

УДК 553.97:547.91:577.117.3

DOI: 10.15372/ChUR2024547

EDN: TOMKUL

## Динамика двухлетнего постпирогенного восстановления состава биомолекул кустарников южной тайги Томской области

И. В. РУССКИХ, Е. Б. СТРЕЛЬНИКОВА

Институт химии нефти Сибирского отделения РАН,  
Томск, Россия

E-mail: rus@ipc.tsc.ru

(Поступила 15.12.2023; принята к печати 22.12.2023)

### Аннотация

Методом хромато-масс-спектрометрии исследована динамика состава биомолекул листьев кустарников *Caragana arborescens* и *Sorbus aucuparia*, типичных для южно-таежной природно-климатической зоны, в процессе постпирогенного восстановления территории вблизи д. Головина Томской области через 3 месяца, 1 и 2 года после пожара. Идентифицированы ациклические органические соединения: *n*-алканы, жирные кислоты, *n*-алкан-2-оны, альдегиды, *n*-алканолы. В листьях *S. aucuparia* обнаружен длинноцепочечный насыщенный спирт 10-нонакозанол. В составе изопреноидных структур в листьях растений обнаружены алифатические дитерпеноиды – фитон и изомеры фитола, тритерпен – сквален, а также нафтоароматические соединения – витамин Е (токоферол) и витамин К1 (фитанодион). В листьях *S. aucuparia* через 3 месяца и через 1 год после пожара наблюдаются повышенные содержания фитола и жирных кислот, которые уменьшаются до фоновых значений через 2 года. Содержание сквалена в листьях *S. aucuparia*, снизившееся в результате пожара, резко увеличивается на следующий год и остается на уровне, значительно превышающем фоновый, и через 2 года. Наибольшее влияние пожар оказал на длинноцепочечный спирт 10-нонакозанол, обнаруженный в большом количестве в листьях *S. aucuparia*. В результате пожара его содержание падает до следовых количеств с последующим небольшим ростом на следующий год и скачкообразным увеличением вплоть до фоновых значений через 2 года. В процессе двухлетнего постпирогенного восстановления наблюдаются изменения молекулярно-массового распределения ациклических соединений. В листьях *S. aucuparia*, отобранных через 3 месяца и 1 год после пожара, по сравнению с фоновыми участками наблюдается смещение распределения от более высокомолекулярных гомологов к менее высокомолекулярным *n*-алканам и *n*-альдегидам, а в *C. arborescens* – к *n*-алкан-2-онам. Через 2 года после пожара распределение ациклических соединений на постпирогенном участке становится близким фоновому.

**Ключевые слова:** пожар, кустарники, хромато-масс-спектрометрия, *n*-алканы, 10-нонакозанол

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших экологических факторов, воздействующих на растительный покров наряду с температурным режимом, освещенностью и увлажнением, является огонь. За последние десятилетия под влиянием изменения климата и деятельности человека площади пожаров в России возросли более чем вдвое. Исследователи отмечают, что площадь территорий, под-

верженных пожарам, в пожароопасные сезоны может достигать нескольких миллионов гектаров. Большое количество пожаров как по числу, так и по площади сосредоточено в таежной зоне [1]. Пожары, повторяющиеся неоднократно на определенной территории, оцениваются как экзогенный локально-катастрофический фактор, ведущий к трансформации природных экосистем [2].

Практически не изучены биохимические процессы, происходящие при постпирогенном вос-

становлении растений. Известно, что растения способны реагировать на изменения окружающей среды посредством биосинтеза вторичных метаболитов. Действительно, стресс, вызванный огнем, способствует биосинтезу этих соединений (например, терпеноидов, фенольных соединений) [3]. Этот усиленный биосинтез обеспечивает устойчивость растительности к новым пожарам, которые могут быть еще более серьезными [4].

Термическая деструкция биомассы во время пожара вызывает изменения и в структуре распределения липидов [5, 6]. Однако влияние процессов постпирогенной трансформации на состав липидов биомассы недостаточно исследовано. Есть данные, что в структуре распределения липидов в некоторых почвах Испании, на которые повлияло выжигание растительности, преобладали короткоцепочечные *n*-алканы с четным числом атомов углерода [7], в то время как в не подверженной влиянию пожара биомассе преобладают длинноцепочечные *n*-алканы с нечетным числом атомов углерода [8, 9].

