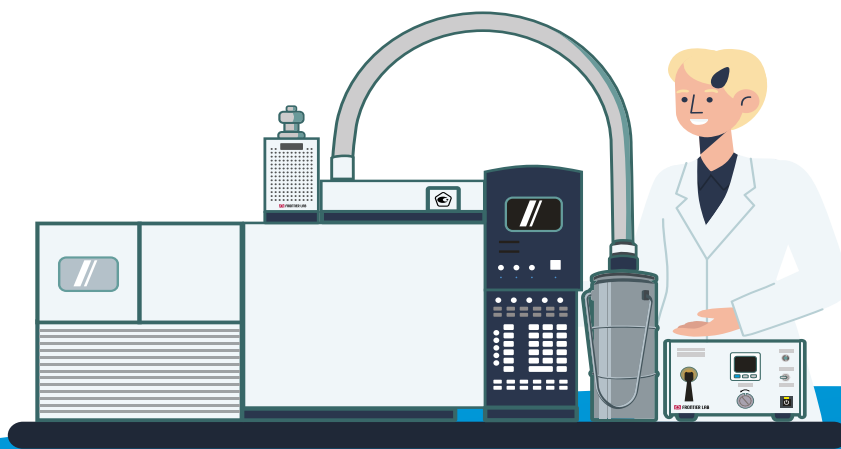


СЕЛЕКТУМ И ИМС

III НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«УНИКАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ  
ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ХРОМАТОГРАФИИ»

СБОРНИК  
ТЕЗИСОВ



21 мая 2026  
[www.pyro2026.ru](http://www.pyro2026.ru)

**III научная конференция «Уникальные возможности пиролитической хроматографии»: сборник тезисов.** — Москва, ООО «Селектум-МС», 2026.— 76 с.

Настоящий сборник включает тезисы III научной конференции «Уникальные возможности пиролитической хроматографии», проходившей 21 мая 2026 г. в Москве.

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

**Борисов Р.С., к.х.н.,** ИНХС РАН, Москва

**Захаров В.П., д.х.н.,** УУНИТ, Уфа

**Крылов А.И., д.х.н.,** ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург

**Ревельский А.И., д.х.н.,** МГУ, Москва

**Свирский К.С., к.х.н.,** Селектум-МС, Москва

**Третьяков Н.Ю., к.х.н.,** Тюменский Государственный Университет

**Федотов П.С., д.х.н.,** ГЕОХИ РАН, Москва

**Юрасов Ю.И., д.т.н.,** ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону

## **НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

- Органический синтез
- Полимерные материалы
- Добыча и переработка нефти
- Геохимия
- Экология
- Искусствоведение и археология
- Микроэлектроника

## НАУЧНАЯ ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

**9:15** — Начало регистрации, приветственный кофе

### **10:00 — 12:00 — СЕКЦИЯ 1**

1. **Константин Станиславович Свирский** — «Селектум-МС»  
*Открытие конференции и вступительное слово.*
2. **Святослав Валерьевич Суховерхов** — Институт химии ДВО РАН  
*Применение пиро-ГХМС в идентификации нефти и её фальсификации.*
3. **Николай Юрьевич Третьяков** — Тюменский Государственный Университет  
*Применение метода пиро-ГХМС для оценки эффективности модифицированных цеолитных катализаторов в процессе пиролиза полипропилена.*
4. **Юрий Викторович Нефёдов** — Санкт-Петербургский горный университет  
*Локализация залежей углеводородов по миграционным следам флюидов методом пиро-ГХМС.*
5. **Александра Евгеньевна Осечкова** — Новосибирский институт органической химии имени Н. Н. Ворожцова СО РАН  
*Применение пиролитической газовой хроматографии с масс-детектированием для решения прикладных задач в области химии и экологии.*
6. **Роман Сергеевич Герасимов** — Frontier Lab  
*Новые тренды и вызовы в области применения метода пиролитической хроматографии.*

**12:00 – 12:30** — Кофе-брейк

### **12:30 – 14:20 — СЕКЦИЯ 2**

7. **Юрий Игоревич Юрасов** — Южный научный центр РАН  
*Эффективность определения полимерных микрочастиц при помощи пиро-ГХМС в донных отложениях и гидробионтах.*
8. **Андрей Арсеньевич Ботин** — Газпромнефть - Промышленные Инновации  
*Применение пиро-ГХ×ГХМС для исследований сложных объектов в нефтепереработке и нефтехимии.*
9. **Екатерина Александровна Тютюкова** — Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
*Метод Пиро-ГХ/МС как инструмент выявления механизмов устойчивости осины обыкновенной к ядровой гнили.*

10. **Татьяна Александровна Юркова** — Институт геологии и природопользования ДВО РАН  
*Анализ растительного опада лиственных лесов методом пиролитической ГХМС.*
11. **Михаил Александрович Невестенко** — Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт  
*Пиролитическая хроматография как инструмент для моделирования процессов преобразования органического вещества.*
12. **Александра Владимировна Клубина** — Санкт-Петербургский государственный университет  
*Пиролитическая хроматография для идентификации природных химерных терпеноидных кумаринов.*

14:20 – 15:00 — Кофе-брейк

### 15:00 – 17:00 — СЕКЦИЯ 3

13. **Олеся Николаевна Видищева** — Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
*Комплексное исследование процессов термического преобразования органического вещества бажендовской свиты методом пиро-ГХМС*
14. **Дмитрий Алексеевич Волков** — Университет ИТМО  
*Использование пиролитической газовой хроматографии в исследовании влияния катализаторов на процессы получения биомасел.*
15. **Андрей Алексеевич Гринько** — Научно-технологический университет «Сириус»  
*Сравнительная характеристика органического вещества донных осадков в районе метановых эмиссий и на фоновых участках Черного моря с помощью пиро-ГХМС.*
16. **Михаил Игоревич Толстунов** — Южный научный центр РАН  
*Определение полистирола и его производных в личинках *ulomodius demestodius* методом пиро-ГХМС.*
17. **Павел Анатольевич Романов** — Российский государственный геолого-разведочный университет  
*Результаты биомаркерных исследований органического вещества пород методом пиролитической хромато-масс-спектрометрии Центрально-Каспийского региона.*

17:00 — Завершение работы конференции

17:00 – 19:00 — Фуршет

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Научная программа конференции .....	3
Исследование состава светочувствительной композиции методом пиролитической ГХ/МС с криоконцентрированием.....	8
<i>Барышева А.В., Суворов С.С., Егорова О.А., Титова Е.М, Воротынцев А.В.</i>	
Применение пиролитической хроматографии для изучения антропосолей древних поселений Западной Сибири (на примере Кетского острога и городища Шайтан II).....	11
<i>Белкина Т.Н., Лойко С.В.</i>	
Применение Пиро-ГХ×ГХ-МС для исследований сложных объектов в нефтепереработке и нефтехимии .....	14
<i>Ботин А.А., Демиденко Э.С., Демакова М.Я., Подлеснова Е.В.</i>	
Применение бентонитовой глины, модифицированной оксидом железа (III) в качестве катализатора в процессе пиролиза полипропилена .....	16
<i>Бушуева А.Е., Тиссен Е.А., Третьяков Н.Ю., Зубенко П.А., Григорьев М.В., Елышев А.В.</i>	
Комплексное исследование процессов термического преобразования органического вещества баженовской свиты методом Py-GC/MS: дифференциация свободных углеводородов, продуктов крекинга керогена и оценка влияния минеральной матрицы .....	18
<i>Видищева О.Н., Костышина М.О., Калмыков А.Г., Калмыков Г.А.</i>	
Использование пиролитической газовой хроматографии в исследовании влияния катализаторов на процессы получения биомасел.....	21
<i>Волков Д.А.</i>	
Сравнительная характеристика органического вещества донных осадков в районе метановых эмиссий и на фоновых участках Черного моря.....	23
<i>Оберемок И.А., Гринько А.А., Малахова Т.В.</i>	
Выделение микропластика из морской воды методом противоточной хроматографии и определение Пиро-ГХ/МС.....	28
<i>Дженлода Р.Х., Ермолин М.С., Иванеев А.И., Савонина Е.Ю.</i>	
Применение пиролитической газовой хроматографии для изучения органического вещества нефтематеринских пород баженовской свиты.....	30
<i>Дженлода Р.Х., Коноплева И.В.</i>	
Применение метода Пиро-ГХМС для оценки динамики нефтеотдачи после паротеплового воздействия на примере породы Горского месторождения .....	32
<i>Мухаматдинова Р.Э., Дуглав Ю.А.</i>	

Использование возможностей пиролитической хроматографии для идентификации природных терпенокумаринов.....	35
<i>Клюбина А.В., Шаварда А.Л.</i>	
Анализ состава материалов для корпусирования микросхем в пластиковые корпуса методом пиролитической газовой хроматографии.....	38
<i>Курбатов В.Г., Пугачёва Т.А.</i>	
Пиролитическая хроматография как инструмент для моделирования процессов преобразования органического вещества.....	40
<i>Невестенко М.А., Можегова С.В., Герасимов Р.С.</i>	
Локализация залежей углеводородов по миграционным следам флюидов методом Пиро-ГХ-МС .....	43
<i>Нефедов Ю.В., Логинов А.В.</i>	
Применение пиролитической газовой хроматографии с масс-детектированием для решения прикладных задач в области химии полимерных материалов и анализа микропластика в объектах окружающей среды .....	46
<i>Половяненко Д.Н., Сотникова Ю.С., Осечкова А.Е., Кривошеина М.И., Карпова Е.В., Нефедов А.А., Багрянская Е.Г.</i>	
Оценка генерационного потенциала нефтегазоносных пород по результатам пиролитических исследований методом Пиро-ГХ/МСД в каспийском секторе Скифско-Туранской платформы .....	49
<i>Романов П.А., Захарченко М.В.</i>	
Применение Пиро-ГХ-МС в оценке экологической безопасности полимерной составляющей минеральной ваты .....	52
<i>Рудаков Я.О., Хорохордина Е.А., Кураева А.Е., Рудаков О.Б.</i>	
Применение метода Пиро-ГХ/МС для оценки эффективности модифицированных цеолитных катализаторов в процессе пиролиза полипропилена.....	55
<i>Соколова Д.А., Тиссен Е.А., Третьяков Н.Ю., Зубенко П.А., Григорьев М.В., Елышев А.В.</i>	
Применение Пиро-ГХМС для идентификации фальсификаций нефти.....	57
<i>Суховерхов С.В.</i>	
Определение полистирола и его производных в личинках <i>Ulomoides dermestoides</i> методом Пиро-ГХ/МС.....	60
<i>Толстуннов М.И., Бастраков А.И., Ушакова Н.А., Юрасов Ю.И.</i>	
Метод Пиро-ГХ/МС как инструмент выявления механизмов устойчивости осины обыкновенной к ядровой гнили .....	64
<i>Артемихина (Тютюкова) Е.А.</i>	
Применение пиролитической хроматографии для сравнительной оценки состава органического вещества дерново-подзолистых почв с различной агрогенной нагрузкой.....	67
<i>Фарходов Ю.Р.</i>	

**Эффективность определения полимерных микрочастиц при помощи Пиро ГХ-МС в донных отложениях и гидробионтах.....70**

*Юрасов Ю.И., Анциферова М.А., Толстунов М.И., Клещенков А.В., Савикин А.И., Коваленко М. В., Подопригора Е.А.*

**Анализ растительного опада лиственных лесов методом пиролитической ГХ-МС .....74**

*Юркова Т.А, Котельникова И.М., Брянин С.В.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ МЕТОДОМ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ГХ/МС С КРИОКОНЦЕНТРИРОВАНИЕМ

**Барышева А.В., Суворов С.С., Егорова О.А., Титова Е.М, Воротынцев А.В.**

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Alex.barysheva@yandex.ru

*В работе проведено исследование состава светочувствительной композиции и идентификация новолачных смол методом ГХ/МС с пиролизической приставкой и криоконцентрированием. Идентифицированы летучие компоненты позитивного фоторезиста, исследован состав полимера.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** фоторезист, новолак, фенол-формальдегидная смола, криоконцентрирование, пиролиз, ГХ/МС.

Актуальность исследования состава светочувствительных композиций на основе новолачных смол и диазонафтохиноновых соединений обусловлена необходимостью повышения точности контроля рецептур для воспроизводимости литографических характеристик позитивных фоторезистов, а также для разработки методов обратного инжиниринга современных фоторезистивных материалов. Молекулярно-массовое распределение, химический состав и структура новолачной смолы определяет устойчивость к травлению, термическую стабильность и способность к формированию однородных пленок. При этом сложность анализа обусловлена наличием полимерных и труднолетучих компонентов фоторезиста, что ограничивает применение традиционных методов ГХ/МС. В данной работе использовали метод пиролизической газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием, позволяющей проводить деструктивный анализ полимерной матрицы. Дополнительное применение системы криоконцентрирования, обеспечивает повышение чувствительности и улучшение разделения компонентов.

Для проведения анализа использовали хроматомасс-спектрометр Shimadzu GCMS-QP2010 Plus, с пиролизической системой Frontier Lab EGA/PY-3030D, оснащенной системой криоконцентрирования Frontier Lab MJT-1035E. Эксперименты на Пиро-ГХ/МС проводили в двух режимах: 1) термодесорбция при программировании температуры от 50 до 850 °С со скоростью нагрева 20 °С/мин с деактивированной трубкой вместо колонки и 2) двухстадийный пиролиз на капиллярной колонке при установленных в режиме термодесорбции температурах 270 и 550 °С. Хроматографическое разделение продуктов двухстадийного пиролиза проводили на капиллярной колонке HP-1MS (50 м, 0,32 мм, 0,25 мкм) при программировании температуры колонки от 40 °С до 230 °С при 20 °С/мин, газ-носитель — гелий при потоке — 1,62 см<sup>3</sup>/мин, сплит 30. Образец исследуемого материала в количестве приблизительно 4 мг помещали в микротигель, который помещали в пиролизер.

Первый этап исследования — термодесорбция (EGA, анализ выделяющихся газов) — необходим для определения температур последующего пиролиза. При этом

вместо колонки использовали пустую деактивированную металлическую капиллярную трубку для ЕГА. Результат анализа выделяющихся газов представлен на рисунке 1.

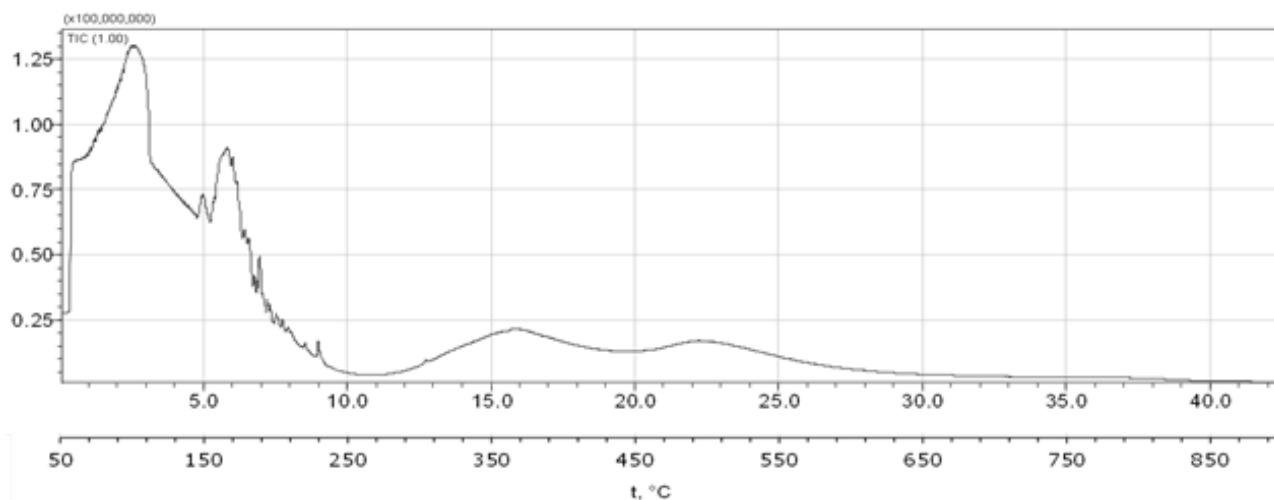


Рисунок 1. Результат первичного анализа светочувствительного соединения

Пиролиз при 270 (группа пиков до 10 минут) и 550° С (группа пиков от 10 до 25 минут) позволил определить тип полимерной основы — это крезол-формальдегидная (новолачная) смола. Хроматограммы анализа при этих температурах пиролиза представлены на рисунках 2 и 3. На хроматограммах присутствует значительное количество метилзамещенных фенолов, которые являются фрагментами новолачных смол.

Механизм разложения полимера начинается с разрыва связей, в результате чего образуются свободные радикалы. Стабилизация свободных радикалов происходит за счет извлечения атомов водорода из структуры новолачной смолы, что приводит к уменьшению отношения водорода к углероду. Ожидаемые димеры метилзамещенных фенолов, такие как метилзамещенные дигидроксибензилметаны, которые, как предполагается, должны были образоваться, при пиролизе новолака термически нестабильны и разлагаются до метилзамещенных фенолов или метилзамещенных ксантенов путем циклизации. Циклизация происходит за счет удаления воды, а не за счет извлечения водорода [1].

Из литературы известно [2], что распределение продуктов пиролиза новолачной смолы отражает особенности её молекулярной структуры. Преобладание определённых изомеров алкилфенолов свидетельствует о позициях метиленовых мостиков, соединяющих ароматические звенья в новолачной смоле. По результатам пиролитической ГХ/МС среди димерных продуктов идентифицирован исключительно 2,2'-метиленбис (4-метилфенол). Согласно литературным данным, для *p*-крезольных звеньев новолачной смолы образование димеров возможно только по орто-орто-положениям, что приводит к формированию указанного соединения. Таким образом, обнаружение преимущественно данного димера свидетельствует о доминировании орто-ориентированных метиленовых мостиков в структуре смолы.

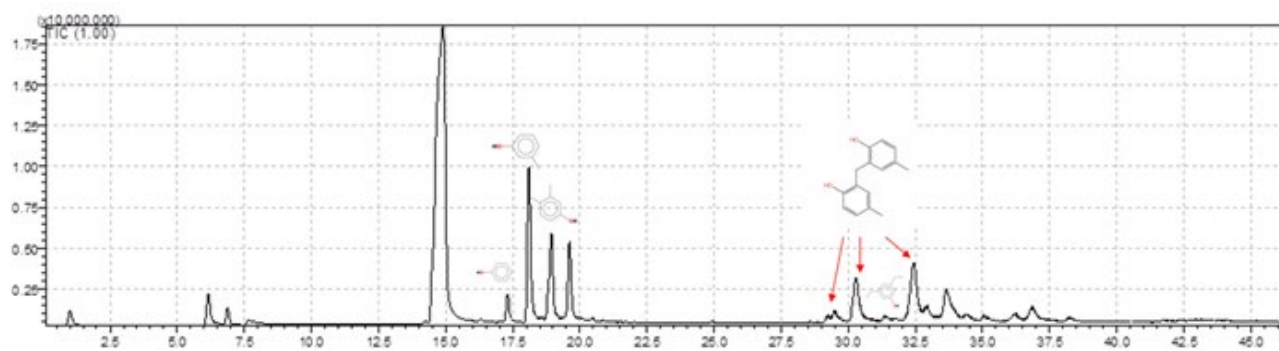


Рисунок 2. Хроматограмма результата пиролиза при 270 °С

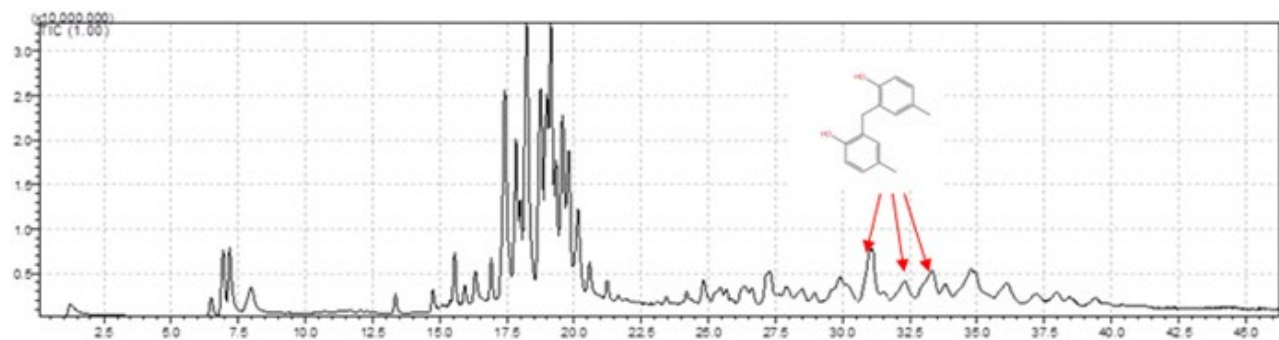


Рисунок 3. Хроматограмма результата пиролиза при 550 °С

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen Y., Aizenshtat Z. Investigation of pyrolytically produced condensates of phenol-formaldehyde resins, in relation to their structure and decomposition mechanism //Journal of analytical and applied pyrolysis. – 1992. – Т. 22. – №. 3. – С. 153-178.
2. Blazso M., Tóth T. Sequence of phenolic units in phenol—formaldehyde polycondensates studied by pyrolysis—gas chromatography/mass spectrometry //Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 1991. – Т. 19. – С. 251-263.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ХРОМАТОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АНТРОПОСОЛЕЙ ДРЕВНИХ ПОСЕЛЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (НА ПРИМЕРЕ КЕТСКОГО ОСТРОГА И ГОРОДИЩА ШАЙТАН II)

**Белкина Т.Н., Лойко С.В.**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, bandanaz@yandex.ru

*Методом пиролизической хромато-масс-спектрометрии (Пиро-ГХ/МС) изучен молекулярный состав антропосолей древних средневековых поселений Западной Сибири. Идентифицированы биомаркеры хозяйственной деятельности. Выявлены два основных источника органического вещества, которые сохраняются в почве длительное время: пирогенный (черный углерод) и продукты отходов животноводства.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Пиро-ГХ/МС, антропосоли, почва, органическое вещество почв, углерод-секвестрация, археологические памятники Западной Сибири.

Антропогенные темноцветные почвы (антропосоли) археологических памятников Западной Сибири, формировавшихся столетиями, являются потенциальными резервуарами долговременного накопления органического углерода. Для оценки устойчивости и генезиса этого углерода необходима информация о его молекулярном строении. Цель работы — оценить возможности метода пиролизической хромато-масс-спектрометрии (Пиро-ГХ/МС) для идентификации биомаркеров и определения источников углерода в антропосолях.

Объектами исследования послужили антропосоли двух археологических памятников южно-таежной зоны Западной Сибири: Кетский острог (русское поселение, XVII в.) и городище Шайтан III (дорусское средневековое городище, XII-XVII вв.) [1]. Анализ проводили методом Пиро-ГХ/МС с использованием пиролизера Frontier Lab EGA/PY-3030D (500 °C) и ГХ/МС Agilent 8890/5977B. Идентификацию соединений проводили с помощью библиотеки масс-спектров NIST. Содержание соединений нормировали на сумму площадей всех пиков в хроматограмме (%). Пирохроматограммы образцов приведены на рисунке 1.

В составе пиролизатов идентифицированы алканы, алкены, полиароматические углеводороды (ПАУ), лигниновые маркеры, фенолы и азотсодержащие гетероциклы. Обработка данных методом главных компонент (PCA) позволила разделить образцы по оси «природный фон — антропогенное воздействие» (Фактор 1, 41,1 % дисперсии) и дифференцировать тип хозяйственной деятельности (Фактор 2, 20,6 %) [2]. Животноводческие слои русского и дорусского поселений попали в один кластер. Это говорит о том, что под влиянием скотоводства состав культурного слоя становится сходным независимо от этнокультурной принадлежности жителей. В верхних горизонтах обоих памятников зафиксированы высокие содержания азотсодержащих гетероциклов (зоогенный сигнал), что демонстрирует сходство их молекулярных портретов.

