклидов радиометром РКСБ-104. Территория считалась однородно загрязненной по содержанию гамма-излучающих радионуклидов, если результаты измерений в 10 точках отбора образцов древесной зелени различались не более чем на 50% [20].

Степень загрязненности образцов радионуклидами определяли по величине удельной активности Cs¹³⁷ и Sr⁹⁰. Содержание Cs¹³⁷ в образцах хвои контролировали по стандартной методике на радиометре РУГ-91М, а удельную активность изотопов Sr⁹⁰ определяли на радиометре РУБ-91 [21].

Анализ содержания тяжелых металлов Pb, Zn, Co, Ni, Cd, Cu в хвое проводили на атомно-абсорбционном спектрометре Avanta GM с электротермическим атомизатором по стандартной методике [22]. Содержание серы в хвое определяли нефелометрическим методом [23].

Эфирное масло выделяли из древесной зелени методом гидродистилляции [24]. Выход масла определяли вольюметрически.

Состав компонентов эфирного масла анализировали методами спектроскопии ЯМР и газожидкостной хроматографии.

Запись спектров ЯМР проводили на спектрометрах BS-587 А, BS-567 А (Чехия) и AVANCE-500 (Германия) с рабочими частотами для ядер

^1H – 80, 100 и 500 МГц соответственно, и для ядер ^{13}C – 20, 25 и 125 МГц соответственно. Для количественного анализа образцов в зависимости от чувствительности спектрометра готовили растворы эфирного масла определенной концентрации в CDCl_3 (1–10%). Все экспериментальные данные получены и обработаны с использованием пакета программ XWIN-NMR 3.5.

Хроматографический анализ эфирных масел проводился методом газо-жидкостной хроматографии на хроматографе «Кристалл 5000.1». Для разделения компонентов использовали капиллярную колонку диаметром 0,25 мм и длиной 60 м с нанесенной фазой 100%-ным диметилсилоксаном. В качестве газа-носителя использовался азот. Соотношение расходов воздух : азот : водород составляло 10 : 1 : 1. Расход азота через колонку составлял 20 мл/мин. Условия хроматографического анализа: изотермический режим при 70°C в течение 20 мин, затем программированный подъем температуры со скоростью 2°C/мин до 150°C с выдержкой при конечной температуре 40 мин. Температура испарителя – 250°C. Идентификацию отдельных компонентов проводили с использованием эталонных соединений, а также на основании известных литературных данных по индексам удерживания отдельных соединений [25]. Количественное содержание компонентов рассчитывали методом внутренней нормализации по площадям пиков.

Результаты каждой серии параллельных опытов подвергали статистической обработке с целью нахождения грубых ошибок («промахов») с использованием критерия Стьюдента [26]. В этом случае сомнительный результат

исключали из выборки, а по оставшимся данным рассчитывали среднее арифметическое и оценку дисперсии воспроизводимости. Для определения необходимого объема выборки при выполнении исследований принимали допустимую величину погрешности Δx равной 5% от среднего значения показателя при доверительной вероятности $\alpha = 95\%$.

На рис. 1 представлен фрагмент карты Республики Беларусь, где схематично указаны места отбора образцов древесной зелени ели европейской. Как видно, образцы отбирались на территориях, подвергшихся в той или иной мере радиоактивному заражению. В качестве эталонных образцов были выбраны ели, произрастающие на территориях ГПУ НП «Браславские озера» (Витебская область), ГПУ «Национальный парк «Беловежская пуща» (Гродненская область) и ГПУ «Национальный парк «Нарочанский» (Минская область).

Результаты и их обсуждение. С целью исключения влияния токсичных элементов на состав эфирного масла образцы древесной зелени отбирались на территориях, где отсутствуют промышленные объекты и транспортные магистрали. Содержание токсичных элементов в хвое составило (мг/100 г а. с.): Pb – 0,0058, Zn – 9,2873, Ni – 0,2680, Cu – 0,2767. Такое содержание элементов хорошо согласуется с данными по содержанию токсичных элементов в хвое растений, произрастающих на незагрязненных территориях [10]. Такие элементы, как Ca, Co, Cr, в хвое отобранных образцов не обнаружены.