Таким образом, биомолекулы растений можно рассматривать как индикаторы или маркеры постпирогенного восстановления. Цель настоящей работы – оценить динамику восстановления растений после пожара по составу и распределению биомолекул липидов в кустарниках, типичных для южно-таежной природно-климатической зоны.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Листья растений *Caragana arborescens* (карагана древовидная) и *Sorbus aucuparia* (рябина обыкновенная) были отобраны западнее деревни Головина на территории Томского района Томской области (табл. 1). Пирогенно-нарушенная территория представляет собой сосновый бор с подростом на возвышенностях и понижениях. Пожар произошел в конце апреля 2020 г. и охватил площадь около 0.2–0.3 га. Пробы листьев с фоновых участков отбирали с подветренной стороны примерно в 800–1000 м от горелого участка леса.

Для определения состава органического вещества (ОВ) липидные компоненты из высушенных растений и торфа были выделены экстракцией 7%-м раствором метанола в хлороформе при 60 °С. Содержание и индивидуальный состав органических соединений определяли методом хромато-масс-спектрометрии с использованием магнитного хромато-масс-спектрометра Trace-DSQ (Thermo Scientific, Германия). Режим работы хроматографа: кварцевая капиллярная

хроматографическая колонка Thermo Scientific (внутренний диаметр – 0.25 мм, длина – 30 м), толщина фазы – 0.25 мкм, неподвижная фаза – TR-35MS, газ-носитель – гелий, температура испарителя – 250 °С, температура интерфейса – 250 °С. Индивидуальные соединения идентифицировали по масс-фрагментограммам в программе X-Calibur 10 с использованием компьютерной библиотеки масс-спектров NIST.

Для оценки восстановительных процессов растительности после пожара применяли индекс нечетности CPI (Carbon Preferences Index) – отношение нечетных *n*-алканов к четным, CPI рассчитывали в ряду  $C_{20}-C_{32}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Среди линейных структур в листьях растений идентифицированы *n*-алканы, *n*-алкан-2-оны, *n*-альдегиды, *n*-алканола, насыщенные и ненасыщенные жирные кислоты (ЖК) (табл. 2, рис. 1). В образцах рябины обнаружен длинноцепочечный насыщенный спирт 10-нонакозанол. В составе изопреноидных структур в листьях растений обнаружены алифатические дитерпеноиды – фитон и изомеры фитола, тритерпен – сквален, который является промежуточным соединением в биологическом синтезе стероидов, а также нафтенароматические соединения – витамин Е (токоферол) и витамин К1 (фитаноидон).

Листья растений фоновых участков, отобранные через 3 месяца после пожара, а также через один и два года, слабо различаются по содержанию большинства идентифицированных

ТАБЛИЦА 1

Характеристика образцов растений южной тайги\* в процессе двухгодичного постпирогенного восстановления биогеоценоза

| Обозначение образца                                       | Год отбора       | Участок | CPI |
|-----------------------------------------------------------|------------------|---------|-----|
| <b>Карагана древовидная (<i>Caragana arborescens</i>)</b> |                  |         |     |
| Фон среднее                                               | 2020, 2021, 2022 | Фоновый | 16  |
| КП-20                                                     | 2020             | Горелый | 7   |
| КП-21                                                     | 2021             | Горелый | 11  |
| КП-22                                                     | 2022             | Горелый | 16  |
| <b>Рябина обыкновенная (<i>Sorbus aucuparia</i>)</b>      |                  |         |     |
| Фон среднее                                               | 2020, 2021, 2022 | Фоновый | 16  |
| РП-20                                                     | 2020             | Горелый | 2   |
| РП-21                                                     | 2021             | Горелый | 7   |
| РП-22                                                     | 2022             | Горелый | 22  |

\* Деревня Головина, Томский район, Томская область, координаты: 56°23'16.4" N, 84°42'36" E, даты отбора: 18.07.2020, 23.07.2021, 08.08.2022.

