

## ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА СОСТАВА ЖИВИЦЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ МЕТОДОМ ЯМР

Е. Д. Скаковский<sup>1\*</sup>, Л. Ю. Тычинская<sup>1</sup>, О. А. Молчанова<sup>1</sup>, Е. И. Гапанькова<sup>1</sup>,  
И. А. Латышевич<sup>1</sup>, С. Е. Богусевич<sup>2</sup>, С. А. Ламоткин<sup>3</sup>

УДК 543.429.23:665.944.54

<sup>1</sup> Институт физико-органической химии НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь; e-mail: sed@ifoch.bas-net.by

<sup>2</sup> Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>3</sup> Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

(Поступила 7 декабря 2022)

Методом ЯМР изучен состав живицы сосны обыкновенной в концентрированных и разбавленных растворах в восьми дейтерированных растворителях и  $CCl_4$ . Установлено, что разбавленные растворы в хлороформе- $d$ , хлористом метиле- $d_2$  и уксусной кислоте- $d_4$  содержат значительно меньше левопимаровой кислоты, чем концентрированные, при одновременном возрастании количества абиединовой кислоты. Предполагено, что высокая скорость изомеризации левопимаровой кислоты в абиединовую в разбавленных растворах при комнатной температуре обусловлена каталитическими реакциями, связанными с кислотным характером растворителей, что необходимо учитывать при проведении ЯМР-анализа. При “старении” живицы идут реакции с кислородом воздуха с образованием дегидроабиединовой кислоты. Сравнительный анализ показал, что при установлении состава живицы методом ЯМР наиболее приемлемым растворителем является дейтерированный бензол.

**Ключевые слова:** спектр ЯМР; живица сосны обыкновенной; абиединовая, дегидроабиединовая, левопимаровая кислоты.

The NMR method has been used to study the composition of Scotch pine oleoresin in concentrated and dilute solutions in 8 deuterated solvents and carbon tetrachloride ( $CCl_4$ ). It has been established that dilute solutions in chloroform- $d$ , methylene chloride- $d_2$  and acetic acid- $d_4$  contain significantly less levopimaric acid than the concentrated ones, while the amount of abietic acid increases. It is assumed that the high rate of isomerization of levopimaric acid to abietic acid in dilute solutions at room temperature is due to catalytic reactions associated with the acidic nature of solvents, which must be taken into account when performing NMR-analysis. During the “aging” of oleoresin, reactions with atmospheric oxygen occur with the formation of dehydroabietic acid. Comparative analysis has shown that deuterated benzene is the most acceptable solvent when determining the composition of oleoresin with NMR method.

**Keywords:** NMR spectra; Scotch pine oleoresin; abietic, dehydroabietic, levopimaric acids.

**Введение.** Лес в Беларуси занимает почти 40 % ее территории. Среди лесных культур преобладает сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L., относящаяся к семейству сосновые *Pinaceae*. Древесина сосны смолиста, прочна и широко используется в строительстве. Другим важным продуктом является смола-живица, образующаяся в смоляных ходах и при подсочке вытекающая наружу. Живица —

## FEATURES OF THE ANALYSIS OF SCOTCH PINE OLEORESIN COMPOSITION WITH NMR METHOD

E. D. Skakovsky<sup>1\*</sup>, L. Yu. Tychinskaya<sup>1</sup>, O. A. Molchanova<sup>1</sup>, E. I. Gapankova<sup>1</sup>, I. A. Latyshevich<sup>1</sup>,  
S. E. Bogushevich<sup>2</sup>, S. A. Lamotkin<sup>3</sup> (<sup>1</sup> Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: sed@ifoch.bas-net.by; <sup>2</sup> Institute of Bioorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; <sup>3</sup> Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus)

ценное сырье для химической промышленности, состоящее из летучих соединений (моно- и сесквитерпенов и дитерпенов (преимущественно смоляных кислот (СК)). При перегонке с водяным паром летучие соединения отделяются с образованием скипидара, СК образуют канифоль. Из скипидара получают лаки, растворители, ароматизаторы, клеящие вещества и другие продукты. Канифоль применяется в мыловарении, бумажной, резинотехнической и лакокрасочной промышленности.