В табл. 1 представлены данные по радиационной загрязненности хвои ели европейской.



Рис. 1. Фрагмент карты Республики Беларусь с указанием места отбора образцов древесной зелени ели европейской

Таблица 1

Характеристики радиационного загрязнения хвои ели европейской в условиях радиоактивного загрязнения территории отбора проб

Номер образца	Район произрастания	Удельная активность А (Sr ⁹⁰), Бк/кг	Удельная активность А (Cs ¹³⁷), Бк/кг	Мощность дозы гамма-излучения, мЗв/ч
1	Лельчицкий лесхоз Гомельское ГПЛХО	410	580	0,34
2	Калинковичский лесхоз Гомельское ГПЛХО	390	500	0,32
3	Наровлянский спецлесхоз Гомельское ГПЛХО	405	550	0,40
4	Хойницкий лесхоз Гомельское ГПЛХО	160	280	0,22
5	Чаусский лесхоз Могилевское ГПЛХО	146	300	0,14
6	Речицкий лесхоз Гомельское ГПЛХО	75	120	0,10
7	Пинский лесхоз Брестское ГПЛХО	21	30	0,12
Фоновые точки				
8	НП «Браславские озера»	14	11	0,10
9	НП «Беловежская пуща»	15	10	0,09
10	НП «Нарочанский»	15	12	0,12
Среднее значение фоновых точек		14,7	11,0	0,10

Как видно из табл. 1, образцы хвои испытывают различную радиоактивную нагрузку. Так, образцы 1–3 значительно больше загрязнены радионуклидами Sr⁹⁰ и Cs¹³⁷, чем остальные. Следует отметить, что наблюдаемые значения активностей и величины мощности дозы обусловлены инкорпорированными радионуклидами и продуктами их распада. Основным источником поступления радионуклидов в хвою является их миграция из почвы, при этом количество радионуклидов на поверхности хвои несущественно и, как правило, не учитывается. Полученные данные хорошо согласуются со значениями коэффициентов перехода изотопов из почвы в древесину [27]. Более высокое содержание Cs¹³⁷ во всех образцах по сравнению со Sr⁹⁰ легко объясняется различной скоростью миграции данных радионуклидов в почве. Следует также отметить, что радионуклиды, накапливаясь в растении, оказывают негативное влияние на процессы биосинтеза на протяжении всего календарного года и ведут к возрастанию стрессовой нагрузки на биомассу дерева [28]. Анализ табл. 1 и данных по содержанию токсичных элементов в хвое позволяет утверждать, что растения, отобранные в зонах 1–7, испытывают стрессовую нагрузку исключительно за счет радионуклидов, инкорпорированных хвоей.

Поскольку детальный анализ спектров ЯМР эфирного масла различных елей проводился ранее [29], на рис. 2 представлены фрагменты спектров ЯМР ¹³C эфирного масла ели европейской, выделенного из древесной зелени с различным уровнем загрязнения радионуклидами.

Как видно, качественно спектры подобны и в них идентифицированы основные компоненты: α-пинен, камфен, лимонен, борнилацетат и 1,8-цинеол. Отличие спектров заключается в

различной интенсивности линий, принадлежащих отдельным соединениям. Это свидетельствует о существенном изменении количества компонентов эфирного масла при переходе от «чистого» сырья к «загрязненному».

Общее содержание эфирного масла в ассимиляционном аппарате еловых насаждений отобранных образцов не превышало (0,30 ± 0,05)% на а. с. с. В изученных образцах выход эфирного масла изменялся в пределах 0,1–0,3% на а. с. с. и зависел от места отбора образцов хвои. Содержание эфирного масла в наиболее загрязненных радиоактивными элементами образцах 1–4 (табл. 2) ниже практически в 1,5–2 раза содержания эфирного масла в «чистых» образцах 8–10 (табл. 2).

Такая тенденция влияния радиоактивных элементов на содержание эфирного масла подобна наблюдаемой для сосны [30]. Вероятнее всего, влияние радиоактивных элементов приводит к общему торможению процессов биосинтеза эфирного масла в растениях.