ТАБЛИЦА 2

Содержание отдельных групп липидов в листьях растений фоновых участков, отобранных в 2020–2022 гг., отн. %

| Соединение                                | Карагана древовидная |      |      |                 | Рябина обыкновенная |      |      |                 |
|-------------------------------------------|----------------------|------|------|-----------------|---------------------|------|------|-----------------|
|                                           | 2020                 | 2021 | 2022 | Среднее         | 2020                | 2021 | 2022 | Среднее         |
| <i>n</i> -Алканы                          | 23.3                 | 18.3 | 24.5 | <b>22.0±2.7</b> | 16.3                | 19.8 | 14.8 | <b>17.0±2.1</b> |
| <i>n</i> -Алканолаы + <i>n</i> -альдегиды | 43.1                 | 50.4 | 43.3 | <b>45.6±3.4</b> | 2.4                 | 1.3  | 7.1  | <b>3.6±2.5</b>  |
| <i>n</i> -Алкан-2-оны                     | 0.7                  | 0.2  | 0.8  | <b>0.6±0.3</b>  | 0.3                 | 0.2  | 0.5  | <b>0.3±0.1</b>  |
| ЖК*                                       | 6.3                  | 8.5  | 10.2 | <b>8.4±1.6</b>  | 10.6                | 13.5 | 10.3 | <b>11.5±1.4</b> |
| Фитон                                     | 0.5                  | 0.5  | 0.3  | <b>0.4±0.1</b>  | 0.2                 | 0.2  | 0.4  | <b>0.2±0.1</b>  |
| Фитол                                     | 16.0                 | 19.7 | 11.1 | <b>15.6±3.5</b> | 9.0                 | 4.8  | 22.5 | <b>12.1±7.6</b> |
| Сквален                                   | 4.6                  | 1.2  | 4.8  | <b>3.5±1.6</b>  | 1.4                 | 6.5  | 1.5  | <b>3.1±2.4</b>  |
| Витамин К1                                | 1.2                  | 0.4  | 0.5  | <b>0.7±0.3</b>  | 0.2                 | 0.1  | 0.3  | <b>0.2±0.1</b>  |
| Витамин Е                                 | 4.3                  | 0.8  | 4.5  | <b>3.2±1.7</b>  | 2.9                 | 3.5  | 1.4  | <b>2.6±0.9</b>  |
| 10-Нонакозанол                            | 0                    | 0    | 0    | <b>0</b>        | 56.7                | 50.1 | 41.2 | <b>49.4±6.3</b> |

\* Жирные кислоты (насыщенные и ненасыщенные).

групп соединений (см. табл. 2). В листьях караганы во все годы отбора преобладают *n*-алканолаы, *n*-альдегиды и *n*-алканы. В листьях рябины также высока доля *n*-алканов, но доминирует 10-нонакозанол. Есть данные, что наонакозан-10-ол составляет до 60 % от общего количества воска, содержащегося в хвое хвойных пород [10]. Например, высокое содержание (в среднем 77.1 %) 10-нонакозанол обнаружили в воске листьев растения *Pinus pinaster* (сосна приморская), произрастающего в южно-атлантическом регионе Европы и некоторых частях западного Средиземноморья [11]. Нонакозан-10-ол обладает ярко выраженными гидрофобными свойствами,

он может быть селективно извлечен из отходов лесного хозяйства и использован при приготовлении супергидрофобных покрытий [12]. Это является актуальным при разработке инновационных технологий по комплексной переработке древесины на стадии лесозаготовок.

Доля *n*-алканов, *n*-алкан-2-онов и ЖК в составе липидов листьев растений фонового участка довольно стабильна во все годы отбора как у караганы, так и у рябины (см. табл. 2). В то же время содержание ациклических изопреноидов, таких как сквален, витамины Е и К1 и дитерпеновый спирт фитол, в листьях растений фонового участка довольно значительно различалось