Широкий спектр использования живицы в различных областях делает обоснованным анализ ее состава с целью получения оптимальными способами продуктов с потребительскими свойствами и наилучшим подбором соединений. Большое количество работ посвящено изучению состава живицы сосны. Из используемых при этом методов наиболее известна и давно применяется газожидкостная хроматография (ГЖХ). Этим методом проанализирована живица сосны тяжелой (*P. ponderosa*) и сосны Жеффрея (*P. jeffreyi*) [1]. Однако ГЖХ-анализ не позволяет определить индивидуально левопимаровую и палюстровую кислоты, поскольку они выходят одним пиком.

Более достоверную и обширную информацию получают при совместном применении ГЖХ и масс-спектрометрии. В [2] проведен анализ живицы сосны тонкинской (*P. tonkinensis*) и сосны меркуза (*P. merkusii*). Для определения СК методом ГЖХ необходимо преобразовывать их в метиловые эфиры, что создает некоторые трудности.

Метод ЯМР позволяет анализировать живицу без предварительной пробоподготовки. Достаточно растворить ее в подходящем растворителе, в качестве которого чаще всего используется дейтерированный хлороформ ( $\text{CDCl}_3$ ).

Для установления строения СК ряда пимарана и изоимарана выделены из живичной канифоли сосны обыкновенной (*P. sylvestris*) и проанализированы методом  $^{13}\text{C}$  ЯМР в четыреххлористом углеороде ( $\text{CCl}_4$ ) и  $\text{CDCl}_3$  [3]. С применением протонного магнитного резонанса изучено окисление сосновой живицы, а также ее изомеризация, полимеризация и деструкция под воздействием температуры [4]. На основе анализа живицы сосны обыкновенной методом ЯМР в  $\text{CDCl}_3$ -растворах установлено [5], что в составе живицы из менее промышленно загрязненных районов Беларуси выше содержание левопимаровой кислоты и ниже — абиединовой и изоимаровой кислот. Сравнительный анализ методом ЯМР компонентного состава растворов живицы сосны обыкновенной в  $\text{CDCl}_3$ , отобранной в чистых и радиационно загрязненных территориях Беларуси, показал такую же зависимость содержания СК, как и от промышленного загрязнения [6].

В работе [7] после гидродистилляции живицы сосны обыкновенной получены бальзамы, состоящие из СК. На основании ЯМР-анализа этих СК в  $\text{CDCl}_3$  определены химические сдвиги основных протонов и атомов углерода, позволившие идентифицировать и количественно измерить содержание СК в анализируемых бальзамах. Установлено, что наборы СК и их соотношения в бальзамах живиц, полученных из произрастающих в различных районах сосен, практически не различаются. Длительное хранение бальзамов приводит к обогащению их абиединовой кислотой.

Метод ЯМР на ядрах  $^{13}\text{C}$  использован при установлении состава 23 образцов живицы сосны приморской (*P. pinaster*), произрастающей на Корсике [8]. СК были предварительно отделены от нейтральных терпенов и растворены в  $\text{CDCl}_3$ . Образцы разделены на два кластера: с большим содержанием дегидроабиединовой кислоты и малым содержанием левопимаровой, во втором кластере преобладала левопимаровая кислота.

Таким образом, существует достаточно много публикаций, посвященных применению ЯМР-спектроскопии для анализа живицы или экстрактов различных частей сосен. Большинство исследований проведено с  $\text{CDCl}_3$  растворами. В ряде работ указывается на большой разброс в определяемом содержании левопимаровой кислоты.

При изучении состава живицы сосен подрода *Pinus* методом ЯМР ранее нами установлено [9], что он зависит от многих факторов (вида сосны, времени и места сбора, а также условий сбора и хранения образцов). Кроме того, вследствие реакций изомеризации и окисления происходит перераспределение компонентного состава СК. Наибольшие изменения в содержании претерпевают левопимаровая, абиединовая, палюстровая, неоабиединовая и дегидроабиединовая кислоты. Предполагается, что содержание компонентов в составе живицы может зависеть от условий записи ЯМР-спектров.

Цель настоящей работы — ЯМР-анализ состава живицы сосны обыкновенной, проведенный в различных растворителях и при разных концентрациях исходной смолы.