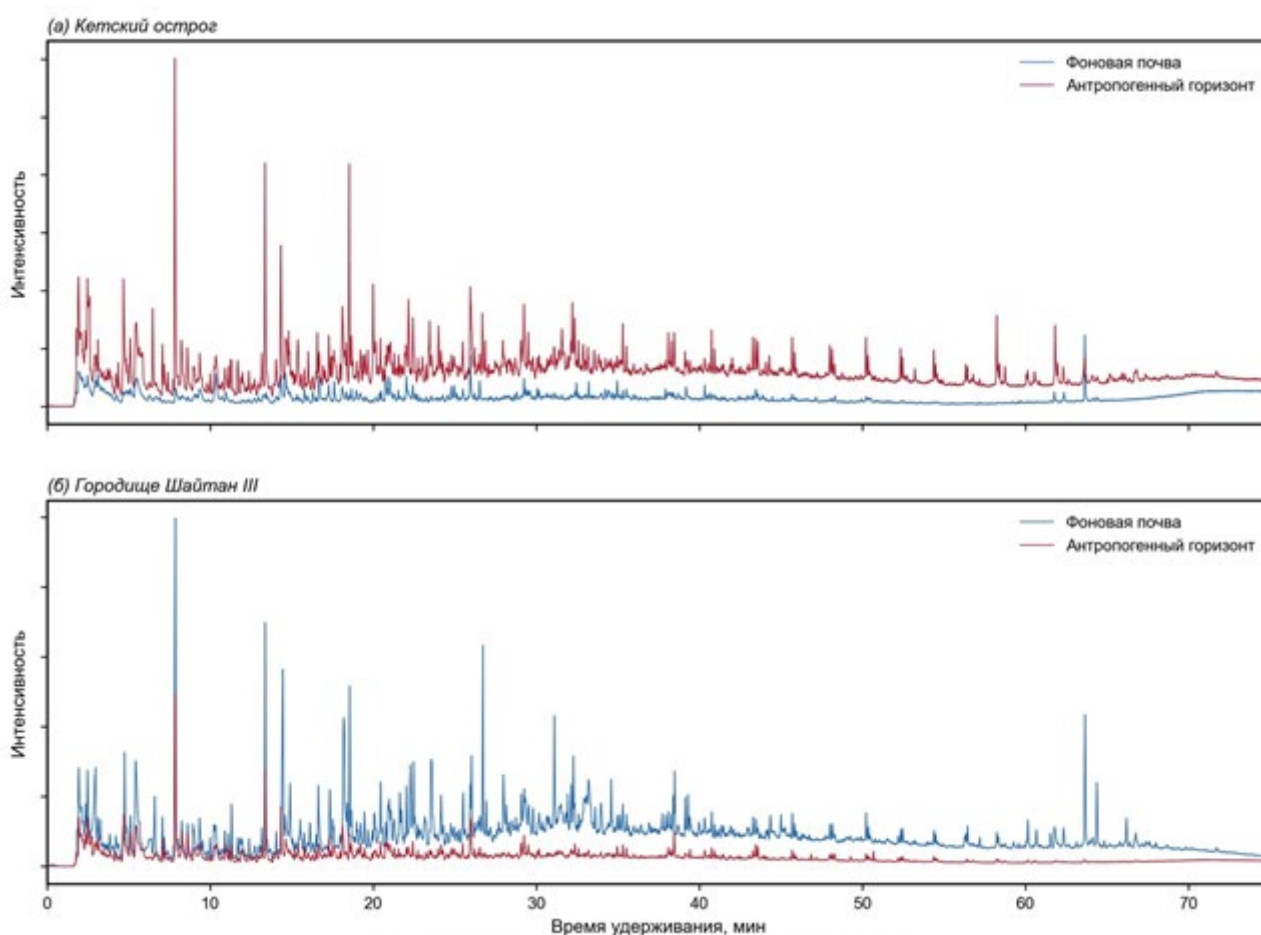


Рис. 1. Хроматограммы (ТIC) пиролизатов исследуемых почв.

Рисунок 1. Хроматограммы (ТIC) пиролизатов исследуемых почв

Суммарное содержание пирогенных маркеров (ПАУ) в слоях животноводческого этапа составляет 3,8–4,5 %, а в металлургических слоях городища Шайтан III возрастает до 7,3–10,7 % от общего пула идентифицированных соединений. Это подтверждает накопление стабильного пирогенного углерода в результате металлургической деятельности. Именно пирогенный углерод является наиболее устойчивой к микробному разложению формой, обеспечивая долговременную секвестрацию углерода в культурных слоях. Отношение лабильной фракции к стабильной (пирогенной) в металлургических слоях достигает 1,5, что в два раза ниже, чем в животноводческих (3).

Таким образом, метод Пиро-ГХ/МС продемонстрировал эффективность при изучении антрополей. Он позволил разделить органическое вещество (ОВ) по происхождению, подтвердить большую роль отходов жизнедеятельности домашних животных в формировании устойчивых форм ОВ, сохраняющихся столетиями после прекращения бытования археологических культур, и оценить вклад стабильного пирогенного углерода. Это имеет ключевое значение для понимания механизмов формирования углерод-секвестрирующих систем прошлого.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anthropogenic dark soils horizons in western Siberian taiga: origin, soil chemistry and sustainability of organic matter / A.A. Idimeshev, O.S. Pokrovsky, S.V. Loyko, E.V. Barsukov [et al.] //

Geoderma. - 2024. - Vol. 452. - Art. num. 117101. - DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.117101.

2. Soil properties and molecular compositions of soil organic matter in four different Arctic regions / S. Jeong, S. Nam, J.Y. Jung // Journal of Ecology and Environment. – 2022. – Vol. 46, № 4. – P. 282–291. – DOI: 10.5141/jee.22.069.

---

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 26-17-00309.*

---

## ПРИМЕНЕНИЕ ПИРО-ГХ×ГХ-МС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В НЕФТЕПЕРЕРАБОТКЕ И НЕФТЕХИМИИ

---

**Ботин А.А., Демиденко Э.С., Демакова М.Я., Подлеснова Е.В.**

Центр промышленных инноваций «Газпром нефти», botin.aa@gazprom-neft.ru,  
г. Москва

*Метод Пиро-ГХ×ГХ-МС в сочетании с термогравиметрическим анализом является важным инструментом для аналитического контроля процессов нефтепереработки и нефтехимии и позволяет оперативно определять состав и/или наличие реагентов, в том числе минорных функциональных добавок, в сложных матрицах.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** депрессорные присадки, диспергирующие присадки, функциональные модификаторы, ТГА, реверсивный инжиниринг.

---

Применение метода пиролитической газовой хроматографии с двумерным разделением и масс-спектрометрическим детектированием (Пиро-ГХ×ГХ-МС) для анализа сложных объектов нефтепереработки и нефтехимии обусловлено необходимостью исследования высокомолекулярных и нелетучих соединений. Для таких объектов неприменимы методы прямого анализа с помощью традиционной газовой хроматографии, а большинство других видов анализа недостаточно эффективны и информативны [1,2]. К таким объектам можно отнести присадки к топливам и смазывающим материалам, реагенты химико-технологической защиты оборудования нефтеперерабатывающих заводов, а также нетипичные объекты, образующиеся в процессе работы оборудования нефтеперерабатывающих предприятий. В данной работе проведено исследование составов образцов различной природы, сложность которых требует применения комбинированных методов анализа.

Контроль качества и стабильности состава присадок и реагентов химико-технологической защиты необходим для обеспечения бесперебойной работы предприятий нефтепереработки. Часто действующие вещества данных реагентов (например, ингибиторов коррозии) представлены нелетучими веществами (амидами, имидазолинами жирных кислот и т.п.). Определение состава данных соединений, обнаружение их в составе реагентов и углеводородных потоках соответствующих установок крайне затруднителен. Применение традиционных методов анализа позволяет лишь косвенно судить о составе: инфракрасная спектроскопия фиксирует наличие функциональных групп, однако не обеспечивает однозначной идентификации [3]. В свою очередь, использование Пиро-ГХ×ГХ-МС при температуре 600 °С обеспечивает получение продуктов термодеструкции, характерных для указанных классов соединений, что позволяет достоверно определить состав реагента и/или его присутствие в потоке. В случае возникновения осложнений, связанных с применением реагентов, метод Пиро-ГХ×ГХ-МС позволяет оперативно определить присутствие в составе образцов компонентов реагентов, их структурных фрагментов или продуктов реакции с другими химическими веществами [4].

Однако не во всех случаях задача сводится к определению основных действующих веществ. Состав основных действующих веществ классических присадок к топливам, например депрессорно-диспергирующих, широко известен и может быть подтвержден другими методами анализа. Большую ценность представляет информация о составе функциональных добавок (модификаторов, бустеров). Установлено, что использование стандартных температурных режимов (порядка 600 °С), характерных для классического пиролиза, приводит к глубокой деструкции основных действующих веществ образцов, что не позволяет достоверно идентифицировать минорные компоненты, при этом именно их состав представляет наибольший интерес для целей реверсивного инжиниринга.

Для устранения данного ограничения применено сочетание Пиро-ГХ×ГХ-МС с термогравиметрическим анализом, что позволило определить температурные интервалы начала потери массы образцов и, соответственно, начала протекания процессов, связанных с выделением летучих компонентов. Установлено, что для исследованных депрессорных и диспергирующих присадок данный интервал находится в области 300–400 °С. Проведение пиролиза в указанном диапазоне температур обеспечивает десорбцию компонентов, позволяя фиксировать продукты, наиболее близкие к исходным структурам. Повышение температуры до 400 °С (начало 2-й стадии потери массы по результатам ТГА) позволило идентифицировать группу более высокомолекулярных компонентов, также используемых в качестве добавок к основным действующим веществам.

Таким образом, показано, что использование метода Пиро-ГХ×ГХ-МС, особенно в сочетании с термогравиметрическим анализом, представляет собой эффективный инструмент для исследования сложных нелетучих объектов нефтепереработки и нефтехимии. Разработанный подход позволяет выявлять функциональные компоненты присадок, а также решать задачи подтверждения соответствия состава реагентов и их влияния на процессы нефтепереработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jansson K. D., Zawodny C. P., Wampler T. P. Determination of polymer additives using analytical pyrolysis // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2007. Т. 79. № 1-2. С. 353-361.
2. Wang F. C.-Y. Polymer additive analysis by pyrolysis-gas chromatography // *Journal of Chromatography A*. 2000. Т. 891. № 2. С. 325-336.
3. Cook S., Lehrle R. Characterization and analysis of polymeric additives in oils by pyrolysis-g.c. // *European Polymer Journal*. 1993. Т. 29. № 1. С. 1-8.
4. Bart J. C. J. Polymer/additive analysis by flash pyrolysis techniques // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2001. Т. 58-59. С. 3-28.

## ПРИМЕНЕНИЕ БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ОКСИДОМ ЖЕЛЕЗА (III) В КАЧЕСТВЕ КАТАЛИЗАТОРА В ПРОЦЕССЕ ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА

**Бушуева А.Е., Тиссен Е.А., Третьяков Н.Ю., Зубенко П.А., Григорьев М.В., Елышев А.В.**

Тюменский государственный университет. 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, д.6, n.y.tretyakov@utmn.ru

*В работе рассматриваются результаты исследования каталитического пиролиза полипропилена с использованием модифицированного оксидами железа (III) бентонита в качестве катализатора. Приведен анализ состава продуктов пиролиза методом пиролитической ГХ/МС. Показано, что максимальная селективность по алкенам достигается при содержании 5 %  $Fe_2O_3$ , тогда как увеличение концентрации до 10–15 % приводит к образованию циклических и ароматических соединений и снижению выхода целевых олефинов.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Полипропилен (ПП), каталитический пиролиз, Пиро-ГХ/МС, бентонит, оксид железа.

Пластмассы используются в различных целях благодаря их низкой стоимости и универсальности, однако только 21–26 % пластиковых отходов перерабатывается надлежащим образом. Нынешнее нерациональное использование пластиковых отходов усугубляет загрязнение окружающей среды [1]. К методам переработки пластиковых отходов относится, прежде всего пиролиз [2]. Ключевым результатом такого термического разложения становится получение жидких углеводородных фракций, близких по составу к нефтепродуктам, а также горючих газов и твердого углеродного остатка. Эти топливные продукты могут быть в дальнейшем использованы для генерации тепла и электроэнергии, обеспечивая частичную замену ископаемого сырья. Использование катализаторов в этом процессе способствует снижению температуры разложения и увеличению выхода ценных продуктов реакции. В работе рассматривается эффективность катализаторов на основе бентонита,

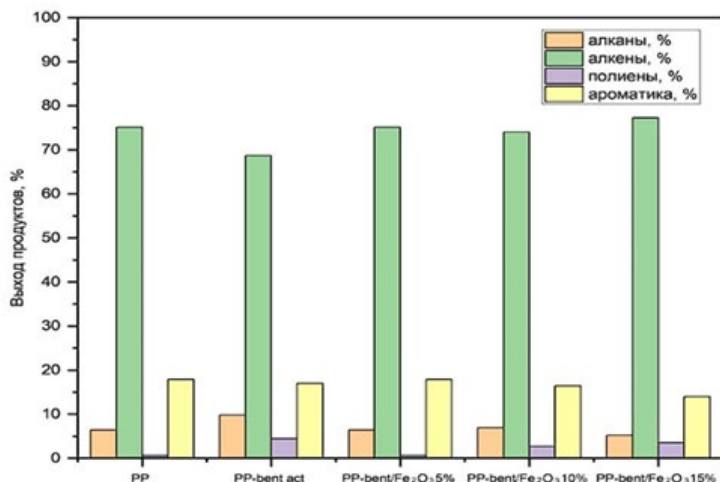


Рисунок 1. Количественный и качественный состав продуктов пиролиза полипропилена

модифицированного различными концентрациями оксида железа (III). Оксиды железа привлекают внимание как одни из наиболее распространенных, экологически безопасных и недорогих каталитических материалов, что подтверждено современными исследованиями [3].

В качестве катализаторов были взяты бентонитовые глины, предварительно активированные. На глинистые подложки

наносили нитрат железа. Чтобы оценить структурные и текстурные свойства полученных образцов, использовали комплекс методов: ИК-Фурье-спектроскопию, рентгеноструктурный анализ и измерение удельной поверхности по БЭТ. Эксперименты по каталитическому пиролизу полипропилена (ПП) проводили на установке Пиро-ГХ/МС с многофункциональным пиролизером Frontier Laboratories (модель EGA/PY-3030D, Япония) в условиях программируемого нагрева. Для этого смешивали катализатор и полиэтилен в массовом отношении 1:10 (1 мг катализатора на 10 мг ПП) и загружали смесь в тигель. Реакцию вели в интервале температур 150–600 °С, поднимая температуру со скоростью 15 °С/мин в атмосфере гелия. Продукты пиролиза, выходящие из реактора, анализировали на газовом хроматографе Agilent 7890В, сопряженном с масс-спектрометром 5977В (США). Ионизацию молекул осуществляли электронным ударом при энергии 70 эВ, а масс-спектры регистрировали в режиме полного сканирования в диапазоне  $m/z$  от 15 до 550, причем нить накала включали с задержкой в 1 минуту.

На рисунке 1 показано, что во всех случаях преобладают алкены, при этом их максимальный выход наблюдается при использовании 5 %-го оксида железа (III). При увеличении содержания  $Fe_2O_3$  до 10 % и 15 % селективность по алкенам уменьшается, что, вероятно, связано с тем, что часть алкенов при более высокой концентрации катализатора превращается в циклические и ароматические соединения. Алкены являются предпочтительными продуктами каталитического пиролиза, поскольку представляют собой ценное нефтехимическое сырьё и легко вступают в реакции полимеризации и гидратации благодаря наличию двойной связи.

Таким образом, селективный катализ при оптимальной концентрации (5 %  $Fe_2O_3$ ) позволяет направить переработку полипропиленовых отходов в русло получения дефицитных олефинов, а не просто топливных смесей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu Q., Jiang D., Zhou H., Yuan X., Wu C., Hu C., Luque R., Wang S., Chu S., Xiao R., Zhang H. Pyrolysis–catalysis upcycling of waste plastic using a multilayer stainless-steel catalyst toward a circular economy // PNAS. — 2023. — Vol. 120, № 39. — P. 1–9.
2. Peng Y., Wang Y., Ke L. et al. A review on catalytic pyrolysis of plastic wastes to high-value products // Energy Conversion and Management. — 2022. — Vol. 254. — P. 115243.
3. Ильин А. А. Получение оксида железа из металлических порошков // Известия вузов. Химия и химическая технология. — 2019. — № 5.

---

### **Благодарность**

*Исследование выполнено при финансовой поддержке НИР ГЗ (FEWZ-2024-0015).*

*Результаты Пиро-ГХ/МС получены с использованием оборудования ЦКП «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» Тюменского государственного университета.*

---

## КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ МЕТОДОМ PY-GC/MS: ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СВОБОДНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ, ПРОДУКТОВ КРЕКИНГА КЕРОГЕНА И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МИНЕРАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ

---

**Видищева О.Н., Костышина М.О., Калмыков А.Г., Калмыков Г.А.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, a.kalmykov@oilmsu.ru, o.vidishcheva@oilmsu.ru

*В работе исследованы возможности метода пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии (Py-GC/MS) для изучения процессов термического преобразования органического вещества (ОВ) нефтематеринских пород на примере образцов баженовской свиты различной степени катагенетической зрелости. Показано, что использование ступенчатого нагрева (до 300 °C и до 650 °C) позволяет дифференцированно оценивать состав подвижных углеводородов (УВ), выделяющихся из породы, и продуктов высокотемпературного крекинга керогена. Экспериментально установлено влияние лабораторного гидропиролиза на изменение молекулярных параметров УВ (распределение n-алканов, соотношения Pr/Ph, n-C<sub>17</sub>/Pr, n-C<sub>18</sub>/Ph, DBT/Phen, MPI-1, 4-MDBT/1-MDBT) и появление специфических индикаторов термического стресса (антрацена и метилантрацена). Сравнительный анализ пиролизатов экстрагированной породы и выделенного керогена при нагреве до 650 °C не выявил существенного влияния минеральной матрицы на состав образующихся углеводородных соединений в условиях эксперимента.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Py-GC/MS, баженовская свита, органическое вещество, кероген, УВ-биомаркеры, термическое преобразование.

---

Изучение процессов генерации и преобразования углеводородов в нефтематеринских толщах, таких как баженовская свита Западной Сибири, является ключевой задачей для оценки их нефтегазогенерационного потенциала. Метод пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии (Py-GC/MS) — аналитический инструмент, позволяющий не только моделировать термическое созревание ОВ, но и детально анализировать состав выделяющихся продуктов. Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью развития подходов, позволяющих комплексно изучать как состав уже сформировавшихся в породе битумоидов (свободных УВ), так и состав продуктов, генерируемых непосредственно при деструкции керогена. Кроме того, важным вопросом остается оценка влияния минеральной матрицы породы на состав пиролизатов, что имеет принципиальное значение при интерпретации данных, полученных на цельных породах и выделенном керогене. Целью работы была демонстрация возможностей метода Py-GC/MS для решения этих задач на примере образцов баженовской свиты из трех скважин.

Для проведения исследования использовался комплекс газовой хромато-масс-спектрометрии Agilent 8890-5977B в комплекте пиролизической приставкой Frontier Lab EGA/PY-3030D, закупленный по Программе развития МГУ.

Для изучения влияния гидропиролиза на состав УВ соединений (анализ при 300 °С) были изучены образцы кремнисто-глинистых пород баженовской свиты из скважин 03 и 07 Западной Сибири, характеризующиеся различной степенью катагенетической зрелости ОВ. Для скв.03 значения  $T_{max}$  составляли 420–434 °С, что соответствует градациям катагенеза  $PK_3-MK_1$  [1]; для скв.07  $T_{max}$  варьировал в диапазоне 435–443 °С, что отвечает уровню зрелости  $MK_1-MK_2$  [1]. Для оценки состава УВ, выделяющихся при умеренном нагреве, использовался анализ в режиме Single Shot при температуре 300 °С. Анализировались образцы исходной (неэкстрагированной) породы, а также породы после эксперимента по гидропиролизу, проведенного при 350 °С в течение 12 часов (методика прогрева подробно изложена в работе [2]).

Для изучения состава УВ, образующихся при деструкции керогена, а также для оценки влияния минеральной матрицы был поставлен эксперимент на образцах из скв. 04. Для каждого образца проводилось два типа анализа в режиме ступенчатого нагрева: анализ экстрагированной породы и анализ керогена, выделенного из породы. Температурная программа включала начальный нагрев до 300 °С для удаления остаточных битумоидов и последующий нагрев до 650 °С, при котором происходил непосредственно крекинг керогена.

Сравнение состава УВ, выделившихся при 300 °С из исходной и прогретой породы, показало ряд изменений, характер которых зависел от исходной зрелости ОВ. После гидропиролиза распределение n-алканов смещается в более высокомолекулярную область с появлением отчетливого максимума на n- $C_{16}$ . Данный пик более выражен в образцах более зрелой скважины 07. Смещение максимума в распределении n-алканов в сторону более высокомолекулярных соединений после гидропиролиза может быть обусловлено тем, что нагрев до 350 °С в течение 12 часов приводит к частичному испарению и термодесорбции наиболее легких фракций УВ (до  $C_{15}$ ), что автоматически увеличивает относительную долю n- $C_{16}+$  компонентов в остаточном флюиде в породе.

Соотношение пристана к фитану (Pr/Ph) незначительно снижается после прогрева для образцов скважины 03 и, напротив, возрастает для скважины 07. Аналогичная тенденция прослеживается для соотношений n- $C_{17}$ /Pr и n- $C_{18}$ /Ph. Снижение Pr/Ph в незрелой скв. 03 и рост в скв. 07 объясняется преобладанием генерации фитана или его деструкции в зависимости от исходной зрелости. В менее зрелой скважине 03, где генерационный потенциал керогена еще высок, гидропиролиз приводит к высвобождению дополнительного количества фитана (часто связанного с более восстановленными условиями диагенеза исходного ОВ), что временно снижает отношение Pr/Ph. В более зрелой скважине 07 свободный генерационный потенциал в области  $C_{19}-C_{20}$  (фитан) частично исчерпан природным катагенезом, и на первый план выходит процесс предпочтительной деструкции менее термостабильного фитана по сравнению с пристаном, что ведет к росту значения Pr/Ph. Аналогичная тенденция для n- $C_{17}$ /Pr и n- $C_{18}$ /Ph подтверждает, что скорость новообразования n-алканов при гидропиролизе выше, чем скорость новообразования изопреноидов, либо что изопреноиды более активно расходуются в реакциях крекинга.

Соотношение регулярных стеранов  $C_{27}:C_{28}:C_{29}$  остается стабильным. Отсутствие значимых изменений в соотношении регулярных стеранов свидетельствует о том, что достигнутая температура (350 °C) и длительность гидропиролиза недостаточны для изменения конфигурации стерановых углеводородов или селективной деструкции гомологов  $C_{27}$ ,  $C_{28}$  и  $C_{29}$ . Это делает данный параметр надежным индикатором исходного типа ОВ и фациальных условий даже после термического воздействия, не достигающего стадий глубокого мезокатагенеза.

Параметр DBT/Phen (дибензотиофен/фенантрен) снижается для обеих скважин. Уменьшение отношения дибензотиофена к фенантрону после гидропиролиза может быть связано с новообразованием фенантрена в результате ароматизации полициклических структур керогена.

Параметр MPI-1 (метилфенантреновый индекс) закономерно увеличивается после прогрева, отражая рост термической зрелости ОВ, что является классическим и ожидаемым результатом термического воздействия. Соотношение 4-MDBT/1-MDBT (4-метилдибензотиофен/1-метилдибензотиофен), практически не изменяются. Переход 4-MDBT в 1-MDBT требует более жестких температурных условий или большей длительности.

После гидропиролиза в составе продуктов фиксируется появление антрацена ( $m/z$  178) и, предположительно, метилантрацена ( $m/z$  192, элюируется между пиками метилфенантренов), что может служить надежным признаком высокотемпературного воздействия на ОВ.

Исследование УВ, образующихся при 650 °C, не выявило значительного влияния минеральной матрицы породы на состав продуктов. Распределение *n*-алканов в пиролизатах экстрагированной породы и выделенного керогена оказалось практически идентичным. Во всех образцах в продуктах пиролиза наблюдаются алкены (элюируются перед соответствующими *n*-алканами), а также интенсивные пики антрацена и предполагаемого метилантрацена, что указывает на сходные пути термической деструкции керогена как в присутствии минеральной матрицы, так и без нее.

Таким образом, метод Py-GC/MS с использованием ступенчатого нагрева является эффективным инструментом для комплексного исследования процессов термического преобразования ОВ пород, позволяя отдельно анализировать состав подвижных битумоидов (до 300 °C) и продуктов высокотемпературного крекинга керогена (до 650 °C).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вассоевич Н.Б., Тимофеев П.П. Нефтематеринские свиты и признаки их диагностики. М.: Наука, 1979. 264 с.
2. Григоренко Т. В. и др. Характеристика органического вещества доманиковых отложений и насыщающих их флюидов на территории Республики Татарстан //Георесурсы. – 2025. – Т. 27. – №. 1. – С. 221-235.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ ХРОМАТОГРАФИИ В ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ БИОМАСЕЛ

**Волков Д.А.**

Университет ИТМО, mityavolckov@itmo.ru, «Национальный исследовательский университет ИТМО» г. Санкт-Петербург

*Представлены опытные результаты испытания различных типов катализаторов для облагораживания продуктов пиролиза биомассы лигноцеллюлозного типа методами пиролитической газовой хроматографией. Описана методология эксперимента, ее преимущества и недостатки. По результатам работы определено, что применение комплекса пиролитической газовой хроматографии является наиболее оптимальным решением для исследования процессов каталитического пиролиза биомасс.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пиролиз, биомасса, катализ, хроматография, лигноцеллюлоза, биотехнологии.