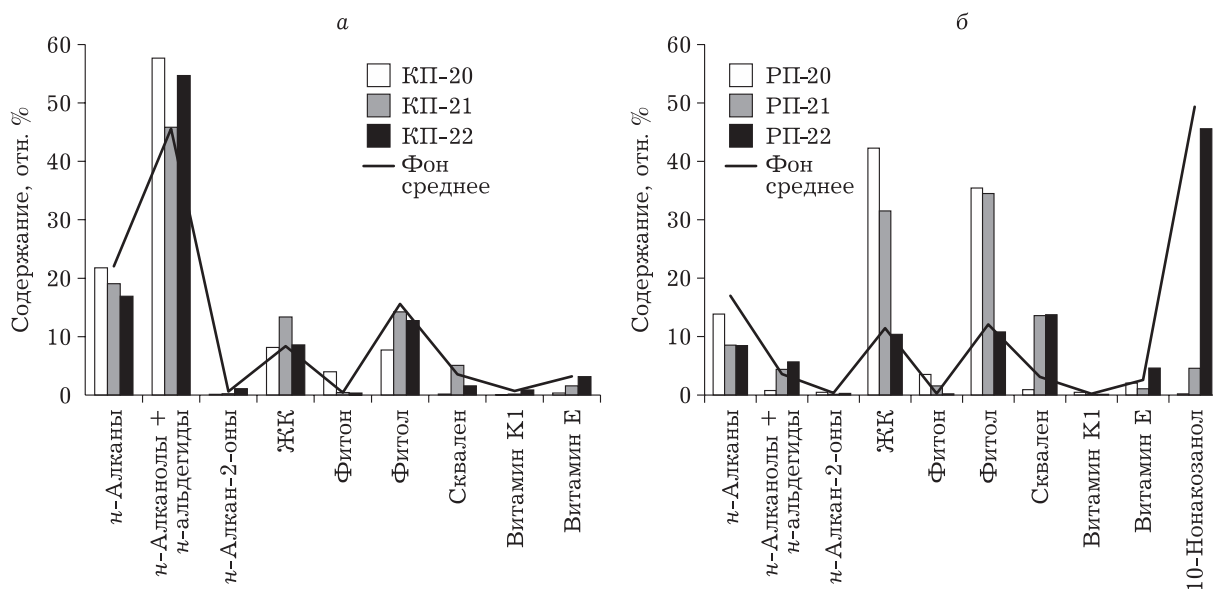


Рис. 1. Содержание органических соединений в листьях караганы древовидной (а) и рябины обыкновенной (б), отобранных на горелых участках в 2020–2022 гг. Обозн. образцов см. табл. 1. ЖК – жирные кислоты (насыщенные и ненасыщенные).

