

Санкт-Петербургский государственный университет

КОНОПЛИНА Лидия Юрьевна

Выпускная квалификационная работа

***Характеристика качественного состава органического вещества почв
различных биотопов***

Уровень образования:

Направление *06.03.02 «Почвоведение»*

Основная образовательная программа *СВ.5022.2017 «Почвоведение»*

Научный руководитель: профессор
кафедры почвоведения и экологии
почв СПбГУ, д. с.–х. н.,
профессор по кафедре
Попов Александр Иванович

Рецензент: доцент кафедры
почвоведения и агрохимии
почв СПбГАУ, к. с.–х. н., доцент,
Родичева Тамара Васильевна

Санкт-Петербург

2021

Оглавление

Введение	3
1. Литературный обзор	4
1.1. Общие положения о почвенном органическом веществе.....	4
1.2. Современная классификация гуминовых веществ	5
1.3. Недостатки метода щелочного извлечения гуминовых веществ	6
1.4. Компонентный состав почвенного органического вещества	8
2. Объекты и методы исследования	14
2.1 Объекты исследования.....	14
2.2. Методы исследования	21
3. Результаты и обсуждение	24
4. Выводы	35
Список литературных источников.....	36
Приложение.....	45

Введение

Почвенное органическое вещество (ПОВ) — многокомпонентный, гетерогенный и полифункциональный континуум отдельных частиц и ансамблей биомолекул частично и полностью трансформировавшихся остатков биоты, которые отличаются по размеру, массе, химической структуре, возрасту, питательной ценности и доступности микроорганизмам, имеют разную природу и прочность внутренних и внешних химических связей, характеризуются объемной конфигурацией и пространственной неравномерностью расположения в конгломерате минеральных частиц (Семёнов, Когут, 2015).

Несмотря на столь долгую историю исследований и технологические достижения, многие вопросы, связанные с генезисом и химическим составом органических соединений в почве, остаются актуальными до сих пор (Орлов и др., 1996). Как справедливо заметила М.М. Кононова, исследователи ПОВ неоднократно пересматривают даже основные положения, касающиеся гумусовых веществ, а именно самого факта их существования и путей образования (Кононова, 1963).

Традиционно гуминовые вещества (ГВ) извлекаются из почвы с использованием щелочных растворов. Проблема заключается в том, что повсеместно распространенный метод щелочного выделения ГВ не позволяет отделить специфические и неспецифические органические вещества друг от друга (Kleber, Lehmann, 2019). В связи с этим выбранная тема является как никогда актуальной.

Для совершенствования метода извлечения ГВ в рамках данного исследования предлагается новый подход, позволяющий извлекать часть индивидуальных органических соединений из почв, а также специфические соединения, в том числе и ГВ, с помощью органических растворителей.

Цель исследования — охарактеризовать качественный состав органического вещества почв, которые сформировались в различных биотопах.

Для осуществления данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать и опробовать методологию извлечения неспецифических и специфических органических соединений из почв, описать возможный компонентный состав ПОВ.
2. Выделить и определить в составе почвенного органического вещества содержание фотосинтетических пигментов, гломалинов, гуминовых веществ, липидов.
3. Сравнить качественный состав ПОВ почв различных биотопов.

1. Литературный обзор

1.1. Общие положения о почвенном органическом веществе

Почвенное органическое вещество (ПОВ) — это сложный комплекс гуминовых (специфических) веществ и индивидуальных (неспецифических) соединений, а также продуктов их взаимодействия между собой и минеральной частью почвы (Попов, Чертов, 1996). Так как в состав ПОВ входит множество разнообразных индивидуальных соединений, в целом оно демонстрирует признаки эмерджентной системы, проявляя новые свойства, которых изначально не было у органических соединений по отдельности (Семёнов, Когут, 2015).

Важность ПОВ как природного объекта трудно переоценить (Александрова, 1980). Почвенное органическое вещество — главный фактор, который определяет свойства и физиологию почвы (Вильямс, 1949).

Исследования с использованием ЯМР-метода показали, что генезис ПОВ преимущественно микробный (Simpson et al., 2007). Почти 80 % ПОВ состоит из остатков микробной биомассы и микробных метаболитов (Liang et al., 2011). В составе ПОВ обнаруживают ранее неизвестные органические соединения грибного происхождения, например, гломалины и гидрофобины (Семёнов, Когут, 2015).

Индивидуальные органические соединения представляют собой постмортальные остатки и экскреты биоты, а также продукты их частичного разложения (Schnitzer, 1978). Неспецифические вещества присутствуют в почве в свободном виде либо в составе более сложных соединений биогенного происхождения, однако они не входят в состав ГВ (Орлов, 1985). При этом их содержание в почвах составляет от нескольких до десятков процентов, редко — более половины ПОВ (Flaig, 1971).

Химический состав растительных остатков, поступающих в почву, чрезвычайно разнообразен, количественное содержание компонентов варьирует в широких пределах в зависимости от природной зоны (Орлов, 1985). В органическом материале, поступающем в почву, преобладают углеводы, включая моно-, олиго- и полисахариды (целлюлозу, гемицеллюлозы, пектиновые вещества, хитин и др.), белки, липиды, лигнин (Туев, 1989; Орлов, 1985).

Как правило, исследователи уделяют мало внимания изучению индивидуальных органических соединений по причине их присутствия в почве в малых количествах (Кононова, 1963; Паников и др., 1984). Необходимость большего внимания к изучению несспецифических веществ обусловлена их активным участием в почвенных процессах (Кононова, 1963). Индивидуальные органические соединения выполняют множество разнообразных функций: стимулируют и ингибируют рост растений, выступают в

качестве антибиотиков и витаминов, а также влияют на газовый режим, темпы окислительно-восстановительных процессов, степень подвижности элементов минерального питания растений (Александрова, 1980; Кононова, 1963; Паников и др., 1984). К тому же индивидуальные соединения могут служить индикаторами условий почвообразования и диагностическими характеристиками почв (Козырев, 1991; Попов, Сун, 2017; Розенцвет и др., 2019).

Гуминовые вещества — это высокомолекулярные амфотерные амфифильные органические азотсодержащие гетерополимеры, которые имеют темно-коричневую или темно-бурую окраску и характеризуются изменчивостью химического состава (Попов, 2004). Процесс гумификации изменяет состав и структуру продуктов разложения растений таким образом, что вновь синтезированные соединения приобретают уникальные свойства, позволяющие отличить их от негумифицированного органического вещества. Существование подобных уникальных соединений является основным объяснением научного интереса к ГВ (Kleber, Lehmann, 2019).

В биосфере ГВ выполняют важнейшие функции, главными из которых являются: аккумулятивная, транспортная, регуляторная, протекторная и физиологическая (Орлов, 1990).

1.2. Современная классификация гуминовых веществ

В основе классификации гуминовых веществ заложена возможность их извлечения из природных объектов теми или иными растворителями, но чаще всего — щелочными растворами. К ГВ принято относить гумусовые кислоты, негидролизующий остаток (гумин) и прогуминовые вещества (или меланины) (Орлов и др., 1996).

Гумусовые кислоты — комплекс органических соединений бурого, коричневого и желтого цвета, выделяемых из почвы растворами щелочей, нейтральных солей и органическими растворителями (Кононова, 1963). Гумусовые кислоты характеризуются как особый класс органических соединений, не имеющий строго постоянного химического состава (Александрова, 1980).

В зависимости от способа выделения гумусовые кислоты природных объектов разделяют на гуминовые кислоты, фульвокислоты и гиматомелановые кислоты (Орлов и др., 1996).

Гуминовые кислоты (ГК) — высокомолекулярные азотсодержащие органические кислоты, имеющие темно-бурую или черную окраску, растворимые в щелочах и нерастворимые в кислотах (Александрова, 1980; Орлов и др., 1996). В свою очередь ГК подразделяются на черные и бурые ГК (Орлов и др., 1996).

По мнению Д.С. Орлова для идентификации гуминовых кислот способ выделения и отношение к растворителям недостаточны, так как в почвах могут присутствовать другие вещества (пигменты), которые ведут себя сходно с ГК (Орлов и др., 1996).

Фульвокислоты (ФК) — высокомолекулярные азотсодержащие органические кислоты, растворимые в воде, щелочах и кислотах. Чаще всего под ФК подразумевают совокупность кислоторастворимых органических веществ, которые остаются в растворе после осаждения ГК. Фульвокислоты отличаются от ГК большей гидрофильностью и окисленностью, меньшим содержанием углерода и более светлой окраской (Александрова, 1980; Кононова, 1963; Орлов, 1974; Пономарева, Плотникова, 1980).

Разделение гумусовых кислот на ГК и ФК основано на изменении агрегативной устойчивости молекул ГВ в сильнокислой среде. Потеря агрегативной устойчивости ГК приводит к их коагуляции и, следовательно, к осаждению. При этом в растворе остаются ФК, являющиеся агрегативно-устойчивой системой ГВ (Попов, 2004).

Гиматомелановые кислоты — группа гумусовых кислот, растворимых в этаноле и имеющих темно-красную окраску в спиртовом растворе (Кононова, 1963).

Гумин — органическое вещество, представляющее собой совокупность ГК и ФК, прочно связанных с минералами, а также индивидуальные органические соединения (лигнин, хитин, целлюлоза и др.). Гумусовые кислоты негидролизуются остатком не удается извлечь из почвы растворами щелочей, кислот и органическими растворителями (Александрова, 1980; Кононова, 1963; Орлов, 1990; Пономарева, Плотникова, 1980).

Прогуминовые (меланиновые) вещества — группа высокомолекулярных пигментов биогенного происхождения коричневого, бурого или черного цвета, образующихся в результате окислительной полимеризации азотсодержащих и фенольных соединений (Попов, 2004).

1.3. Недостатки метода щелочного извлечения гуминовых веществ

В 1786 году Ф. К. Ахард впервые выделил ГВ с помощью щелочной вытяжки из торфа. Данный метод остается актуальным до сих пор (Kleber, Lehmann, 2019). Метод щелочного извлечения является широко используемым, вероятно, потому, что он позволяет выделить больше органического вещества, чем большинство альтернативных методов (Hayes, 2006). Часть ученых критикуют распространенный метод выделения ГВ из почвы щелочными растворами (Hayes, 2006; Hayes, Clapp, 2001; MacCarthy, 2001; Olk, Gregorich, 2006). Ряд исследователей считают, что ГВ являются искусственными

продуктами, синтезированными в процессе обработки почвы щелочными растворами (Трусов, 1917; Козырев, 1991; Кононова, 1963; Орлов и др., 1996).

Еще А.Г. Трусов (Трусов, 1917) отмечал, что бурые вещества, извлекаемые щелочными растворами из почвы, не находились изначально в почве, а образовались в результате воздействия щелочи на почвенное органическое вещество. Как считал этот ученый, некоторые органические соединения, такие как хлорофиллы, дубильные вещества, при действии на них щелочью буреют.

По мнению Д.С. Орлова с соавторами практическое разделение специфических и неспецифических почвенных соединений, переходящих в щелочные вытяжки, невозможно (Орлов и др., 1996).

При разделении гуминовых веществ происходят сопутствующие реакции, такие как: гидролиз ГВ, включение части низкомолекулярных веществ в молекулы высокомолекулярных полимеров. В гумус попадают остатки микроскопических организмов и мелкие частицы ветоши, часть которых может быть склеена или сорбирована минеральными частицами, так как невозможно полностью разделить гумус и остатки, не утратившие своего анатомического строения. Если в ходе анализа почва не была предварительно обработана органическими растворителями, то липиды попадают в группу гуминовых кислот или гумина, несмотря на то, что по своей природе они являются неспецифическими соединениями (Орлов, 1990).

Существует большая вероятность выделения одновременно с ГВ негуминовых веществ, которые имеют либо приобретают в процессе извлечения признаки, считающиеся специфическими только для ГВ (Семёнов, Когут, 2015).

По мнению М. Клебера и Дж. Лехмана (Kleber, Lehmann, 2019) щелочной раствор не позволяет выделить только специфические органические соединения, синтезированные вторично в почве. Таким образом, любое определение гуминовых веществ, включающее извлечение последних из почвы с помощью водного раствора щелочи, можно считать ошибочным. М. Клебер и Дж. Лехман (Kleber, Lehmann, 2019) предлагают определить щелочное выделение как способ извлечения большей доли органического вещества из почвы. Другие ученые (Sutton, Sposito, 2005) рекомендуют в понятие «гуминовые вещества» включать все биомолекулы, относящиеся к индивидуальным органическим соединениям, которые не могут быть отделены без значимого изменения структуры и химических свойств ГВ.

1.4. Компонентный состав почвенного органического вещества

В составе ПОВ выявлены следующие индивидуальные органические соединения: белки, углеводы и липиды (жиры, воски, смолы и др.), лигнин, а также пигменты, включая хлорины, каротиноиды и их производные, оксиантрахиноны и родственные им вещества (Орлов, 1985; Туев, 1989; Ноут, 1971).

На рисунке 1 приведена функционально-генезисная классификация ПОВ.



Рисунок 1. – Функционально-генезисная классификация ПОВ (Попов и др., 2021).

Дисперсное органическое вещество (ДОВ) — фракция ПОВ, представляющая собой постмортальные остатки биоты различной степени разложения. Фракция включает твердые дискретные частицы остатков биоты, размером от 0,053 до 2,000 мм. В составе ДОВ присутствуют растительный материал, полностью или частично сохранивший свое клеточное строение, почвенный детрит, а также семена, пыльца, споры, грибные гифы, фитолиты и обугленные вещества. Фактически, ДОВ является промежуточным пулом

между остатками почвенной биоты и ГВ (Семёнов и др., 2019). В образцах ДОВ было обнаружено 200 пиролитических соединений, включая лигнин, фенолы, спирты, жирные кислоты, нафталины, пирролы, кетоны и др. (Xiao, 2017). В. М. Семёнов с соавторами показали, что в верхнем слое гумусового горизонта доля ДОВ выше, чем в нижней части. Максимальное содержание фракции встречалось в черноземах обыкновенных (Семёнов и др., 2019).

Белки — высокомолекулярные соединения, состоящие из остатков аминокислот, соединенных между собой пептидной связью. По составу подразделяются на простые (протеины) и сложные (протеиды). Простые белки состоят только из аминокислот, а сложные, помимо аминокислот, содержат также органические или неорганические соединения, такие как фосфорная кислота, глюкозамин, лецитин и др. (Паников и др., 1984; Туев, 1989).

Углеводы — основной класс природных веществ, повсеместно встречающихся в растительных, животных и бактериальных организмах (Туев, 1989). Высшие растения являются главным источником почвенных углеводов. В составе растительного сырья содержание углеводов составляет от 50 до 80 % (в пересчете на сухое вещество) (Паников и др., 1984). В составе ПОВ углеводы представлены поли-, олиго- и моносахаридами, их содержание варьирует от 5 до 16 % (Flaig, 1971). Моносахариды содержат от 4 до 7–8 атомов углерода и одну альдегидную или кетонную группу (Туев, 1989).

Полисахариды — это высокомолекулярные углеводы, состоящие из большого числа остатков моносахаридов и их производных, связанных гликозидными связями. Соединения, в состав молекул которых входит от 3 до 20 остатков моносахаридов, называют олигосахаридами (Слесарев, 2007). К числу важнейших полисахаридов относятся: целлюлоза, гемицеллюлозы, пектиновые вещества, крахмал, хитин и др. (Паников и др., 1984).

В составе индивидуальных органических соединений ПОВ выделяют группу гидрофобных органических веществ, которые извлекают из почвы малополярными органическими растворителями. По мнению Н.С. Паникова с соавторами, наиболее приемливо называть их «липидами» (Паников и др., 1984).

Липиды — разнородная группа природных соединений, объединенных одним общим свойством: они практически нерастворимы в воде, но хорошо растворимы в органических растворителях. В зависимости от способности к гидролизу липиды разделяют на омыляемые и неомыляемые. Омыляемые липиды включают в себя простые и сложные. Простые липиды — жиры и воски: при гидролизе образуют спирты и карбоновые кислоты. Сложные липиды при гидролизе образуют три и более компонента.

К ним относят фософлипиды, сфинголипиды и гликолипиды. Неомыляемые липиды охватывают стероиды, жирорастворимые витамины и простагландиды (Слесарев, 2001).

Индивидуальные органические соединения ПОВ включают в себя липиды, представленные, в основном, восками и смолами. Эти соединения наиболее устойчивы к биодegradации в почвах (Паников и др., 1984). Содержание липидов в составе ПОВ минеральных горизонтов варьирует от 2–4 до 10–12 %, в органогенных горизонтах и торфах их доля составляет 15–20 % (Орлов, 1996). Липидная фракция почв может включать в небольшом количестве смоляные кислоты, пигменты и другие вещества, поступающие в почву с экскретами и отмершими остатками живых организмов (Паников и др., 1984).

Жиры — органические соединения, представляющие собой сложные эфиры жирных кислот и глицерина. В составе жирных кислот содержится карбоксильная группа (или головка жирной кислоты, которая является гидрофильной) и радикал (так называемый хвост, обладающий гидрофобными свойствами). В зависимости от строения радикала выделяют насыщенные и ненасыщенные жирные кислоты. Радикал насыщенных жирных кислот не содержит двойных связей, ненасыщенные жирные кислоты характеризуются наличием двойных связей в радикале (Берёзов, Коровкин, 1998).

Воски — простые липиды, образованные сложными эфирами высших карбоновых кислот и высокомолекулярных одноатомных спиртов (Орлов, 1985).

Смоляные кислоты (или дитерпеновые кислоты) — карбоновые кислоты преимущественно фенантренового ряда с общей формулой $C_{19}H_{27-31}COOH$, а также их дигидро-, тетрагидро- и дегидропроизводные — $C_{19}H_{29}COOH$, $C_{19}H_{27}COOH$, $C_{19}H_{23}COOH$ (Рогоза и др., 2013). Для большинства природных смол не установлен химический состав. Растительные смолы содержат резиноловые (смоляные) кислоты, редко — резинолы (одно- и многоатомные смоляные спирты), ароматические кислоты, а также эфиры этих спиртов и кислот. Абиетиновая и L-пимаровая кислоты являются наиболее устойчивыми изомерами смоляных кислот (Орлова, Фомичева, 1990; Азаров и др. 1999).

Еще одним из индивидуальных органических соединений является лигнин, представляющий собой гетерополимер, обладающий склонностью к конденсации за счет образования устойчивых C–C связей. Характерной особенностью лигнина является его чрезвычайно сложная химическая структура (Ковалев, 2015). Основу строения лигнина составляет элементарное фенилпропановое звено. Заместителями в ароматическом кольце могут быть гидроксильные и метоксильные группы, пропановые цепочки. Структурными звеньями лигнина являются три спирта и их остатки: синаповый, кониферилловый, п-кумаровый (Орлов, 1985). Лигнин является одним из главных компонентов растительных

тканей, он локализуется между микрофибриллами клеток и препятствует сжатию, поэтому его называют инкрустирующим веществом (Туев, 1989).

В составе почвенного органического вещества постоянно присутствуют пигменты — группа разнообразно окрашенных биогенных веществ растительного и микробного происхождения, переходящих в 90 % ацетоновую (а также в спиртовую или спирто-бензольную) вытяжку. В группу пигментов входят оксиантрахиноны и вещества, родственные им, фотосинтетические пигменты (хлорины и каротиноиды), а также другие соединения. Водоросли и растительные остатки являются главным источником фотосинтетических пигментов в почве (Паников и др., 1984).

Хлорины — это органические соединения, содержащие гетероциклическое ароматическое кольцо, ядро которого состоит из четырех пирролов, попарно соединенных четырьмя метильными связями. Они включают в себя хлорофиллиды *a* и *b*, хлорофиллы *a*, *b*, *d* и *f*, феофетины *a* и *b*, бактериохлорофилл *c* и феофорбиды. Хлорофиллы — это хлорины, содержащие магний. Под воздействием почвенных микроорганизмов хлорофилл быстро трансформируется. В кислой среде хлорофилл превращается в феофитин при замене иона магния двумя ионами водорода (Орлов, 1985; Roca et al., 2016; Yilmaz, Gökmen, 2016).

Каротиноиды состоят из остатков изопрена, образующих сплошную цепь сопряженных двойных связей, что обуславливает их интенсивную окраску (Орлов, 1985). Каротиноиды обладают высокой антиоксидантной активностью (Stahl, Sies, 2003).

В почве существует определенный пул хлоринов и каротиноидов — они могут закрепляться и сохраняться без разрушения в течение длительного времени (Бриттон, 1986; Бирюкова, 1978). Было показано, что фотосинтетические пигменты могут солубилизироваться в мицеллах ГВ. Вероятно, это свойство и способствует длительному сохранению пигментов в POV (Попов, 2018). Хлорофилл и его производные могут использоваться для оценки и диагностики биохимических процессов в почве (Орлов, 1985). Содержание хлорофиллов в составе почвенного органического вещества служит индикатором переувлажнения почв (Козырев, 1991).

К оксиантрахинонам относят хризоталуниин (дегидродимер хризофанола), пигменты типа скирина и хризазина, а также пигмент P_g или «зеленая гуминовая кислота» (4,9-диоксиперилен-3,10-хинон). Зеленый пигмент продуцируется грибами, в частности *Senococcum graniforme* и встречается в различных природных зонах, испытывающих хотя бы временное переувлажнение. Некоторые пигменты из группы оксиантрахинонов экстрагируются раствором щелочи вместе с гуминовыми веществами (Орлов, 1985).

Считается, что некоторые пигменты извлекаются совместно с ГВ раствором щелочи (Орлов, 1985).

Из специфических веществ, ГВ выделяют как наиболее кинетически устойчивую форму сохранения органических веществ в биосфере (Орлов, 1993).

Многочисленные исследования доказывают, что ГВ являются молекулами с относительно низкой молекулярной массой, не имеют четко распознаваемой структуры и постоянного состава (Семёнов, Когут, 2015).

Меланины — это высокомолекулярные азотистые или безазотистые полимеры, которые имеют бурую, темно-коричневую или черную окраску. Эти соединения широко распространены в природе: это наиболее часто встречающиеся пигменты животных. Темноокрашенные пигменты широко распространены в почвах, образуются в процессе жизнедеятельности грибов, актиномицетов и бактерий (Мишустин и др., 1956; Лях, Рубан, 1972; Саиз-Гименез, Мартин, 1979; Звягинцев, Мирчинк, 1986).

Меланины — полимеры хиноидных соединений. Однако, являясь гетерополимерами, меланины различаются набором мономерных единиц и видами связей между ними. Таким образом, меланины характеризуются разнообразным химическим составом и нерегулярной структурой. В зависимости от химического строения выделяют эумеланины, феомеланины и алломеланины. Меланины практически не растворимы в воде, минеральных кислотах и органических растворителях, но хорошо растворяются в щелочных растворах и выпадают в осадок при подкислении растворов (Бриттон, 1986). По многим свойствам эти пигменты сходны с гумусовыми кислотами, а в некоторых случаях — даже неотличимы (Орлов, 1985). Меланины являются возможными предшественниками ГВ (Завгородняя, 2000). Спектры поглощения меланинов в видимом диапазоне характеризуются пологими кривыми с постепенно уменьшающейся оптической плотностью от 400 до 750 нм (Орлов, 1985).

Гидрофобины — важные структурные белки клеточной поверхности, секретлируемые мицелием грибов. Гидрофобины — новый класс белков, которые обладают необычными физико-химическими свойствами. Для их выделения применяют методы, нетипичные для выделения белков (Белозерская, 2001). В составе гидрофобинов присутствует около 100 аминокислотных остатков, их характерной чертой является наличие восьми остатков цистеина, которые образуют дисульфидные мостики. Гидрофобины являются амфифилами, поскольку содержат и гидрофильные, и гидрофобные аминокислотные остатки. Они обладают поверхностно-активными свойствами и способны спонтанно самособираться на границе раздела гидрофобной и гидрофильной фаз. Уникальное свойство гидрофобинов, связанное с тем, что они

обладают способностью понижать поверхностное натяжение воды, позволяет гифам грибов расти на воздухе (Колесников, 2014). Гидрофобины имеют структуры, способствующие их длительному сохранению в почве (Epstein, Chapman, 2008; Rillig et al., 2007).

Гломалины — это гликопротеины, продуцируемые арбускулярными микоризными грибами порядка *Glomales (Glomerales)*. Гломалины обладают гидрофобными свойствами и способностью связывать железо (Nichols, 2003). С позиции биохимии, гломалины корректнее называть гликоконъюгатами — белками, которые содержат углевод (гликан), ковалентно связанный с полипептидной основой (Хьюз, 1985).

Гломалины в большом количестве присутствуют в составе почвенного органического вещества, что объясняется медленной скоростью их деградации, варьирующей от 7–42 до 100 лет, и высоким содержанием гифов арбускулярных микоризных грибов (Nichols, 2003). Их содержание в почве варьирует от 2–15 до 60 мг/г (Wright, 1998). Показано, что микоризация растений способствует увеличению содержания гломалина в почве (Bedini et al., 2009).

По своим свойствам и функциям гломалины имеют сходство с гидрофобинами. Экстракция гломалина происходит при очень высокой температуре (121°C) с помощью буферного раствора, который содержит цитрат-ион (Nichols, 2003).

Доказано, что химический состав меланинов и гломалинов, подобен составу ГВ (Coelho, 1997; Rillig, 2004; Rillig et al., 2007). Щелочное извлечение гуминовых веществ, вероятно, приводит к совместному извлечению гуминовых веществ и гломалинов, причем на долю последних приходится до 9,5 % углерода органических соединений почв (Haile-Mariam et al., 2008; Nichols, Wright, 2005).

Кероген — преобразованное преимущественно в анаэробных условиях рассеянное органическое вещество любого генетического типа, включающее комплекс неоднородных детритных и тонкодисперсных органических остатков, а также часть органического вещества осадочных пород. Кероген не растворим в органических растворителях, но растворим в щелочных растворах (Богородская и др., 2005; Семёнов, Когут, 2015). Кероген является основным источником нефти и горючих газов в геосфере. Важной особенностью керогена является неповторимость его химической структуры, которая, в первую очередь, определяется составом исходного органического вещества. В основе макромолекулы керогена лежат конденсированные карбоциклические ядра, соединенные гетероатомными связями или алифатическими цепочками (Бушнев, Бурдельная, 2010).

2. Объекты и методы исследования

2.1 Объекты исследования

В качестве объектов исследования были выбраны образцы гумусовых горизонтов следующих почв:

1. Каштановой типичной мелкой среднесуглинистой карбонатной на карбонатных лессовидных суглинках (1–AJ)
2. Чернозема миграционно-мицелярного мощного тяжелосуглинистого глубококарбонатного на карбонатных лессовидных суглинках (2–AU1)
3. Серой типичной маломощной легкосуглинистой на карбонатных лессовидных суглинках (3–AY)
4. Бурозема мелкого тяжелосуглинистого на элюво-делювии известняка (4–AY)
5. Перегнойно-темногумусовой маломощной тяжелосуглинистой на элюво-делювии известняка (5–AH)

Названия почв даны в соответствии с Классификацией и диагностикой почв России (Шишов, 2004).

Описание объектов исследования

Почва: *Каштановая типичная мелкая среднесуглинистая карбонатная на карбонатных лессовидных суглинках*

Координаты: 52.73493° с.ш., 79.85368° в.д.

Местоположение: Алтайский край.

Макрорельеф: Западно-Сибирская равнина, Кулундинская равнина.

Мезорельеф: II терраса Кучукского озера.

Растительность: типчаково-волоснецово-ковыльная галофитная степь (*Allium lineare* L., *Bolboschoenus popovii* Egor., *Jurinea multiflora* L., *Nitraria sibirica* Pall., *Potentilla acaulis* L., *Psathyrostachys juncea* Fisch., *Scorzonera ensifolia* Bieb., *Stipa capillata* L.).

Климатические характеристики: сухой континентальный климат с теплым засушливым продолжительным летом и холодной зимой. Среднегодовая температура воздуха +2°C. Сумма температур выше 10° C составляет 2320° C. Среднегодовая сумма атмосферных осадков 246 мм. Максимальное количество осадков выпадает в июле. Среднегодовалый показатель гидротермического коэффициента (ГТК) составляет 0,61 (Макарычев, 2016; Олешко и др., 2016).

Морфологическое описание профиля

Индекс горизонта; мощность, см	Описание горизонта
Степной войлок (0+1)	сухой, светло-серый, состоит из частей неразложившейся травянистой растительности.
АJ (0–13)	сухой, светло-серый, среднесуглинистый, комковато-порошистый, уплотненный, плотнее в нижней части. Встречаются мелкие корни травянистой растительности, редкие червoroины. Переход резкий, граница слабоволнистая.
ВМК (13–30)	свежий, коричневоый, тяжелосуглинистый, ореховатый, уплотненный. Встречаются многочисленные мелкие корни, карбонаты в виде пятен и мелких конкреций, следы зоогенной проработки. Вскипает от 10% HCl. Переход ясный, граница слабоволнистая.
САТ (30–42)	свежий, желтовато-буровато-палевый, тяжелосуглинистый, крупнокомковатый, уплотненный, вязкий. Присутствуют карбонаты в виде пятен, мелких округлых карбонатных конкреций и белоглазки, отдельные корни, ходы мелких почвенных животных, заполненные гумусовым материалом и материалом нижележащих горизонтов. Бурно вскипает от 10% HCl. Переход ясный, граница слабоволнистая.
Сса (42–110)	свежий, темно-палевый, светло-палевый при подсыхании, глинистый, тонкоплитчатый, плотный, пористый. Встречаются единичные корни, тонкие корневины, тонкие глинистые кутаны. Вскипает от 10% HCl менее бурно, чем предыдущий горизонт.

Почва: *Чернозем миграционно-мицелярный мощный тяжелосуглинистый глубококарбонатный на карбонатных лессовидных суглинках.*

Координаты: 51,19055° с.ш., 37,62529° в.д.

Местоположение: Белгородская область, заповедник «Белогорье», участок «Ямская степь».

Макрорельеф: южная часть Среднерусской возвышенности.

Мезорельеф: плакор.

Растительность: кострцово-разнотравная луговая степь с доминированием мезоксерофитного разнотравья (*Astragalus danicus* Retz., *Bromopsis riparia* Rehm., *Calamagrostis epigeios* L., *Elyrtigia intermedia* Host., *Festuca valesiaca* Schleich. ex Gaudin., *Filipendula vulgaris* Moench, *Fragaria viridis* Weston., *Galium verum* L., *Onobrychis arenaria* Kit., *Salvia pratensis* L., *Vicia tenuifolia* Roth.) (Багрова и др., 2016).

Климатические характеристики заповедника «Белогорье» участок «Ямская степь»: умеренно-континентальный климат с жарким сухим летом и довольно холодной зимой. Среднегодовая температура воздуха +6 °С. Сумма положительных температур выше 10° составляет 2600°. Среднегодовая сумма атмосферных осадков 530 мм в год, около половины осадков выпадает летом (Аксенов и др., 1980). ГТК составляет 1,1 (Чендев и др., 2015).

Морфологическое описание профиля (Багрова и др., 2016)

Индекс горизонта;

Описание горизонта

мощность, см

AU1 (0–15)	свежий, темно-серый, тяжелосуглинистый, мелкокомковато-зернистый, уплотненный. Обилие мелких корней и копролитов. Единичные отбеленные кварцевые зерна. Переход постепенный по структуре и плотности.
AU2 (15–42)	свежий, темно-серый, тяжелосуглинистый, мелко-среднекомковатый, уплотненный (плотнее предыдущего). Обилие корней, локально присутствуют отбеленные зерна кварца. Переход постепенный по структуре.
AU3 (42–62)	Свежий, темно-серый, тяжелосуглинистый, комковато-мелкопризматический, более уплотненный. Встречаются мелкие корни, включения отбеленных кварцевых зерен. