

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи

Анохина Наталья Александровна

Биогенные углеводороды в почвах парковых зон города Москвы

Специальность: 03.02.13 Почвоведение, 03.02.08 Экология (по отраслям)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва 2020

Работа выполнена на кафедре химии почв факультета Почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научные руководители:

Завгородняя Юлия Анатольевна

Кандидат биологических наук

Демин Владимир Владимирович

Кандидат биологических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Ковалев Иван Васильевич

Доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики почв факультета Почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова

Лодыгин Евгений Дмитриевич

Доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук ФГБУН ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Васильева Галина Кирилловна

Кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН»

Защита диссертации состоится «7» апреля 2020 г. в 15 часов 30 мин на заседании диссертационного совета МГУ.03.05 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП–1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, аудитория М-2.

E-mail: mmakarov@soil.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/262315354/>

Автореферат разослан «28» февраля 2020 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор биологических наук

/ Ковалева Наталия Олеговна /

Актуальность проблемы. Исследование факторов, влияющих на устойчивость пула органических веществ почвы – главного резервуара $C_{орг}$ в биосфере (Batjes, 2014) - требует изучения всех аспектов поведения в почвах разных классов органических соединений. Некоторые образующиеся в результате биосинтеза молекулы, могут служить биомаркерами – соединениями, наблюдая за которыми можно получить информацию о процессах формирования и трансформации органических веществ в почве. Алифатические углеводороды с длиной углеродной цепи от 16 до 34 атомов, несмотря на их невысокое содержание в составе органического вещества (ОВ) почв (Kögel-Knabner, 2002), представляются удобными соединениями для исследования углеродного цикла. *n*-Алканы относятся к наиболее гидрофобным органическим молекулам липидной фракции почвы, что позволяет им связываться в прочные комплексы с твердыми фазами почвы и ограничивает их миграцию в растворах из-за низкой растворимости в воде. Являясь продуктами биогенного синтеза, *n*-алканы не образуются в почве при внутри- и внеклеточной деградации органических соединений. Таким образом, распределение в почве и сезонные изменения гомологического состава алканов могут отражать локализацию и динамику трансформации и стабилизации ОВ с момента поступления в почву (Zech et al., 2012). Одним из промежуточных окисленных продуктов постмортальной биodeградации *n*-алканов являются *n*-метил-кетоны, отсутствующие в живых клетках растений. По степени гидрофобности алифатические кетоны близки к алканам, что определяет сходное с ними поведение в почве и также может быть использовано для оценки интенсивности деструкции липидов в почве.

Цель работы – исследование динамики содержания и состава алифатических соединений липидов в почвах под широколиственными растительными сообществами на территории города Москвы.

Задачи исследования:

1) Произвести подбор оптимальных условий для одновременной эффективной экстракции из подстилок и верхних горизонтов почв алифатических соединений почвенных липидов - *n*-алканов и *n*-метил-кетонов

2) Исследовать качественный и количественный состав алифатических компонентов липидной фракции в профиле почвы под широколиственным растительным сообществом.

3) Изучить сезонные изменения в содержании и гомологическом составе *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в верхних горизонтах почв под листопадными фитоценозами.

4) Оценить вклад различных источников природных липидов в формирования гомологического состава линейных углеводов в верхних горизонтах почв под листопадными фитоценозами.

Научная новизна. Предложена усовершенствованная методика определения *n*-алканов и *n*-метил-кетонов из одной навески проб подстилок и почв. Впервые изучена сезонная динамика содержания биогенных углеводов в почвах листопадных сообществ городских лесопарков. Впервые получены данные по профильному распределению содержания *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в почвах.

Практическая значимость работы. Распределение в почве и сезонные изменения гомологического состава алканов отражают локализацию и динамику трансформации и стабилизации гидрофобной фракции почвенного органического вещества, изучение которой является ключом для понимания механизмов взаимодействия и прогнозирования времени пребывания различных органических соединений в почвах, в том числе гидрофобных поллютантов.

Положения, выносимые на защиту.

1) Использование градиентной экстракции растворителями различной полярности необходимо при проведении количественных исследований липидного комплекса почв, так как обеспечивает более эффективное извлечение из минеральных и органогенных горизонтов алифатических соединений почвенных липидов с длиной углеродной цепи $>C_{25}$.

2) В гомологическом составе линейных алканов верхних гумусовых горизонтов дерново-подзолистой почвы под широколиственным растительным сообществом абсолютно доминируют нечетные соединения с длиной цепи $C_{25}-C_{33}$, основным источником которых в почве являются эпителикулярные воска растений. В элювиальном и иллювиальном горизонтах гомологический состав *n*-алканов определяется наличием липидов микробной биомассы и корней.

3) В гумусовых горизонтах почв под листопадными фитоценозами происходят количественные и качественные сезонные изменения в липидном составе. Фракция липидов в зрелых почвах характеризуется выраженными сезонными изменениями в

гомологическом составе *n*-алканов при незначительных колебаниях их количественного содержания. Для молодых почв в годовом цикле количественные изменения содержания *n*-алканов более существенны, в то время как гомологический состав меняется слабо.

4) Продукты микробиологического окисления *n*-алканов – 2-метил-кетоны - являются более чувствительным показателем процессов трансформации липидного комплекса, протекающих в почве, по сравнению линейными алканами.

Личный вклад автора. Автором осуществлялась постановка проблемы и методическая разработка путей ее решения, планирование и проведение экспериментальных работ, обработка, систематизация и интерпретация полученных данных, апробация и публикация результатов. Все аналитические измерения, обработка данных и подготовка проб проводились самим автором или при его непосредственном участии.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены на конференциях: Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2014, 2016); Международная научная конференция Докучаевские молодежные чтения (Санкт-Петербург, 2015, 2017), Лесные почвы и функционирование лесных экосистем. Всероссийская научная конференция с международным участием (Москва, 2019). Предзащита состоялась на кафедре химии почв 17.05.2019.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в список Scopus, Web of Science, RSCI, рекомендованных к защите в МГУ.

Объем и структура диссертации. Диссертация включает введение, обзор литературы, описание объектов и методов исследования, обсуждение экспериментальных результатов, выводы, список литературы. Материалы диссертации изложены на 124 страницах, содержат 13 таблиц, 37 рисунков. Список литературы включает 128 наименований, в том числе 97 англоязычных.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своим научным руководителям за неоценимую помощь, терпение и неиссякаемый источник вдохновения, а также семье, друзьям и коллегам за понимание и поддержку. Отдельное спасибо хочется сказать школьным учителям за помощь в подготовке к

олимпиадам, Омской ОблСЮН за первые шаги в области почвоведения и, конечно, преподавателям родного факультета за все полученные знания и навыки.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Глава 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.

1.1 Источники поступления биогенных углеводов в почву. Описана роль липидов в формировании почвенного органического вещества. Обозначены источники поступления *n*-алканов в почву. В главе рассматриваются эпителикулярные воска листьев наземных растений – как основные источники поступления *n*-алканов в почву с растительным опадом (Harwood, Russel, 1984; Zech et al., 2011; Bush, McInerney, 2013; Norris et al., 2013). Синтез углеводов в микроорганизмах зависит от условий окружающей среды, которые определяют пути физиологической регуляции (Walker, Cooney, 1973; Bagaeva, Zinurova, 2004; Ladygina, Dedyukhina, Vainshtein, 2006).