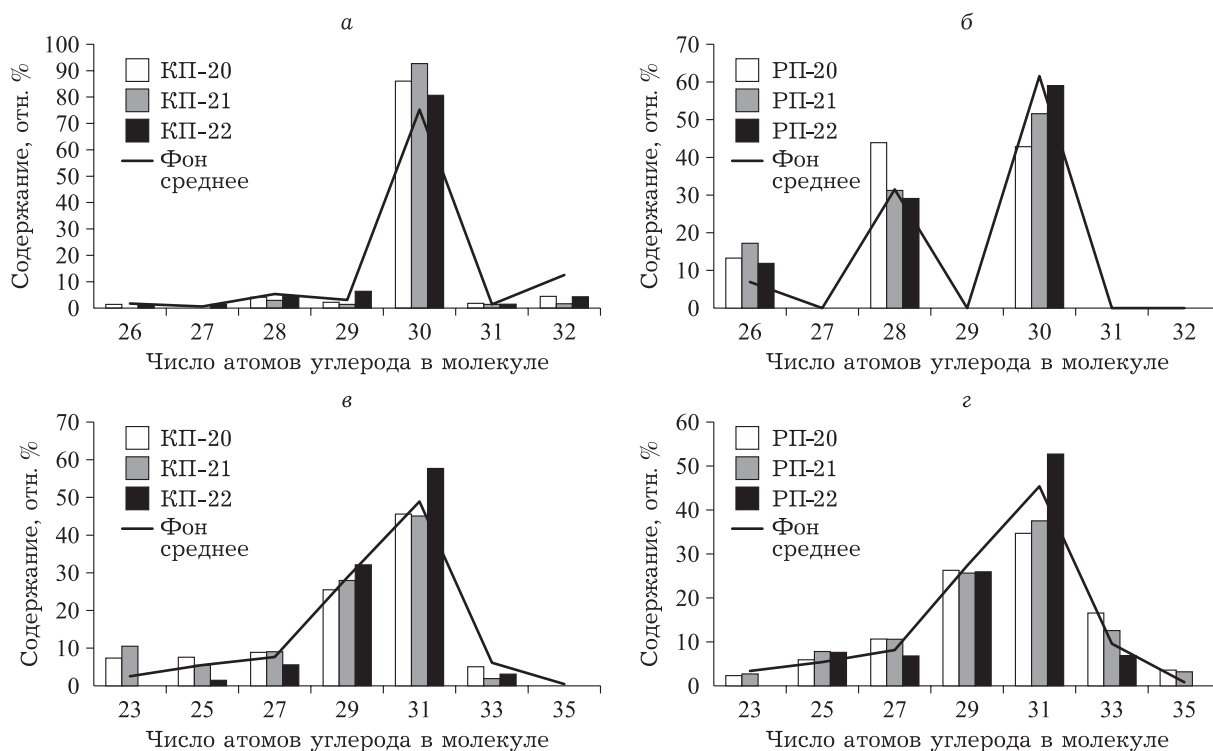


Рис. 2. Распределение *n*-альдегидов (а, б) и *n*-алкан-2-олов (в, г) в листьях караганы древовидной (а, в) и рябины обыкновенной (б, г). Обозн. образцов см. табл. 1.

в разные годы отбора. Фитол является одним из наиболее распространенных ациклических изопреноидных соединений биосферы, продукты его преобразования применяются в качестве биогеохимических индикаторов (биомаркеров) происхождения и трансформации органического вещества [13]. Фитол используется для производства синтетических форм витаминов Е и К1, а также в парфюмерной промышленности.

Распределение отдельных групп соединений в листьях кустарников в разные годы после пожара на горелом участке представлено на рис. 1. Для сравнения приведены средние значения на фоновом участке в эти же временные периоды.

В листьях караганы постпирогенного участка за исследованный период наблюдаются незначительные вариации в содержании идентифицированных соединений. Можно зафиксировать лишь плавное снижение доли *n*-алканов и увеличение содержания витаминов Е и К1 последовательно через 1 и 2 года после пожара. В целом через 2 года содержание отдельных соединений в листьях караганы на постпирогенном участке близко к фоновому, что свидетельствует о полном восстановлении этого растения.

В листьях рябины на постпирогенной территории, в отличие от фоновой территории, в год пожара наблюдается крайне низкое содержание

10-нонакозанола, а преобладают ЖК, *n*-алканы и фитол. На следующий год доля фитола не меняется, тогда как относительные содержания *n*-алканов, ЖК, фитона снижаются, а *n*-алканолов и *n*-альдегидов, сквалена, витамина Е и 10-нонакозанола растут. Через 2 года доли ЖК, фитола резко снижаются, а витамина Е и, главным образом, 10-нонакозанола резко увеличиваются вплоть до фоновых значений, что может свидетельствовать об интенсивном восстановлении рябины на постпирогенном участке к этому времени. Интересно, что содержание сквалена, резко возросшее на следующий год после пожара, остается высоким и через 2 года, значительно превышая фоновый уровень.

В листьях караганы преобладают *n*-алканолы и *n*-альдегиды (см. табл. 2). Состав *n*-альдегидов, обнаруженных в листьях кустарников, включает четные гомологи  $C_{26}-C_{32}$  (рис. 2, а, б), причем в карагане доминирует гомолог  $C_{30}$ , а в рябине —  $C_{28}$  и  $C_{30}$ . В листьях караганы фоновой территории, по сравнению с постпирогенной территорией, немного повышена доля высокомолекулярного гомолога  $C_{32}$ . Состав *n*-альдегидов листьев караганы в год, через 1 и 2 года после пожара не изменился, в отличие от листьев рябины, где наблюдается смещение распределения от менее высокомолекулярных гомологов к более высоко-

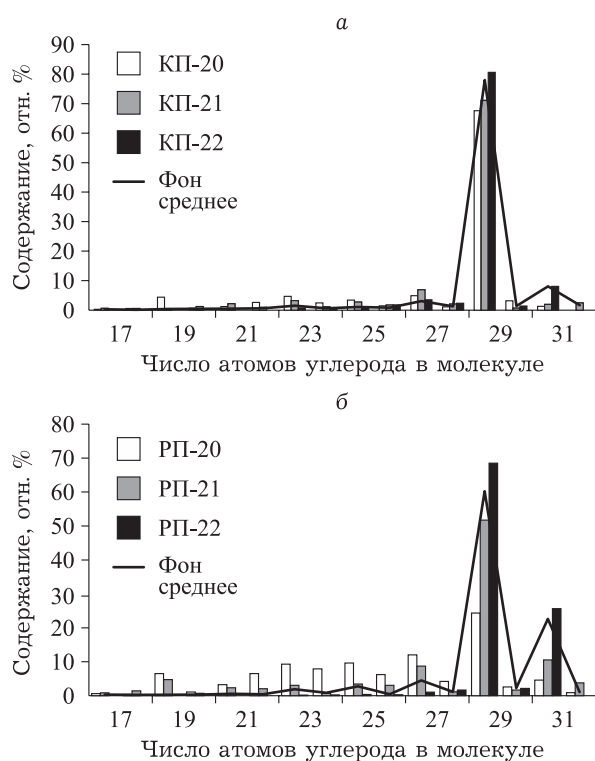


Рис. 3. Молекулярно-массовое распределение *n*-алканов в листьях караганы древовидной (а) и рябины обыкновенной (б). Обозн. образцов см. табл. 1.

комолекулярным со временем после пожара. Распределение *n*-альдегидов в листьях рябины постпирогенного участка через 2 года после пожара близко по составу к фоновому образцу.

На втором месте по распространенности в листьях караганы находятся нечетные *n*-алканы C<sub>19</sub>–C<sub>31</sub> с доминированием гомолога C<sub>29</sub> (рис. 3, а). Ряд *n*-алканов в листьях рябины фоновой участка, как и в карагане, включает нечетные гомологи C<sub>19</sub>–C<sub>31</sub>, однако доминирование C<sub>29</sub> выражено слабее за счет повышенного содержания C<sub>31</sub> (см. рис. 3, б). Распределение *n*-алканов в листьях рябины через 1 и 2 года после пожара подобно фоновому образцу. В листьях рябины, отобранных через 3 месяца после пожара, наблюдалось увеличение доли низкомолекулярных *n*-алканов. Подобное поведение *n*-алканов в растениях на постпирогенных территориях известно из литературы. Так, в работах [8, 14] показано, что при горении растительности происходит разрушение высокомолекулярных *n*-алканов с преобладанием нечетного числа атомов углерода и образование низкомолекулярных *n*-алканов. Ранее сообщалось об увеличении количества короткоцепочечных гомологов *n*-алканов с четным числом атомов углерода для обугленной биомассы [15], а также для материала верхнего

слоя почвы после пожара [7, 16]. Описанные закономерности связывают с разрушением гомологов высших алканов при нагревании. По сравнению с предыдущими годами, через 2 года после пожара в листьях караганы и рябины, подобно фоновой территории, снижена доля низкомолекулярных алканов.

Рассчитанные значения показателя CPI в листьях кустарников (см. табл. 1), отобранных через 3 месяца после пожара, меньше относительно фоновой территории в 8 раз в рябине и в 2 раза в карагане, что свидетельствует о наличии *n*-алканов антропогенного происхождения. Через 1 год после пожара наблюдается увеличение значений CPI – в 3.5 раза (в рябине) и в 1.5 раза (в карагане). Через 2 года CPI на постпирогенных участках достигает значений фоновых образцов, что указывает на восстановление исходного состава липидов кустарников. Известно, что коэффициент нечетности (CPI) для биогенных *n*-алканов может достигать 6–10 и более [17].

В небольших количествах в листьях кустарников присутствуют также *n*-алкан-2-оны ряда C<sub>23</sub>–C<sub>35</sub> с преобладанием гомологов C<sub>29</sub> и C<sub>31</sub> (см. рис. 2, в, г). При этом в листьях караганы в год пожара и в последующий год наблюдается смещение распределения от более высокомолекулярных гомологов к менее высокомолекулярным, а через 2 года распределение приближено к фоновому.

Ряд жирных кислот (ЖК) в листьях кустарников включает насыщенные структуры C<sub>12</sub>–C<sub>22</sub> с преобладанием пальмитиновой кислоты (C<sub>16</sub>), а также ненасыщенные кислоты C<sub>18</sub> – олеиновую, линолевую и линоленовую. Изменения в распределении кислот в связи с пожаром не зафиксированы.