Альтернативные источники энергии и переработка органических отходов становятся объектом интереса все большего числа исследователей. Каталитический пиролиз биомассы, органического вторичного сырья, является одним из наиболее перспективных способов получения аналога ископаемого топлива [1]. Данный процесс основан на термической деструкции природных полимеров, таких как лигноцеллюлоза, маслосодержащая биомасса или биомассы водорослей. К полезным продуктам пиролиза биомасс относят фенолы, спирты, простые эфиры, фураны и углеводороды. Для повышения их выхода используют различные типы катализаторов, преимущественно на основе солей щелочных металлов и цеолитов [2, 3]. Одной из основных задач, стоящих в области пиролиза органического вещества, является анализ и мониторинг продуктов пиролиза, выявления зависимостей от используемого катализатора [4]. В данной работе, влияние катализаторов на продукты пиролиза анализировалось методами пиролитической газовой хроматографии с масс-селективным детектором. Наибольшую эффективность показали гидрокарбонатные катализаторы с ионами Na<sup>+</sup> и K<sup>+</sup> при концентрациях 2 % и 5 %. Выход целевых продуктов, таких как фенолы, кетоны и альдегиды, при использовании данных катализаторов является наиболее оптимальным. Количество остаточных углеводов минимально, что говорит о высокой степени конверсии исходного сырья.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang W., Lemaire R., Bensakhria A., Luart D. Review on the catalytic effects of alkali and alkaline earth metals (AAEMs) including sodium, potassium, calcium and magnesium on the pyrolysis of lignocellulosic biomass and on the co-pyrolysis of coal with biomass // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2022. – Vol. 163. – P. 105-126.
2. Chen W., Tao X., Shi X. и др. «Insight into Catalytic Effects of Alkali Metal Salts Addition on Bamboo and Cellulose Pyrolysis» // npj Materials Sustainability. – 2024. – Vol. 2. – P. 25.

3. Mahadevan R. et al. Effect of alkali and alkaline earth metals on in-situ catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: A microreactor study // *Energy & Fuels*. – 2016. – Vol. 30. – P. 3045–3056.
4. Kumar R., Strezov V., Kan T., Weldekidan H., He J., Jahan S. Investigating the Effect of Mono- and Bimetallic/Zeolite Catalysts on Hydrocarbon Production during Bio-oil Upgrading from Ex Situ Pyrolysis of Biomass // *Energy & Fuels*. – 2020. – Vol. 34, No 1. P. 389–400.

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДОННЫХ ОСАДКОВ В РАЙОНЕ МЕТАНОВЫХ ЭМИССИЙ И НА ФОНОВЫХ УЧАСТКАХ ЧЕРНОГО МОРЯ

Оберемок И.А.<sup>1</sup>, Гринько А.А.<sup>1</sup>, Малахова Т.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-технологический университет «Сириус», ФТ Сириус

<sup>2</sup>ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»

*В работе проведено исследование состава органического вещества методом пиролитической хроматографии-масс-спектрометрии донных осадков Черного моря, отобранных в зоне метановых эмиссий (сиповая зона) и за ее пределами (фон). Показано, что для осадков сиповой зоны характерна специфичная картина биомаркеров, характеризующихся повышенным содержанием липидных компонентов микробного происхождения на фоне дефицита углеводных и лигниновых структур; фоновые осадки сохраняют типичный облик ОВ смешанного морского и терригенного генезиса с выраженной углеводной составляющей.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** масс-спектрометрия, пиролитическая хроматография, Черное море, метановые эмиссии, донные осадки, органическое вещество.

Образцы донных осадков были отобраны в ходе прибрежных экспедиций по Черному морю в августе 2024–2025 гг. на рейсах на НИС «Профессор Водяницкий» (132 и 137 рейсы). Образцы отобраны с шельфовой части с небольших глубин, выше пикноклина, т.е. в кислородсодержащей водной толще. В прибрежных водах за пределами шельфа верхние 60 м насыщены кислородом и поддерживают аэробное дыхание (Collins et al., 2016). Отбор проводился возле мыса Мартьян на метановом полигоне (Malakhova et al., 2025) (Рис. 1) при помощи гравитационной трубы длиной 3 м (GC-corer), верхний слой осадков отбирался специальным вакуумным пробоотборником не нарушающим структуру осадка (mini-corer).

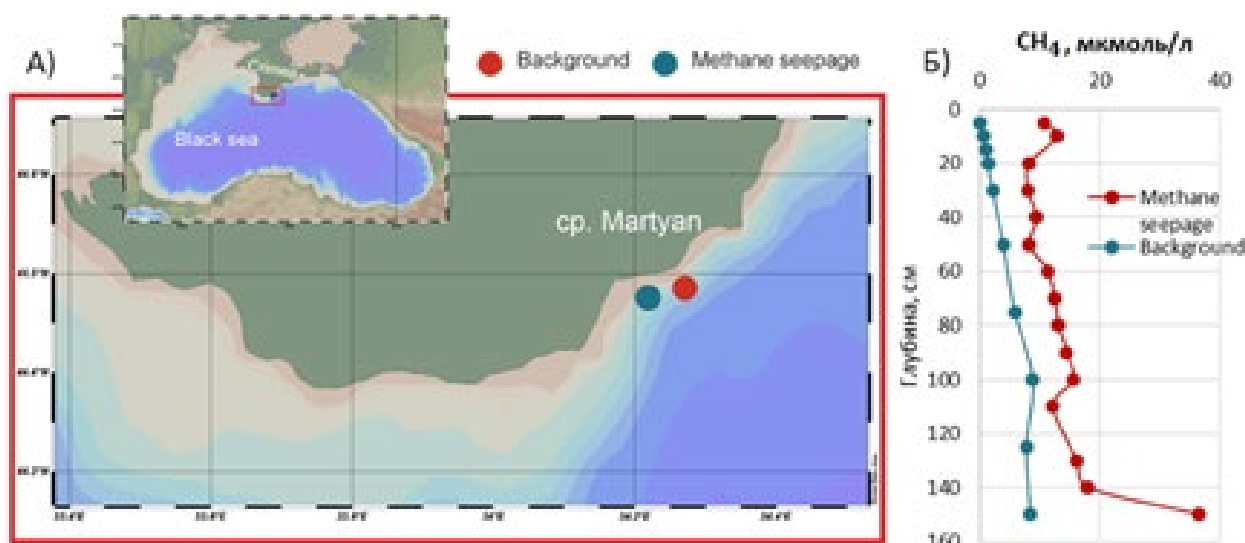


Рисунок 1. Карта отбора (А) и содержание растворенного газа в осадках (Б)

## Методика

Пиро-ГХМС анализ позволяет идентифицировать как продукты деструкции нерастворимого ОВ («биогеополимеры»), так и легкокипящие слабосвязанные с минеральной матрицей компоненты. В методе Пиро-ГХМС не могут быть надежно вычислены реальные концентрации идентифицированных соединений, но может быть оценен их вклад в суммарное количество образуемых продуктов пиролиза (% отн.), позволяя таким образом проводить полуколичественный анализ и сравнивать образцы друг с другом (Guo et al., 2004). Анализ выполнялся на комплексном приборе ГХ-МС с пиролитическим испарителем производства ЗАО СКБ «Хроматэк». Образец измельченной и высушенной породы массой 10 мг помещался в специальный кварцевый контейнер, который погружался в кварцевую трубку, в нижней части которой была помещена кварцевая вата. Пиролиз проводился в инертной среде (гелий) при температуре 600 °С в течение 5 мин, скорость нагрева 2000 °С/мин. Условия хроматографического разделения продуктов пиролиза были следующие: капиллярная колонка Rxi-5 (длина 30 м, диаметр 0,25 мм, толщина фазы 0,25 мкм), скорость потока газа-носителя (гелий) 1 мл/мин, программируемый нагрев термостата колонки — начальная температура 40 °С, затем нагрев со скоростью 8 °С/мин до 130 °С, далее нагрев со скоростью 12 °С/мин до 310 °С, выдержка 13 мин. Параметры работы масс-детектора: температура переходной линии 300 °С, температура источника ионов 280 °С, диапазон сканирования масс 40–550 а.е.м. Идентификация соединений проводилась по соответствующим молекулярным ионам и ионам-продуктам, при использовании литературы и справочников по масс-спектрометрии и библиотек масс-спектров NIST 2020. Концентрация каждого компонента рассчитывалась как относительная на сумму всех пиков по TIC.

Таблица 1. Основные группы неэкстрагируемых компонентов органического вещества (NEOC – non-extractable organic components) в соответствии с (Guo et al., 2004; Sparkes et al., 2016)

Группы компонентов	Значение
Furfurals (фурфуролы)	Продукты деградации полисахаридов
Alkylbenzenes (алкилбензолы)	Наиболее распространены в почвах и формируются в анаэробных условиях
Nitriles (нитрилы)	Образуются из полипептидов и указывают на хорошо гумифицированную среду
Phenols (фенолы)	Ключевые компоненты лигнина
Pyridines (пиридины)	Являются продуктами разрушения ОВ морской первичной продуктивности
Cyclopentenones and furanes (циклопентеноны и фураны)	Являются продуктами пиролиза полисахаридов

## Результаты

На рисунке 2 представлены пирограммы исследуемых образцов (TIC). В таблице 2 приведены основные характеристичные группы соединений, по суммарной концентрации которых проводят сравнительный анализ. Количество идентифицируемых компонентов больше (спектр компонентов шире) в зоне метановых эмиссий (сиповой зоне) по сравнению с фоновой зоной (51 против 46), что согласуется с большей продукцией ОВ в сиповых зонах, способного сорбироваться на минеральной матрице осадка. В продуктах пиролиза обеих станций идентифицировано 57 соединений, относящихся к различным классам: предельные и непредельные углеводороды (алкены/алканы), ароматические структуры (алкилбензолы, ПАУ), кислородсодержащие производные (фураны, жирные кислоты, спирты, кетоны) и азотсодержащие соединения (нитрилы, амиды). Максимальным содержанием в пиролизатах обеих станций характеризуется *n*-гексадекановая кислота, доля которой составляет 47,47 % (отн.) в осадках сипа и 34,74 % в фоновых осадках. Вторым по интенсивности пиком является октадекановая кислота с содержанием 22,75 % и 13,99 % соответственно. Суммарный вклад идентифицированных жирных кислот ( $C_{14}$ – $C_{18}$ ) составляет 74,10 % для сиповой станции и 51,89 % для фоновой. Среди алифатических углеводородов в составе пиролизатов зафиксированы *n*-алканы ряда  $C_{14}$ – $C_{22}$  и *n*-алкены ряда  $C_{11}$ – $C_{20}$ . Содержание индивидуальных гомологов варьирует в диапазоне от 0,05 % (октадекан, сип) до 0,58 % ((*E*)-2-додецэн, фон). В образце сиповой станции идентифицированы тетрадекан (0,10 %), генэйкозан (0,08 %) и докозан (0,10 %), отсутствующие в фоновом осадке. На фоновой станции зарегистрированы 1-ундецэн (0,53 %), (*E*)-5-октадецэн (0,36 %) и нонадекан (0,39 %), содержание которых на сипе ниже в 1,7–3,3 раза. В группе азотсодержащих соединений доминируют амиды жирных кислот. Среди кислородсодержащих гетероциклических соединений в фоновом осадке зафиксированы фурфурол (1,35 %), 2-метилфуран (2,03 %) и 2-винилфуран (0,89 %), в то время как в сиповой пробе обнаружен только фурфурол с содержанием 0,53 %. Бутилизобутиловый эфир себациновой кислоты присутствует только в фоновом осадке (3,13 %), а дибутиловый эфир декандиовой кислоты в фоне достигает 2,79 % против 1,28 % на сиповой станции. В составе ароматических соединений в сиповом осадке идентифицированы 3-феноксифенол (0,13 %) и изохинолин (0,09 %), в фоновом — флуорен (0,15 %) и *n*-нонадеканол (0,13 %). Сквален зарегистрирован в обеих пробах с содержанием 1,22 % в сипе и 0,58 % – в фоне. 3-сульфо-*L*-аланин (0,75 %) идентифицирован исключительно в пробе сипа, на фоновой станции данное соединение не зафиксировано. Повышенные концентрации гексадеканамида и сквалена на сиповой станции относительно фоновой могут служить маркерами аккумуляции ОВ, ассоциированного с автохтонным генезисом, которая в области метановых газовыделений проявляется в значительно большей степени. Более высокое содержание кислот  $C_{16}$ – $C_{18}$  (Сип/Фон = 1,37–1,63) и сквалена (Сип/Фон = 2,10) свидетельствуют о селективном накоплении алифатических структур в зоне метановой разгрузки (Elvert et al., 2003). Снижение содержания фурфурола, 2-метилфурана и 2-винилфурана на сиповой станции (Сип/Фон = 0,16–0,39) указывает на снижение вклада полисахаридов (Fabbri et al., 2005). Фурановые производные являются маркерами пиролиза целлюлозы и гемицеллюлоз, поступающих в осадок преимущественно с терригенным стоком (Salot et al., 1984). Их низкое содержание в зоне сипа может быть связано с микробной утилизацией углеводов в зоне активной сульфатредукции и метаногенеза, сопутствующих флюидной разгрузке.

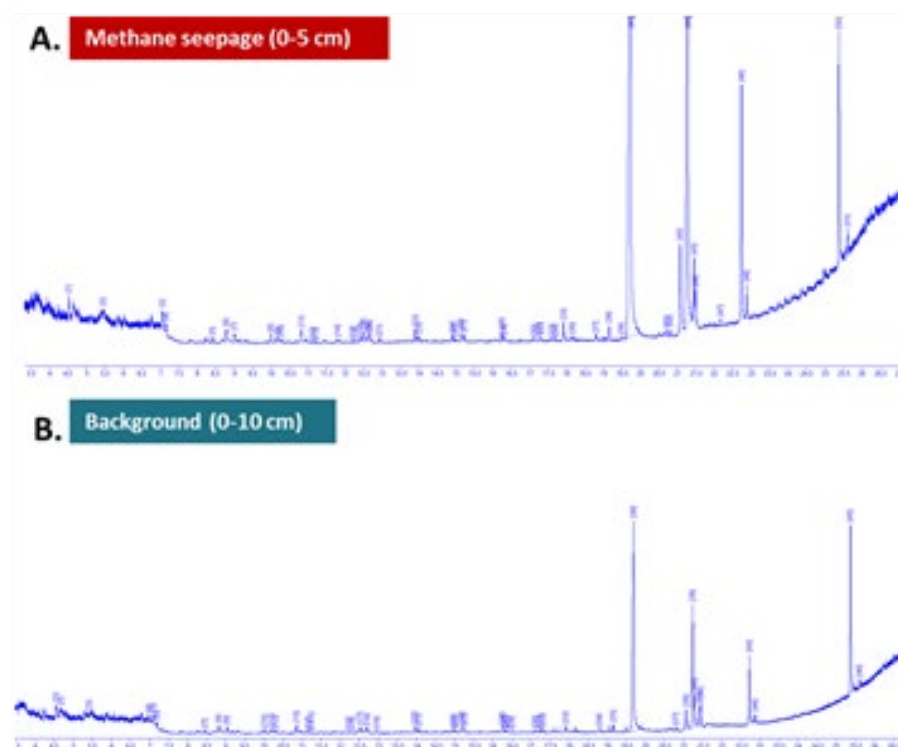


Рисунок 2. Py-GC/MS хроматограмма основных пиков (TIC) образца «0-5 Seep Мартьян» (A) и образца «0-10 Background Мартьян» (B)

Таблица 2. Сравнительный анализ групп компонентов осадка, отобранного в области метановых эмиссий в сравнении с фоновой зоной

Группы компонентов	Сип	Фон	Сип/Фон
Furfurals (фурфуролы)	0,53	1,35	0,39
Alkylbenzenes (алкилбензолы)	1,52	2,66	1,57
Nitriles (нитрилы)	0,75	1,08	0,69
Phenols (фенолы)	0,13	0,00	–
Pyridines (пиридины)	0,00	0,00	–
Cyclopentenones and furanes (циклопентеноны и фураны)	0,00	3,32	–
Алканы и алкены	2,53	5,86	0,43
Прочие	94,54	85,73	1,10

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Collins, P.C., Carlsson, J., Rowcroft, P., Tibbles, B., 2016. Ecosystem status of the deep Black Sea, soft sediment, benthic community. *Marine Policy* 73, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.07.016>
- Elvert, M., Boetius, A., Knittel, K., Jørgensen, B.B., 2003. Characterization of Specific Membrane Fatty Acids as Chemotaxonomic Markers for Sulfate-Reducing Bacteria Involved in Anaerobic Oxidation of Methane. *Geomicrobiology Journal* 20, 403–419. <https://doi.org/10.1080/01490450303894>
- Fabbri, D., Sangiorgi, F., Vassura, I., 2005. Pyrolysis–GC–MS to trace terrigenous organic matter in marine sediments: a comparison between pyrolytic and lipid markers in the Adriatic Sea. *Analytica Chimica Acta* 530, 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.09.020>

4. Guo, L., Semiletov, I., Gustafsson, Ö., Ingri, J., Andersson, P., Dudarev, O., White, D., 2004.
5. Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: Implications for terrestrial organic carbon export. *Global Biogeochemical Cycles* 18, 2003GB002087. <https://doi.org/10.1029/2003GB002087>.
6. Malakhova, T.V., Makarov, M.M., Khurchak, A.I., Stetsiuk, A.P., Kucher, K.M., Syrбу, N.S., Legkodimov, A.A., Ivanov, M.V., Budnikov, A.A., 2025. Shallow gas seeps offshore Crimea (Black Sea): Mapping, bubble flow quantification and geochemical study. *Regional Studies in Marine Science* 89, 104290. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104290>.
7. Saliot, A., Ulloa-Guevara, A., Viets, T.C., De Leeuw, J.W., Schenck, P.A., Boon, J.J., 1984. The application of pyrolysis-mass spectrometry and pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry to the chemical characterization of suspended matter in the ocean. *Organic Geochemistry* 6, 295–304. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(84\)90051-2](https://doi.org/10.1016/0146-6380(84)90051-2).
8. Sparkes, R.B., Doğrul Selver, A., Gustafsson, Ö., Semiletov, I.P., Haghypour, N., Wacker, L., Eglinton, T.I., Talbot, H.M., Van Dongen, B.E., 2016. Macromolecular composition of terrestrial and marine organic matter in sediments across the East Siberian Arctic Shelf. *The Cryosphere* 10, 2485–2500. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2485-2016>.

---

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда  
№ 24-17-20030, <https://rscf.ru/en/project/24-17-20030/>.*

---

## ВЫДЕЛЕНИЕ МИКРОПЛАСТИКА ИЗ МОРСКОЙ ВОДЫ МЕТОДОМ ПРОТИВОТОЧНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПИРО-ГХ/МС

---

**Дженлода Р.Х., Ермолин М.С., Иванеев А.И., Савонина Е.Ю.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва, dzhenloda@geokhi.ru

*В работе рассматривается применение противоточной хроматографии в сочетании с пиролизной газовой хроматографией–масс-спектрометрией для выделения и количественного анализа микропластика. Показана высокая эффективность метода и возможность его использования для мониторинга загрязнения морских экосистем*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** микропластик, противоточная хроматография, Пиро-ГХ/МС, морская вода, загрязнение.

---

Микропластик представляет собой частицы полимеров размером менее 5 мм, которые широко распространены в морской среде и способны накапливаться в экосистемах. Основными источниками микропластика являются разрушение пластиковых отходов и прямое поступление пластиковых частиц в окружающую среду. Традиционные методы выделения микропластика, такие как фильтрация и разделение по плотности, обладают рядом ограничений, включая низкую селективность и трудности при анализе мелкодисперсных частиц [1].

В работе предложен подход к выделению микропластика с использованием противоточной хроматографии [2]. Метод основан на распределении частиц между двумя несмешивающимися фазами — водной и органической. За счёт гидрофобных свойств микропластик преимущественно переходит в органическую фазу, что обеспечивает его эффективное извлечение из водной фазы. Анализ состава и количественное определение микропластика осуществлялись методом пиролитической газовой хроматографии–масс-спектрометрии.

Полученные результаты показали, что предложенный метод позволяет выделять частицы размером до 1 мкм и обеспечивает высокую воспроизводимость результатов. В исследованных образцах морской воды обнаружены основные виды микропластика, при этом их суммарная концентрация составила около 6,5 мкг/л [3].

Предложенный метод обладает рядом преимуществ, включая высокую селективность, возможность предварительного концентрирования и применимость к сложным природным объектам. Это делает его перспективным инструментом для экологического мониторинга и дальнейшей стандартизации методов анализа микропластика.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ermolin M.S. Assessment of the Microplastics Content in Natural Waters and Sediments: Sampling and Sample Preparation. J Anal Chem 79, 500–519 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1061934824050058>
2. Ermolin M.S., Ivaneev A.I., Savonina E.Y., Dzhendloda R.Kh. Extraction of Microplastics from River Water in a Rotating Coiled Column Using a Water–Oil System. J Anal Chem 80, 432–441 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1061934824701909>
3. Ermolin M., Ivaneev A., Savonina E., Dzhendloda R., Maryutina T., Fedotov P. Separation and Quantification of Microplastics in Black Sea Water Using a Combination of Countercurrent Chromatography and Pyro-GC-MS. Microplastics 5(1), 21, (2026). <https://doi.org/10.3390/microplastics5010021>

---

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-13-00263).*

---

## ПРИМЕНЕНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ ХРОМАТОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА НЕФТЕМАТЕРИНСКИХ ПОРОД БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

---

**Дженлода Р.Х., Коноплева И.В.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва, dzhenloda@geokhi.ru

*Баженовская свита является одним из ключевых нефтематеринских комплексов России, характеризующимся высоким содержанием органического вещества. В работе рассмотрены возможности пиролитической газовой хроматографии для изучения состава и термохимических свойств органического вещества данных пород. Показано, что метод позволяет оценивать генерационный потенциал и степень термической зрелости органического вещества с использованием современного аналитического оборудования.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пиролиз, пиролитическая газовая хроматография, нефтематеринские породы, Баженовская свита, органическое вещество, кероген.

---

Баженовская свита представляет собой один из наиболее значимых нефтематеринских комплексов Западной Сибири, характеризующийся высоким содержанием органического вещества сапропелевого типа. Изучение состава и преобразованности органического вещества имеет важное значение для оценки нефтегенерационного потенциала пород и прогноза формирования углеводородов.

Пиролитическая газовая хроматография является эффективным методом анализа керогена, основанным на его термическом разложении с последующим разделением и идентификацией продуктов пиролиза. Получаемые хроматографические профили позволяют судить о составе органического вещества, его генезисе и степени термической зрелости [1,2].

Исследование выполнено с использованием газового хроматографа «Маэстро ГХ» и масс-детектора «Маэстро Альфа МС» (ИНТЕРЛАБ, Россия), оснащённых пиролитической печью (Frontier Lab, Япония). Пиролиз образцов проводился в контролируемом температурном режиме, обеспечивающем эффективное разложение керогена с образованием летучих продуктов. Разделение и идентификация соединений осуществлялись методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием.

В работе исследованы образцы пород Баженовской свиты. Анализ продуктов пиролиза показал, что их состав существенно зависит от степени термической зрелости органического вещества. Для менее зрелых образцов характерно преобладание высокомолекулярных углеводородов, тогда как при увеличении зрелости возрастает доля низкомолекулярных соединений и ароматических структур.

Полученные данные свидетельствуют о высокой информативности метода при оценке состава органического вещества. Пиролитическая газовая хроматография позволяет выявлять закономерности трансформации керогена и использовать их для интерпретации геохимических процессов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лопатин Н.В., Емец Т.П. Пиролиз в нефтегазовой геохимии. М.: Наука, 1987.
2. Герасимов Р.С., Свирский К.С. Пиролитическая хроматография для геохимических исследований нефтеносных горных пород: новый взгляд на классический метод. Аналитика 9(2), 144-149 (2019). <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2019.09.2.144.149>

---

*Авторы выражают благодарность сотрудникам АО «Томск НИПИнефть» Трушкову П.В., Гончарову И.В. за предоставленные образцы пород для исследований.*

*Работа выполнена по теме государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).*

---

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПИРО-ГХМС ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ НЕФТЕОТДАЧИ ПОСЛЕ ПАРОТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОРОДЫ ГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

---

**Мухаматдинова Р.Э.<sup>1</sup>, Дуглав Ю.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий, НИЛ Внутрипластовое горение, г. Казань, lkm.rm@mail.ru

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий, НИЛ Утилизация диоксида углерода в подземных естественных резервуарах, г. Казань, JulianaD@inbox.ru

*На примере пород Горского месторождения пиролитической газовой хроматографии-масс-спектрометрии (Пиро-ГХМС) получены пиролитические параметры, количественно оценивающие степень выработки керогена под паротепловым воздействием различных температур в лабораторных условиях. Описана методика исследований с использованием пиролитической ячейки, продемонстрирована высокая информативность подхода для мониторинга динамики термической трансформации органического вещества и эффективности паротеплового метода повышения нефтеотдачи.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** паротепловое воздействие, Пиро-ГХМС, пиролитические параметры, лабораторное моделирование, термическая зрелость.