**Эксперимент.** Живицу сосны обыкновенной собрали с дерева ~70 лет в Телеханском лесничестве в августе 2021 г. и поместили в закрытом сосуде в холодильник при температуре 10 °С. Для ЯМР-анализа использовали восемь доступных дейтерированных растворителей и  $\text{CCl}_4$ . В 0.7 мл каж-

дого из них растворяли живицу в количестве 10 и 110 мг, за исключением циклогексана- $d_{12}$  ( $C_6D_{12}$ ), в котором растворилось только 64 мг. После растворения образцы фильтровались, а спектры регистрировались на следующий день. Для разбавленных растворов проводилась запись только  $^1H$ , а для концентрированных — как  $^1H$ -, так и  $^{13}C$ -спектров.

Спектры ЯМР зарегистрированы на спектрометре AVANCE-500 (Bruker) с рабочими частотами 500 и 125 МГц для ядер  $^1H$  и  $^{13}C$ , соответственно, при температуре 20 °С. Дейтронная стабилизация осуществлялась с использованием сигнала растворителя, в случае  $CCl_4$  — сигнала  $C_6D_{12}$ , добавленного в количестве ~10 % в основной растворитель. В качестве внутреннего стандарта для ядер  $^1H$  использован сигнал протонов не полностью дейтерированных молекул растворителей, в случае спектров на ядрах  $^{13}C$  репером служил сигнал самого растворителя. Протонные спектры регистрировали в “количественном” режиме с использованием 30° импульса, а углеродные — 60°. Релаксационная задержка 5 с в обоих случаях. Для идентификации соединений в идентичных условиях предварительно зарегистрированы спектры  $^1H$  и  $^{13}C$  предполагаемых СК и других терпенов. Левопимаровая кислота выделена из живицы сосны обыкновенной в 2007 г., содержание основного компонента 92 %, хранилась в закрытой посуде при комнатной температуре. Спектр левопимаровой кислоты в  $CDCl_3$  (5 мг в растворе) записывался дважды: через сутки и через 8 сут после растворения. Раствор сохранялся при комнатной температуре.

Количество накоплений для спектров  $^1H$  составляло 256, для спектров  $^{13}C$  (регистрировали с подавлением протонного взаимодействия) 1024. Спектры на ядрах  $^{13}C$  необходимы для более полной идентификации компонентов живицы.

Экспериментальные данные получены и обработаны с помощью пакета программ XWIN-NMR 3.5. Количественные расчеты проведены на основании интегральных интенсивностей сигналов соответствующих соединений в  $^1H$  ЯМР-спектрах. Относительная ошибка измерений ~4 %.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 показаны фрагменты  $^1H$  ЯМР-спектров растворов в  $CDCl_3$  живицы сосны обыкновенной малой и большой концентраций. Идентифицированы восемь СК: абиетиновая (1), дегидроабиетиновая (2), изопимаровая (3), левопимаровая (4), неоабиетиновая (5), палюстровая (6), пимаровая (7) и сандаракопимаровая (8), а также шесть монотерпенов: камфен (9),  $\Delta^3$ -карен (10), лимонен (11), мирцен (12),  $\alpha$ -пинен (13) и  $\beta$ -пинен (14). Обнаружены незначительные количества дегидроабиеталя (15). На рисунках цифрами обозначены ароматические, олефиновые и альдегидный протоны соответствующих соединений.

Отнесение сигналов в спектрах ЯМР дано в работах [7, 10—13]. Практически все идентифицированные соединения имеют неперекрывающиеся сигналы в области альдегидных, ароматических и олефиновых протонов. Это позволило количественно определить присутствующие соединения на основании интегральных интенсивностей линий. Полученные данные (табл. 1) демонстрируют, что содержания компонентов живицы в  $CDCl_3$  сильно различаются для разных концентраций. Так, левопимаровая кислота практически отсутствует в растворе 10 мг живицы, но ее количество составляет 19.9 % в образце, содержащем 110 мг живицы. Спектры зарегистрированы в один день. Одновременно с резким уменьшением содержания левопимаровой кислоты при разбавлении увеличивается количество в растворе абиетиновой кислоты (36.3 % против 13.8 %). Такое изменение в содержании компонентов живицы характерно при ее нагревании.

Ранее была изучена термическая изомеризация левопимаровой кислоты в твердом состоянии в интервале температур 80—170 °С [11]. Обнаружено, что в этих условиях образуются абиетиновая, неоабиетиновая и палюстровая кислоты. Присутствие кислорода дает также дегидроабиетиновую кислоту. Кроме того, существует минорный процесс, приводящий к незначительным количествам пимаровой кислоты. Повышение температуры ускоряет реакции изомеризации. Однако образец левопимаровой кислоты, 15 лет хранившийся в открытом состоянии при комнатной температуре, полностью разложился.

Эти наблюдения побудили проверить поведение левопимаровой кислоты в растворе (5 мг в 0.7 мл  $CDCl_3$ ). На рис. 2 показаны фрагменты  $^1H$  ЯМР-спектров, зарегистрированных через 1 и 8 сут после приготовления раствора и хранения его при комнатной температуре. В первом случае наблюдается следующее содержание СК (мол. %): абиетиновая 10.1, дегидроабиетиновая 2.9, левопимаровая 72.5, неоабиетиновая 2.2 и палюстровая 10.1. Во втором случае отсутствует исходная левопимаровая кислота, а содержание остальных СК следующее (мол. %): абиетиновая 45.0, дегидроабиетиновая 6.7, неоабиетиновая 5.5 и палюстровая 40.8. Таким образом, растворенная в  $CDCl_3$  левопимаровая кислота при комнатной температуре эффективно изомеризуется в абиетиновую и палюстровую кислоты и

дает незначительные количества неоабиетиновой. Дегидроабиетиновая кислота, по-видимому, получается в реакции диспропорционирования с кислородом воздуха. Можно предположить, что высокие скорости изомеризации при комнатной температуре обусловлены каталитическими реакциями, например кислотным катализом (вследствие электроноакцепторного действия трех атомов хлора хлороформ является весьма сильной СН кислотой).

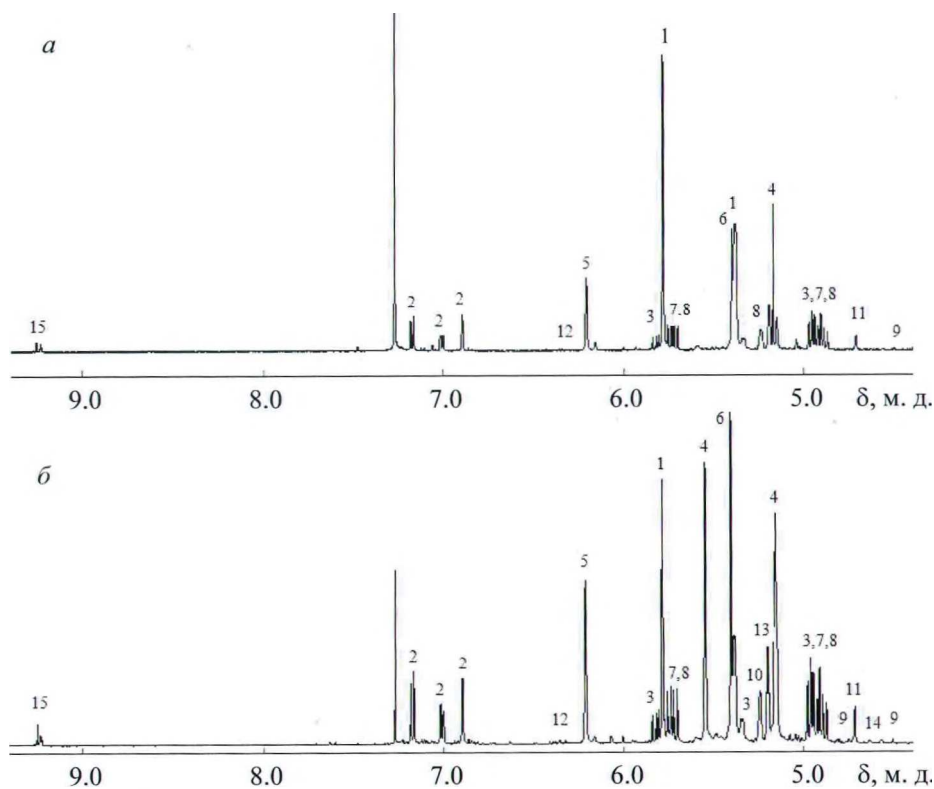


Рис. 1. Фрагменты  $^1\text{H}$  ЯМР-спектров растворов живицы в  $\text{CDCl}_3$ : в растворе 10 (*a*) и 110 мг (*b*) живицы