Таким образом, групповой состав идентифицированных соединений в листьях караганы горелого и фоновой территории за исследованный период не имеет больших различий и не показывает однозначную динамику в зависимости от года и места отбора. То же относится и к листьям рябины фоновой территории, но не пирогенной. Так, в листьях рябины через 3 месяца и через 1 год после пожара наблюдаются повышенные содержания фитол и ЖК, которые снижаются до фоновых значений через 2 года после пожара. Содержание сквалена в листьях рябины, снизившееся в результате пожара, резко увеличивается через 1 год и остается на уровне, значительно превышающем фоновый, и через 2 года. Наибольшее влияние пожар оказал на длинноцепочечный спирт 10-нонакозанол, обна-

руженный в большом количестве в листьях рябины фонового участка. В результате пожара наблюдается падение его содержания до следовых количеств с последующим небольшим ростом через 1 год после пожара и скачкообразным увеличением вплоть до фоновых значений через 2 года после пожара.

Молекулярно-массовое распределение ациклических соединений, таких как *n*-алканы, *n*-альдегиды, *n*-алкан-2-оны, на постпирогенном участке имеет некоторые отличия от фоновой территории. В листьях рябины, отобранных через 3 месяца и через 1 год после пожара, наблюдалось смещение распределения от более высокомолекулярных гомологов к менее высокомолекулярным *n*-алканам и *n*-альдегидам. То же самое отмечено в *S. arborescens* для *n*-алкан-2-онов. Распределение ациклических соединений на постпирогенном участке через 2 года после пожара смещается к высокомолекулярным гомологам и восстанавливается до фоновых значений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено постпирогенное изменение состава биомолекул листьев кустарников двух видов (*S. arborescens* и *S. aucuparia*), типичных для южной тайги Томской области. Исследованы ациклические органические соединения (*n*-алканы, жирные кислоты, *n*-алкан-2-оны, альдегиды, *n*-алканолы, 10-нонакозанол) и изопреноидные структуры (дитерпеноиды – фитон и изомеры фитола, тритерпен – сквален), а также нафтоароматические соединения (витамин Е и витамин К1) через 3 месяца, 1 и 2 года после пожара. Распределение этих соединений в листьях рябины обыкновенной и караганы древовидной на фоновом участке однотипно во всем исследованном временном периоде. Как и ожидалось, термический стресс (пожар) вызывает изменения в биосинтезе активных соединений в растениях, которые наблюдаются в течение длительного времени, прошедшего после события. Затем программа биосинтеза восстанавливается, растение продуцирует набор соединений, состав и соотношение которых аналогичны синтезированным до термического воздействия. Среди ациклических структур наибольшее влияние пожар оказал на длинноцепочечный насыщенный спирт 10-нонакозанол, являющийся основным компонентом воскового слоя, предохраняющего растения от неблагоприятных условий окружающей среды. Влияние пожара на ацик-