---

В настоящей работе исследованы породы Горского месторождения — одного из крупнейших объектов сверхвязкой нефти (СВН) — на различных этапах паротеплового воздействия с целью изучения изменений пиролитических параметров [1]. Комплексный анализ проведен методом пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии (Пиро-ГХМС) для оценки эффективности термического воздействия на трансформацию органического вещества.

Паротепловое воздействие (ПТВ) на породы представляет собой высокоэффективный метод увеличения нефтеотдачи, применяемый преимущественно на месторождениях с высоковязкими нефтями. ПТВ на породу помимо увеличения нефтеотдачи преследует дополнительные стратегические цели в нефтедобыче [2].

Геохимические исследования органического вещества (ОВ) в нефтематеринских породах — ключевой этап оценки нефтегазоносности. Пиролитические исследования, в частности, предоставляет данные о количестве, качестве и зрелости ОВ, а также количественно характеризует его термическую трансформацию на стадиях паротеплового воздействия, прогнозируя эволюцию генерационного потенциала. Для пород Горского месторождения метод позволяет отслеживать остаточный потенциал после паротепловых циклов.

В лаборатории геохимии органического вещества нефтей и пород совместно с НИЛ «Внутрипластовое горение» КФУ проведены пиролитические испытания с использованием системы Пиро-ГХМС (EGA/PY-3030D + Agilent 7890B + 5977B MSD), результаты обработаны в Agilent MassHunter. Тонкодисперсный порошок породы (0,20–0,25 мм,

300–500 мкг) подвергался ступенчатому пиролизу в гелиевом потоке: 100–300 °С (600 °С/мин), 300–650 °С (30 °С/мин) — режим Bulk Rock (Rock-Eval 6) [3]. ТОС/MinC определяли на Метавак-CS10 при рабочей температуре 1100 °С. Лабораторное моделирование процесса некаталитического акватермолиза проводилось в реакторе высокого давления R-201 Series Control System фирмы Reaction engineering с загрузкой образца битуминозного песка и воды при соотношении 10:1. Смесь породы и воды подвергалась температурному воздействию при температурах 250 °С и 300 °С в течение 24, 48 и 72 часов [4].

В настоящей работе проанализированы образцы пород из скважин Горского месторождения: исходные и подвергшиеся паротепловому воздействию при различных температурах и временах выдержки после экстрагирования. В ходе исследований определены ключевые пиролитические параметры — S1, S2, S3, Tmax и ТОС — с последующей сравнительной характеристикой трансформации органического вещества на всех этапах лабораторного моделирования. Результаты представлены в таблице 1.

Согласно полученным данным, исходный образец относится к породам с очень хорошим потенциалом, генерирующим преимущественно нефть, по показателю Tmax ОВ является термически незрелым и соответствующим тяжелой нефти. При исследовании образцов после экстрагирования выявлено, что нерастворимое ОВ является незрелым, с бедным (плохим) генерационным потенциалом [5].

Можно сделать вывод, что воздействие пара при высоких температурах оказывает значительное влияние на нерастворимое ОВ осадочных пород. ПТВ при 250 °С приводит к небольшому увеличению содержания общего органического углерода, ОВ также остается «незрелым», однако происходит увеличение показателя S2, определяющего остаточный генерационный потенциал. Воздействие пара при 300 °С приводит к более существенным изменениям: происходит увеличение количества органического углерода, свободных углеводородов и остаточного генерационного потенциала, а также происходит «созревание» ОВ. Так, при проведении эксперимента в течение 24 и 48 часов ОВ переходит в стадию «ранней зрелости», при этом сохраняется нефтяная генерационная способность. При продолжительности эксперимента в течение 72 часов значение Tmax соответствует поздней зрелости и ОВ утрачивает нефтегенерационную способность и переходит в стадию газообразования [6].

Таблица 1. Результаты пиролитических исследований образцов Горского месторождения после ПТВ

Образец породы	Температура ПТВ, °С	Время воздействия ПТВ, часы	S1, мг/г	S2, мг/г	Tmaxi, °С	ТОС, % массы образца	Н1, мг УВ / г ТОС
Исходный	-	-	21.27	9.83	427	2.14	460
Исходный после экстракции	-	-	0.20	0.10	418	0.07	144
1*	250	24	0.27	0.27	427	0.09	301
2		48	0.26	0.22	428	0.08	282
3		72	0.20	0.17	428	0.06	283
4	300	24	0.21	0.46	440	0.12	448

Образец породы	Температура ПТВ, °С	Время воздействия ПТВ, часы	S1, мг/г	S2, мг/г	Tmaxi, °С	ТОС, % массы образца	Н1, мг УВ / г ТОС
5		48	0.28	0.50	440	0.22	223
6		72	0.72	0.43	454	0.44	99

*\*Образцы пород после паротеплового воздействия при 250/300 °С в течение 24, 48 или 72 часов с последующей экстракцией*

Таким образом, применение пиролитической системы EGA/PY3030D в методе Пиро-ГХМС демонстрирует исключительную эффективность для оценки динамики нефтеотдачи после паротеплового воздействия. Ключевое преимущество заключается в использовании масс-селективного детектора для детального анализа продуктов пиролиза и гибкой конструкции с заменой капилляра на колонку [3]. Комплексный подход позволяет количественно охарактеризовать эволюцию пиролитических параметров керогена — от сохранения остаточного генерационного потенциала до его истощения под влиянием контролируемой термической нагрузки, адекватно моделируя пластовые процессы. Такой анализ продуктов пиролиза обеспечивает высокую прогностическую надежность, выявляя оптимальные режимы паротепловой стимуляции для максимизации извлечения углеводородов из трудноизвлекаемых запасов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рачевский Б.С., Цао Бо. Высоковязкая тяжелая нефть — альтернатива традиционной нефти // Транспорт на альтернативном топливе. 2015. № 6(48). С. 40-43
2. Muraza O., Galadima A. Aquathermolysis of heavy oil: A review and perspective on catalyst development / Fuel. 2015. №157. P. 219-231
3. МИ № 205-02 / RA.RU.311787-2016 / 2018 Методика определения массовой доли суммы свободных углеводородов, массовой доли суммы углеводородов пиролиза нерастворимых органических веществ в пробах нефтеносных горных пород методом пиролитической хроматографии.
4. Туманян Б.П., Петрухина Н.Н., Какюкова Г.П., Нургалиев Д.К., Фосс Л.Е., Романов Г.В. Акватермолиз нефтей и природных битумов: химизм процесса, катализаторы, перспективы промышленной реализации // Успехи химии. 2015. № 84 (11). С. 1145–117
5. Peters K. E. Applied source rock geochemistry / K.E. Peters, M.R. Cassa // Pet Syst - from source to trap. - 1994. - P. 93-120.
6. Peters K.E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis / K.E. Peters // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1986. Vol. 70. P. 318-329.

---

*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 26-27-20062*

---

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ХРОМАТОГРАФИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИРОДНЫХ ТЕРПЕНОКУМАРИНОВ

**Клюбина А.В.<sup>1,2</sup>, Шаварда А.Л.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Научный Парк СПбГУ, Ресурсный Центр «Развитие Молекулярных и Клеточных Технологий», Санкт-Петербург, Россия, a.klyubina@spbu.ru

*Исследована возможность идентификации четырёх изомеров терпенокумаринов дриманового ряда. В работе показано, что сочетание пиролитической газовой хроматографии с методом главных компонент (РСА) позволяет различить четыре изомерные структуры (бадракемин, колладонин, фарнезиферол, гуммозин) с помощью измерения их физико-химических параметров. Подход позволяет дополнить хромато-масс-спектрометрические данные паттернами продуктов пиролиза, что обеспечивает достаточно надежную идентификацию.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** терпенокумарины, молекулярный ресурс, ГХ-МС, пиролиз.

Терпенокумарины, химерные соединения, представляющие собой сесквитерпеновые спирты, конъюгированные простой эфирной связью с кумарином (чаще всего, умбеллифероном), являются крайне специфической частью молекулярного ресурса высших растений. Объекты исследования – четыре энантиомера кумаринового эфира сесквитерпенового спирта альнинканола, которые входят в состав смолы, заполняющей схизо-лизигенные секреторные вместилища в корнях и плодах растений, принадлежащих роду *Ferula*.

Исследована возможность идентификации четырёх изомеров терпенокумаринового ряда — бадракемина, колладонина, фарнезиферола и гуммозина — которые различаются исключительно конфигурацией двух хиральных атомов C-3' и C-9' (Рис. 1). Прямой газохроматографический анализ позволяет разделить эти соединения, но из-за практически одинаковой летучести и полярности разница в их индексах удерживания слишком мала, чтобы надежно аннотировать конкретный изомер в метаболитном пуле, особенно, если в нем присутствует только одно из этих соединений. Масс-спектры этих соединений тоже не имеют выраженных характерных особенностей. Все это, с учетом слабой аппаратной воспроизводимости хромато-масс-спектрометрических данных делает идентификацию этих компонентов невозможной. Применение пиролитической газовой хроматографии (Pyro-GC/MS) приводит к термическому разрушению молекул с образованием многокомпонентной смеси летучих продуктов, состав и соотношение которых отражают структурные особенности исходных изомеров.

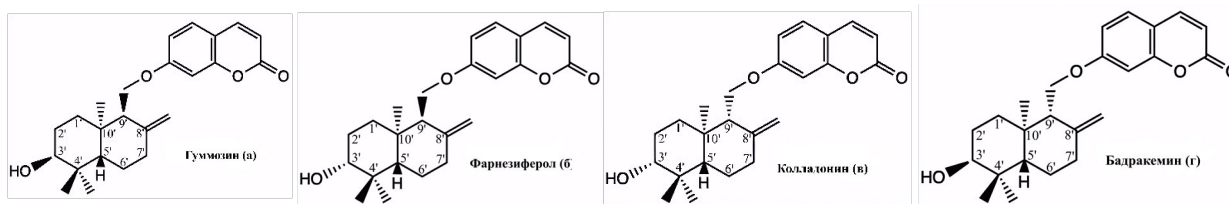


Рисунок 1. Структурные формулы терпенокумаринов

Для каждого соединения получены пиролизические хроматограммы и определены относительные содержания пиков, которые встречаются не менее чем в двух соединениях. Сформированная матрица концентраций обработана методом главных компонент (РСА). Полученная модель объясняет 83,1 % общей дисперсии (PC1 — 56,5 %, PC 2 — 26,6 %) и демонстрирует чёткое разделение всех четырёх изомеров на плоскости PC1–PC2. Такая упорядоченная картина отражает вклад двух независимых структурных факторов.

Анализ расположения областей на плоскости главных компонент (Рис. 2) показывает, что первая главная компонента (горизонтальная ось) коррелирует с конфигурацией углерода C-3', а вторая главная компонента (вертикальная ось) — с конфигурацией C-9'. Таким образом, переход от одного изомера к другому вдоль оси PC1 соответствует изменению геометрии связи в положении 3', тогда как перемещение вдоль оси PC2 обусловлено изомеризацией связи при C-9'. Явное разделение кумаринов относительно осей свидетельствует о том, что путь пиролизической деструкции напрямую зависит от конфигурации вышеуказанных атомов и каждый изомерный переход приводит к характерному соотношению компонентов в профиле продуктов пиролиза.

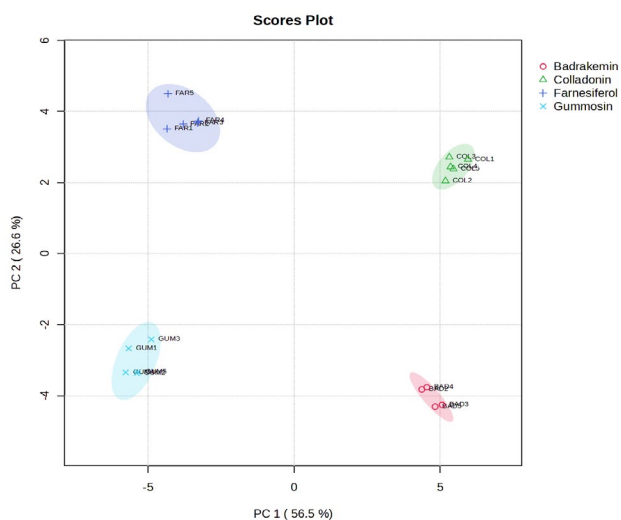


Рисунок 2. Распределение терпенокумаринов в пространстве главных компонент

Детальный состав продуктов пиролиза требует дополнительного изучения и вряд ли целесообразен. Ожидаемым общим процессом для всех терпенокумаринов является отрыв умбеллиферона ( $m/z$ 162) и образование углеводов с сохранением гидроксильной группы при C-3' ( $m/z$  220). Отрыв второй гидроксильной группы приводит к образованию целого ряда углеводов ( $m/z$ 202) с модифицированным скелетом, поскольку дегидратация идет через образование карбкатиона, стабилизация которого может сопровождаться значительными перегруппировками. Идентификация этих углеводов по масс-спектрам невозможна, а накопление их

для анализа с помощью ЯМР слишком затратна и не оправдана, так как конечная цель уже достигнута.

Дополнительный анализ хроматограмм по ионам с  $m/z$  220 и  $m/z$  218 (Рис. 3) выявил характерную закономерность, хорошо согласующуюся с результатами РСА. Профили относительного содержания этих ионов оказались практически идентичными в парах гуммозин–фарнезиферол и колладонин–бадракемин, тогда как между парами они различаются.

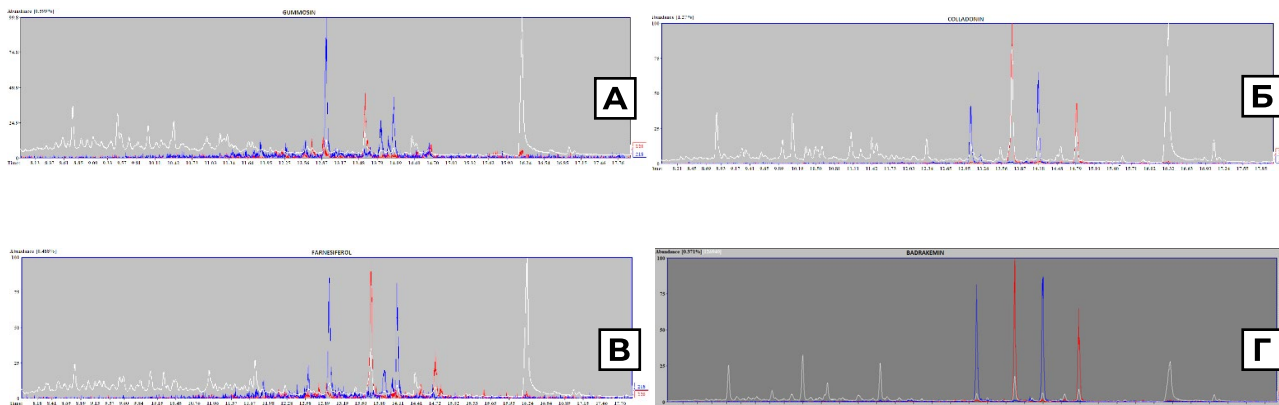


Рисунок 3. Метаболитные профили терпенокумаринов с указанием содержания ионов с  $m/z$  220 (красные пики) и  $m/z$  218 (синие пики):  
А — гуммозин, Б — фарнезиферол, В — колладонин, Г — бадракемин

Таким образом, сочетание пиролитической газовой хроматографии с построением матрицы относительных концентраций позволяет надёжно разделить изомерные терпенокумарины, неразделимые традиционными газохроматографическими методами. Предложенный подход может быть использован для идентификации подобных соединений во фракциях, собранных в процессе полупрепаративной ВЭЖХ растительных экстрактов, а также, учитывая повышенную биологическую активность терпенокумаринов, для аналитического контроля лекарственных препаратов, созданных на их основе. Работа будет продолжена, поскольку изученная группа умбеллиферилгидроксиалнинканолов составляет лишь небольшую часть от известных природных химерных терпенокумаринов.

Работа выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Развитие Молекулярных и Клеточных Технологий» в рамках выполнения ГЗ 125022803066-3. Используются дубликатные библиотеки масс-спектров и индексов удерживания, созданные в процессе выполнения государственного задания Ботанического института В. Л. Комарова РАН (проект № 124020100140-7) «Развитие профайлинго-метаболических методов исследования биологических объектов (2024–2028)».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang J. et al. Sesquiterpenes and sesquiterpene derivatives from *Ferula*: their chemical structures, biosynthetic pathways, and biological properties // *Antioxidants*. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – С. 7.
2. Денисова, Г. А. Терпеноидсодержащие структуры растений / Отв. ред. А. Е. Васильев; АН СССР, Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова. - Ленинград : Наука : Ленингр. отд-ние, 1989. - 140 с.

## АНАЛИЗ СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОРПУСИРОВАНИЯ МИКРОСХЕМ В ПЛАСТИКОВЫЕ КОРПУСА МЕТОДОМ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

---

**Курбатов В.Г., Пугачёва Т.А.**

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Черноголовка, kurbatovvg@list.ru

*Создание материалов, позволяющих корпусировать микросхемы, является одной из важных задач. С помощью пиролитической газовой хроматографии проанализированы герметизирующий и заливочный материалы. Установлен состав связующего и сшивающего агента в герметизирующем и заливочном материале. Определен состав вспомогательных материалов для корпусирования и ряда добавок, входящих в их состав.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** корпусирование, герметизирующий материал, заливочный материал, микросхема, пластиковый корпус, вспомогательные материалы.

---

В последние годы значительно увеличивается производство интегральных схем и полупроводниковых приборов в пластмассовых корпусах, в числе достоинств, которых низкая стоимость полимерных пресс-материалов, высокая устойчивость к механическим воздействиям, малые габариты и масса, возможность автоматизации технологических процессов сборки и испытаний, удобство монтажа. К тому же, применение пластмасс позволяет изготавливать корпуса разнообразных форм и размеров. Для выполнения своего функционального назначения корпус и его конструкция должны отвечать определенным требованиям: обеспечивать необходимую электрическую связь между элементами схемы и выводами; гарантировать электрическую изоляцию между выводами; выполняться из материалов по возможности наиболее инертных по отношению к химическим агрессивным составляющим окружающей среды (кислороду, влаге, солям); в некоторых случаях должны учитываться возможные электрохимические процессы, такие как коррозия в присутствии электролитов; иметь удобную для печатного монтажа конструкцию по габаритам и расположению выводов.

Для корпусирования применяют несколько основных материалов (герметизирующий, заливочный) и несколько вспомогательных (смазывающий и очищающий), которые являются сложными композициями. В настоящее время необходима разработка собственных материалов для корпусирования микросхем. Для облегчения в определении состава используемых материалов служит много инструментов — один из них пиролитическая газовая хроматография [1-3].

В настоящее время поставки данных материалов в нашу страну полностью прекращены, что делает необходимым разработку собственных литографических материалов. Однако, ввиду того, что данные материалы являются многокомпонентными необходимо провести анализ промышленно выпускаемых аналогов, что позволит ускорить разработку собственных материалов. Одним из инструментов, позволяющих определить состав многокомпонентной системы является пиролитическая газовая хроматография [1-3].

Результаты исследования герметизирующего материала, показаны на рисунке 1.

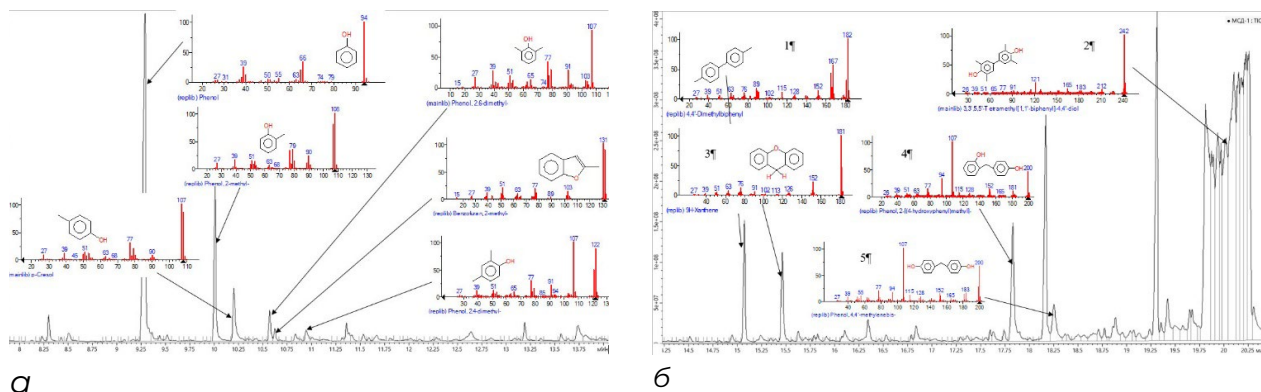


Рисунок 1. Хроматограмма для образца герметизирующего материала EMG-700 BSE, полученные с помощью газового хроматографа с пиролитической приставкой и масс-спектрометрическим детектором. Время удерживания, мин: а — 7,9-14,0; б — 14,25-20,4)

На полученной хроматограмме имеются следы пиролиза характерные как для эпоксидных олигомеров, так и для фенол-формальдегидных (рисунок 1а). Для фенол-формальдегидных олигомеров характерными продуктами пиролиза являются: фенол, о-крезол, п-крезол, 2,4-диметилфенол, 2,6-диметилфенол, метильное производное бензофурана (рисунок 1а) и 9Н-ксантен (рисунок 1б, продукт 3), 2,4'-дигидроксибензилметан ((рисунок 1б, продукт 4)), 4,4'-дигидроксибензилметан (рисунок 1б, продукт 5). Продукт 3 характерен для пиролиза незамещенных фенолформальдегидных продуктов, а продукты 4 и 5 подтверждают это так как являются простейшими структурными звеньями для фенол-формальдегидных олигомеров. Известно, что метилольные производные фенола при поликонденсации в основном взаимодействуют либо с о-положением, либо с п-положением следующего элементарного звена. Без применения специальных катализаторов получить фенол-формальдегидные смолы с большим содержанием о-о связей невозможно. Таким образом, в качестве сшивающего агента в герметизирующем материале используется фенол-формальдегидная смола на незамещенном феноле.

Для эпоксидной смолы характерными продуктами пиролиза являются фенол и п-крезол (рис. 2.5а), а также 4,4'-диметилбифенил (рисунок 1б б, продукт 1) и 4,4'-дигидрокси-3,3',5,5'-тетраметилбифенил (рисунок 1б, продукт 2). Исходя из этого следует предположить, что в качестве эпоксидного соединения в данном материале используется диглицидиловый эфир 4,4'-дигидрокси-3,3',5,5'-тетраметилбифенила.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McMaster, Marvin C. GC/MS: a practical user's guide,. 2nd. ed. 2008. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim; p.195;
2. Akoueson F., Chbib C., Monchy S., Paul-Pont I., Doyen P., Dehaut A., Duflos G. Identification and quantification of plastic additives using pyrolysis-GC/MS: A review // Science of The Total Environment, 2021. Vol. 773, 145073;
3. Hubschmann, H.J Handbook of GC/MS: Fundamentals and Applications, Second Edition. 2009. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim; p. 732;

## ПИРОЛИТИЧЕСКАЯ ХРОМАТОГРАФИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

**Невестенко М.А., Можегова С.В., Герасимов Р.С.**

Апрелевское отделение Всероссийского научно-исследовательского геологического нефтяного института (Филиал «Апрелевское отделение ВНИГНИ»), г. Апрелевка, m.nevestenko@vnigni.ru

*В работе представлен пример использования пиролитической хроматографии для проведения кинетических исследований органического вещества нефтегазоматеринских пород венд-кембрийского комплекса Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. Получаемые при термическом разложении керогена и хроматографическом разделении продуктов его деструкции данные позволяют рассчитать динамику и масштабы генерации и эмиграции углеводородов в пределах исследуемой территории.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пиролитическая газовая хроматография, кинетика, генерация углеводородов, кинетические спектры.

Изучение кинетики термического преобразования органического вещества (ОВ) нефтегазоматеринских пород (НГМП) является важной частью геохимических исследований. По сути кинетические исследования отображают механизм историко-геологического преобразования ОВ, описывая катагенетические превращения керогена и позволяя разделить массу соединений, образующихся в результате его деструкции [1, 2].

Основными данными, получаемыми в ходе кинетических исследований, являются спектры энергий активации (рис. 1) для реакций преобразования ОВ в углеводороды (УВ). Значения энергий активации позволяют проводить моделирование кинетики химических реакций в соответствии с уравнением Аррениуса и выявлять основные закономерности в изменении скорости этих реакций от температуры и времени воздействия. Подобный подход широко используется при бассейновом моделировании, позволяя проводить расчет объемов генерации, определять состав нефти и газа на различных стадиях геологической истории бассейна [3].