1.2 Трансформация алканов в почвах. Попадая в почву, *n*-алканы подвергаются превращениям под воздействием биотических и абиотических агентов. *n*-Алканы считаются относительно устойчивыми к деградации, по сравнению с другими соединениями - биомаркерами (Zech et al., 2011). Первичными продуктами деструкции алканов в почвенных условиях являются спирты, жирные кислоты и метил-кетоны (*n*-алкан-2-оны). Последние образуют гомологи с числом углеродных атомов, равным исходному алкану (Rontain et al., 2013). Еще один из возможных путей деградации *n*-алканов – это окисление до *n*-спиртов и *n*-жирных кислот, которые, в отличие от алканов, имеют больше четных компонентов в составе, поэтому их поступление из растений весьма ограничено (Jansen, 2008).

1.3 Сорбция алканов в почве. Сохранение линейных липидов в почвах, в том числе *n*-алканов, является конечным результатом сложных взаимодействий различных факторов – состава микробной популяции, сорбционных свойств и минерального состава почв (Bull, 2000). Часть *n*-алканов, связанная с почвенными органо-минеральными частицами может перемещаться вместе с ними в профиле в результате лессиважа и зоотурбаций (Ferguson et al., 2009; Bush, McInerney, 2013).

1.4 Круговорот углерода в лесных экосистемах и его пулы. Органические соединения, попадающие в почву, сильно различаются по составу, доступности для разложения и, как следствие, имеют разную скорость оборачиваемости. Современные

подходы вносят представление о наличии в почвах континуума органических соединений, а не дискретных пулов с разным временем оборота, и учитывают, в первую очередь, влияние на оборачиваемость доступности органических соединений, а не качества субстрата. Чтобы предсказать реакцию органического углерода почвы на климатические изменения, модели круговорота должны выходить за рамки отдельных углеродных пулов, а объединить физические свойства почвы и биологические процессы (Lehmann, Kleber, 2015).

Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Исследование сезонных изменений скоростей трансформации органического вещества в почвах под широколиственными растительными сообществами. Чувствительным индикатором скоростей трансформации органического вещества в подстилочном и верхнем почвенном горизонтах могут быть неспецифические водорастворимые соединения почвенного гумуса. На примере модельного широколиственного сообщества почвенных лизиметров, представленного кленом платанолистным (*Acer platanoides*), была изучена сезонная динамика состава и содержания бензолкарбоновых кислот (БКК) в верхнем гумусовом горизонте почвы и в подстилке. В течение года производили ежемесячные (с октября по апрель) отборы проб подстилки и почвы с глубины 0-10 см. В образцах проводили определение состава и содержания БКК методом твердофазной экстракции с использованием концентрирующих патронов и последующим определением на ВЭЖХ (Анохина с соавт., 2018). Также в образцах определяли интенсивность почвенного дыхания по скорости эмиссии диоксида углерода (Anderson, Domsch, 2010).

2.2 Оптимизация методики выделения *n*-алканов и *n*-метил-кетонов из проб почв и подстилок. При подборе оптимальных условий экстракции за основу были взяты несколько методик экстракции из почв *n*-алканов, *n*-спиртов и *n*-жирных кислот (Wiesenberg et al., 2004; Jansen et al., 2006; Nichols, Huang, 2007). Во всех сериях экспериментов использовалась одни и те же процедуры: подготовки образцов к экстракции, хранения и концентрирования проб после экстракции, выделения слабополярной и неполярной фракций липидов методом адсорбционной хроматографии и количественного определения *n*-алканов и *n*-метил-кетонов методом ГХ-МС.

2.3 Анализ проб методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии.

Качественную идентификацию и количественное определение целевых компонентов в пробах проводили методом капиллярной газо-жидкостной хроматографии на газовом хроматографе Agilent 6890N (Agilent Technologies) с квадрупольным масс-селективным детектором MSD5973N (Agilent Technologies) и системой обработки данных ChemStation, MSDChem. Идентификацию *n*-алканов и *n*-метил-кетонов проводили по временам удерживания и масс-спектрам. Количественное определение проводили по доминирующим фрагмент-ионам.

2.4 Исследование состава и содержания *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в профиле почв под широколиственными фитоценозами. Для изучения профильного распределения *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в почвах под широколиственными фитоценозами в начале сентября были заложены два разреза («Л.О.2» и «Л.О.3») дерново-подзолистых почв под липняками (*Tilia cordata*) в Национальном парке «Лосиный остров» города Москва. Из почвенных горизонтов АУ (слои 0–2 и 2–5см), АУЕЛ (5–12см), ЕЛ (12–28см), ВТ (28–60см) отобрали по пять точечных проб. Для каждого слоя почвы из точечных проб готовили смешанные образцы, которые высушивали до воздушно-сухого состояния.

2.5 Исследование сезонных изменений состава и содержания *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в верхних слоях почв под липняками. Для проведения сезонного пробоотбора четыре площадки опробования были заложены в Национальном парке «Лосиный остров» в 30-м и 32-м кварталах парка («Л.О.1», «Л.О.2», «Л.О.3», «Л.О.4»). Все площадки расположены между 3–4 деревьями в фитоценозах с липой сердцевидной (*Tilia cordata*) в первом ярусе, лещиной обыкновенной (*Corylus avellana*), кленом платанолистным (*Acer platanoides*) и рябиной обыкновенной (*Sorbus aucuparia*) во втором ярусе. В пределах выбранных площадок присутствовал травянистый ярус. Почва под липняками - дерново-подзолистая типичная мелкая неглубокоосветленная легкосуглинистая на покровном суглинке, подстилаемом мореной (Umbric Retisols) (Классификация...,2004; IUSS Working Group WRB, 2006) с подстилкой, представленной недифференцированным растительным опадом текущего года (Киселева, 2006; Прокофьева с соавт., 2011). Пробы отбирали в пяти точках в пределах площадки опробования. Отбор подстилок производили с поверхности почвы площадью 0.0625 м². Пробы подстилок высушивали до воздушно-сухого состояния и

взвешивали, из точечных проб растительного материала готовили смешанную пробу. Пробы почв отбирали с глубины 0-5 и 5-10 см, из точечных проб готовили смешанные, которые высушивали до воздушно-сухого состояния.

2.6 Исследование сезонных изменений состава и содержания *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в верхних слоях почв под различными широколиственными фитоценозами. Для проведения сезонного пробоотбора три площадки опробования были заложены в лесопарке на Воробьевых горах (г. Москва, Большой газон МГУ) под широколиственными фитоценозами между 3–4 деревьями. Приблизительный возраст почв – 60 лет (Прокофьева, Герасимова, 2018). В исследованных точках доминантами верхнего яруса являются: клен платанолистный (*Acer platanoides*) («В.Г.кл»), липа сердцевидная (*Tilia cordata*) («В.Г.л»), клен и липа (далее – кленово-липовое сообщество) («В.Г.кл+л»). Постоянный слой подстилки не формируется и представлен недифференцированным опадом текущего года. Почва - темногумусовая типичная насыщенная сильно гумусированная среднесуглинистая почва на техногенных отложениях (Haplic Phaeozems) (Классификация...,2004; IUSS Working Group WRB, 2006; Прокофьева, Герасимова, 2018). Различия между точками заключаются как в составе первого яруса, так и в степени развития травянистого покрова. Проективное покрытие травянистого яруса выше всего под липняком. Под кленово-липовым сообществом напочвенный ярус выражен значительно слабее, под кленом он отсутствует. Сезонные отборы проб производили в пяти точках в пределах площадки опробования. Отбор подстилок производили с поверхности почвы площадью 0.0625 м². Пробы почв отбирали с глубины 0-10 см. Из точечных проб готовили смешанные, которые использовали для дальнейших анализов.