лические соединения, такие как *n*-алканы, *n*-альдегиды, *n*-алкан-2-оны, выразилось в смещении молекулярно-массового распределения в низкомолекулярную область, что связано с разрушением высокомолекулярных гомологов под воздействием пожара. Через 2 года после пожара содержание 10-нонакозанол и молекулярно-массовое распределение ациклических рядов возвращается к фоновым показателям. В то же время содержание изопреноидных структур с выраженной антиоксидантной активностью, таких как сквален и витамин Е, в листьях рябины повышено по сравнению с фоном даже через 2 года после термического стресса. Это свидетельствует о том, что защитное (антиоксидантное) действие этих соединений на метаболические процессы является пролонгированным во времени. Выполненная работа направлена на понимание биохимических реакций, связанных с восстановлением растительности после пожаров, что может способствовать выявлению механизмов адаптации и устойчивости растений в неблагоприятных условиях окружающей среды. Знания химии растительных липидов необходимы в различных отраслях, например в фармацевтике, при производстве косметики и продуктов питания.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН (НИОКТР № 121031500046-7), финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Буряк Л. В., Каленская О. П., Кукавская Е. А., Лузганов А. Г. Зонально-географические особенности воздействия пожаров на лесообразование светлостойных насаждений юга Сибири. Новосибирск: Наука, 2022. 284 с.
- 2 Ильина В. Н. Пирогенное воздействие на растительный покров // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2011. Т. 20, № 2. С. 4–30.
- 3 Ormeño E., Céspedes B., Sánchez I. A., Velasco-García A., Moreno J. M., Fernandez C., Baldy V. The relationship between terpenes and flammability of leaf litter // For. Ecol. Manage. 2009. Vol. 257, No. 2. P. 471–482.
- 4 Santacruz-García A. C., Bravo S., Corro F. del, García E. M., Molina-Terrén D. M., Nazareno M. A. How do plants respond biochemically to fire? The role of photosynthetic pigments and secondary metabolites in the post-fire resprouting response // Forests. 2021. Vol. 12, No. 1, Art. 56.
- 5 González-Vila F. J., Tinoco P., Almendros G., Martín F. Pyrolysis-GC-MS analysis of the formation and degradation stages of charred residues from lignocellulosic biomass // J. Agric. Food Chem. 2001. Vol. 49, No. 3. P. 1128–1131.
- 6 Simoneit B. R. T. Biomass burning – a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion // Appl. Geochem. 2002. Vol. 17, No. 3. P. 129–162.
- 7 Tinoco P., Almendros G., Sanz J., González-Vázquez R., González-Vila F. J. Molecular descriptors of the effect of

- fire on soils under pine forest in two continental mediterranean soils // *Org. Geochem.* 2006. Vol. 37, No. 12. P. 1995–2018.
- 8 Eckmeier E., Wiesenberg G. L. B. Short-chain *n*-alkanes ( $C_{16-20}$ ) in ancient soil are useful molecular markers for prehistoric biomass burning // *J. Archaeol. Sci.* 2009. Vol. 36, No. 7. P. 1590–1596.
- 9 Serebrennikova O. V., Strel'nikova E. B., Russkikh I. V., Fedorov D. V. Postpyrogenic changes in the lipid composition of peat and bog plants // *Solid Fuel Chem.* 2022. Vol. 56, No. 2. P. 93–102.
- 10 Matas A. J., Sanz M. J., Heredia A. Studies on the structure of the plant wax nonacosan-10-ol, the main component of epicuticular wax conifers // *Int. J. Biol. Macromol.* 2003. Vol. 33, No. 1–3. P. 31–35.
- 11 Nikolić B., Todosijević M., Djordjević I., Stanković J., Mitić Z. S., Tešević V., Marin P. D. Nonacosan-10-ol and *n*-alkanes in leaves of *Pinus pinaster* // *Nat. Prod. Commun.* 2020. Vol. 15, No. 5. P. 1–4.
- 12 McElroy C. R., Attard T. M., Farmer T. J., Gaczynski A., Thornthwaite D., Clark J. H., Hunt A. J. Valorization of spruce needle waste via supercritical extraction of waxes and facile isolation of nonacosan-10-ol // *J. Cleaner Prod.* 2018. Vol. 171. P. 557–566.
- 13 Rontani J.-F., Volkman J. K. Phytol degradation products as biogeochemical tracers in aquatic environments // *Org. Geochem.* 2003. Vol. 34, No. 1. P. 1–35.
- 14 Kuhn T. K., Krull E. S., Bowater A., Grice K., Gleixner G. The occurrence of short chain *n*-alkanes with an even over odd predominance in higher plants and soils // *Org. Geochem.* 2010. Vol. 41, No. 2. P. 88–95.
- 15 Wiesenberg G. L. B., Lehdorff E., Schwark L. Thermal degradation of rye and maize straw: lipid pattern changes as a function of temperature // *Org. Geochem.* 2009. Vol. 40, No. 2. P. 167–174.
- 16 Almendros G., Martin F., González-Vila F. J. Effects of fire on humic and lipid fractions in a Dystric Xerochrept in Spain // *Geoderma.* 1988. Vol. 42. P. 115–127.
- 17 Didyk B. M., Simoneit B. R. T., Pezoa L. A., Riveros M. L., Flores A. A. Urban aerosol particles of Santiago, Chile: organic content and molecular characterization // *Atmos. Environ.* 2000. Vol. 34, No. 8. P. 1167–1179.