Содержание основных компонентов эфирного масла, выделенного из отобранных образцов древесной зелени, представлено в табл. 2. В целом следует отметить, что в масле, выделенном из загрязненных образцов, на 30–40% выше общее содержание кислородсодержащих терпенов и снижается количество монотерпенов.

Тенденция в содержании отдельных компонентов в зависимости от степени радиоактивного загрязнения аналогична установленным для токсичных элементов. Как видно, в загрязненных образцах возрастает содержание 1,8-цинеола, камфена, борнеола и борнилацетата. Следует отметить снижение содержания в эфирном масле таких соединений, как α-пинен и лимонен, что дает возможность вынести предположение о сложном механизме влияния радиоактивных элементов на состав эфирного масла.

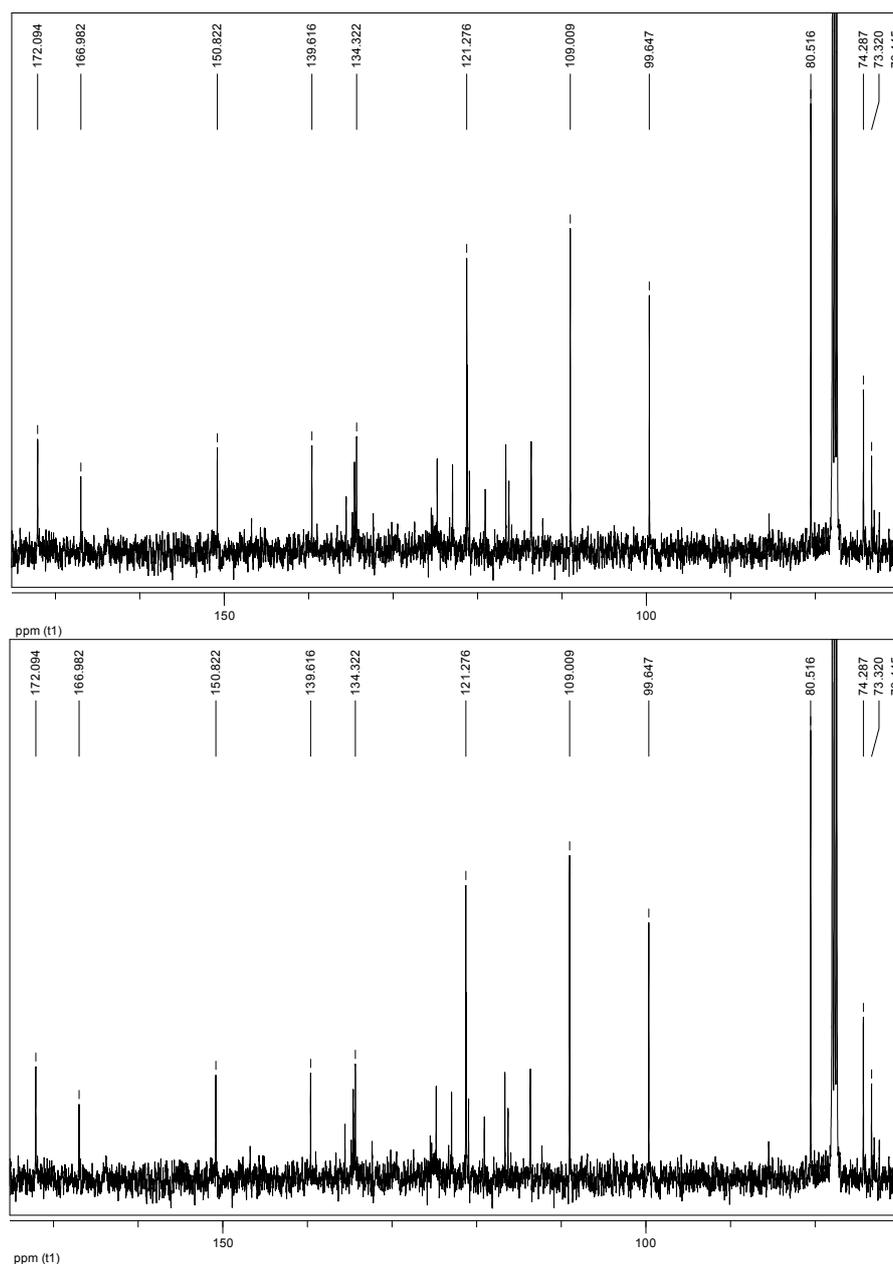


Рис. 2. Фрагменты спектров ЯМР ^{13}C эфирного масла ели европейской, выделенных из древесной зелени образца № 10 (верхний), № 1 (нижний). Характеристические сигналы основных компонентов (δ , м. д.): борнилацетат – 172,0 и 80,5; камфен – 166,9 и 99,6; лимонен – 150,7 и 109,0; 1,8-цинеол – 74,3 и 70,5; α -пинен – 121,3

Как видно, с возрастанием степени радиоактивного загрязнения хвои атибатно изменяется содержание лимонена и 1,8-цинеола.

Увеличение содержания отдельных кислородсодержащих терпенов и их общего количества свидетельствует о том, что радиоактивные элементы способствуют протеканию в хвое окислительных процессов.

Кроме того, изменения содержания основных компонентов могут свидетельствовать о влиянии радиоактивных элементов на общую схему биосинтеза соединений эфирного масла.