2.7 Выделение водопрочных агрегатов из образцов почв. Водопрочные агрегаты были выделены методом мокрого просеивания в трехкратной повторности для каждого образца. Для последующего анализа фракции водопрочных агрегатов высушивали в фарфоровых чашках в сушильном шкафу при температуре 60°C до воздушно-сухого состояния (Вадюнина, Корчагина, 1986).

2.8 Анализ проб. Воздушно-сухие пробы подстилок гомогенизировали с помощью мельницы с ножевыми лезвиями. Пробы из минеральных горизонтов почвы растирали в фарфоровой ступке и пропускали через сито с диаметром отверстий 1 мм.

Для полученных образцов определяли:

- содержание C и N на CHNS-анализаторе VarioELIII (Elementar),
- состав и содержание *n*-алканов и *n*-метил-кетонов, выделенных по оптимизированной процедуре экстракции, методом ГХ-МС.

Аналитическая повторность всех проведенных определений была трехкратная.

2.9 Расчет показателей. По полученным результатам количественных определений для всех образцов рассчитывали следующие показатели:

- содержание суммы *n*-алканов C₁₇–C₃₆ (мкг/гC_{орг});
- содержание суммы нечетных *n*-алканов с длиной C-цепи 25–35 (мкг/г C_{орг}), как преобладающих в составе биомассы высших растений – доминирующего источника алифатических углеводородов в незагрязненных почвах;
- содержание суммы *n*-метил-кетонов C₁₇–C₃₆ (мкг/гC_{орг});
- содержание суммы нечетных *n*-метил-кетонов с длиной C-цепи 25–35, продуктов окисления *n*-алканов с аналогичной длиной углеродной цепи;
- индекс OEP (odd-over-even predominance), который характеризует состав *n*-алканов (отношение содержания *n*-алканов с нечетной и четной длиной цепи), позволяет оценить источник поступления *n*-алканов в почву, в частности, указывает на интенсификацию микробиологической активности в почве (Zech et al., 2012; Norris et al., 2013):

$$OEP = \frac{nC_{25} + nC_{27} + nC_{29} + nC_{31} + nC_{33}}{nC_{24} + nC_{26} + nC_{28} + nC_{30} + nC_{32}}$$

- индекс LSR(long-short ratio) – отношение алканов с длинной и короткой углеродной цепью, также позволяет учесть вклад низших растений и микробной биомассы в состав почвенных *n*-алканов (Nichols, Huang, 2007; Zech et al., 2012):

$$LSR = \frac{\sum n\text{-алканов с длиной C-цепи} \geq 25}{\sum n\text{-алканов с длиной C-цепи} < 25}$$

- отношение *n*-алканы/2-метил-кетоны (A/K) – величина относительного накопления продуктов деградации исходных *n*-алканов; используется как показатель повышения интенсивности переработки растительных липидов в почвенной мортмассе (Jetter et al., 2006; Sachse, 2009; Zech et al., 2011; Xia et al., 2015):

$$A/K = \frac{\sum n\text{-алканов с длиной C-цепи} 25-34}{\sum n\text{-метил-кетонов с длиной C-цепи} 25-34}$$

Статистическую обработку результатов проводили с помощью программ Excel и Statistica.

Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Исследование сезонных изменений скоростей трансформации органического вещества в почвах под широколиственными растительными сообществами.

В течение периода наблюдений в образцах подстилки и почвы под широколиственным растительным сообществом высокое содержание отмечено для 4-гидроксibenзойной, бензойной и салициловой кислот, которые являются и продуктами разложения лигнина, и образуются в ходе метаболизма микроорганизмов. В образцах почвы преобладает бензойная кислота, в подстилке – 4-гидроксibenзойная. Минорными компонентами выступают кислоты, образующиеся в ходе биохимических процессов в растительных клетках - например, коричная. На основании проведенного исследования были выбраны временные точки для выполнения пробоотбора, отражающие для данного типа листопадных растительных сообществ периоды, контрастные по запасам и скорости трансформации растительной мортмассы - основного источника липидов в верхних горизонтах почвы: начало вегетации после весеннего снеготаяния (апрель-май), конец вегетации, период до начала листопада (сентябрь), постлистопадный период (ноябрь).

3.2 Оптимизация методики выделения *n*-алканов и *n*-метил-кетонов из проб почв и подстилок.

Модернизация исходной процедуры экстракции проводилась последовательно через ряд этапов: дихлорметан был заменен на хлороформ, что позволило существенно снизить давление в системе ASE при экстракции; были опробованы следующие варианты экстрагентов: 1) CHCl_3 ; 2) $\text{CHCl}_3:\text{CH}_3\text{OH}$ 3:1 (v/v); 3) $\text{CHCl}_3:\text{CH}_3\text{OH}$ 1:1 (v/v); был исследован выход целевых компонентов при последовательной экстракции различными растворителями (градиентная экстракция). В целом по сравнению с оригинальной методикой изменение параметров экстракции позволило увеличить выход липидных компонентов из исследованных образцов почвы и подстилки на 51-56 и 28-35%, соответственно, преимущественно за счет лучшей экстракции гомологов с длиной цепи $>\text{C}_{25}$. Финальный вариант подготовки проб для анализа приведен на рисунке 1.

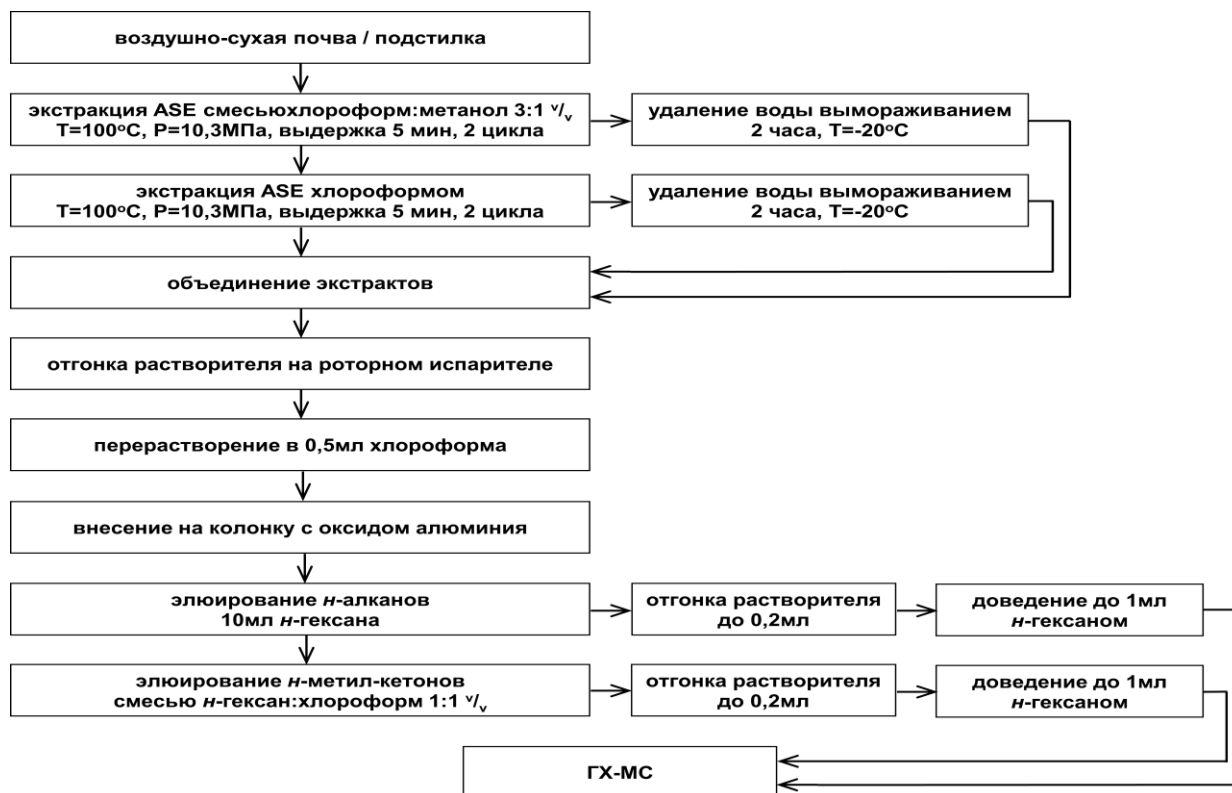


Рисунок. 1. Схема анализа состава и содержания *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в почвах и подстилках методом ГХ-МС.