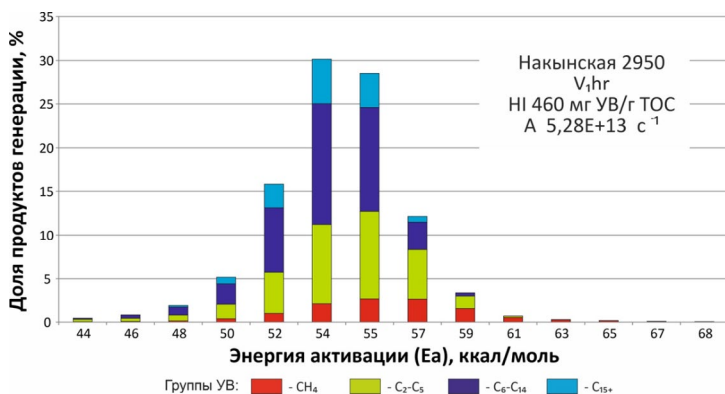


Рисунок 1. Четырехкомпонентный кинетический спектр реализации генерационного потенциала ОВ в процессе термической эволюции

Оценка масштабов генерации и эмиграции УВ необходима при прогнозировании нефтегазоносности новых перспективных территорий. Одной из таких территорий, уже доказавшей свой нефтегазовый потенциал, но неизученной в полной мере является Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция (НГП).

Для получения кинетических спектров были выбраны четыре образца пород, характеризующих разновозрастные нефтегазоматеринские породы рассматриваемой территории с генерационным потенциалом от удовлетворительного до отличного. Основные пиролизические характеристики ОВ выбранных образцов представлены в таблице 1. Литологический состав пород представлен преимущественно аргиллитами и алевролитами, образцы содержат ОВ II (морского) типа, катагенетическая преобразованность соответствует градации МК1.

Таблица 1. Результаты пиролизических исследований НГМП

№ п/п	Скважина	Свита	Глубина отбора, м	S1, мг УВ/г породы	S2, мг УВ/г породы	Tmax, °C	ТОС, %	Н1, мг УВ/г ТОС	PI
1	Онкучахская 2861	Э1sn-kt	1284,46	0,9	34,26	437	4,48	765	0,03
2	Дюданская 2910	V2bk	3408,07	0,17	10,72	430	2,12	506	0,05
3	Среднемархинская 2250	V1yn	3910,13	0,15	3,88	433	1,06	366	0,01
4	Накынская 2950	V1hr	3196,60	0,40	10,31	426	2,26	456	0,01

Кинетические исследования выполнялись с помощью приборного комплекса, состоящего из пиролизической ячейки Frontier Lab EGA/PY-3030D, газового хроматографа Agilent 7890A и установки для улавливания продуктов пиролиза жидким азотом. Сущность метода заключалась в нагревании навески образца породы в пиролизической ячейке с последующим хроматографическим разделением продуктов крекинга керогена на капиллярной колонке и регистрацией компонентов пламенно-ионизационным детектором (ПИД). Главным достоинством данного комплекса является возможность проведения ступенчатого пиролиза образцов, что обеспечивается ячейкой EGA/PY-3030D [2].

Используя карту глубин залегания кровли терригенного венда и результаты кинетических исследований, был рассчитан уровень катагенетической преобразованности НГМП ынахской, бесюряхской и хоронохской свит нижнего венда для различных участков Вилюйской гемисинеклизы (Рис. 2). Что позволило сделать предварительную оценку плотности генерации, масштабов генерации и эмиграции УВ для этих свит, а также рассчитать отношения продуктов генерации (жидкие и газообразные УВ) для различных стадий катагенеза.

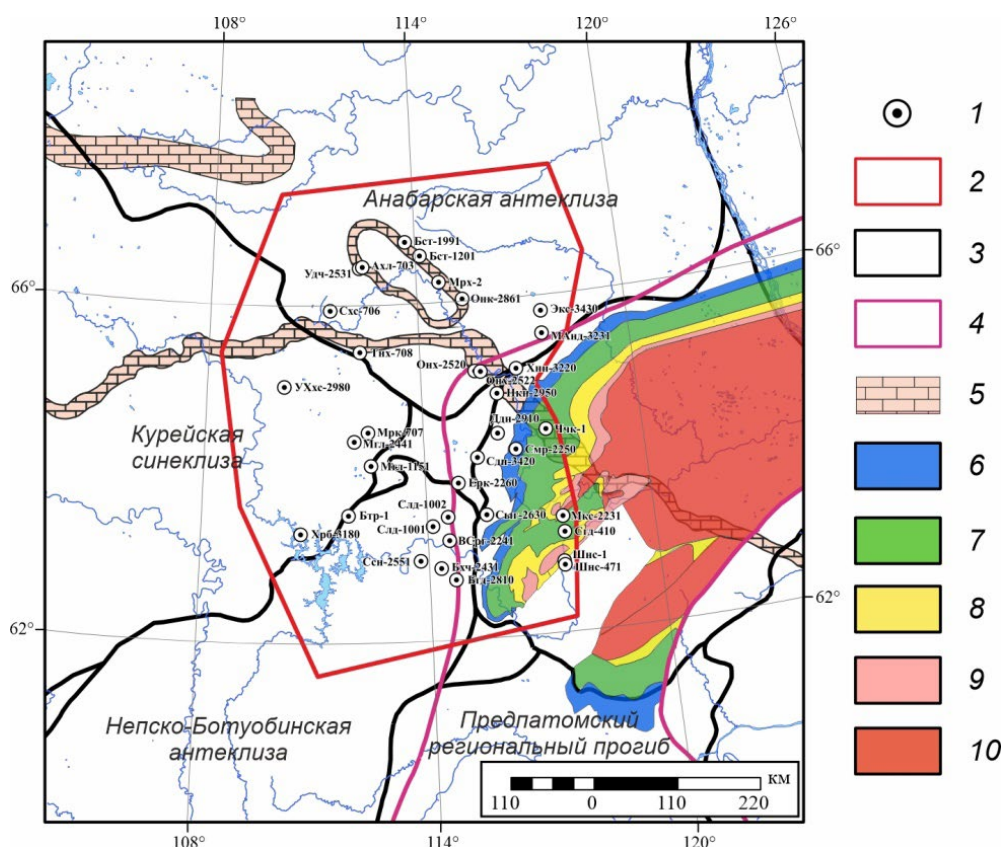


Рисунок 2. Схема изменения катагенеза изучаемых НГМТ  
 1–5 — основные обозначения:  
 1 — исследуемые скважины;  
 2 — район исследований;  
 3 — границы крупнейших тектонических элементов;  
 4 — граница мелководья в ранневендское время;  
 5 — нижне-среднекембрийская барьерная рифовая система;  
 6–10 — уровень катагенеза:  
 6 —  $PK_3/MK_1$ ;  
 7 —  $MK_1/MK_2$ ;  
 8 —  $MK_2/MK_3$ ;  
 9 —  $MK_3$ ;  
 10 — АК.

По предварительной оценке общая суммарная эмиграция УВ газов из выделенного нижневендского очага составляет 17,5 трлн. м<sup>3</sup>, жидких УВ — 69,1 млрд. т.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория нафидогенеза: количественная модель эволюции аквагенного органического вещества в катагенезе / А.Э. Конторович, Л.М. Бурштефн, В.Р. Лившиц // Геология и геофизика. – № 8 (62). – 2021. – С. 1026-1047.
2. Изучение кинетики преобразования органического вещества пород методом пиролитической хроматографии / С.В. Можегова, И.Л. Пайзанская, Р.С. Герасимов, А.А. Алферова, Е.М. Кравченко // Геология нефти и газа. – № 4. – 2021. – С. 57-68.
3. Исследование кинетики термического преобразования органического вещества нефтегазоматеринский пород: обзор методов и экспериментальные результаты / М.Ю. Спасенных, В.В. Широкова, А.С. Ильменский, Е.В. Козлова, Т.Д. Булатов, А.В. Гончарова, Е.А. Леушина // Георесурсы. – № 26 (4). – 2024. – С. 3-19.

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ ПО МИГРАЦИОННЫМ СЛЕДАМ ФЛЮИДОВ МЕТОДОМ ПИРО-ГХ-МС

---

**Нефедов Ю.В.<sup>1</sup>, Логинов А.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>К.г.-м.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия, yurijnefedov@yandex.ru

<sup>2</sup>Аспирант кафедры геологии нефти и газа, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

*Изучение миграции углеводородов базируется на последовательной интеграции методов Пиро-ГХ-МС и изотопных методов. Для выявления аномалий насыщения применяется имитация метода Rock-Eval, биомаркерный анализ применим для подтверждения миграционной природы и оценки вторичных преобразований УВ, а изотопный анализ, в свою очередь применим для установления связи флюидов с источниками и трассировки миграционных потоков. Такой подход позволяет сформировать стройный алгоритм комплексной интерпретации данных.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Миграция углеводородов, органическая геохимия, Rock-Eval, газовая хромато-масс-спектрометрия (ГХ-МС), индексы нефтенасыщенности, биомаркеры.

---

Диагностика миграции углеводородов геохимическими методами основана на выявлении латеральных и вертикальных аномалий в распределении органического вещества, которые формируются под влиянием первичных факторов его накопления и последующих преобразований. Иерархический подход к анализу позволяет повысить информативность и прогнозную ценность геохимических исследований. Наибольшая эффективность достигается при последовательной интеграции методов по принципу «от диагностики к доказательству»: выявление аномалий с помощью Пиро-ГХ-МС, верификация и определение путей миграции с использованием биомаркерного анализа и окончательная корреляция с применением изотопного анализа. Такой подход позволяет последовательно переходить от фиксации аномалий к доказательству генетической связи флюидов и реконструкции путей их движения, что существенно снизит геологические риски при поисково-разведочных работах.

Пиролитические исследования свит Енисей-Хатангского прогиба показали высокие значения  $S1$  при крайне низких  $S2$ , а также высокие значения  $OSI$  (индекса нефтенасыщенности) (Таблица 1), что позволило предположить наличие коллекторские прослоев в изучаемой НГМТ (нефтегазоматеринской толще). Распределение  $n$ -алканов свидетельствует о смешанном (террагенном и аквагенном) исходном веществе. Полученный хлороформенный коэффициент (25 % и 21 %) подтвердил миграционную природу битумоида. Сделан вывод о неоднородности толщ и наличии низкопродуктивных прослоев-коллекторов, обогащённых параавтохтонным веществом.

**Таблица 1.** — Результаты пиролитических исследований образцов керн скважин Пайяхского и Танамского НГР [по данным авторов]

Интервал отбора	Свита	Возраст	S1 (мг УВ/г породы)	S2 (мг УВ/г породы)	PI	Tmax (°C)	TOC %	OSI (мг УВ/г породы)
3464-3479	Шуратовская свита	K1sht	12,09	0,24	51,38	476	0,78	560
3413-3428			5,82	0,03	195,00	469	2,06	282
4125-4200	Малышевская свита	J2 ml	20,82	0,11	190,27	474	2,32	897
3453-3463	Шуратовская свита	K1sht	14,09	1,99	8,08	451	2,72	518
4000-4015	Гольчихинская свита	J2- K1 gl	27	1,11	25,32	487	7,74	349
4199-4207	Малышевская свита	J2 ml	6,29	0,24	27,21	453	0,59	1059
2640-2655	Гольчихинская свита	J2 - K1gl	2,28	0,14	17,29	443	0,41	553
3415-3430	Гольчихинская свита	J2 - K1gl	10,85	0,46	24,59	459	2,66	408
3580-3595			5,02	0,21	24,90	464	1,15	438

Примером успешного применения биомаркерного анализа для дифференциации очагов генерации служат исследования нефтей Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Характер распределения биомаркеров позволил сформировать концепцию нефтегазоносности зоны контакта мезозойских и палеозойских отложений, учитывающую как восходящую палеозойскую миграцию углеводородов, так и латеральную миграцию по юрским пластам (рис. 1).

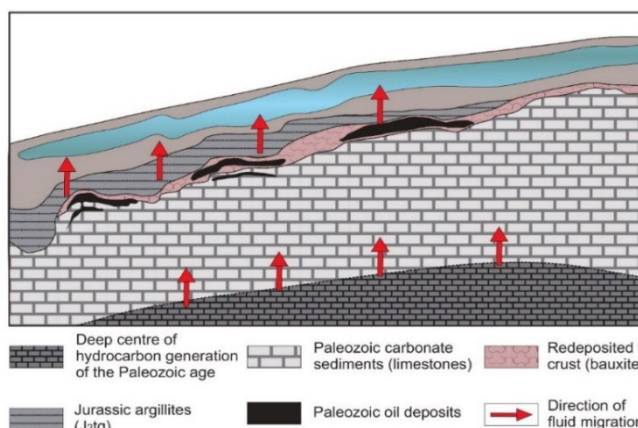


Рисунок 1. Концептуальная модель формирования нефтегазоносности зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений юго-восточной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна [6]

Наряду с изучением хемофассий делаются попытки изучения возможных маркеров глубинного формирования нефтей. К таким маркерам можно отнести ди-

амантаны и адамантаны — углеводороды каркасного строения. Благодаря своей высокосимметричной алмазоподобной структуре они обладают рядом уникальных свойств, среди которых в первую очередь следует отметить высокую термическую устойчивость и высокую устойчивость к процессам биodeградации. Дополнительным подходом к контролю миграции является оценка степени биodeградации углеводородов. В данном случае мы работали с нефтями Уфимского нефтеперерабатывающего завода.

Таким образом, последовательная интеграция методов по принципу «от диагностики к доказательству» — от выявления аномалий с помощью Пиро-ГХ-МС через верификацию и трассировку путей миграции с использованием газовой хромато-масс-спектрометрии и SARA-анализа до окончательной корреляции с применением изотопного анализа — позволяет не только фиксировать зоны возможного привноса флюидов, но и доказать генетическую связь углеводородов с конкретными очагами генерации, реконструировать пути их движения и существенно снижать геологические риски при поисково-разведочных работах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jarvie D. M. Shale Resource Systems for Oil and Gas: Part 2 «Shale-oil Resource Systems», Shale Reservoirs—Giant Resources for the 21st Century: American Association of Petroleum Geologists, 2012
2. Piedrahita J., Aguilera R. Estimating Oil Saturation Index OSI from NMR Logging and Comparison with Rock-Eval Pyrolysis Measurements in a Shale Oil Reservoir // SPE Unconventional Resources Conference. : SPE, 2017.
3. Li M. и др. Fractionation of pyrrolic nitrogen compounds in petroleum during migration: derivation of migration-related geochemical parameters // Geological Society, London, Special Publications. 1995. T. vol. 86. № no. 1. C. p.p. 103-123.
4. Larter S. R., Aplin A. C. Reservoir geochemistry: methods, applications and opportunities // Geological Society, London, Special Publications. 1995. T. vol. 86. № no. 1. C. p.p. 5-32.
5. Eric Lafargue (2), Colin Barker (3). Effect of Water Washing on Crude Oil Compositions // AAPG Bulletin. 1988. T. vol. 72.
6. Prospects for Oil and Gas Bearing Potential of Paleozoic Basement of West Siberian Sedimentary Basin / O. M. Prischepa, N. V. Sinitsa // International Journal of Engineering. – 2025. – Vol. 38, No. 5. – P. 1098–1107. – DOI: 10.5829/ije.2025.38.05b.12. – EDN: MHTRCL
7. Геолого-геохимические показатели прогноза нефтегазоносности на больших глубинах северных районов Западной Сибири / А.С. Немченко-Ровенская, А.В. Рыльков, Ф.З. Хафизов [и др.] // Недропользование XXI век. – 2011. – № 4 (29). – С. 30-35.
8. Роль различных видов миграции углеводородов в формировании залежей нефти и газа в Западной Сибири (на основе геохимических данных) / И. В. Гончаров, С. В. Фадеева, В. В. Самойленко [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 4. – С. 12-17. – EDN VTKTTL.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ ХРОМАТОГРАФИИ С МАСС-ДЕТЕКТИРОВАНИЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ ХИМИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И АНАЛИЗА МИКРОПЛАСТИКА В ОБЪЕКТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

---

**Половяненко Д.Н., Сотникова Ю.С., Осечкова А.Е., Кривошеина М.И., Карпова Е.В., Нефедов А.А., Багрянская Е.Г.**

Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, dpolo@nioch.nsc.ru

*В настоящей работе предоставлены результаты применения метода пиро-ГХ/МС для анализа состава пластиков, исследования археологических образцов, анализа содержания микропластика как загрязнителя объектов окружающей среды.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пиролитическая газовая хромато-масс-спектрометрия, пластики, археологические образцы, микропластик как загрязнитель, стойкие органические загрязнители.

---

Химия полимерных материалов активно развивается, что требует высокоточных методов анализа их состава и свойств. Пиролитическая газовая хроматография с массдетектированием (пироГХ/МС) современный аналитический метод, позволяющий идентифицировать полимерные соединения, определять добавки и модификаторы в составе материалов, что особенно важно для проведения обратного инжиниринга современных материалов из пластика и других. Метод пиро-ГХ/МС эффективен для анализа полимеров с низкой растворимостью или высокой молекулярной массой, где применение других аналитических методов ограничено. Кроме того, метод пиро-ГХ/МС в последние годы находит широкое применение в области анализа микропластика, загрязнения которым объектов окружающей среды - одна из экологических проблем современности. Почвы выступают важным резервуаром накопления микропластика, однако их анализ осложняется высокой гетерогенностью матриц. В настоящей работе предоставлены результаты применения метода пиро-ГХ/МС для анализа состава пластиков, исследования археологических образцов, анализа содержания микропластика как загрязнителя объектов окружающей среды, а также стойких органических загрязнителей.

В части анализа составов пластиков при проведении обратного инжиниринга применение пиролитической хроматографии позволили дополнить данные ИК-спектроскопии для идентификации компонент. При обратном инжиниринге клеевого состава по заявке промышленного предприятия было установлено, что основным компонентом является смешанный полимер полиуретана на основе фенилизоцианата и 1,4-бутандиола в качестве полиола и полиэфира на базе гександионовой кислоты. Аналогичным образцов с целью воссоздания был исследован состав промышленного лака, который по результатам измерений содержал в своем составе сополимер этилена и акриловой кислоты (с содержанием акрильных

звеньев 20 %) и полиуретан на основе диизоцианата изофорона и 1,4-бутандиола. Помимо основных компонент в составе лака был обнаружен ряд функциональных добавок, в том числе коммерческое поверхностно-активное вещество Surfino1 104.

При проведении анализа археологического образца из республики Саха, удалось определить основные компоненты вкраплений в пластины - нитрилы жирных кислот, амиды жирных кислот, линейные насыщенные и ненасыщенные углеводороды, спирты и альдегиды. Детальный анализ продуктов пиролиза показал, что обнаруженная археологами пластика была покрыта лаковой эмульсией на основе яйца.

Применение пиро-ГХ/МС для исследования микропластика как загрязнителя окружающей среды получает все более широкое распространение среди ученых, о чем в том числе свидетельствует появление методики ASTM по анализу микропластика [1]. В Химическом исследовательском центре коллективного пользования СО РАН на базе НИОХ СО РАН было проведено сравнение различных традиционных методов исследования содержания и состава микропластика – оптической спектроскопии, ИК-спектроскопии, термического анализа и пиролитической газовой хроматографии. Все указанные методы имеют преимущества и недостатки, а полную характеристику образца можно получить только с использованием совокупности методов, что трудо- и время- затратно. По результатам сравнения можно сделать вывод, что Пиро-ГХ/МС является наиболее удобным, эффективным и информативным методом анализа содержания микропластика в объектах окружающей среды [2]. Для проведения измерений образцов природной и сточной воды, почв, донных отложений для каждого типа проб были разработаны процедуры пробоподготовки для удаления минеральных и других затрудняющих анализ компонент [3]. Разработанные процедуры пробоподготовки, измерений методом пиро-ГХ/МС успешно применены для анализа содержания микропластика в природной воде на ряде объектов (река Обь, озеро Байкал и др.), в почвах на примере Новосибирской области, донных отложениях озера Байкал.

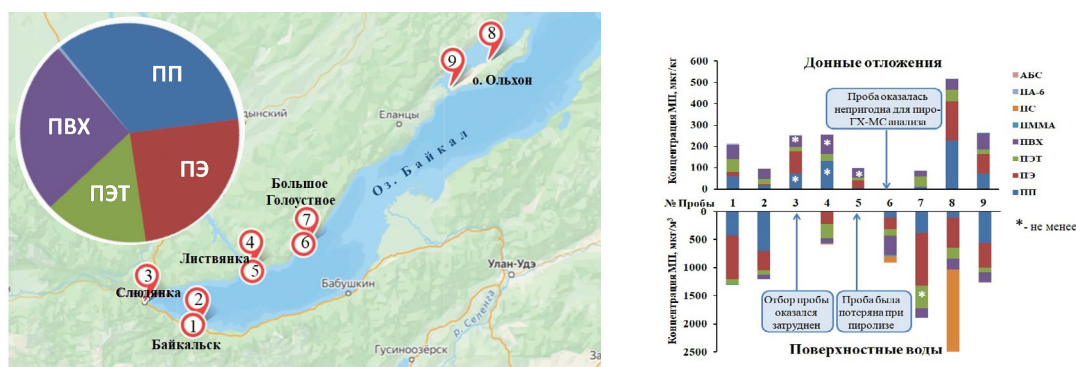


Рисунок 1. Точки обора и результаты измерения содержания микропластика в пробах воды и донных отложений озера Байкал

По результатам измерений в образцах донных отложений озера Байкал микропластик обнаружен во всех исследованных пробах, кроме того, прослеживается связь между концентрацией микропластика в воде и донных отложениях. Наиболее распространенными полимерами, как в донных осадках, так и в воде, являются ПП, ПЭ, ПЭТ и ПВХ, в некоторых образцах присутствуют ПММА, ПС, ПА-6, АБС. В пробах донных отложений доля тяжелых полимеров (ПВХ, ПЭТ) в среднем больше, чем в пробах воды, обратное верно для легких полимеров (ПЭ, ПС). Результаты измерений показывают, что хозяйственная и туристическая деятельность, в том числе судоходство, вероятно, являются основными источниками микропластика на Байкале.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ASTM D8401-24 Standard Test Method for Identification of Polymer Type and Quantity of Microplastic Particles and Fibers in Waters with High to Low Suspended Solids Using Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry, DOI: 10.1520/D8401-24, Published April 2024
2. Microplastics in River Water: Features of Analytical Methods for Quantitative Determination Yu.S. Sotnikova, E.V. Karpova, I.K. Shundrina, A.E. Osechkova, Il.Song. Dae, A.A. Nefedov, A.V. Sotnikov, D.N. Polovyanenko, E.G. Bagryanskaya *Environments* 2026, 13(1), 50. doi: 10.3390/environments13010050
3. The development of an analytical procedure for the determination of microplastics in freshwater ecosystems [Yu. S. Sotnikova](#), [E.V. Karpova](#), [D.II Song](#), [D.N. Polovyanenko](#), [I.A. Kuznetsova](#), [S.G. Radionova](#), [E.G. Bagryanskaya](#) *Analytical Methods*, 2024,16, 8019-8026. doi: 10.1039/D4AY01279H

---

*Коллектив авторов выражает благодарность за спектральные и аналитические измерения Химическому исследовательскому ЦКП СО РАН и за финансовую поддержку Правительству Новосибирской области и Российскому научному фонду (грант № 25-24-20132).*

---

## ОЦЕНКА ГЕНЕРАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПОРОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПИРОЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОМ ПИРО-ГХ/МСД В КАСПИЙСКОМ СЕКТОРЕ СКИФСКО-ТУРАНСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

**Романов П.А., Захарченко М.В.**

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия, romanovpa@mgri.ru

*Целью исследования являются изучение углеводородных систем плитного чехла Скифско-Туранской платформы с точки зрения геохимических характеристик нефтегазоматеринских толщ. Актуальность исследования: геохимические параметры являются одним из важнейших блоков в бассейновом моделировании. В плитном чехле выделяются четыре УВ системы: тоарско-байосская, келловейско-титано-неокомская, аптско-сеноманская, майкопская.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** органическое вещество, Скифско-Туранская платформа, Сорг, НГМТ, геохимические параметры, углеводородная система.

Исследования были выполнены в лаборатории Геохимии углеводородов (Рис. 1) кафедры геологии и разведки месторождений углеводородов МГРИ на основе применения методики анализа органического вещества пород методом Пиро-ГХ/МСД на базе комплекса приборов, состоящих из пиролитической ячейки EGA/PY-3030D (Frontier, Япония) и хроматографа «Маэстро ГХ» и масс-селективного детектора «Маэстро Альфа МС» (ИНТЕРЛАБ, Россия).

Количественный расчет проводится по площади интегрированных пиков на пирохроматограмме с помощью коэффициента отклика детектора, рассчитанного после измерения площади пиков аналогичных продуктов при анализе стандартного образца или методом нормализации.



Рисунок 1. Лаборатория геохимии УВ кафедры геологии и разведки месторождений углеводородов МГРИ

Полученные данные по хромато-масс-спектрометрии свидетельствуют о сложной геохимической природе региона.

Тоарская толща (нижняя-средняя юра) характеризуется: ТОС-1–4 % (максимально до 6 % в локальных депрессиях); тип ОВ-II (сапропелево-гумусовое), реже I в глубоководных участках; зрелость –  $R_o = 0,8–1,5$  % (в зависимости от глубины), 0,8–1,1 % – зона нефтегенерации (Прикумская зона), 1,3 % – газогенерация (центральная часть Каспийской впадины). Высокое содержание трициклических терпанов и C27-стеранов являются признаком морского ОВ с аноксидными условиями. Основным источником газа в глубоководных зонах, локально – нефти.