Хорошо известно, что процесс образования монотерпеноидов имеет определенную очередность и тормозится на конкретном терпене. Для ели европейской [18] основным соединением, через которое проходит биосинтез монотерпеноидов, является лимонен. Согласно общей схеме образования монотерпеноидов (рис. 3) первоначально по реакции циклизации геранил-катион образует катион циклогексановой структуры с последующим образованием лимонена (I) и α -терпинеола (II). Как видно из табл. 2, содержание лимонена снижается в загрязненных образцах и резко возрастает содержание 1,8-цинеола.

Таблица 2

Содержание основных компонентов эфирного масла хвой ели европейской, произрастающей в условиях радиоактивного загрязнения территории

Компонент	Место отбора										Среднее
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10	
Содержание эфирного масла, % на а.с.м.											
	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,15	0,3	0,3	0,32	0,25
Содержание компонентов, мас. %											
α -Пинен	5,1	5,2	4,4	6,6	8,2	9,0	9,9	10,2	12,1	10,4	10,3
Камфен	16,7	16,9	16,6	15,5	15,8	13,6	13,8	13,8	13,4	14,5	13,4
β -Пинен	0,1	0,6	0,5	0,4	0,6	0,9	0,7	1,2	1,2	1,3	1,2
Мирцен	3,9	2,8	3,6	2,8	3,1	2,6	2,5	2,9	1,7	2,8	2,5
Δ^3 -Карен	0,2	0,1	0,3	0,0	0,2	0,3	0,3	0,2	0,8	0,2	0,3
Лимонен	7,4	8,6	8,7	11,9	10,8	14,9	14,9	15,7	13,5	15,1	15,2
1,8-Цинеол	13,2	12,9	14,3	13,4	11,2	9,5	8,5	8,5	7,9	7,5	8,7
Камфора	2,3	2,9	2,8	2,1	2,9	3,4	3,2	3,1	3,1	3,4	3,5
Борнеол	4,7	5,6	6,2	3,9	3,4	3,6	3,9	3,1	3,2	2,6	2,9
α -Терпинеол	1,9	1,9	1,8	2,2	1,2	1,5	1,2	1,4	1,5	1,7	1,5
Борнилацетат	28,5	30,0	29,8	24,6	23,1	20,8	21,8	27,2	24,3	18,9	22,5
Монотерпены	48,7	49,9	46,7	51,6	49,9	56,9	56,9	59,2	53,4	62,3	58,0
Кислородсодержащие	46,8	45,7	43,8	36,5	47,3	37,4	37,4	37,9	35,3	28,3	33,5
Сесквитерпены	1,5	2,1	3,7	9,8	2,4	4,1	4,1	2,3	2,5	3,3	2,4

Таким образом, в загрязненных образцах биосинтез терпенов смещается в направлении лимонена, далее переходящего в 1,8-цинеол. Косвенно это подтверждается увеличением содержания α -терпинеола (II) в загрязненных образцах.