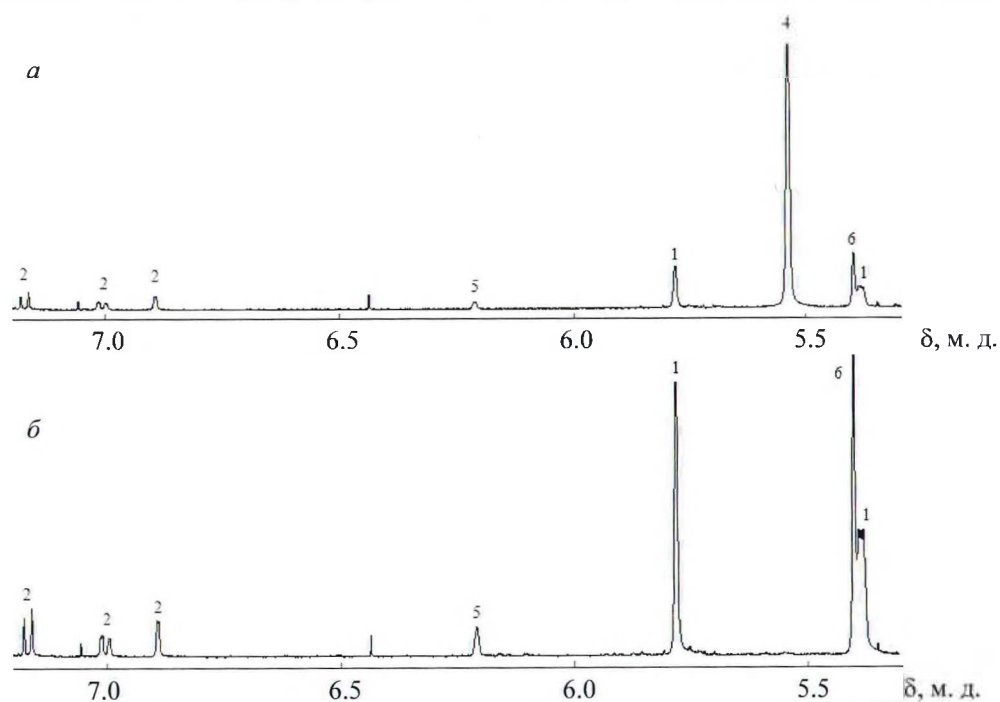


Рис. 2. Фрагменты  $^1\text{H}$  ЯМР-спектров раствора 5 мг левопимаровой кислоты в  $\text{CDCl}_3$  через 1 (*a*) и 8 сут (*b*) после приготовления раствора

**Т а б л и ц а 1. Содержание компонентов живицы сосны обыкновенной в различных растворителях (мол. %)**

№	Соединение	CDCl <sub>3</sub>		CD <sub>2</sub> C(O)OD		CD <sub>2</sub> C(O)CD <sub>3</sub>		C <sub>6</sub> D <sub>6</sub>		CCl <sub>4</sub>		C <sub>6</sub> D <sub>12</sub>		CD <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>		DMSO- <i>d</i> <sub>6</sub>		CD <sub>3</sub> OD	
		Количество живицы в растворе, мг																	
		10	110	10	110	10	110	10	110	10	110	10	64	10	110	10	110	10	110
<i>Кислоты</i>																			
1	Абиетиновая	36.3	13.8	15.8	15.3	7.2	8.0	8.6	8.7	9.0	8.3	8.6	8.5	10.2	8.9	8.4	8.8	8.0	8.0
2	Дегидроабиетиновая	4.6	4.3	7.7	7.8	10.8	7.3	5.0	5.8	3.8	4.2	7.5	7.3	7.6	7.2	7.5	7.2	6.8	6.5
3	Изопимаровая	4.4	4.3	4.3	4.7	5.6	5.1	4.0	4.5	4.3	4.5	4.4	5.1	5.1	4.9	5.2	4.6	5.3	5.5
4	Левопимаровая	0.2	19.9	11.0	15.3	16.1	21.1	28.1	28.1	27.8	27.9	19.4	19.4	15.8	22.2	22.1	24.1	19.2	20.9
5	Неоабиетиновая	11.0	11.7	6.3	7.5	6.8	7.3	9.5	9.4	10.1	10.1	7.0	7.2	6.9	8.0	8.0	9.1	7.5	7.8
6	Палюстровая	16.5	17.2	11.7	12.9	12.6	13.4	12.6	13.0	15.1	16.0	12.8	13.1	14.5	13.9	13.7	12.9	12.4	12.3
7	Пимаровая	7.0	7.5	7.8	8.1	9.7	10.3	6.5	6.5	7.8	8.0	9.0	8.7	9.9	9.2	9.0	8.6	8.7	8.3
8	Сандаракимаровая	2.0	2.1	1.2	1.3	0.9	1.4	1.8	1.9	1.4	1.5	1.3	1.4	1.7	1.6	1.7	1.5	1.7	1.8
<i>Моноотерпены</i>																			
9	Камфен	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
10	Δ <sup>3</sup> -карен	4.3	4.5	4.3	4.1	6.1	6.2	7.5	7.5	4.3	4.5	6.0	6.6	7.6	6.3	5.7	5.0	8.5	7.3
11	Лимонен	0.9	1.0	0.8	0.9	0.9	1.5	0.2	0.2	0.9	0.9	1.3	1.5	1.1	0.9	1.0	0.9	2.0	2.2
12	Мирцен	0.5	0.7	0.1	0.1	0.4	0.5	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
13	α-Пинен	9.1	9.4	7.0	8.5	10.4	10.2	8.7	8.0	7.2	5.9	13.5	13.1	10.4	7.7	8.6	8.2	10.6	10.4
14	β-Пинен	0.3	0.3	0.1	0.2	0.5	1.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<i>Альдегид</i>																			
15	Дегидроабиеталь	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3

Из доступных дейтерированных органических кислот использована уксусная-*d*<sub>4</sub>. Действительно, при разбавлении раствора живицы содержание левопимаровой кислоты незначительно уменьшается (с 15.3 до 11.0 %). Однако это практически не сказывается на относительном содержании каких-либо СК, в том числе абиетиновой, хотя ее в обоих случаях становится больше. По-видимому, в данном случае концентрация не важна для изомеризации.

Уменьшение содержания левопимаровой кислоты и увеличение концентрации абиетиновой при разбавлении, но в значительно меньших пропорциях наблюдается и в хлористом метиле (CD<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>). Меньшее ее количество определяется и при разбавлении раствора в ацетоне-*d*<sub>6</sub> (CD<sub>3</sub>C(O)CD<sub>3</sub>), но обусловлено это не изомеризацией, а диспропорционированием с кислородом, поскольку фиксируется рост содержания дегидроабиетиновой кислоты. В остальных растворителях содержание левопимаровой кислоты не зависит от концентрации живицы, а наибольшее ее количество содержится в дейтерированном бензоле C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> (28.1 %) и CCl<sub>4</sub> (27.9 %). Это количество, по-видимому, и продуцирует сосна обыкновенная.

Кроме изомеризации в растворах живицы из-за большого количества соединений с двойными связями протекают реакции полимеризации, окисления и диспропорционирования. Наиболее заметна реакция с кислородом, вследствие которой образуется дегидроабиетиновая кислота.

Одним из наиболее инертных растворителей является циклогексан-*d*<sub>12</sub>. Однако оказалось, что живица в нем плохо растворяется. В конечном итоге в растворе увеличивается относительное количество моноотерпенов (особенно α-пинена), лучше растворимых, чем СК. В диметилсульфоксиде-*d*<sub>6</sub> (DMSO-*d*<sub>6</sub>) разбавление приводит к незначительному уменьшению содержания левопимаровой кислоты, но в отличие от CDCl<sub>3</sub> несколько увеличивается доля палюстровой, а не абиетиновой кислоты. Кроме того, DMSO в процессе хранения интенсивно поглощает атмосферную воду, что загрязняет <sup>1</sup>H-спектр раствора живицы и ухудшает ее растворимость. Это делает DMSO-*d*<sub>6</sub> не самым удобным растворителем для анализа.

Метанол-*d*<sub>4</sub> (CD<sub>3</sub>OD) в качестве растворителя дает результаты, мало зависящие от концентрации живицы. Однако сигналы остаточных протонов гидроксила и растворенной воды закрывают область спектра, удобную для анализа, что делает этот растворитель не совсем удобным для исследования состава живицы.

Наиболее достоверную информацию о составе вырабатываемой сосной живицы, на наш взгляд, дает изучение ЯМР-спектров растворов в  $\text{CCl}_4$  и  $\text{C}_6\text{D}_6$ . Ранее  $\text{CCl}_4$  широко использовался в ЯМР-спектроскопии. Однако для рутинной записи спектров на ЯМР-Фурье-спектрометрах необходимы дейтерированные растворители для осуществления стабилизации магнитного поля. Поэтому в случае использования в качестве растворителя  $\text{CCl}_4$  возникают неудобства. Таким образом, из рассмотренных девяти растворителей  $\text{C}_6\text{D}_6$  наиболее приемлем при анализе состава живицы сосны обыкновенной методом ЯМР. Использование одного из наиболее применяемых в ЯМР растворителей  $\text{CDCl}_3$  дает результаты, близкие к реальному содержанию левопимаровой и других смоляных кислот, только в случае большой концентрации живицы.

**Заключение.** В ходе исследования методом ЯМР высокого разрешения состава живицы сосны обыкновенной, растворенной в различных растворителях, показано, что результаты могут сильно различаться из-за протекания в растворах реакций при комнатной температуре. Главной при этом является реакция изомеризации левопимаровой кислоты с образованием абиетиновой и палюстровой кислот. Реакции с кислородом воздуха с образованием дегидроабиетиновой кислоты протекают в меньшей степени. Данный процесс характерен и при “старении” живицы. Сравнительный анализ показал, что для установления методом ЯМР количественного состава компонентов живицы, продуцируемой сосной обыкновенной, наиболее приемлемым растворителем является  $\text{C}_6\text{D}_6$ .

- [1] A. B. Anderson, R. Riffer, A. Wong. *Phytochemistry*, **8** (1969) 873—875
- [2] W. Lange, G. Weipmann. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **45**, N 7 (1987) 285—288
- [3] И. И. Бардышев, А. С. Дегтягенов, Т. И. Пехк, Г. С. Янковская. *ЖОрХ*, **17**, № 12 (1981) 2568—2573
- [4] В. Ю. Пузанова, Б. А. Радбиль, В. А. Ралдугин, В. А. Пентегова. *Химия древесины*, № 4 (1983) 12—14
- [5] С. И. Шпак, С. А. Ламоткин, А. И. Ламоткин, Е. Д. Скаковский. Сб. ст. XIII Всерос. конф. “Структура и динамика молекулярных систем”, 25 июня—1 июля, Яльчик, Уфа—Казань—Москва—Йошкар-Ола, **2** (2006) 455—458
- [6] С. И. Шпак, С. А. Ламоткин, А. И. Ламоткин, Е. Д. Скаковский. *Тр. БГТУ*, № 14 (2006) 165—169
- [7] Е. Д. Скаковский, Л. Ю. Тычинская, О. А. Гайдукевич, Н. Г. Козлов, А. Ю. Клюев, С. А. Ламоткин, С. И. Шпак, С. В. Рыков. *Журн. прикл. спектр.*, **75**, № 3 (2008) 411—415  
[E. D. Skakovskii, L. Yu. Tychinskaya, O. A. Gaidukevich, N. G. Kozlov, A. Yu. Klyuev, S. A. Lamotkin, S. I. Shpak, S. V. Rykov. *J. Appl. Spectr.*, **75** (2008) 439—443]
- [8] J. Ottavio, M. Paoli, J. Casanova, F. Tomi, A. Bighelli. *Chem. Biodiversity*, **16** (2019) e1800482, doi: 10.1002/cbdv.201800482
- [9] Е. Д. Скаковский, Л. Ю. Тычинская, Е. А. Гапанькова, И. А. Латышевич, А. Г. Шутова, С. Н. Шиш, С. А. Ламоткин. *Изв. Санкт-Петербург. лесотех. академии*, вып. 237 (2021) 242—257
- [10] A. Koutsaviti, E. Ioannou, M. Couladis, O. Izakou, V. Roussis. *Magn. Res. Chem.*, **55**, N 8 (2017) 772—778
- [11] Е. Д. Скаковский, Л. Ю. Тычинская, О. А. Гайдукевич, А. Ю. Клюев, С. А. Ламоткин, С. И. Шпак, С. В. Рыков. Сб. ст. XV Всерос. конф. “Структура и динамика молекулярных систем”, 30 июня—4 июля, Яльчик, Казань, **3** (2008) 172—175
- [12] N. Muto, T. Tomokuni, M. Haramoto, H. Tatemoto, T. Nakanishi, Y. Inatomi, H. Murata, A. Inada. *Biochem.*, **72**, N 2 (2008) 477—484
- [13] Е. Д. Скаковский, С. А. Ламоткин, Л. Ю. Тычинская, О. А. Молчанова, С. В. Матвейчук, Ю. М. Сорокина. *Тр. БГТУ*, № 4 (2014) 211—215