3.3 Исследование состава и содержания *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в профиле почв под широколиственными фитоценозами.

При переходе от верхних гумусовых гор.АУ и АУЕЛ к гор.ЕЛ уменьшается содержание в почве органического вещества, при этом резко возрастает доля линейных алканов в его составе с 200 мкг/г С в АУЕЛ до 700–900 мкг/г С в гор.ЕЛ (табл.1). Также в гор. ЕЛ резко меняется тип распределения *n*-алканов: падает доля нечетных длинноцепочечных гомологов (индекс ОЕР близок к 1), что указывает на преимущественно микробное (грибное и бактериальное) происхождение углеводородов. По сравнению с гор.ЕЛ в гор. ВТ повышается относительное содержание длинноцепочечных нечетных алканов, спектр гомологов близок к их распределению в гор.АУЕЛ, что указывает на увеличение доли липидов растительного происхождения, среди которых преобладают, по-видимому, компоненты корневого опада (рис.2). Вклад алканов – продуктов микробного синтеза, остается достаточно высоким: индексы ОЕР и LSR остаются низкими.

Таблица 1. Профильное распределение *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в дерново-подзолистых почвах под липняками НП “Лосиный остров” (среднее значение±стандартное отклонение, *n*=3)

Горизонт		AY _{0-2см}	AY _{2-5см}	AYEL	EL	BT
«Л.О.2»						
C _{орг} , %		4,7±0,2	3,5±0,1	2,5±0,5	0,3±0,02	0,1±0,01
<i>n</i> -Алканы:	сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	130±35	150±18	195±59	900±55	570±20
	сумма нечетных C ₂₅ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	97±11	107±10	150±26	369±42	229±12
	C ₂₉ /C ₃₁	1,2±0,1	1,2±0,1	0,5±0,1	1,8±0,2	0,7±0,1
	ОЕР	10±2	8±2	6±2	1,0±0,2	2±1
	LSR	5±1	4±1	4±1	4±1	2±1
<i>n</i> -Метил-кетоны:	сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	12±2	17±3	16±3	2,2±0,3	9,5±1,0
	сумма нечетных C ₂₅ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	10±2	12±1	12±2	2,0±0,1	8,0±0,7
	А/К	11±1	9±1	12±1	409±10	60±6
«Л.О.3»						
C _{орг} , %		3,8±0,3	2,2±0,1	2,0±0,2	0,3±0,03	0,2±0,01
<i>n</i> -Алканы:	сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	140±35	150±18	220±59	680±63	590±25
	сумма нечетных C ₂₅ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	105±28	107±16	169±27	279±22	237±14
	C ₂₉ /C ₃₁	1,4±0,2	1,0±0,1	1,0±0,1	1,2±0,1	0,6±0,1
	ОЕР	11±2	7±2	5±2	1,0±0,3	3±1
	LSR	6±2	4±2	3±2	3±2	1,0±0,3
<i>n</i> -Метил-кетоны:	сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	13±2	8,0±0,9	24±3	1,9±0,2	8,0±1,3
	сумма нечетных C ₂₅ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	9,0±0,7	6,0±0,9	16±2	1,5±0,2	5,2±0,4
	А/К	11±2	19±3	9±2	358±15	74±6

Содержание *n*-метил-кетонов в почвенных горизонтах на 1-2 порядка ниже соответствующих величин для *n*-алканов. Величина параметра А/К в горизонтах меняется в порядке EL(350-410)>>BT(60-75)>>AY_{0-2см}≈AY_{2-5см}≈AYEL(10-20).

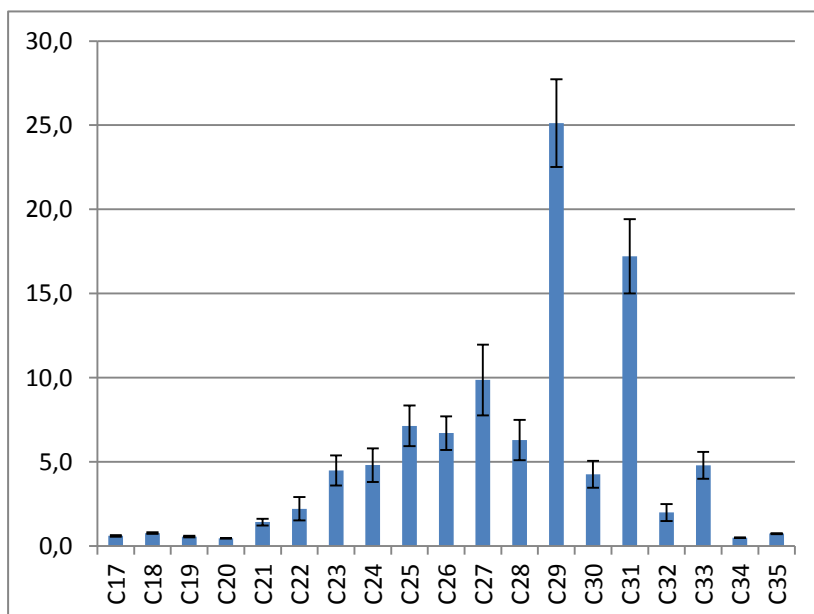


Рисунок 2. Содержание *n*-алканов (% от общей суммы) в корнях из верхнего горизонта дерново-подзолистой почвы

3.4 Исследование сезонных изменений липидного комплекса верхних горизонтов почв под липняками.

Для исследованных фитоценозов содержание *n*-алканов в отобранном после окончания листопада в ноябре свежем листовом опаде составляет 6–9 мг/г C_{орг} (табл.2). Количество *n*-метил-кетонов в 27–65 раз ниже, чем содержание *n*-алканов, и в среднем составляет около 200 мкг/г С. Наблюдается строгое доминирование длинноцепочечных нечетных углеводов – более 75% от общей суммы *n*-алканов и *n*-метил-кетонов составляют соединения с длиной цепи 25, 27, 29 и 31 атом углерода. Наибольшее содержание характерно для C₂₉ и C₃₁ алканов (при некотором преобладании последнего), которые являются биомаркерами широколиственных растительных сообществ.

Таблица 2. Состав *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в опаде, поступающем на поверхность дерново-подзолистых почв под липняками (средние значения ± стандартное отклонение, *n* = 3)

Показатель		«Л.О.1»	«Л.О.2»	«Л.О.3»	«Л.О.4»
<i>n</i> -алканы	Количество опада, г/м ² *	408±11,0	664 ± 7,6	712 ± 8,9	624 ± 6,8
	C _{орг} , %	46,8 ± 0,6	45,0 ± 0,4	44,9 ± 0,4	45,1 ± 0,6
	Сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	9175±842	5541±307	7068±500	6450±416
	Сумма нечетных C ₂₅ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	8437±712	4690±220	6603±436	5816±338
	C ₂₉ /C ₃₁	0,5±0,3	1,0±0,4	0,9±0,4	2,1±1,0
	ОЕР	13 ± 2	9 ± 1	20 ± 4	14 ± 2
	LSR	61 ± 6	11 ± 1	34 ± 4	18 ± 3
<i>n</i> -метил-кетоны	Сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	142 ± 20	208 ± 43	234 ± 51	233 ± 48
	Сумма нечетных C ₂₅ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	117 ± 14	160 ± 26	195 ± 38	194 ± 38
	А/К	65 ± 4	27 ± 1	30 ± 1	28 ± 1

* *n* = 5.

Основные отличия в составе липидного комплекса верхних горизонтов почв (табл.3) от подстилки – относительное повышение (в 3–4 раза) содержания кетонов и увеличение доли в спектре УВ четных *n*-алканов (индекс ОЕР снижается в 2–4 раза),

что связано с увеличением вклада компонентов микробной и корневой биомассы в формирование углеводородного состава минеральных слоев почвы (Анохина, Демин, Завгородняя, 2018). Относительно повышенное содержание C_{29} алкана также можно объяснить большей величиной корневого опада трав в верхних минеральных горизонтах.

Таблица 3. Состав *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в верхних горизонтах дерново-подзолистых почв под липняками в ноябре после окончания листопада (средние значения \pm стандартное отклонение, $n = 3$)

Показатель	Слой, см	«Л.О.1»	«Л.О.2»	«Л.О.3»	«Л.О.4»	
$C_{орг}$, %	0–5	$4,6 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,4$	$3,9 \pm 0,3$	
	5–10	$3,8 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,5$	$2,1 \pm 0,3$	$2,0 \pm 0,4$	
Сумма $C_{17}-C_{35}$, мкг/г $C_{орг}$	0–5	95 ± 9	91 ± 8	111 ± 12	86 ± 7	
	5–10	195 ± 38	200 ± 37	185 ± 32	190 ± 31	
<i>n</i> - алканы	Сумма нечетных $C_{25}-$ C_{35} , мкг/г $C_{орг}$	0–5	56 ± 3	66 ± 4	76 ± 5	64 ± 4
	5–10	95 ± 9	127 ± 16	106 ± 11	126 ± 11	
C_{29}/C_{31}	0–5	$0,9 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,1 \pm$	$1,8 \pm 0,3$	
	5–10	$1,1 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,3$	$1,3 \pm 0,2$	
ОЕР	0–5	$5 \pm 0,4$	6 ± 1	$5 \pm 0,3$	$6 \pm 0,3$	
	5–10	4 ± 1	4 ± 1	$4 \pm 0,4$	6 ± 1	
LSR	0–5	6 ± 1	10 ± 1	9 ± 1	8 ± 1	
	5–10	7 ± 1	7 ± 1	5 ± 1	6 ± 1	
<i>n</i> - метил- кетоны	Сумма $C_{17}-C_{35}$, мкг/г $C_{орг}$	0–5	8 ± 1	9 ± 1	10 ± 1	10 ± 1
	5–10	14 ± 2	20 ± 4	17 ± 4	21 ± 5	
А/К	Сумма нечетных $C_{25}-$ C_{35} , мкг/г $C_{орг}$	0–5	6 ± 1	7 ± 1	9 ± 2	8 ± 2
	5–10	10 ± 2	16 ± 3	13 ± 2	12 ± 2	
	0–5	9 ± 2	9 ± 2	8 ± 2	8 ± 2	
	5–10	10 ± 2	8 ± 2	8 ± 2	11 ± 2	

Достоверных изменений в суммарном содержании *n*-алканов по сезонам года не обнаружено: 96–137 мкг/г $C_{орг}$ в гор.АУ и 170–220 мкг/г $C_{орг}$ в АУЕЛ (табл.4, рис. 4). При этом общие запасы нечетных *n*-алканов с длиной цепи $C_{25}-C_{35}$ в гумусовых горизонтах составляют около 370 мг/м^2 , что в 4–5 раз ниже их количества, ежегодно поступающего с листовым опадом на поверхность почвы осенью (в среднем около 1700 мг/м^2). Таким образом, основная часть липидных компонентов наземного опада утилизируется в подстилочном горизонте в ходе минерализации растительных остатков.

Достоверных изменений в суммарном содержании *n*-алканов по сезонам года не обнаружено: 96–137 мкг/г $C_{орг}$ в гор.АУ и 170–220 мкг/г $C_{орг}$ в АУЕЛ (табл.4, рис. 3). При этом общие запасы нечетных *n*-алканов с длиной цепи C_{25} – C_{35} в гумусовых горизонтах составляют около 370 мг/м², что в 4–5 раз ниже их количества, ежегодно поступающего с листовым опадом на поверхность почвы осенью (в среднем около 1700 мг/м²). Таким образом, основная часть липидных компонентов наземного опада утилизируется в подстилочном горизонте в ходе минерализации растительных остатков.

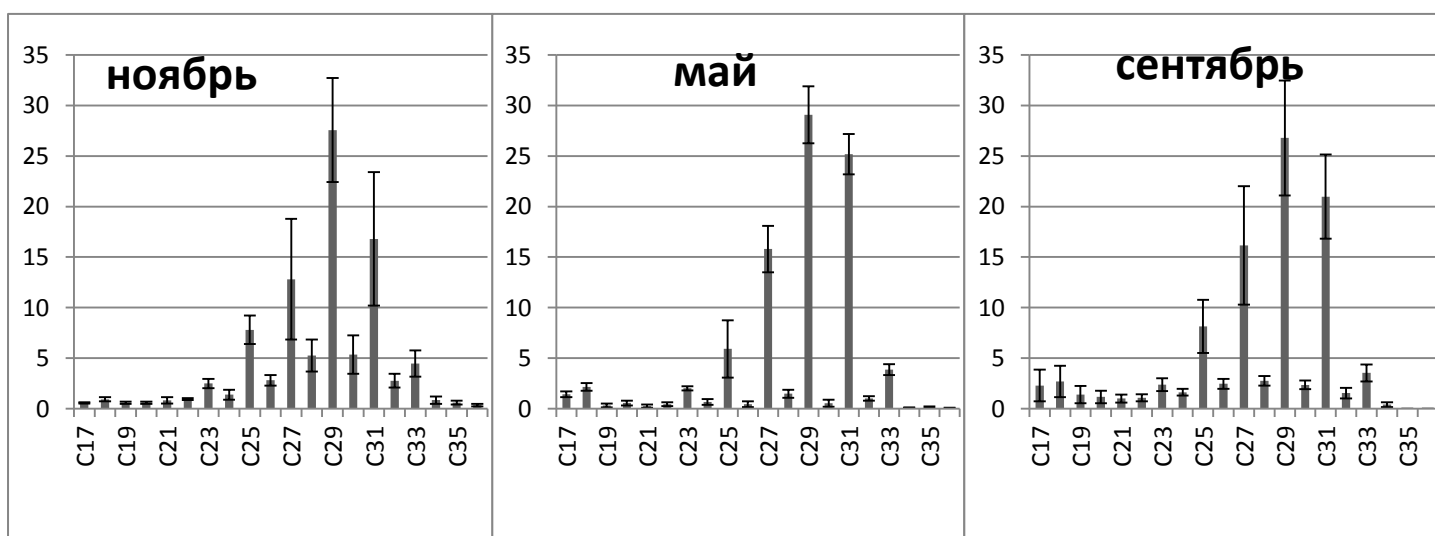


Рисунок 3. Сезонные изменения спектра *n*-алканов (мкг/г $C_{орг}$) в горизонте 0–5см дерново-подзолистых почв НП“Лосиный остров” (средние значения для четырех точек ± стандартное отклонение).

Таблица 4. Изменение в течение года состава *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в верхних горизонтах дерново-подзолистых почв под липняками (средние значения для четырех точек ± стандартное отклонение)

Показатель	Слой, см	Ноябрь	Май	Сентябрь
$C_{орг}$, %	0–5	3,9 ± 0,7	4,4 ± 0,6	4,2 ± 0,9
	5–10	2,6 ± 0,8	3,0 ± 0,6	2,5 ± 0,3
Сумма C_{17} – C_{35} , мкг/г $C_{орг}$	0–5	96 ± 27	91 ± 14	99 ± 28
	5–10	193 ± 37	178 ± 16	206 ± 41
<i>n</i> -алканы Сумма нечетных C_{25} – C_{35} , мкг/г $C_{орг}$	0–5	66 ± 20	80 ± 11	76 ± 19
	5–10	114 ± 26	118 ± 11	121 ± 26
C_{29}/C_{31}	0–5	1,4±0,4	1,2±0,3	1,2±0,2
	5–10	1,2±0,3	1,2±0,3	0,9±0,3
ОЕР	0–5	6 ± 1	22 ± 2	9 ± 1
	5–10	5 ± 1	9 ± 1	6 ± 1

LSR		0–5	8 ± 2	9 ± 1	4 ± 1
		5–10	6 ± 1	4,0 ± 1	3 ± 1
<i>n</i> -метил-кетоны	Сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	0–5	9 ± 1	5 ± 1	13 ± 2
		5–10	18 ± 3	1 ± 0,2	20 ± 4
	Сумма нечетных C ₂₅ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	0–5	8 ± 1	4 ± 1	9 ± 1
		5–10	13 ± 3	1 ± 0,2	13 ± 2
А/К		0–5	9 ± 1	21 ± 4	11 ± 2
		5–10	9 ± 2	170 ± 26	9 ± 1

В то же время, заметные изменения в течение годового цикла происходят в составе липидной фракции верхних горизонтов исследованных почв. Наиболее сильно отличаются пробы, отобранные в весеннее время после окончания снеготаяния, когда вегетационный период еще только начался, отсутствует напочвенный растительный покров, и слабо развита корневая масса травянистых растений. Процессы микробного разложения почвенного органического вещества в этот период также замедлены, и в составе *n*-алканов снижается доля четных гомологов, поступающих в большей мере из остатков корней и микробной плазмы. Индексы ОЕР в гор.АУ наиболее высокие в этот период (>20), углеводородная фракция представлена, в основном длинноцепочечными нечетными гомологами, источником которых является, по-видимому, липиды локализованные внутри почвенных агрегатов и менее доступные для микробного разложения.

В этот период из-за низкой микробной активности в гумусовых горизонтах почвы резко снижается содержание *n*-метил-кетонов. К этому моменту уже утилизированы кетоны, поступившие в почву с поверхности с частицами опада и образовавшиеся при дальнейшей окислительной деградации в почве алканов легкодоступной растительной биомассы. В гор.АУЕЛ содержание кетонов снижается сильнее (до значений <1мкг/г C_{орг}) по сравнению с вышележащим горизонтом, что можно объяснить отсутствием деятельности в течение зимнего периода почвенных беспозвоночных, обеспечивающих в другие сезоны равномерное распределение напочвенного и корневого опада в пределах всего гумусированного слоя.

К концу вегетационного сезона в составе фракции *n*-алканов верхнего почвенного горизонта снова нарастает содержание четных гомологов (ОЕР понижается до 8–9), что соответствует повышению вклада в липидный состав углеводов корневого опада и свежей микробной биомассы, активно

развивающейся, в том числе в зоне ризосферы и на корневом опаде. В 2 раза снижаются индексы LSR, такое появление в почве дополнительного количества среднецепочечных *n*-алканов связано, по-видимому, с развитием в летний период напочвенного покрова из низших растений (мхов и водорослей), остатки которых являются источником неполярных соединений с длиной углеродной цепи $<C_{25}$ (Ficken et al, 2011; Zech et al, 2012; Bush, McInerney, 2013). Аналогичные изменения в липидном составе наблюдаются для гор. АУЕЛ, но выражены они значительно слабее.

3.5 Исследование сезонных изменений липидного комплекса верхних горизонтов почв под различными широколиственными фитоценозами.

Активная трансформация *n*-алканов в *n*-метил-кетоны начинается после отмирания листа. В зеленых листьях клена и липы содержание окисленных соединений близко к нижней границе предела обнаружения, т.е. они фактически отсутствуют. В желтых листьях *n*-метил-кетоны содержатся в достаточно большом количестве – сотни мкг/гC_{орг.} Величина соотношения алканы/кетоны демонстрирует сказанное и резко уменьшается в ходе пожелтения листьев. Опад, поступающий на поверхность почвы после листопада, является источником большого пула биогенных углеводородов и претерпевает изменения, связанные с деструкцией, в течение всего года. Количество опада, представленного в основном листьями, уменьшается от постлистопадного сезона (ноябрь) к долистопадному периоду (сентябрь). Стоит отметить отличительную черту исследуемого кленового сообщества, где к сентябрю на поверхности почвы практически полностью исчезает слой подстилки, при том, что кленовый опад считается менее благоприятным для разложения почвенной биотой по сравнению с, например липняковым (Zech et al., 2011).

В горизонте АУ темногумусовых почв доля *n*-алканов выше, чем в дерново-подзолистой почве НП «Лосиный остров» и меняется в диапазоне от 600 до 300 мкг/гC_{орг.} Суммарное содержание *n*-алканов в верхнем горизонте почвы кленового сообщества уменьшается к долистопадному периоду в 3 раза, относительно довольно высоких содержаний в ноябре и мае, что согласуется с динамикой деструкции опада. При этом доля нечетных длинноцепочечных соединений остается постоянной и составляет около 90%(табл. 5). Об этом факте также свидетельствует постоянство коэффициента ОЕР. Имеет место деградация алканов от ноября к сентябрю. В верхнем горизонте почвы под кленово-липовой парцеллой происходит уменьшение

общего количества *n*-алканов к сентябрю на 25%, доля длинноцепочечных нечетных углеводородов стабильно составляет около 82%, ОЕР падает к сентябрю на 60% за счет повышения доли четных длинноцепочечных *n*-алканов. LSR не изменяется течение года и составляет в среднем 7, что меньше в 2 раза, чем в верхнем горизонте почвы кленового сообщества, также как и ОЕР (табл. 5). В исследуемой почве липняка суммарное количество *n*-алканов снижается в 2 раза к сентябрю, доля нечетных длинноцепочечных *n*-алканов также остается постоянной на уровне 80% (табл. 5). Индекс ОЕР немного возрастает к долистопадному периоду, LSR – без сезонных изменений. Коэффициент ОЕР в почве кленового сообщества был в среднем в 1,5 раз выше, чем в почве липняка, а LSR – в 2,8 раз, что свидетельствует о большем вкладе длинноцепочечных нечетных *n*-алканов в точке под кленом, где отсутствует травянистый покров и корневые экссудаты. Для верхнего горизонта почвы всех изучаемых сообществ характерно уменьшение суммарного содержания *n*-метил-кетонов к долистопадному сезону: для липняковой парцеллы в 2 раза, для двух других – в 20-30раз, где в сентябре окисленных соединений практически не обнаружено.

Для всех исследуемых образцов доля водопрочных агрегатов составила не менее 75% от общей массы почвы, что свидетельствует о достаточно высокой устойчивости структурных единиц к воздействию воды в верхнем горизонте изучаемых почв. Качественный состав *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в органическом веществе выделенных из почв водопрочных агрегатов в течение всего сезона достоверно не отличался от состава этих алифатических соединений для всей почвенной массы, что указывает на малое время жизни почвенных агрегатов и высокую скорость перемешивания верхнего слоя почвы зообиотой, обеспечивающей равномерное распределение поступающих из различных источников липидов на почвенной матрице.

Таблица 5. Состав *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в верхнем горизонте темногумусовой почвы под исследуемыми парцеллами (средние значения ± стандартное отклонение, n = 3).

А) Кленовая парцелла

Показатель	ноябрь		май		сентябрь	
	почва	ВПА	почва	ВПА	почва	ВПА

Масса опада, г/м ²		970±84		889±75		136±20	
н-алканы	C _{орг} , %	5,5±1,4	5,0±0,03	4,7±1,2	4,9±0,2	3,4±0,8	3,3±0,1
	Сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	577±27	351±53	671±82	519±110	340±29	170±13
	Сумма нечетных C ₂₅ – C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	515±71	318±40	606±69	469±98	303±15	154±11
	%нечетныхC ₂₅ –C ₃₅ от общей суммы	89±4	91±5	90±4	90±3	89±4	91±3
	C ₂₉ /C ₃₁	0,4±0,1	0,4±0,1	0,4±0,1	0,4±0,1	0,4±0,1	0,4±0,1
	ОЕР	12±1	14±1	13±1	13±1	13±1	12±1
	LSR	12±1	17±2	14±1	18±1	18±1	15±1
н-метил- кетоны	Сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	29±2	21±1	30±8	25±8	<1	<1
	Сумма нечетных C ₂₅ – C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	24±2	18±1	24±6	19±2	<1	<1
	%нечетныхC ₂₅ –C ₃₅ от общей суммы	83±4	86±9	80±6	76±7	100	100
	А/К	20±4	16±3	24±2	23±5	311±42	527±14

Б) Кленово-липовая парцелла

Показатель	ноябрь		май		сентябрь		
	почва	ВПА	почва	ВПА	почва	ВПА	
Масса опада, г/м ²	715±68		556±45		108±12		
н-алканы	C _{орг} , %	4,5±1,1	3,9±0,01	3,0±0,8	3,2±0,1	3,4±0,8	5,2±0,5
	Сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	355±56	267±41	315±59	241±50	284±16	121±24
	Сумма нечетных C ₂₅ – C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	286±42	216±34	265±49	201±36	233±1	106±21
	% нечетныхC ₂₅ –C ₃₅ от общей суммы	81±4	81±3	84±4	83±3	82±3	88±6
	C ₂₉ /C ₃₁	0,8±0,1	0,7±0,1	0,8±0,1	0,8±0,1	0,9±0,1	1,1±0,1
	ОЕР	10±3	9±1	11±1	9±3	7±1	12±1
	LSR	7±2	6±1	4±1	5±1	7±3	9±1
н-метил- кетоны	Сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	21±5	16±5	15±2	13±1	1,1±0,2	<1
	Сумма нечетных C ₂₅ – C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	15±4	14±9	17±6	13±1	1,1±0,2	<1

	% нечетных C ₂₅ –C ₃₅ от общей суммы	71±7	88±8	100	100	100	100
	A/K	16±7	20±7	19±3	19±7	255±34	346±46

В) Липняковая парцелла

Показатель		ноябрь		май		сентябрь	
		почва	ВПА	почва	ВПА	почва	ВПА
Масса опада, г/м ²		676±70		279±20		129±15	
<i>n</i> -алканы	C _{орг} , %	5,5±1,5	4,4±0,2	5,0±1,2	5,2±0,1	4,7±0,4	4,4±0,1
	Сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	632±39	381±41	607±3	432±46	300±20	159±21
	Сумма нечетных C ₂₅ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	504±32	270±39	467±12	319±40	247±38	120±17
	% нечетных C ₂₅ –C ₃₅ от общей суммы	80±1	71±2	77±2	74±3	82±2	75±2
	C ₂₉ /C ₃₁	1,6±0,1	1,5±0,1	1,3±0,1	1,5±0,1	1,5±0,1	1,5±0,1
	OEP	7±1	4±1	6±1	5±1	13±2	10±1
<i>n</i> -метил- кетоны	LSR	6±1	4±1	6±2	6±1	4±1	2,1±0,2
	Сумма C ₁₇ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	38±3	33±1	47±2	35±6	19±3	14±2
	Сумма нечетных C ₂₅ –C ₃₅ , мкг/гC _{орг}	29±2	25±0,4	34±2	25±3	14±1	9±2
	% нечетных C ₂₅ –C ₃₅ от общей суммы	76±3	76±4	72±5	71±4	65±6	64±5
	A/K	17±1	12±2	13±1	12±2	17±5	11±1

Заключение

Отсутствие выраженной дифференциации в гомологическом спектре *n*-алканов для различающихся по прочности почвенных структур так же, как и наличие связанной со стадиями биологического круговорота сезонной динамики этого спектра, позволяет предположить, что в почве алканы находятся в составе частичек (капсул) самостоятельной фазы липидов, образующихся при разрушении восковой кутикулы листьев и суберинизированных покровов корней и имеющих сложный компонентный состав. Биodeградация почвенной микробиотой и сорбционные взаимодействия с минеральными и органо-минеральными поверхностями для таких гидрофобных капсул происходят без значительных изменений молекулярного состава входящих в них липидных соединений. В гомологическом ряду неразветвленных

алканов, поступающих на поверхность почвы с наземным опадом абсолютно доминируют длинноцепочечные нечетные соединения, также как и в составе листьев соответствующих древесных растений. При пожелтении листовых пластин увеличивается средняя длина углеродной цепи и начинается трансформация линейных алканов в *n*-метил-кетоны. В этот же период окончательно формируется так называемый углеводородный «отпечаток» наземной фитомассы широколиственной растительности – преобладающая длина С-цепи и спектр *n*-алканов в целом сохраняется в течение года следующего после отмирания листа и превращении его в опад.

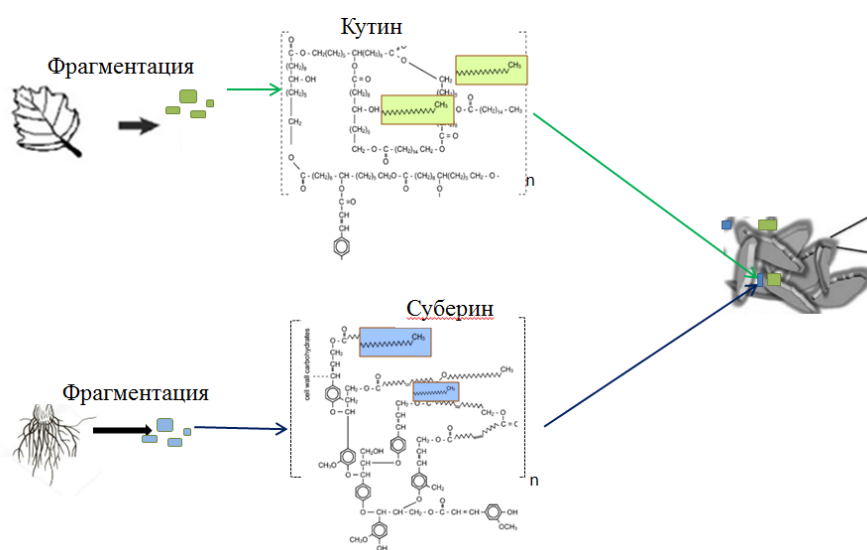


Рисунок 4 Схема поступления *n*-алканов из кутина и суберина в почву в составе липидных «капсул»

ВЫВОДЫ

1) Оптимизирована процедура выделения алифатических соединений почвенных липидов - *n*-алканов и *n*-метил-кетонов - методом ускоренной автоматической экстракции, заключающаяся в увеличении количества последовательных циклов извлечения и использовании растворителей различной полярности. Модернизация параметров выделения (использование градиентной экстракции) позволила увеличить выход целевых компонентов из образцов почв на 50%, из подстилок - на 30% за счет более эффективного извлечения наиболее гидрофобных гомологов с длиной углеродной цепи $>C_{25}$.

2) В гомологическом составе *n*-алканов верхних гумусовых горизонтов (АУ и АУЕЛ) исследованной дерново-подзолистой почвы под широколиственным

растительным сообществом абсолютно доминируют (>70%) нечетные соединения с длиной цепи C_{25} – C_{33} , основным источником которых в почве являются эпителикулярные воска листового опада растений. В более глубоком горизонте АУЕЛ выше вклад углеводов корневой биомассы, что выражается в повышении доли четных гомологов: значения индекса ОЕР снижаются 10 до 6.

3) В элювиальном (ЕЛ) и иллювиальном (ВТ) горизонтах почвы резко (в 3–4 раза) возрастает доля линейных алканов в составе органического вещества, и меняется тип распределения *n*-алканов по длине углеродной цепи – вклад четных и коротких гомологов резко повышается (значения индексов ОЕР и LSR - 1-2). Процессы биodeградации алканов в негумусовых горизонтах замедлены, что выражено в низком относительном содержании продуктов деградации –метил-кетонов.

4) Для почв под листопадными фитоценозами с разным временем формирования верхних гумусовых горизонтов характерны количественные и качественные сезонные изменения в липидном составе органофиля. Доля *n*-алканов в составе органического вещества горизонта АУ дерново-подзолистых почв достоверно не изменяется в течение года и составляет 91–99 мкг/г $C_{орг}$. В горизонте АУ темногумусовых почв доля *n*-алканов выше, меняется в диапазоне от 600 до 300 мкг/г $C_{орг}$.

5) Гомологический состав *n*-алканов в дерново-подзолистых почвах под липой существенно меняется в годовом цикле: ОЕР увеличивается от ноября к сентябрю в 2,5 раза. Диапазон изменений в гомологическом составе *n*-алканов темногумусовой почве под липой ниже. В горизонте АУ под кленовым сообществом состав *n*-алканов стабилен: значения индекса ОЕР остается постоянным (12 – 13).

6) Продукты микробиологического окисления *n*-алканов – 2-метил-кетоны, несмотря на относительно невысокое содержание в составе почвенных липидов (5–30 мкг/г $C_{орг}$), являются более чувствительным показателем изменений липидного комплекса почвы по сравнению линейными алканами. В течение вегетационного сезона их относительное содержание в почве изменялось на порядок. При этом диапазон колебаний в дерново-подзолистых почвах (5 – 13 мкг/г $C_{орг}$) ниже чем темногумусовых почва под кленовыми (1–30 мкг/г $C_{орг}$) и липовыми сообществами (19-47 мкг/г $C_{орг}$)

7) В большинстве исследованных растительных сообществ существовал период времени, в течение которого относительное содержание продуктов окисления *n*-алканов – *n*-метил-кетонов – минимально, что указывает на отсутствие в почве биологически доступной липидной фракции. В липняках Лосиног острова затухание процессов трансформации алканов происходило в мае, в кленовом и кленово-липовом фитоценозах Воробьевых гор – в сентябре.

8) Качественный состав *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в органическом веществе выделенных из почв водопрочных агрегатов в течение всего сезона достоверно не отличался от состава этих алифатических соединений для всей почвенной массы, что указывает на малое время жизни почвенных агрегатов и высокую скорость перемешивания верхнего слоя почвы зообиотой, обеспечивающей равномерное распределение поступающих из различных источников липидов на почвенной матрице.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 03.02.13 Почвоведение, 03.02.08 – Экология (по отраслям)

1. Zavgorodnyaya Y.A., Anokhina N.A., Bogatyrev L.G., Demin V.V. Optimized method for the determination of *n*-alkanes and *n*-methyl-ketones in litters and soils // Eurasian Soil Science. — 2020. — No.3. — P.308-315 IF 0,883.

2. Anokhina N.A., Demin V.V., Zavgorodnyaya Y.A. Compositions of *n*-alkanes and *n*-methyl ketones in soils of the forest-park zone of Moscow // Eurasian Soil Science. — 2018. — Vol.51, no.6. — P.637–646 IF 0,883.

3. Anokhina N.A., Zavgorodnyaya Yu A., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., Zemskov F.I., Demin V.V. Dynamics of the Content of Aromatic Acids in Biogeocenoses of Stationary Soil Lysimeters // Moscow University Soil Science Bulletin. – 2018. - Vol. 73, no. 4. – P. 135-141 IF 0,408.

4. Zemskov Ph I., Galkin V.S., Anokhina N.A., Bogatyrev L.G., Demidova A.N., Prilepsky N.G., Zhilin N.I., Benediktova A.I. Methodical Aspects of Investigation of Dynamic of Litter Fall Input under Conditions of Stationary Soil Lysimeters // Moscow University Soil Science Bulletin. – 2017. - Vol. 72, no. 1. – P. 7-12 IF 0,408

Иные публикации в журналах:

5. Богатырев Л.Г., Погожева Е.А, Бенедиктова А.И., Первова Н.Е., Завгородняя Ю.А., Карпухин М.М., Стрелецкий Р.А., **Анохина Н. А.**, Аймалетдинов Р.А.. Некоторые особенности современного состояния стационарных почвенных лизиметров факультета почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова. // Экология России: на пути к инновациям (выпуск 10, Астрахань - 2014). — Издательство Нижневолжского экоцентра Астрахань, 2014. — С. 159–164.

Основные тезисы

6. Завгородняя Ю.А., Бажанова А.Е., **Анохина Н.А.**, Демин В.В. Липидные биомаркеры в почвах под широколиственными растительными сообществами лесных зон Большой Москвы // Лесные почвы и функционирование лесных экосистем - Материалы VIII Всероссийской научной конференции с международным участием. – ЦЭПЛ РАН Москва, 2019. – с. 107-110.

7. **Анохина Н.А.** Биогенные углеводороды в почвах парковых зон г.Москвы // Материалы международной научной конференции XX Докучаевские молодежные чтения "Почва и устойчивое развитие государства". — Санкт-Петербург, 2017. — С. 14–15.

8. **Анохина Н.А.** Состав *n*-алканов и *n*-метил-кетонов в почвах парковых зон г.Москвы // XXIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Ломоносов-2016. — Почвоведение. — МАКС Пресс Москва, 2016. — С. 187–188.

9. **Анохина Н.А.** Бензолкарбоновые кислоты в верхних горизонтах почв (на примере почв лизиметров) // Материалы Международной научной конференции XVIII Докучаевские молодежные чтения "Деградация почв и продовольственная безопасность России". — Издательский дом С.-Петербургского государственного университета Санкт-Петербург, 2015.

10. **Анохина Н.А.** Бензолкарбоновые кислоты в верхних горизонтах почв под хвойным и лиственным растительными сообществами (на примере почв лизиметров) // Материалы XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных "Ломоносов". — Почвоведение. — МАКС Пресс Москва, 2014.