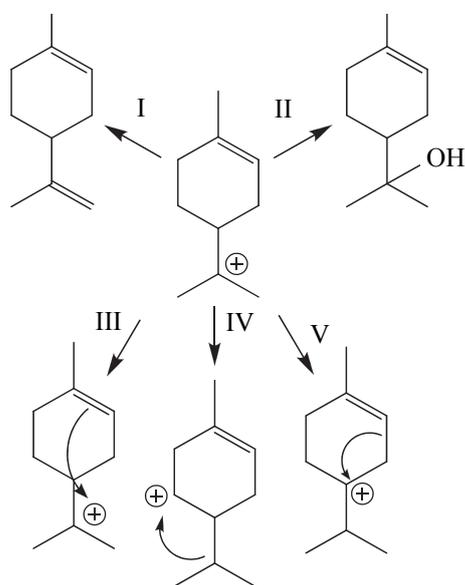


Рис. 3. Схема биосинтеза монотерпеновых углеводов

Образованию α -пинена, камфена и других бициклических монотерпенов предшествуют реакции, связанные с гидридным сдвигом, меняющим положение катионного центра в интермедиате (III, IV, V). Логично предположить, что присутствие радиоактивных элементов специфично изменяет направление данных реакций, что приводит к существенному изменению содержания бициклических терпенов.

Заключение. Таким образом, в результате исследований показано, что ель европейская, произрастающая на территории с высоким уровнем радиоактивного загрязнения, аккумулирует в хвое значительное количество радиоактивных элементов. Загрязнение хвои радиоактивными элементами приводит к изменению процессов биосинтеза вторичных метаболитов, что выражается в общем снижении содержания эфирного масла в ассимиляционном аппарате ели европейской. Кроме того, радиоактивные элементы оказывают влияние на процессы биосинтеза отдельных соединений, входящих в состав эфирного масла, а также перераспределение терпеноидов в группах, увеличивая долю кислородсодержащих соединений.

Литература

1. Статистический ежегодник Республики Беларусь. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2011. 633 с.
2. Сарнацкий В. В. Ельники: формирование, повышение продуктивности и устойчивости в условиях Беларуси. Минск: Тэхналогія, 2009. 334 с.

3. Программа развития лесного хозяйства на 2007–2011 годы. Лесное хозяйство Республики Беларусь. Современное состояние и оценка использования лесосырьевого потенциала: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 29.12.2006 № 1760 // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. URL: <http://www.pravo.by> (дата обращения: 23.10.2019).
4. Матвейко А. П. Основы рационального и комплексного использования лесных ресурсов Республики Беларусь // Лесная наука на рубеже XXI века: сб. науч. тр. Гомель, 1997. Вып. 46. С. 61–63.
5. Биохимия растений / Л. А. Красильникова [и др.]. Харьков: Торсинг, 2004. 224 с.
6. Plant secondary metabolites: occurrence, structure and role in the human diet / ed. by A. Crozier, M. N. Clifford, H. Ashihara. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2006. 372 p.
7. Радиационные эффекты у древесных растений в первый год после острого гамма-облучения леса / Р. Т. Карабань [и др.] // Лесоведение. 1978. № 1. С. 39–45.
8. Овсянникова С. В. Формы нахождения радионуклидов чернобыльского выброса в почвах Республики Беларусь: автореф. дис. ... канд. хим. наук / Белорус. гос. ун-т. Минск, 1992. 24 с.
9. Лес и Чернобыль (Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС, 1986–1994 гг.) / В. А. Ипатьев [и др.]. Минск: СТЕНЕР, 1994. 284 с.
10. Щеглов А. И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М.: Наука, 1999. 268 с.
11. Балясников И. А. Анализ антропогенного влияния на экологическую обстановку и пути ее стабилизации в Брянской области: автореф. дис. ... канд. с-х. наук / Брянская гос. инж.-технол. акад. Орёл, 2004. 24 с.
12. Еўсіевіч К. М., Бойка А. В. Акумуляцыя радыёнуклідаў кампанентамі лясных біягеацэнозаў // Весці Акадэміі навук БССР. Сер. біял. навук. 1991. № 5. С. 39–41.
13. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси (в связи с аварией на Чернобыльской АЭС) / В. И. Парфенов [и др.]. Минск: Навука і тэхніка. 1995. 582 с.
14. Кравченко В. А. Состояние растений, доминирующих в фитоценозах, загрязненных радионуклидами чернобыльского выброса: автореф. дис. ... канд. биол. наук / Ин-т радиобиологии АН Беларуси. Минск, 1997. 22 с.
15. Гродзинский Д. М. Радиобиология растений. Киев: Наук. думка, 1989. 389 с.
16. Козубов Г. М., Таскаев А. И. Радиобиологические и радиоэкологические исследования древесных растений. СПб.: Наука, 1994. 256 с.
17. Степень Р. А. Состав эфирного масла и летучих терпеноидов побегов *Pinus sylvestris* L. в Средней Сибири // Растительные ресурсы. 1995. Вып. 4. С. 63–70.
18. Полтавченко Ю. А., Рудаков Г. А. Эволюция биосинтеза монотерпеновых в семействе сосновых // Растительные ресурсы. 1973. Т. 9, вып. 4. С. 481–493.
19. Практические работы по химии древесины и целлюлозы / А. В. Оболенская [и др.]. М.: Лесная промышленность, 1965. 411 с.
20. Радиационный контроль. Отбор проб пищевых продуктов. Общие требования: СТБ 1053-2015. Введ. 07.10.2015. Минск: Госстандарт, 2015. 8 с.
21. Лобач Д. И., Тимошенко А. И., Штомпель В. П. Методические и информационные материалы для проведения практикума по дозиметрии. Минск: Гидрометеиздат, 1999. 79 с.
22. Чудинов Э. Г. Атомно-эмиссионный анализ с индукционной плазмой // Итоги науки и техники. Сер. «Аналитическая химия». 1990. Т. 2. С. 243–251.
23. Ринькис Г. Я. Методы анализа почв и растений. Рига: Зинатне, 1987. 196 с.
24. Плешков Б. П. Практикум по биохимии растений. М.: Агропромиздат, 1985. 255 с.
25. Хефтман Э. Хроматография. Практическое приложение метода. М.: Мир, 1986. 336 с.
26. Остакин А. И. Применение методов в ЭВМ. Планирование и обработка результатов эксперимента. Минск: Выш. шк., 1989. 218 с.
27. Тихомиров Ф. А., Щеглов А. И. Последствия радиоактивного загрязнения лесов в зоне влияния аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1997. Т. 37, вып. 4. С. 664–672.
28. Антропогенная радионуклидная аномалия и растения / Д. М. Гродзинский [и др.]. Киев: Лыбидь, 1991. 158 с.
29. ЯМР анализ состава эфирных масел хвои ели обыкновенной в зависимости от атмосферного загрязнения районов г. Минска / Е. Д. Скаковский [и др.] // Химия растительного сырья. 2013. № 3. С. 121–128.
30. Shpak S. I., Lamotkin S. A., Lamotkin A. I. Chemical composition of *Pinus sylvestris* essential oil from contaminated areas // Chemistry of Natural Compounds. 2007. Vol. 43, No. 1. P. 55–58.

References

1. *Statisticheskiy ezhegodnik Respubliki Belarus'* [Statistical yearbook of the Republic of Belarus]. Minsk, Natsional'nyy statisticheskiy komitet Respubliki Belarus' Publ., 2011. 633 p (In Russian).
2. Sarnatskiy V. V. *Yel'niki: formirovaniye, povysheniye produktivnosti i ustoychivosti v usloviyakh Belarusi* [Fir-trees: formation, increase of productivity and stability in the conditions of Belarus]. Minsk, Tehnologiya Publ., 2009. 334 p.
3. *Programma razvitiya lesnogo khozyaystva na 2007–2011 gody. Lesnoe khozyaystvo Respubliki Belarus'. Sovremennoye sostoyaniye i otsenka ispol'zovaniya lesosyr'evogo potentsiala: postanovleniye Soveta Ministrov Respubliki Belarus'* [Forestry Development Program for 2007–2011. Forestry of the Republic of Belarus. Current status and assessment of the using of forest raw materials potential. Decree of Council of Ministers of the Republic of Belarus 29.12.2006 No. 1760]. Available at: <http://www.pravo.by> (accessed 23.10.2019).
4. Matveyko A. P. Fundamentals of the rational and integrated using of forest resources of the Republic of Belarus. *Lesnaya nauka na rubezhe XXI veka* [Forest science at the turn of XXI century], 1997, no. 46, pp. 61–63 (In Russian).
5. Krasil'nikova L. A., Avksent'yeva O. A., Zhmurko V. V., Sadovnichenko Yu. A. *Biohimiya rasteniy* [Biochemistry of plants]. Kharkiv, Torsing Publ., 2004. 224 p.
6. *Plant secondary metabolites: occurrence, structure and role in the human diet*. Edited by A. Crozier, M. N. Clifford, H. Ashihara. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2006. 372 p.
7. Karaban' R. T., Mishenkov N. N., Prister B. S., Aleksakhin R. M., Tikhomirov F. A., Romanov G. N., Naryshkin M. A. Radiation effects in woody plants in the first year after acute gamma radiation of a forest. *Lesovedeniye* [Forest science], 1978, no. 1, pp. 39–45 (In Russian).
8. Ovsyannikova S. V. *Formy nahozhdeniya radionuklidov chernobyl'skogo vybroza v pochvakh Respubliki Belarus': avtoref. dis. ... kand. him. nauk* [Forms of finding radionuclides of Chernobyl ejection in the soils of the Republic of Belarus. Abstract of thesis PhD (Chemistry)]. Minsk, 1992. 24 p.
9. Ipat'ev V. A., Bulavik I. M., Dvornik A. M. *Les i Chernobyl' (Lesnye ekosistemy posle avarii na Chernobyl'skoy AES, 1986–1994 gg.)* [Forest ecosystems after the Chernobyl accident, 1986–1994]. Minsk, STENER Publ., 1994. 284 p.
10. Shcheglov A. I. *Biogeochemiya tekhnogennykh radionuklidov v lesnykh ekosistemakh: po materialam 10-letnikh issledovaniy v zone vliyaniya avarii na CHAES* [Biogeochemistry of technogenic radionuclides in forest ecosystems: based on materials from 10 years of research in the impact zone of the Chernobyl accident]. Moscow, Nauka Publ., 1999. 268 p.
11. Balyasnikov I. A. *Analiz antropogenogo vliyaniya na ekologicheskuyu obstanovku i puti ee stabilizatsii v Bryanskoy oblasti: avtoref. dis. ... kand. s-h. nauk* [Analysis of anthropogenic impact on the ecological situation and ways of its stabilization in the Bryansk region. Abstract of thesis PhD (Agriculture)]. Oryol, 2004. 24 p.
12. Eusievich K. M., Boyka A. V. Radionuclide accumulation by components of forest biogeocenoses. *Vesti Akademii nauk BSSR* [News of BSSR Academy of sciences], 1991, no. 5, pp. 39–41 (In Belarusian).
13. Parfenov V. I., Yakushev B. I., Martinsovich B. S. *Radioaktivnoye zagryazneniye rastitel'nosti Belarusi (v svyazi s avariey na Chernobyl'skoy AES)* [Radioactive contamination of vegetation of Belarus (in connection with the accident at the Chernobyl nuclear power plant)]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1995. 582 p.
14. Kravchenko V. A. *Sostoyaniye rasteniy, dominiruyushchikh v fitocenozaakh, zagryaznennykh radionuklidami chernobyl'skogo vybroza: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* [Condition of a plant dominating in phytocenoses contaminated with radionuclides of the Chernobyl discharge. Abstract of thesis PhD (Biology)]. Minsk, 1997. 22 p.
15. Grodzinskiy D. M. *Radiobiologiya rasteniy* [Radiobiology of plants]. Kiev, Nauk. dumka Publ., 1989. 389 p.
16. Kozubov G. M. *Radiobiologicheskiye i radioekologicheskiye issledovaniya drevesnykh rasteniy* [Radiobiological and radioecological studies of woody plants]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1994. 256 p.
17. Stepen' R. A. The composition of essential oils and volatile terpenoids shoots *Pinus sylvestris* L. in Central Siberia. *Rastitel'nyye resursy* [Plant resources], 1995, issue 4, pp. 63–70 (In Russian).
18. Poltavchenko Yu. A. The evolution of monoterpene biosynthesis in pine the family. *Rastitel'nye resursy* [Plant resources], 1973, vol. 9, no. 4, pp. 481–493 (In Russian).
19. Obolenskaya A. V., Schegolev V. P., Akim G. L., Akim E. L., Kossovich N. L., Yemel'yanova I. Z. *Prakticheskie raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Practical work in the chemistry of wood and cellulose]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 411 p.

20. STB 1053-98. Radiation control. Sampling food. General requirements. Minsk, Gosstandart Publ., 1998. 8 p. (In Russian).
21. Lobach D. I., Timoshchenko A. I., Shtompel' V. P. *Metodicheskiye i informatsionnyye materialy dlya provedeniya praktikuma po dozimetrii* [Methodical and informational materials for the workshop on dosimetry]. Minsk, Gidrometeoizdat Publ., 1999. 79 p.
22. Chudinov E. G. Atomic emission analysis with induction plasma. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. "Analitycheskaya khimiya"* [Results of science and technology. Ser. "Analytical chemistry"], 1990, vol. 2. pp. 243–251 (In Russian).
23. Rin'kis G. Ya. *Metody analiza pochv i rasteniy* [Methods of soil and plant analysis]. Riga, Zinatne Publ., 1987. 196 p.
24. Pleshkov B. P. *Praktikum po biohimii rasteniy* [Workshop on plant biochemistry]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 255 p.
25. Heftman E. *Hromatografiya. Prakticheskoe prilozhenie metoda* [Chromatography. Practical application of the method]. Moscow, Mir Publ., 1986. 336 p.
26. Ostakin A. I. *Primeneniye metodov v EVM. Planirovaniye i obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [Application of methods in a computer. Planning and processing the results of the experiment]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 1989. 218 p.
27. Tihomirov F. A., Shcheglov A. I. Consequences of radioactive pollution of forests in the area of Chernobyl accident. *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology], 1997, vol. 37, no. 4, pp. 664–672 (In Russian).
28. Grodzinskij D. M., Kolomiyets K. D., Kutlakhmedov Yu. A. *Antropogennaya radionuklidnaya anomalija i rasteniya* [Anthropogenic radionuclide anomaly and plants]. Kiev, Lybid' Publ., 1991. 158 p.
29. Skakovskiy E. D. NMR analysis of the composition of essential oils of needles of spruce depending on the atmospheric pollution of the districts of Minsk. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant materials], 2013, no. 3, pp. 121–128 (In Russian).
30. Shpak S. I., Lamotkin S. A., Lamotkin A. I. Chemical composition of *Pinus sylvestris* essential oil from contaminated areas. *Chemistry of Natural Compounds*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 55–58.

Информация об авторах

Ламоткин Сергей Александрович – кандидат химических наук, доцент кафедры физико-химических методов сертификации продукции. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: jossby@rambler.ru

Скаковский Евгений Доминикович – кандидат химических наук, доцент, заведующий лабораторией физико-химических методов исследования. Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Сурганова, 13, Республика Беларусь). E-mail: sed@ifoch.bas-net.by

Гиль Елизавета Валерьевна – магистрант, инженер кафедры физико-химических методов сертификации продукции. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hillisa@bk.ru

Information about the authors

Lamotkin Sergey Aleksandrovich – PhD (Chemistry), Assistant Professor, the Department of Physical-Chemical Methods of Products Certification. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: jossby@rambler.ru

Skakovskiy Eugene Dominikovich – PhD (Chemistry), Associate Professor, Head of the Laboratory of Physico-Chemical Methods of Research. Institute of Physical Organic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus (13, Sorganova str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sed@ifoch.bas-net.by

Gil' Yelizaveta Valer'evna – Master's degree student, engineer, the Department of Physical-Chemical Methods of Products Certification. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hillisa@bk.ru

Поступила 01.11.2019