Для оценки генерационного потенциала были подготовлены карты распределения органического углерода (ТОС, Total Organic Carbon) и водородного индекса тоарских отложений. Результаты подчёркивают значительную роль тоарско-байосской системы в формировании углеводородного потенциала региона. Расчеты показали, что объем генерации нефти – 5–10 мг УВ/г породы (в зоне  $R_o$  0,7–1,0 %), а газа – 2–5 мг УВ/г породы (при  $R_o > 1,3$  %).

Келловейская толща (средняя юра) характеризуется: о ТОС: 0,5–3 % (наибольшие значения в глинистых фациях); Тип ОВ: II-III (смешанное морско-терригенное); зрелость:  $R_o = 0,7–1,2$  %: 0,7 0,9 % – начало нефтегенерации (окраины платформы), 1,0–1,2 % – пик генерации (Терско Каспийский прогиб); HI = 200–400 мг УВ/г, ТОС -0,5–3 %.

Для оценки генерационного потенциала были подготовлены карты распределения органического углерода (ТОС, Total Organic Carbon) и водородного индекса тоарских отложений. Объем генерации-нефть: 8–12 мг УВ/г породы (HI = 300 400 мг/г ТОС) и газ: 3–6 мг УВ/г породы (при  $R_o > 1,1$  %).

Аптская толща (нижний мел) характеризуется: ТОС: 1–5 %; Тип ОВ: II (морское, реже II III); зрелость:  $R_o = 0,5–0,9$  % – зона нефтегенерации. В глубоких прогибах (Каспийская впадина) достигает 1,1 %; Высокое содержание 18 $\alpha$ (H)-трисанонеолеана – индикатор карбонатных условий; Стандартное соотношение Pr/Ph < 1 – свидетельство восстановительной среды.

Для оценки генерационного потенциала были подготовлены карты распределения органического углерода ((ТОС, Total Organic Carbon) и водородного индекса Аптских отложений отложений. Объем генерации: Нефть: 10–15 мг УВ/г породы (рекордные значения для региона) и газ: 1–3 мг УВ/г породы (редко, при  $R_o > 1,0$  %). Геохимические параметры: ТОС: 2–8 % (рекордные значения для региона) Наиболее высокие значения установлены в нижней части разреза майкопской толщи; тип ОВ: II III (доминирует морское, но с терригенным влиянием), зрелость:  $R_o = 0,5–1,3$  %: 0,5–0,7 % – ранняя нефтегенерация (окраины прогиба), 0,8–1,2 % – пик генерации (центральные части).

В Каспийском море майкопские отложения достигают газовой стадии ( $R_o > 1,3$  %); HI = 300–600 мг УВ/г ТОС. Объем генерации-нефть: 15–20 мг УВ/г породы (максимальный потенциал в регионе) и газ: 5–10 мг УВ/г породы (в зонах  $R_o > 1,2$  %).

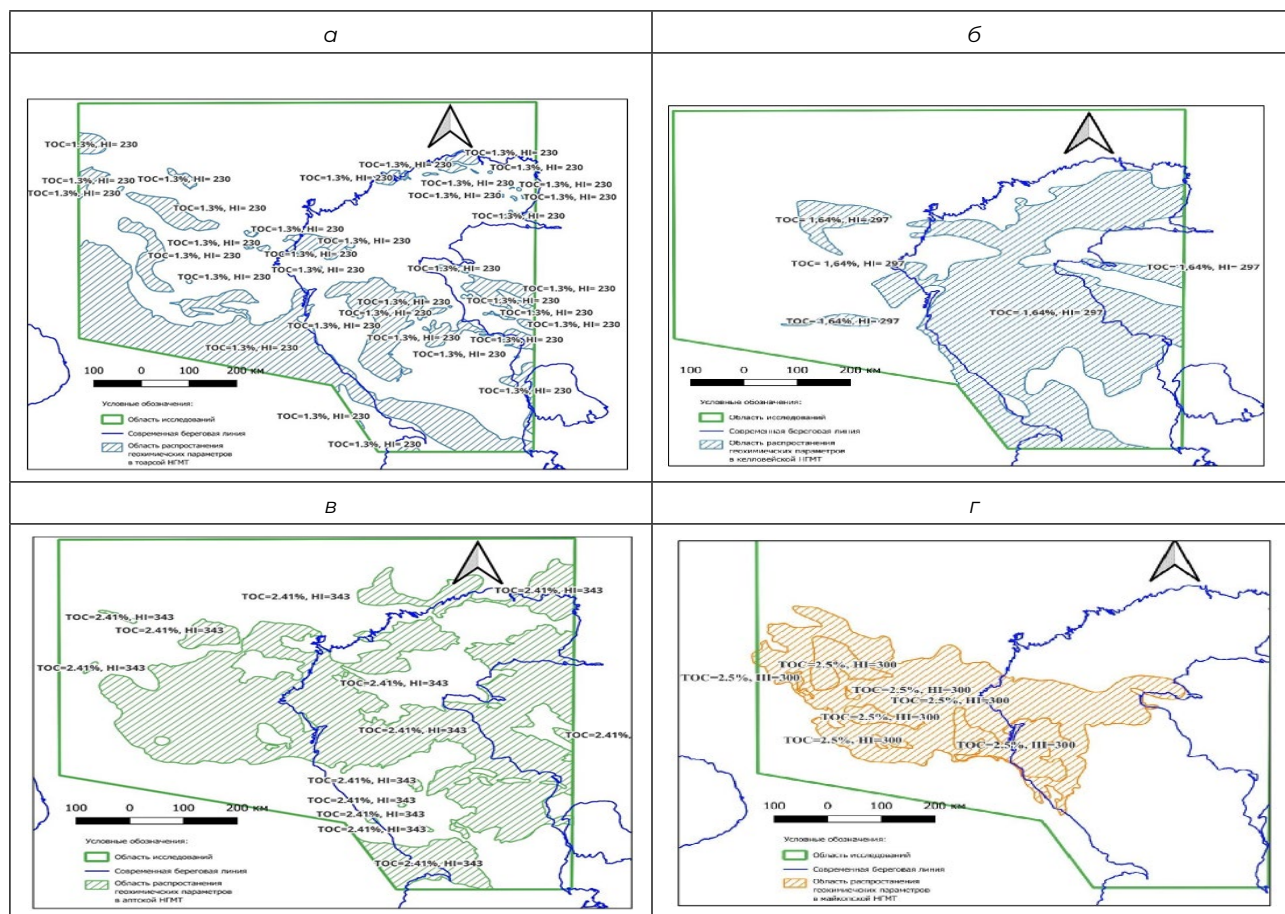


Рисунок 2. Карты распространения пиролитического параметра TOC и HI: а — тоарская НГМТ, б — келловейская НГМТ, в — аптская НГМТ, г — майкопская НГМТ

Для более полного понимания геохимических процессов требует применения комплексной методологии, включающей изотопный анализ, уточнение минерального состава пород и численное моделирование условий генерации органических соединений. Сводный отчет о выполненных хромато-масс-спектрометрических исследованиях содержит параметры ввода пробы, настройки газового хроматографа и масс-селективного детектора, а также хроматограммы и результаты библиотечной идентификации масс-спектров. Полученные данные будут использованы для калибровки моделей углеводородных систем в ходе бассейнового моделирования в геохимическом блоке научных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Керимов В.Ю., Лавренова Е.А., Осипов А.В., Серикова У.С. Геохимия углеводородов: учебник / под ред. проф. Г.Н. Гордадзе. – М.: Издательство РГГРУ, 2024. – 194 с.: ил. ISBN 978-5-907594-34-0
2. Ермолкин В.И., Керимов В.Ю. Геология и геохимия нефти и газа: учебник. – М.: Недра, 2012. – EDN QKKYQD.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПИРО-ГХ-МС В ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛИМЕРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ

**Рудаков Я.О., Хорохордина Е.А., Кураева А.Е., Рудаков О.Б.**

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж,  
robi57@mail.ru

*Наряду с исследованиями физико-механических показателей качества по ГОСТ 4640-2011 минеральной ваты марки «Технониколь» проведены хромато-масс-спектрометрические испытания с применением пиролитической приставки EGA/PY-3030 D FRONTIER LAB и газового хроматографа Agilent 8890 с масс-спектрометрическим детектором. Данные Пиро-ГХ-МС по летучим компонентам и продуктам пиролиза дают информацию о химическом составе полимерной составляющей материала и могут быть полезными при оценке качества и экологической безопасности утеплителя.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** минеральная вата, пиролитическая хромато-масс-спектрометрия, экологическая безопасность, экотоксиканты

Минеральная вата — волокнистый теплоизоляционный материал на синтетическом связующем, получаемый из минерального сырья — силикатных расплавов горных пород, это могут быть силикатные расплавы из доменных шлаков, смесей осадочных и изверженных горных пород. Она представляет из себя тонкие и гибкие волокна, которые получились из капель раздробленного минерального расплава, вытянутого в нити. Минеральная вата активно используется в качестве ненагруженной изоляции горизонтальных, вертикальных и наклонных строительных ограждающих конструкций всех типов зданий, а также в системах наружного утепления штукатурного типа. Актуальной задачей является контроль качества и безопасности минераловатного утеплителя, так как при эксплуатации низкокачественной продукции есть риск повышения теплопотери и понижения звукопоглощения и огнестойкости, а также миграции экотоксикантов. Так как в качестве связующего компонента в минеральную вату добавляют фенолформальдегидную смолу и полиуретаны, в процессе эксплуатации или некачественной продукции возможна миграция формальдегида, фенолов и других органических соединений в воздух рабочей зоны, а значит, важной эколого-аналитической задачей является анализ образцов исследуемой минеральной ваты на химический состав мигрирующих веществ. В этом плане интересны возможности метода Пиро-ГХ-МС [1-3].

Для решения этой задачи был проведен анализ образца минеральной ваты «Технониколь» до ее эксплуатации и после года эксплуатации в строительстве с применением газового хроматографа Agilent 8890 с МСД и многорежимным испарителем (пиролизером). Условия анализа представлены в таблице.

Таблица 1. Условия Пиро-ГХ-МС минеральной ваты

Параметр	Подобранные параметры
Ввод пробы	пиролизер EGA/PY-3030 D FRONTIER LAB
Газ-носитель	гелий
Скорость газа-носителя	1,2 мл/мин
Объем вводимой пробы	0,3 мг
Температура испарителя	300 °С
Программирование температуры термостата	40–320 °С /20 °С
Хроматографическая колонка	Ultra ALLOY®-5
Температура печи	480
Время анализа	30 мин
Библиотека спектров	NIST20
Температура интерфейса	300 °С
Энергия ионизирующих электронов	75 эВ
Режим регистрации масс-спектров	SCAN в диапазоне масс m/z 19-500 а.е.м.

На рисунке 1 приведена пирохроматограмма образца минеральной ваты до ее эксплуатации. Продукты 1–4 — наиболее летучие компоненты, 5–20 — продукты миграции и пиролиза органических компонентов, содержащихся в минвате. Пик 1 — CO<sub>2</sub>, 2 — изоцианид водорода, 3 — метилизоцианат. Пики 4, 5, 9 соответствуют орто- и пара-крезолам; 6, 7 — изомерные диметилфенолы, 10 — ароматический изоцианат, 12 — антисептик метенамин, 13–20 — ароматические амины, цианиды и изоцианаты.

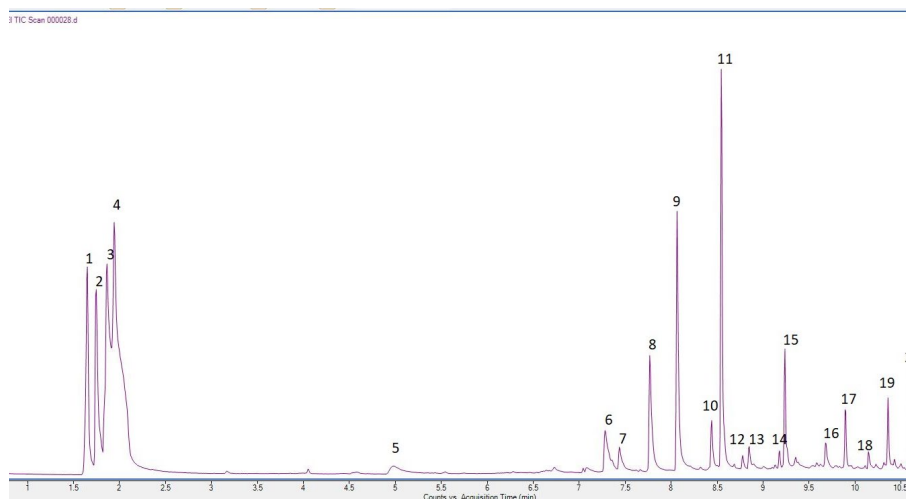


Рисунок 1. Хроматограмма пиро-ГХ-МС минеральной ваты

Через год эксплуатации минеральной ваты на хроматограммах значительно вырос пик 5, соответствующий орто- и пара-крезолам. То же увеличение можно наблюдать по пику 7, т.е. возросла миграция диметилфенолов, возросло выделение изоцианатов изоцианатов (пик 10). Также во втором образце наблюдалось появление новых пиков, которые соответствуют органосилоксанам различного строения.

Таким образом, можно сделать выводы, что минвата обработана для придания ей определенных технико-эксплуатационных характеристик полиуретанами и фенолформальдегидными смолами. Для полиуретанов характерна повышенная твердость, что позволяет их применять там, где на материал оказываются значительные механические нагрузки. Для материалов с применением полиуретанов присуща высокая износостойкость, в том числе к воздействию абразивных веществ, применяемых для шлифовки, полировки и прочих видов обработки материалов. Отметим также значительную эластичность полиуретанов. При том, что твердость материала остается высокой. Наконец, полиуретан – неблагоприятная среда для образования плесени, грибков, микроорганизмов. Фенолы также служат хорошими антисептиками, а также применяются в качестве мономеров фенолформальдегидных смол.

Хроматографический анализ указывает на то, что минеральная вата после года эксплуатации сильнее «фонит» экотоксикантами фенольного типа и азотсодержащими соединениями (аминами, цианидами, изоцианатами), образующимися в результате частичной деструкции полимерного связующего.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение пиролитической хромато-масс-спектрометрии в контроле качества строительных полимеров и композитов / О. Б. Рудаков, А. М. Хорохордин, Я. О. Рудаков, Е. А. Хорохордина // Строительные материалы. – 2022. – № 8. – С. 65-69. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-805-8-65-69.
2. Оценка свойств теплоизоляционного материала в процессе эксплуатации / Я. О. Рудаков, Е. А. Хорохордина, А. А. Распопова [и др.] // Химия, физика и механика материалов. – 2024. – № 1(40). – С. 103-110.
3. Новое в контроле качества минераловатного утеплителя / А. М. Хорохордин, Я. О. Рудаков, Е. А. Хорохордина, А. А. Распопова // Химия, физика и механика материалов. – 2023. – № 3(38). – С. 81-90.
4. Хроматографический контроль над экотоксикантами: от летучих органических соединений до микропластика / О. Б. Рудаков, В. Ф. Селеменев, Я. О. Рудаков, Л. В. Рудакова // Ионнообменные материалы в сорбционных, хроматографических и мембранных процессах - ИОНИТЫ-2025: Мат. XVI Всеросс. конф., Воронеж, 19–21 ноября 2025 года. – Воронеж: ООО Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2025. – С. 15-19.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПИРО-ГХ/МС ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕОЛИТНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ПИРОЛИЗА ПОЛИПРОПИЛЕНА

Соколова Д.А., Тиссен Е.А., Третьяков Н.Ю., Зубенко П.А., Григорьев М.В., Елышев А.В.

Тюменский государственный университет. 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6, n.y.tretyakov@utmn.ru

*Проблема накопления пластиковых отходов остаётся одной из ключевых экологических и экономических задач, а полипропилен (ПП) занимает значительную долю в производстве полимеров. Для её решения в работе применён метод Пиро-ГХ/МС, который позволяет точно оценить эффективность цеолитных катализаторов. Использование данного метода даёт возможность детально анализировать состав продуктов каталитического пиролиза ПП, что важно для снижения температуры и продолжительности процесса, а также улучшения качества получаемого сырья.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Полипропилен (ПП), каталитический пиролиз, пиро-ГХ/МС, цеолит HBEA, оксид никеля.

Проблема накопления пластиковых отходов остаётся одной из ключевых экологических и экономических задач. Полипропилен (ПП) занимает значительную долю в общем объёме производства полимеров. Применение каталитического пиролиза позволяет снизить температуру и продолжительность процесса, а также улучшить состав и качество получаемых продуктов [1]. Особый интерес представляют цеолитные катализаторы, модификация которых позволяет регулировать их текстурные и кислотные свойства и, соответственно, влиять на выход и состав продуктов пиролиза.

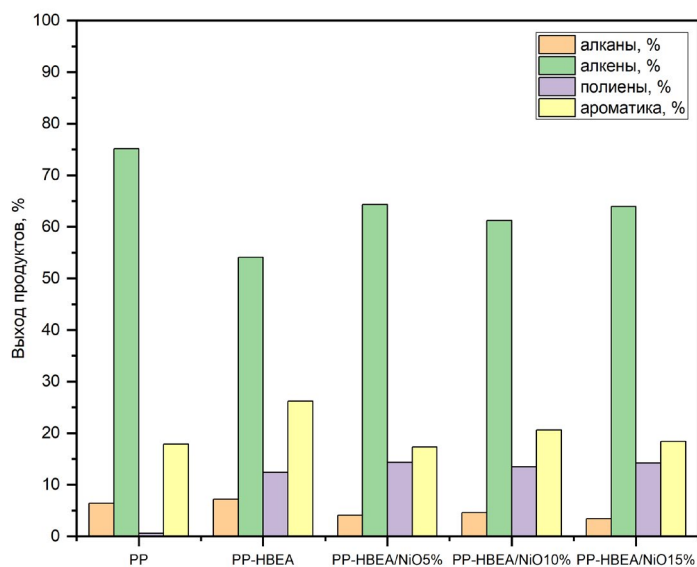


Рисунок 1. Количественный и качественный состав продуктов пиролиза полипропилена

В данной работе исследуется применение метода Пиро-ГХ/МС для оценки эффективности цеолитов типа HBEA, модифицированных оксидом никеля различной концентрации, в процессе пиролиза ПП. Оксид никеля способствует активации связей C-C и C-H, а также процессам дегидрирования и ароматизации [2]; кроме того, никель как переходный металл способен к координационному взаимодействию и изменению степени окисления в ходе катализа [3].

В эксперименте применялись коммерческие катализаторы в аммонийной форме HBEA (Zeolyst international) с массовым содержанием Na<sub>2</sub>O 0,05 %. На цеолит наносили нитрат никеля с различной концентрацией. Физико-химические параметры катализаторов оценивались с помощью методов: ИК-Фурье спектроскопии; рентгеноструктурного анализа; метода физической адсорбции N<sub>2</sub>. Изучение состава продуктов каталитического пиролиза полипропилена проводилось методом Пиро-ГХ/МС с применением многофункционального пиролизера EGA/PY-3030D (Япония; Frontier Laboratories) в условиях программируемого нагрева. Приготовленный катализатор и ПП смешивались в массовом соотношении 1:10 (1 мг/10 мг) и помещались в тигель. Нагрев проводился в диапазоне температур 150–600 °С со скоростью 15°С/мин в потоке гелия. Состав продуктов пиролиза на выходе определяли на газовом хроматографе Agilent 7890В, оснащенного моноквадрупольным масс-спектрометром 5977В GC/MS (Agilent; США). Масс-спектры электронного удара получены при энергии ускорения 70 эВ. Фрагментарные ионы анализировались в диапазоне масс 15–550 m/z при полном сканировании. Время задержки нити накала — 1 мин.

Из рисунка 1 видно, что при использовании цеолитсодержащих катализаторов, модифицированных оксидом никеля, наблюдается существенное изменение состава продуктов: снижается доля алкенов и алканов, при этом резко возрастает содержание полиенов и увеличивается выход ароматических соединений. Бренстедовская кислотность обеспечивает образование карбокатионов, активирует циклизацию и олигомеризацию алкенов, создавая промежуточные полиены, которые далее дегидрируются до ароматических соединений. Максимальный выход ароматических соединений среди модифицированных цеолитных катализаторов достигается при концентрации оксида никеля 10 %, что свидетельствует об оптимальном соотношении кислотных и металлических центров.

Ароматические соединения предпочтительны в каталитическом пиролизе из-за высокой технологической ценности как сырья для химической промышленности и топливных компонентов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Recent Research Advancements in Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste / Rahul Mishra, Aman Kumar, Ekta Singh, [et al.] // ACS Sustainable Chem. Eng. – 2023. – Vol. 11. – Issue. 6. – P. 2033-2049.
2. Decoupling the catalytic features of an Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/USY catalyst in polyethylene pyrolysis using machine learning / Xu Zhang, Ben Ge, Lei Che, [et al.] // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 13. – Issue. 5. – №. 118050.
3. Design and fabrication of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeP heterostructure for oxygen evolution reaction electrocatalysis / Iqbal A., Jawad A., Saima B., [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 894. – №. 162409.

---

### *Благодарность*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке НИР ГЗ (FEWZ-2024-0015).*

*Результаты Пиро-ГХ/МС получены с использованием оборудования ЦКП «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» Тюменского государственного университета.*

---

## ПРИМЕНЕНИЕ ПИРО-ГХМС ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФАЛЬСИФИКАЦИЙ НЕФТИ

---

### **Суховерхов С.В.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИХ ДВО РАН), Владивосток, Россия, sv28@ich.dvo.ru

*Показано, что для идентификации фальсификаций нефти лучше использовать метод ГХ вместо метода Пиро-ГХМС.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** нефть, фальсификация, Пиро-ГХМС, ГХ, Пиро-ГХ.

---

Последнее десятилетие актуальной стала проблема снижения качества нефти. Это связано как с добавлением в товарную нефть трудноизвлекаемых нефтей, так и с прямой фальсификацией нефти. Поставки низкокачественной нефти неоднократно приводили к огромным убыткам ПАО «Транснефть».

Качество, классы, типы и группы нефти нормируются ГОСТ Р 51858-2020 [1]. Важными показателями качества нефти являются содержание серы, плотность, выход фракций, массовая доля парафинов, воды, механических примесей и концентрация хлористых солей. Поставляемые на рынок товарные марки нефти в большинстве случаев не нефть с какого-либо одного месторождения, а смеси нефти из разных месторождений. Это позволяет недобросовестным поставщикам добавлять в качественную товарную нефть как низкокачественную нефть, так и различные отходы, образующие при добыче нефти, очистке трубопроводов и нефтяных резервуаров.

В российском правовом поле понятие «фальсификация» впервые было определено в 2000 году, когда вышел закон «О качестве и безопасности пищевых продуктов» [2]. Согласно этому закону, фальсифицированные пищевые продукты, материалы и изделия — это продукты, которые были умышленно изменены (подделаны) и данные о составе, свойствах и характеристиках которых умышленно не раскрываются. Таким образом, фальсификат — это продукт, который пытается выдать себя за оригинал, но сам таковым не является, так как не соответствует установленным стандартам качества. Относить это можно не только к пищевым продуктам, но и к любым другим, включая нефть и нефтепродукты.

Методы контроля качества нефти и нефтепродуктов по ГОСТ весьма трудоемки, длительны, что существенно снижает возможности и эффективность оперативного контроля. Основным нарушением при транспортировке нефти является процесс компаундирования. Товарная нефть, добываемая компаниями — отправителями, изымается из трубы и отправляется на мини-заводы, где из нее извлекают легкие фракции, а назад в трубу сливают отходы перегонки, не переработанные остатки нефтехимического производства и посторонние примеси, разбавленные растворители, а также отработанные масла. Компаундирование некондиционной нефти и отходов производства с товарной нефтью позволяет недобросовестным компаниям заработать на увеличении массы конечной смеси.

В ИХ ДВО РАН ведется разработка экспресс-методов определения фальсификации нефти и нефтепродуктов, позволяющих не только обнаружить фальсификацию, но и предположить возможный способ фальсифицирования или характер нарушения технологии при изготовлении нефтепродуктов.

Для быстрой идентификации фальсификатов нефти решено было использовать Пиро-ГХМС. Проведенные исследования показали, что в стандартном варианте Пиро-ГХМС (пиролиз 600 °С, колонка Ultra ALLOY-5 (30 м, I.D. 0,25 мм, фаза 0,25 мкм), программирование температуры от 40 °С до 320 °С) не очень подходит для анализа нефти и её фальсификатов, получаемые полные масс-спектры отличаются незначительно, на колонке остаются тяжелые углеводороды и после каждого анализа её необходимо кондиционировать. Но если взять колонку Ultra ALLOY-5(MS/HT) (30 м, I.D. 0,25 мм, фаза 0,1 мкм), подъём температуры запрограммировать от 50 °С до 350 °С, а вместо пиролиза просто испарять нефть при 400 °С, то получаются хроматограммы и масс-спектры пригодные для достоверной идентификации нефти и её фальсификатов (Рис. 1), однако для достоверной идентификации фальсификатов необходимо использовать не программное обеспечение F-Search, а специально разработанные математические алгоритмы.

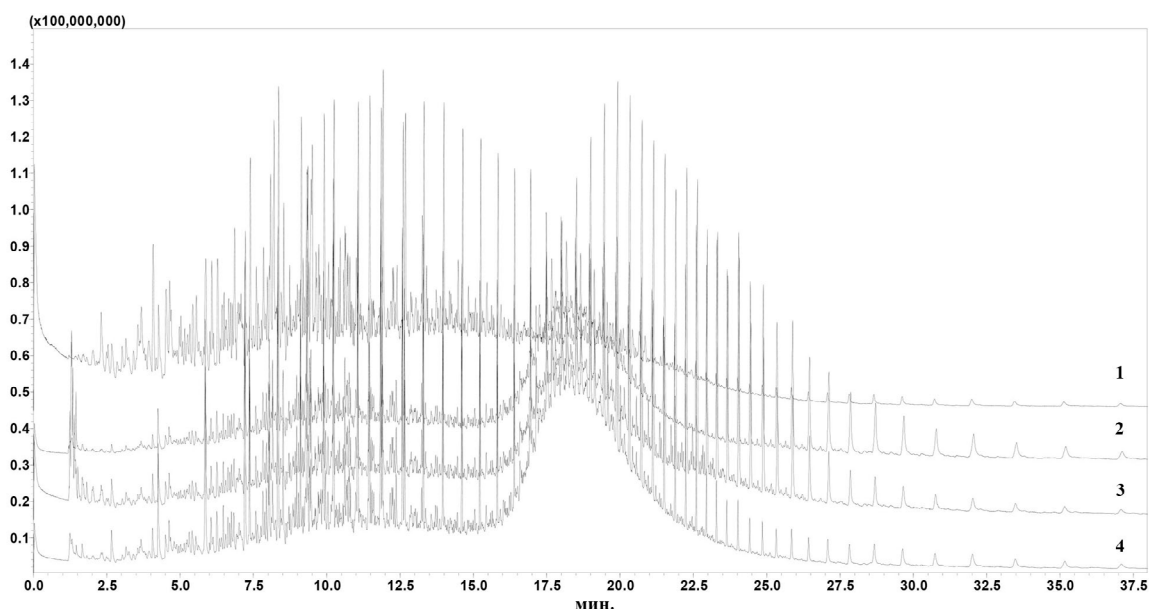


Рисунок 1. Хроматограммы нефти Витязь (1) и её фальсификатов (2, 3 и 4)

Однако метод Пиро-ГХМС достаточно дорогостоящий, а в расчётах используются 3D массивы данных, что значительно усложняет математические алгоритмы, поэтому было решено использовать метод ГХ. Анализ проводили на ГХ с пламенно-ионизационным детектором и многофункциональным инжектором ОРТИС-4 в условиях аналогичных определению концентрации парафинов в нефти [3]. Разделение проводили на колонке Ultra ALLOY-DX30 при программировании температуры от 50 °С до 380 °С, температура программа инжектора от 100 °С до 380 °С, скорость подъема температуры 20 °С/с, температура ПИД 400 °С. Для анализа нефть и её фальсификаты разводили в  $CCl_4$ . Специально разработанные математические алгоритмы позволяют достоверно отличить нефть от её фальсификатов и определить концентрацию фальсифицирующих добавок (Рис. 2).

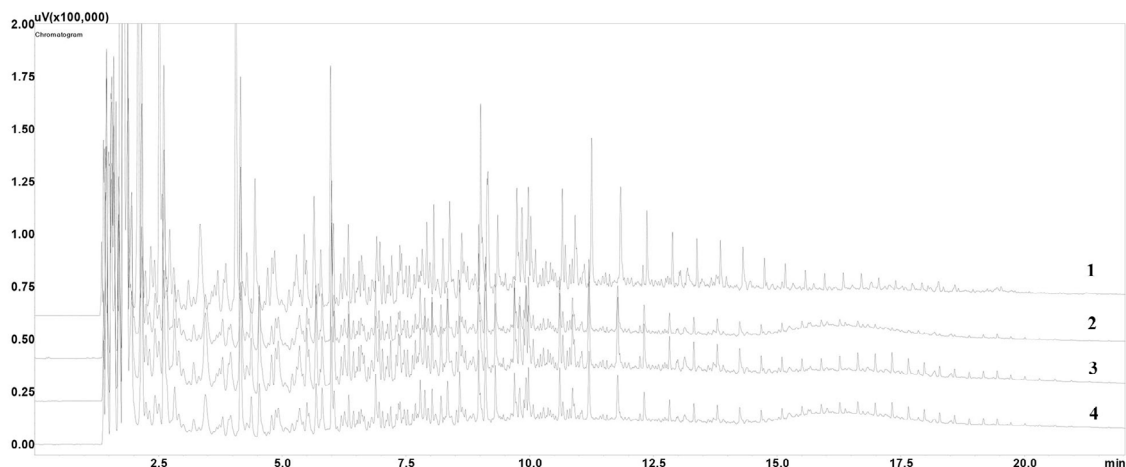


Рисунок 2. Хроматограммы нефти Витязь (1) и её фальсификатов (2, 3 и 4)

Перспективным подходом для идентификации фальсификатов нефти является метод Пиро-ГХ, позволяющий анализировать образцы без разведения каким-либо растворителем, что повышает достоверность идентификации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51858-2020. Нефть. Общие технические условия.
2. Федеральный закон от 02.01.2000 N 29-ФЗ. О качестве и безопасности пищевых продуктов.
3. Суховерхов С.В., Логвинова В.Б. экспресс-методы определения содержания парафинов в нефти, нефтепродуктах и нефтесодержащих отложениях // Химическая технология. 2019. № 13. Т. 20. С. 579-582.

---

*Работа выполнена в рамках государственного задания FWFN-2025-0002 с использованием оборудования ЦКП «ДВЦСИ» ИХ ДВО РАН.*

---

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛИСТИРОЛА И ЕГО ПРОИЗВОДНЫХ В ЛИЧИНКАХ *ULOMOIDES DERMESTOIDES* МЕТОДОМ ПИРО-ГХ/МС

**Толстунов М.И.<sup>1,2</sup>, Бастраков А.И.<sup>3</sup>, Ушакова Н.А.<sup>3</sup>, Юрасов Ю.И.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», Ростов-на-Дону

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону

<sup>3</sup>ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, e-mail: miftol@yandex.ru

*Методом Py-GC-MS с последовательной термодесорбцией (300 °C) и пиролизом (600 °C) исследовано содержание полистирола и продуктов его возможной деградации в тканях личинок *Ulomoides dermestoides*, находившихся на полистирольной, овсяной и комбинированной диетах. Прямых маркеров неповреждённого полистирола (стирол, олигомеры) не обнаружено ни в одном из образцов. В то же время двухтемпературный подход позволил отдельно зафиксировать лабильные метаболиты окислительного стресса (олеиновый альдегид, циклопентанундекановая кислота) при 300 °C и фундаментальный жирнокислотный состав мембран при 600 °C. Показана уникальная возможность Py-GC-MS одновременно отслеживать влияние ксенобиотика и метаболический ответ организма без предварительной пробоподготовки.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пиролитическая ГХ/МС, *Ulomoides dermestoides*, полистирол, биodeградация, термодесорбция, стресс.

Пиролитическая газовая хромато-масс-спектрометрия (Py-GC-MS) является практически безальтернативным методом для прямого анализа состава биологических образцов без стадии экстракции и дериватизации [1]. Возможность варьирования температуры пиролиза позволяет в рамках одного прибора отдельно регистрировать летучие метаболиты (режим термодесорбции) и продукты деструкции биополимеров (режим высокотемпературного пиролиза). Это особенно ценно при изучении метаболической адаптации организмов к ксенобиотикам, в частности к синтетическим полимерам. Личинки некоторых насекомых способны потреблять полистирол, однако судьба полимера в организме и сопутствующие биохимические изменения остаются предметом дискуссий [2]. Недавно выявлено, что личинки чернотелки *Ulomoides dermestoides* разрушают полистирол в процессе их пищевой активности при присутствии полимера в составе кормового субстрата [3].

Цель работы — методом пиролитической ГХ/МС с двухтемпературным режимом (300 °C и 600 °C) оценить наличие полистирола и его возможных производных в кишечнике и теле личинок *U. dermestoides*, а также выявить тканеспецифичные маркеры ответа на смену типа питания.

## Экспериментальная часть

Личинок выдерживали в течение 4 суток на нескольких диетах: 1) на вспененном полистироле (ВПС); 2) овсяные хлопья; 3) 4 суток ВПС, затем 4 суток овсяные хлопья (ВПС→Овсянка). После содержания на соответствующей диете личинок разделяли на две партии: одну партию высушивали, у другой из обездвиженных коротким замораживанием личинок выделяли кишечник, который также высушивали. Анализ выполняли на пиролизере Frontier Lab (модель EGA/PY-3030D) в двух режимах: термодесорбция при 300 °С при условиях работы ГХ/МС включающих выдержку 2 мин при 40 °С, нагрев до 300 °С при потоке гелия 1 мл/мин, диапазон сканирования масс составлял 29–500 Да, и пиролиз при 600 °С при условиях работы ГХ/МС включающих выдержку 2 мин при 40 °С, нагрев до 320 °С при потоке гелия 1 мл/мин, диапазон сканирования масс составлял 29–350 Да. Идентификацию соединений проводили по библиотекам NIST при помощи встроенного программного обеспечения хроматографа «Маэстро».

## Результаты и обсуждение

Прямых маркеров неповреждённого полистирола (стирол, димеры, тримеры) не обнаружено ни в одном из образцов даже при двухступенчатой программе (300+600 °С). Это указывает на отсутствие накопления исходного полимера в тканях и свидетельствует о его полной фрагментации, или непопадании в кишечник. Наиболее вероятно, что личинки грызут, но не проглатывают частицы пластика, так как в противном случае полистирол должен присутствовать в начальной части пищеварительной системы до начала и в процессе его трансформации.

При 300 °С регистрировались нативные липиды и лабильные метаболиты. На полистирольной диете в кишечнике доминировал 9-октадеценаль (52 % ТІС) — маркер перекисного окисления липидов, а в теле — свободные жирные кислоты и азотсодержащие соединения (нитрилы). На овсяной диете в теле преобладали этерифицированные формы — этилолеат (42 %) и аскорбат дипальмитат (32 %) (Таблица 1). При смене диеты (ПС→Овсянка) как в кишечнике, так и в теле появилась циклопентанундекановая кислота (до 57 % ТІС). Данное соединение полностью отсутствовало в монодиетах. Оно может служить маркером адаптационной перестройки липидного обмена. При проведении пиролиза при 600 °С эти данных соединений обнаружено не было, доминировали продукты гидролиза запасных и мембранных липидов: на ПС — ненасыщенный спирт С18:1 (41 %), на овсянке — олеиновая кислота (44 %), на комбинированной диете — линолевая кислота (54 %). Таким образом, двухтемпературный подход позволил различить пул лабильных метаболитов (300 °С) и структурный жирнокислотный состав биополимеров (600 °С).

Таблица 1. Относительное содержание основных компонентов (% ТІС) в теле личинок при термодесорбции (300 °С) на различных диетах

Время, мин	Соединение	ПС	Овсянка	ПС→Овсянка
20.6–20.8	Пальмитиновая кислота (С16:0)	27.4	–	4.0
20.86	Аскорбат дипальмитат	–	32.1	–
22.45	Пентаннитрил	5.0	–	–

Время, мин	Соединение	ПС	Овсянка	ПС→Овсянка
22.50	Линолевая кислота (C18:2)	24.9	–	–
22.52	Этилолеат	–	42.3	–
22.55	Олеиновая кислота (C18:1)	23.1	–	–
22.55	Циклопентанундекановая кислота	–	–	57.0
18.10	Дикетопиперазин (маркер протеолиза)	–	–	1.7

При смене диеты (ПС→Овсянка) как в кишечнике, так и в теле появилась циклопентанундекановая кислота (до 57 % ТИС). Данное соединение полностью отсутствовало в монодиетах. Оно может служить маркером адаптационной перестройки липидного обмена. При проведении пиролиза при 600°C эти данных соединений обнаружено не было, доминировали продукты гидролиза запасных и мембранных липидов: на ПС — ненасыщенный спирт C18:1 (41 %), на овсянке — олеиновая кислота (44 %), на комбинированной диете — линолевая кислота (54 %). Таким образом, двухтемпературный подход позволил различить пул лабильных метаболитов (300 °C) и структурный жирнокислотный состав биополимеров (600 °C).

Сравнение тканей выявило, что кишечник острее реагирует на качество субстрата (появление олеинового альдегида, жирного диола), тогда как тело накапливает конечные продукты обмена (эферы, циклические кислоты). На комбинированной диете при пиролизе (600 °C) кишечник демонстрировал аномально высокий выход малоудерживаемого компонента, предположительно CO<sub>2</sub> (36 %) и азотсодержащих фрагментов, что может указывать на интенсивные окислительные и репаративные процессы в эпителии после периода голодания на полистироле.

### Заключение

Проведённое исследование демонстрирует аналитические возможности двухтемпературной пиролитической ГХ/МС при изучении взаимодействия личинок с полистиролом. Мы полагаем, что личинки механически разрушают полистирол грызущим ротовым аппаратом, но не глотают его, а голодают, используя запасные липиды. Это отразилось на зафиксированных изменениях, связанных с липидным и жирнокислотным обменом веществ. Вместе с тем, полученные данные убедительно показывают, что варьирование температуры пиролиза позволяет в одном эксперименте без пробоподготовки получать два принципиально разных среза информации: профиль лабильных метаболитов (300 °C) и структурный состав биополимеров (600 °C) Метод может быть рекомендован для скрининговой оценки способности различных организмов к переработке синтетических полимеров и выявления тканеспецифичных маркеров метаболического стресса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-24-00273. Хроматографические исследования выполнены в рамках ГЗ ЮНЦ РАН № 124022100017-6.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tsuge S., Ohtani H., Watanabe C. Pyrolysis-GC/MS Data Book of Synthetic Polymers. Elsevier, 2011. 390 p.
2. Yang Y., Yang J., Wu W.M. et al. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: Part 1. Chemical and physical characterization and isotopic tests // Environmental science & technology. — 2015. — Vol. 49. — N. 20. — P. 12080-12086.
3. Bastrakov A. I., Khatsaeva R. M., Triseleva T. A., Ushakova N. A. Destruction of Polystyrene by Larvae of *Ulomoides dermestoides* (C hevrolat, 1878) (Coleoptera: Tenebrionidae) // Biology Bulletin. — 2025. — Vol. 52. — P. 276-284.

## МЕТОД ПИРО-ГХ/МС КАК ИНСТРУМЕНТ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ УСТОЙЧИВОСТИ ОСИНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ К ЯДРОВОЙ ГНИЛИ

### Артемихина (Тюткова) Е.А.

Институт леса им В.Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН tyukatie@gmail.com  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

*С помощью метода Пиро-ГХ/МС показано, что устойчивость осины к ядровой гнили — это постоянно присутствующий, а не индуцируемый инфекцией признак. Устойчивые деревья изначально имеют особый химический состав древесины. Полученные результаты подтвердили наличие внутривидового полиморфизма осины по биохимическим признакам, определяющим устойчивость к *Phellinus tremulae*. Ключевыми маркерами устойчивого фенотипа являются высокое содержание сахаров (>8 %) и сирингильного лигнина (>7 %), а также низкое содержание низкомолекулярных фенолов и бензолов (<8 % и <7 % соответственно).*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ядровая гниль, осина, пиролиз, устойчивость.

В процессе рекогносцировочного обследования территории Молокчинского ботанико-энтомологического заказника, проводившегося в 2024 г., был выявлен древостой осины, в котором присутствовали деревья, сильно и слабо пораженные ядровой гнилью (что первоначально было оценено по обилию плодовых тел на стволе), а также деревья без признаков плодовых тел на стволе, произрастающие в однородных экологических условиях. Это очевидным образом являлось следствием внутривидового полиморфизма по наследственным признакам, важным для формирования устойчивых к поражению осиновым трутовиком фенотипов осины. Выполненные дендрохронологические исследования показали, что между деревьями не существует достоверных отличий по скорости радиального роста, а наблюдающийся в популяции полиморфизм скорее всего связан с генетическими отличиями между деревьями по уровню иммунитета к развитию гнили [1]. Была сформулирована гипотеза о том, что отличия по пораженности трутовиком связаны с разной биостойкостью древесины, например, из-за разной интенсивности синтеза продуктов вторичного метаболизма и их химизма. Для проверки данной гипотезы было необходимо выполнение сравнительных анализов древесины у разных групп деревьев с применением метода пиролитической газовой хромато-масс спектрометрии.

### Материалы и методы

Объектами исследования были деревья осины из древостоя, расположенного на территории Молокчинского ботанико-энтомологического заказника (Сергие-

во-Посадский район Московской области). Брались образцы древесины (сквозные керны) на высоте 1,3 м у двух групп деревьев. Первая группа (10 шт. — Категория 1) — условно здоровые. Деревья не имели внешних признаков повреждения кроны и ствола. Вторая группа (10 шт. — Категория 2) — условно угнетенные. На стволе были выявлены отмершие сучья. Пиро-ГХ/МС использовалась для разделения и идентификации летучих компонентов, образующихся в процессе пиролиза. Для этой цели пиролизер типа Frontier EGA/PY-3030D был непосредственно присоединен к хромато-масс-спектрометру (QP 2020, Shimadzu). Температура пиролиза 600 °С. Хроматографическое разделение летучих продуктов проводили на капиллярной колонке Ultra Alloy (30 м × 0,25 мм × толщина слоя жидкой фазы 0,25 мм). Хроматографическое разделение продуктов пиролиза осуществляли при программировании температуры колонки: (i) 50 °С в течение 10 мин; (ii) от 50 до 240 °С со скоростью 5 °С/мин; (iii) капиллярную колонку поддерживали при 300 °С в течение около 10 мин. В качестве газа-носителя использовали гелий при постоянном расходе 1,0 мл/мин. Температура на входе ГХ составляла 250 °С, при сплит-отношении 50:1. Масс-спектры регистрировали при электронной ионизации (70 эВ) в диапазоне: 35–450 у.е. Идентификацию пиков проводили с использованием библиотеки масс-спектров и литературы.

### Результаты и их обсуждение

Продукты пиролиза, обнаруженные в образцах осины из Категории 1 и Категории 2 были разделены на 2 основных класса: холоцеллюлоза (Х) и лигнин (Л), в которых было выделено 7 подгрупп соединений, полученных из полисахаридов: сахара (Сах.); фураны (Фур.); циклопентеноны (Цик.) и продукты, полученные из лигнина: фенолы (Ф); бензолы (Б); лигнина гваяцильного типа (ЛГ); лигнина сиригильного типа (ЛС). Идентифицированные продукты пиролиза и их относительные площади соответствующих пиков на пирограмме для исследуемых образцов приведены в Таблице 1 и сгруппированы в соответствии их классом.

Таблица 1. Сравнительный анализ продуктов пиролиза холоцеллюлозы и лигнина в древесине двух фенотипических групп осины (*Populus tremula*), произрастающих в Молокчинском ботанико-энтомологическом заказнике

Образец	Холоцеллюлоза			Лигнин			
	Сах.	Фур.	Цик.	Ф	Б	ЛГ	ЛС
Категория 1	8,26± 0,153	6,36± 0,0626	5,48± 0,0754	7,46± 0,0832	6,54± 0,0324	36,63± 0,0871	7,43± 0,0709
	Σ(Х) 20,09			Σ(Л) 58,06			
Категория 2	4,95± 0,0871	5,05± 0,0556	4,25± 0,1021	13,71± 0,0550	23,82± 0,0306	25,28± 0,0624	2,09± 0,0451
	Σ(Х) 13,71			Σ(Л) 64,09			

Образцы Категории 2, отобраны с деревьев, находящиеся в состоянии скрытого патологического стресса, то есть грибная инфекция уже проникла через отмер-

шие сучья, но плодовое тело гриба еще сформировалось и нет обширной гнили в древесине. Образцы деревьев Категории 1 — это деревья без отмерших сучьев, которые, вероятно, успешно блокировали проникновение инфекции на ранних стадиях (либо вообще не были заражены). По результатам, представленным в Таблице 1, можно выделить следующие маркеры устойчивости осины к ядровой гнили. Образцы Категории 1 (устойчивый фенотип) - деревья без отмерших сучьев и без внешних признаков поражения ядровой гнилью характеризуются высоким содержанием углеводов (20,09 %), где сахара составляют 8,26 %, а также высоким содержанием сиригильных (7,43 %) и гваяцильных (36,63 %) субъединиц лигнина. Кроме того, уровень низкомолекулярных фенолов и бензолов выявил минимальное их значение (7,46 % и 6,54 % соответственно). Образцы Категории 2 (восприимчивый фенотип со скрытой инфекцией) — деревья с отмершими сучьями на стволе, но без плодовых тел трутовика. В древесине данных образцов зафиксировано значительное снижение углеводов (до 13,71 %), особенно сахаров (4,95 %), что указывает на начавшуюся деградацию полисахаридов грибом. Также выявлено, что суммарное содержание лигнина повышено (до 64,09 %) за счет резкого накопления низкомолекулярных продуктов распада - фенолов (13,71 %) и бензолов (23,82 %), при одновременном катастрофическом падении содержания сиригильного лигнина (до 2,09 %), который избирательно разрушается патогеном.

Результаты Пиро-ГХ/МС подтвердили наличие внутривидового полиморфизма осины по биохимическим признакам, определяющим устойчивость к *Phellinus tremulae*. Ключевыми маркерами устойчивого фенотипа (Категория 1) являются высокое содержание сахаров (>8 %) и сиригильного лигнина (>7 %), а также низкое содержание низкомолекулярных фенолов и бензолов (<8 % и <7 % соответственно).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Румянцев Д.Е. Как связаны скорость радиального роста и пораженность гнилью у деревьев осины? // Д.Е. Румянцев, Н.С. Воробьева, Е.А. Тюткова, М.В. Моргунова // Материалы XX Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса». – 2022. С. 180–182.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ХРОМАТОГРАФИИ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ С РАЗЛИЧНОЙ АГРОГЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

---

### Фарходов Ю.Р.

ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им В.В. Докучаева», yulian.farkhodov@yandex.ru  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный  
исследовательский центр «Почвенный институт имени В.В. Докучаева», г. Москва

*Пиролитическая хроматография один из наиболее перспективных методов оценки молекулярного состава пулов почвенного органического вещества (ПОВ). В работе методом двухстадийного пиролиза с ГХ-МС изучен состав термолабильных и термостабильных компонентов дерново-подзолистые почвы разного землепользования (пашня, залежь, сенокос, пастбище). Установлено, что в термолабильной фракции доминируют липиды и углеводы на пашне и пастбище, а полифенолы — в залежи и на сенокосе; в термостабильной фракции основными маркерами различий выступили полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и фенолы. Показано, что высокая доля ПАУ соответствует более деградированным почвам (пашня, пастбище), а повышенное содержание фенолов — почвам с признаками накопления углерода (залежь, сенокос). Таким образом, пиролитическая хроматография может служить эффективным инструментом для выявления молекулярных маркеров деградации и проградации дерново-подзолистых почв при различных типах использования.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Пиро-ГХ/МС, постагрогенез, агрогенез, лабильный пул, пассивный пул, пиролизаты.

---

ПОВ представляет собой сложную многокомпонентную смесь органических молекул различного генезиса, строения и степени связи с минеральной матрицей почвы. Ввиду этой сложности возникает серьезная проблема, связанная с анализом компонентного состава ПОВ, что приводит к разработке различных схем и способов фракционирования, направленных на изучение целевых групп соединений. Наряду с методами фракционирования существуют подходы, ориентированные на анализ всей совокупности компонентов ПОВ. К ним относятся методы неразрушающего анализа: ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и ИК-спектроскопии, а также разрушающего анализа, к которым относится аналитический пиролиз [1,2]. Последний метод выгодно отличается от остальных возможностью проведения более детальной оценки компонентного состава ПОВ, позволяя находить индивидуальные молекулярные маркеры трансформации ПОВ. Накопленный объем информации о составе пиролизатов индивидуальных органических соединений, их смесей, а также почвенных образцов позволяет эффективно проводить поиск источников (предшественников) пиролизатов и корректно интерпретировать результаты пиролитических исследований почвы. Важно отметить, что изучение совокупного состава ПОВ является критически важным направлением для комплексной оценки плодородия почв и устойчивости агроэкосистем. Дерново-под-

золистые почвы вносят второй по значимости вклад после черноземов в обеспечение продовольственной безопасности России [4]. Активное сельскохозяйственное использование дерново-подзолистых почв приводит к процессам деградации ОВ и обеднению его состава. Поэтому для эффективного мониторинга их состояния все более актуальными становятся исследования по поиску показателей деградации и проградации почв. Целью исследования является оценка молекулярного состава ОВ дерново-подзолистых почв разного вида использования и выявление пиролитических маркеров его трансформации. Объекты исследования — дерново-подзолистые почвы различного типа землепользования (пашня, залежь, сенокос, пастбище), отобранные на территории исследовательского полигона Всероссийского НИИ мелиорируемых земель (п. Эммаусс, Тверская обл.).

Для детальной оценки состава ПОВ применяли метод двухстадийного пиролиза, позволяющий изучать молекулярный состав термических фракций: термолабильное и термостабильное ПОВ (ТЛОВ, ТСОВ) [3]. Выделение термических фракций проводили на пиролизере EGA/PY-3030D (Frontier Laboratories, Япония). Величина навески почвы составляла 10-15 мг. Первую стадию пиролиза проводили при нагреве от 100 °С до 420 °С со скоростью 30 °С/мин и экспозицией в конечной точке в течении 1 мин, вторую стадию при температуре 650 °С в течении 3 мин. Состав выделенных пиролизатов определяли на газовом хроматографе с масс-спектрометрическим детектором GCMS-QP2010 (Shimadzu, Япония). Площади всех компонентов пробы суммировали и вычисляли относительную долю всех компонентов [5,6]. Показано, что пиролизаты липидов и углеводов доминируют в ТЛОВ пастбища и пашни, а пиролизаты полифенолов — в залежи и сенокосе. Такое распределение пиролизатов свидетельствует о разных источниках поступающего в почву ОВ, а также о накоплении предшественников гуминовых кислот в вариантах с залежью и сенокосом. Составы пиролизатов ТСОВ дерново-подзолистых почв различного землепользования достоверно различались по каждой из выделенных групп. Основные отличия составов ТСОВ связаны с относительным содержанием алканов, фенолов и ПАУ. Высокая доля ПАУ в составе ТСОВ пашни и пастбища свидетельствует о высоком содержании углерода инертного пула. Высокая доля фенолов среди пиролизатов ТСОВ залежи и сенокоса, напротив, указывает на накопление компонентов слаботрансформированного ПОВ; это могут быть как слаботрансформированные компоненты лигнина, так и свежееобразованные гуминовые кислоты. Высокая доля алканов в пашне может свидетельствовать о накоплении труднорастворимых липидов, тогда как в залежи это, вероятно, связано с высоким содержанием липидов в составе поступающего опада. Таким образом, с помощью аналитического пиролиза показана перспективность подхода к оценке состава ОВ дерново-подзолистых почв в целях мониторинговых исследований углеродного статуса почвы при различном землепользовании. По результатам исследований показан высокий диагностический потенциал ПАУ как пиролизатов деградированных почв, а фенолов — как показателя проградации почв.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Данилин И.В. Современные подходы к изучению строения почвенного органического вещества // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Т.124. С.70-90.
2. Холодов В.А., Ярославцева Н.В. Агрегаты и органическое вещество почв восстанавливающихся ценозов. М.: ГЕОС, 2021. 119 с.

3. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Айдиев А.Ю., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Иванов А.Л., Куликова Н.А. Термолабильное и термостабильное органическое вещество черноземов разного землепользования // Почвоведение. 2020. Т. 8. С. 970-982.
4. Шоба, С. А. и др. Национальный атлас почв Российской Федерации. Москва: Астрель, 2011. 633 с.
5. Derenne S., Quenea K. Analytical pyrolysis as a tool to probe soil organic matter // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2015. V. 111. P. 108-120.
6. Farkhodov Yu.R, et al. Fingerprinting of Bulk and Water-Extractable Soil Organic Matter of Chernozems Under Different Tillage Practices for Twelve Years: A Case Study // Soil Systems, 2025, V. 138.

---

*Работа выполнена молодежной лабораторией Почвенного углерода и микробной экологии в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ «Механизмы микробного преобразования секвестрированного углерода в почвах агроэкосистем» (№ FGUR-2025–0011).*

---

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОЧАСТИЦ ПРИ ПОМОЩИ ПИРО ГХ-МС В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ И ГИДРОБИОНТАХ

---

**Юрасов Ю.И., Анциферова М.А., Толстунов М.И., Клещенков А.В., Савикин А.И., Коваленко М. В., Подопригора Е.А.**

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН), Ростов-на-Дону, Россия, yucomp@yandex.ru

*Аннотация. В работе показана эффективность применения метода пиролизной газовой хроматографии-масс-спектрометрии (Пиро-ГХ-МС) при определении полимерных микрочастиц в донных отложениях и гидробионтах. Продемонстрирована сопоставимость результатов с данными визуального контроля при стандартных микроскопических исследованиях и рамановской спектроскопии.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** микропластик; техногенные частицы; донные отложения; бентос; Азовское море; седиментогенез; пиролизная газовая хроматография; полимерные микрочастицы; речной сток.

---

Попадание микрочастиц полимерных материалов является актуальной задачей перед научным сообществом для дальнейшего понимания систем влияния на окружающую среду и возможности последующего устранения данного влияния на неё, но так как идёт неуклонный рост применения любых полимеров, необходимых для снижения трудозатрат в повседневной жизни, исследование распространения различных полимеров имеет актуальный характер. Например, распространение в водных системах микропластика (МП) — техногенных частиц полимеров размером менее 5 мм — становится всё более ярким примером из-за неуклонного роста мирового производства пластика, которое, по прогнозам, может достичь 736 млн т к 2040 году (OECD, 2024), что ведёт к пропорциональному увеличению объёма отходов. Попадая в морскую среду с коммунально-бытовыми стоками и поверхностным смывом, такие частицы полимеров встраиваются в сложные процессы массопереноса и седиментации (Panov, 1961; Cole et al., 2011), поглощаясь микроскопическими водорослями (Galloway et al., 2017), зоопланктоном и бентосными организмами (Woodall et al., 2014), в результате чего они могут накапливать микропластик и влиять на его перераспределение между толщей воды и донными отложениями (Rauen et al., 2024).

Пробы донных отложений и макрозообентоса отобраны так, чтобы дночерпатель Ван-Вина захватывал верхний слой мощностью 0,2 м. Выбранная глубина отбора (верхний слой) обусловлена скоростью осадконакопления в регионе (2–3,3 мм/год (Fedorov, 2008; Matishov, 2016; Panov, 1961)), что позволяет оценить накопление микропластика с начала его массового производства (1950-е гг.), а отбор макрозообентоса выполнен по стандартным методикам (Manual on Methods for Hydrobiological Analysis, 1983) с помощью ступенчатого просеивания (сито 0,5 см и газ 0,5 мм).

На данном этапе развития науки и технологий пиролизная ГХ-МС, которая исключает субъективные ошибки и автоматизирует процесс, позволяет решить эту задачу. Для проведения исследований и выявления различных корреляций был проведен гранулометрический анализ (Ласка ТД 220), а также исследованы различные параметры водной среды (температуры, солёности, глубины точки отбора) при помощи гидрологического зонда STD-60M и глубины (эхолот НИС ПТР «Денеб»).

В результате проведенных исследований было определено содержание микропластика полимерных материалов (микропластика) в донных отложениях по результатам хроматографического анализа, при котором произведено определение количества микропластика в точках отбора, полученных при температуре пиролиза 600 °С для ряда станций (Рис. 1).

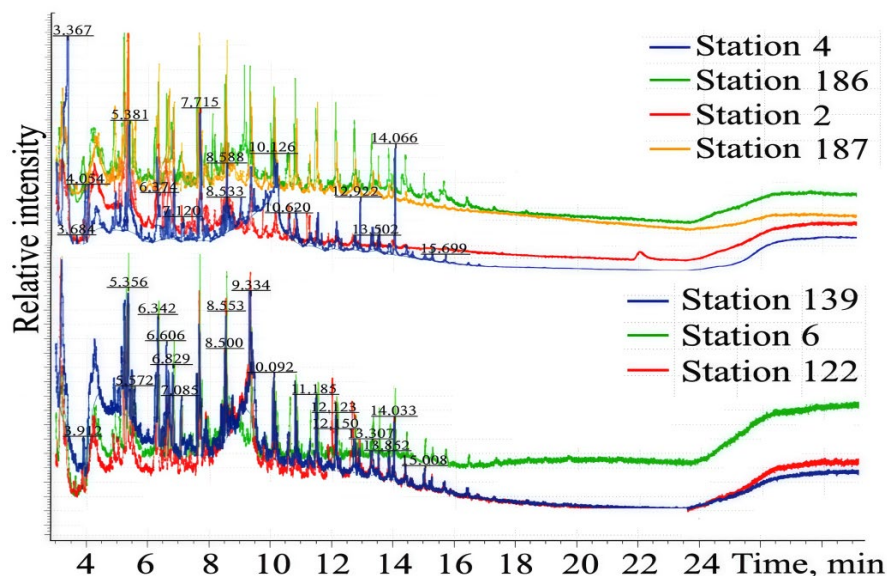


Рисунок 1. Пирограммы донных отложений

Наибольшие концентрации полимеров зафиксированы в устьевой области Дона (139 и 164 мкг/г), в районах Бердянской косы (167 мкг/г) и Керченского пролива (196 мкг/г). Полученные средние значения по накоплению микропластика в донных отложениях Азовского моря (20–66 мкг/г) сопоставимы с данными других исследований в различных регионах мира (около 50 мкг/г) (Barrett et al., 2020).

Результаты хроматографического, гранулометрического и гидрологического анализов, дополненные данными по состоянию макрозообентоса, были проанализированы на картографической модели, при которой демонстрируется взаимосвязь между распределением микропластика, структурой бентосных сообществ и литологией донных осадков Азовского моря.

При анализе было выявлено, что на донные отложения влияет седиментация в устьевых частях рек, тем самым для осаждения микропластика полимеров это имеет весомое влияние. В дальнейшем были проанализированы не только частицы донных отложений, но и частицы, расположенные в гидробионтах (ракушки, рыбы). Например, выбранные частицы были подвергнуты идентификации методом Рамановской спектроскопии (Рис. 2, слева), после чего собраны и проанализированы при помощи Пиро-ГХ-МС (Рис. 2, справа) с определением весового количества ми-

кропластика.

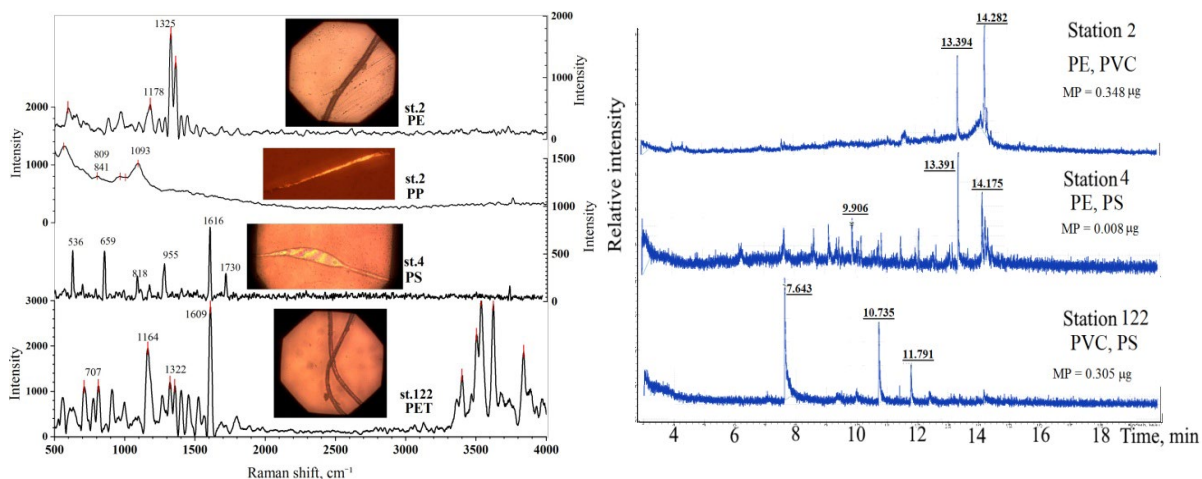


Рисунок 2. Рамановские спектры (слева) и пирограммы микропластика, обнаруженного в бентосе (справа)

В дальнейшем были проанализированы желудки рыб, которые также показали содержание микропластика в рыбах (Рис. 3).

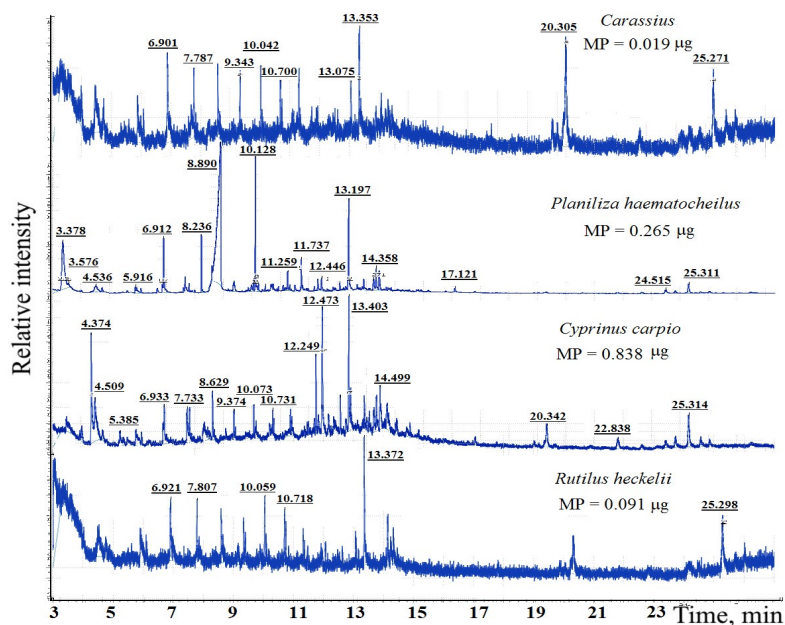


Рисунок 3. Пирограммы микропластика, обнаруженного в рыбе (карась, пеленгас, сазан, тарань), отобранной в районе станции 8 в 2025 г.

Учитывая вышесказанное, вероятность попадания кормовых частиц в пищеварительный тракт не через пищевую активность маловероятна, так как основной поток осмотической воды происходит в жабрах и через кожу (Amineva, Yarzhombek, 1984), а активное питье отмечается у морских рыб.

Проанализировав результаты, можно сказать, что попадание микропластика в гидробионты по пищевой цепи является достаточным, а Пиро-ГХ-МС является эффективным методом определения микрочастиц полимеров в различных объектах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аминова В.А., Яржомбек А.А. 1984. Физиология рыб. М.: Легкая и пищевая промышленность. 200 с.
2. Barrett J., Chase Z., Zhang J., Banaszak Holl M.M., Willis K., Williams A., Hardesty B.D., Wilcox C. 2020. Загрязнение микропластиком глубоководных отложений Большого Австралийского залива // *Frontiers in Marine Science*. Т. 7. Ст. 576170. DOI: 10.3389/fmars.2020.576170.
3. Cole M., Lindeque P., Halsband C., Galloway T.S. 2011. Микропластик как загрязнитель морской среды: обзор // *Marine Pollution Bulletin*. Т. 62, № 12. С. 2588–2597. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025.
4. Федоров Ю.А., Трофимов М.Е. 2008. Современные скорости осадконакопления в Азовском море в свете изучения распределения искусственных радионуклидов по разрезу донных отложений // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. № 4(146). С. 107–111.
5. Galloway T.S., Cole M., Lewis C. 2017. Взаимодействие частиц микропластика в морской экосистеме // *Nature Ecology & Evolution*. Т. 1, № 5. Ст. 0116. DOI: 10.1038/s41559-017-0116.
6. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. 1983. Л.: Гидрометеиздат. 239 с.
7. Матишов Г.Г., Дюжова К.В., Ковалева Г.В., Польшин В.В. 2016. Новые данные о седиментации и биостратиграфии древне- и неозовских отложений (Азовское море) // *Доклады Академии наук*. Т. 467, № 4. С. 463–466. DOI: 10.7868/S0869565216100194 (на русском с англ. резюме).
8. ОЭСР. 2024. Глобальные перспективы пластика: сценарии политики до 2060 года. Париж: Издательство ОЭСР. DOI: 10.1787/aaledf33-en.
9. Панов Д.Г., Спичак М.К. 1961. Скорость накопления осадков в Азовском море // *Доклады Академии наук СССР*. Т. 137, № 5. С. 1212–1213.
10. Rauen T.V., Mukhanov V.S., Baiandina Iu.S., Lyakh A.M. 2024. Влияние микропластика на пищевую и локомоторную активность динофлагелляты *Oxyrrhis marina* в экспериментальных условиях // *Биология внутренних вод*. Т. 17, № 2. С. 316–326. DOI: 10.1134/S1995082924020135.
11. Woodall L.C., Sanchez-Vidal A., Canals M., Paterson G.L.J., Coppock R., Sleight V., Calafat A., Rogers A.D., Narayanaswamy B.E., Thompson R.C. 2014. Глубокое море — основной сток микропластикового мусора // *Royal Society Open Science*. Т. 1, № 4. Ст. 140317. DOI: 10.1098/rsos.140317.

---

### **ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ/БЛАГОДАРНОСТИ**

*Публикация выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-528 от 24.04.2024 о реализации крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития) на оборудовании ЦКП ЮНЦ РАН.*

---

## АНАЛИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО ОПАДА ЛИСТВЕННИЧНЫХ ЛЕСОВ МЕТОДОМ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ГХ-МС

---

**Юркова Т.А, Котельникова И.М., Брянин С.В.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и природопользования Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Благовещенск. Laborant-007@mail.ru

*Изучение потоков углерода в бореальных экосистемах требует понимания того, как растительные остатки разлагаются и преобразуются в устойчивое органическое вещество почвенного профиля. Для раскрытия механизмов деструкции методом пиролитической ГХ-МС был определен исходный состав хвои *Larix gmelinii*, выступающий базовым показателем в процессах трансформации опада и сравнительный анализ с образцами, подвергавшимися естественной деструкции в подстилке в течение двухлетнего периода. Отмечена глубокая деградация лигнина, проявляющаяся в элиминации сиригильных, гваякольных и коричных производных, что указывает на активный распад полимерной матрицы.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пиролиз, масс-спектрометрия, растительный опад, лиственница, органическое вещество, цикл углерода.

---

Бореальные леса являются глобальным стоком наземного углерода, который депонируется преимущественно в почвах [1]. Бореальные леса представляют собой мощный поглотитель атмосферного CO<sub>2</sub>, в связи с этим изучение динамики их углеродного баланса в условиях изменения климата приобретает особую актуальность [2].

Целью данной работы было выявление трансформации молекулярного состава органических соединений растительного опада преобладающих видов бореальных лесов Приамурья методом пиролитической газовой хроматомасс-спектрометрии в процессе разложения. Объектами исследования был лиственный опад лиственницы *Larix gmelinii* Rupr., отобранный в конце естественного периода листопада (контрольные образцы) и после двух лет разложения хвои (экспериментальные образцы).

Для характеристики и оценки компонентов органического вещества применен метод аналитического пиролиза в сочетании с газовой хроматографией-масс-спектрометрией (Пиро-ГХ-МС), позволяющий проводить точную идентификацию продуктов деструкции.

Растительный материал был собран в Зейском государственном природном заповеднике (Амурская область) с использованием опадоуловителей. На пробной площади (20×20 м) заложены 6 экспериментальных площадок размером 25 м<sup>2</sup>. Для исследования процесса разложения опада использовали мешочки 100×100 мм с герметичными краями. Навеску опада (4 г) располагали равномерно по дну мешочка. Мешочки раскладывали на поверхности лесной подстилки, слегка прикрывая свежим опадом, для лучшей фиксации на поверхности. В дату отбора вынимали по 6 мешочков, по одному с площадки.

Для определения качественного состава органических соединений растительного материала методом Пиро-ГХ-МС использовали дериватизацию сложных соединений гидроксидом тетраметиламмония (ТМАН). Анализ выполняли на хромато-масс-спектрометре GCMS-QP2010 Ultra (Shimadzu, Япония) с системой инъекции Optic-4. Разделение образующихся компонентов проводили на легкополярной колонке Ultra-ALLOY 5-MS(HT) +1 m capillary (длина 30 м, внутренний диаметр 0,25 мм, фаза 0,25 мкм). Для идентификации органических соединений использовали библиотеку масс-спектров NIST, достоверность идентификации соединений выше 80 %. Аналитический пиролиз проводили в 6 повторностях.

Тонкоизмельченный образец растительной массы (1–2 мг) помещали в кварцевые пробирки, добавляли 3 мкл ТМАН в метаноле (25 мг/мл, Sigma-Aldrich). Образец оставлялся до полного испарения растворителя, после чего пробирку вводили в предварительно нагретую систему ввода (100 °С) и подвергали пиролизу в две стадии. На первом этапе нагрев проводили со скоростью 10 °С/сек 300 °С, воздействие температуры 2 сек. На втором этапе образец нагревали с 300 до 500 °С со скоростью 10 °С/сек, воздействие температуры 5 сек. В качестве газа-носителя использовался гелий (чистота 99,995 %). Газ-носитель подавался со скоростью 3 мл/м, деление потока 1:20.

Разделение органических соединений проводили при начальной температуре колонки 50 °С, увеличивали до 300 °С со скоростью 5 °С/мин, анализ выполнялся в течение 55 мин. Температура интерфейса МСД — 200 °С, ионного источника — 180 °С, диапазон масс — 35–500, скорость сканирования — 2000 ед/с.

В образцах определяли количественное содержание органического углерода методом высокотемпературного каталитического термоокисления на анализаторе ТОС-L (Shimadzu, Япония). В исходных образцах средняя массовая доля органического углерода составила 42,05 %, тогда как в образцах, подвергшихся деструкции, данный показатель снизился до 38,38 %.

Методом Пиро-ГХ-МС в исходных образцах было идентифицировано 48 соединений, в деградированных — 41 соединение. Выявленные компоненты были классифицированы по следующим группам: производные лигнина, жирные кислоты, продукты термодеструкции полисахаридов - целлюлозы и гемицеллюлоз, жирные спирты, алканы, прочие ароматические соединения, терпены, а также маркер микроорганизмов - метиловый эфир 12-метилтридекановой (изомиристиновой) кислоты (Таблица 1).

Таблица 1. Группы соединений в образцах хвои лиственницы *Larix gmelinii*, определенные методом Пиро-ГХ-МС

Группы компонентов	Количество соединений в исходных образцах	Количество соединений в образцах после деструкции
Производные лигнина	19	14
Жирные кислоты	16	13
Метиловый эфир 12-метилтридекановой кислоты	0	1
Терпены	5	2

Группы компонентов	Количество соединений в исходных образцах	Количество соединений в образцах после деструкции
Продукты пиролиза полисахаридов	4	4
Жирные спирты	2	0
Алканы	1	0
Другие ароматические соединения	1	7

Данные таблицы демонстрируют качественное изменение состава: полная элиминация алканов (докозан) и жирных спиртов (фитол, 10-нонадеканол) сопровождается снижением концентрации жирных кислот, лигнинсодержащих структур и производных целлюлозы и гемицеллюлоз. Отмечена деградация основных структурных единиц лигнина. Наблюдается снижение концентрации мономерных предшественников — синрингильных (полностью исчезли 2,6-диметилфенол), гваякольных (исчезли 2-этилфенол, 1,4-диметоксибензол, 4-этенил-2-метокси фенол) и коричневых производных — метиловых эфиров 4-метокси бензойной кислоты, метоксифенолов и диметоксифенилов 2-пропановой кислоты, что свидетельствует о деструкции полимерной матрицы. Изменился состав соединений ароматического ряда, не входящих в состав лигнина: в исходных образцах хвои это был компонент эфирных масел 1,2,4-триметоксибензол, в образцах после деструкции — продукты глубокой деструкции лигнина — толуол, 2,4,6-триметокситолуол и другие соединения. После разложения сократилось содержание и количество терпеновых соединений из эфирных масел хвои.

Об активной биогенной трансформации субстрата свидетельствует появление специфических микробных маркеров (12-метилтридекановая кислота) после деструкции хвои.

Применение метода Пиро-ГХ-МС позволило зафиксировать динамику деструкции компонентов хвои лиственницы на протяжении первых двух лет эксперимента. В данный период отмечена глубокая деградация лигнина, проявляющаяся в элиминации синрингильных, гваякольных и коричневых производных (2,6-диметилфенола и эфиров фенилпропановых кислот), что указывает на активный распад полимерной матрицы уже на промежуточном этапе исследования. Эксперимент по изучению деструкции растительного опада в бореальных лесах будет продолжен, что позволит проследить процесс разложения полимерных органических соединений и формы запасаания углерода в почве и подстилке бореальных лесов в течение ряда лет.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратова А.В., Абрамова Е.Р., Брянин С.В. Разложение основных типов опада и высвобождение азота в постпирогенных лиственничниках Дальнего Востока России. // Сибирский экологический журнал 2021 № 2.С 214-226.
2. Kellomaki S. Forests of the boreal region: gaps in knowledge and research needs // Forests ecology and management, 132, 2000, pp. 63-71.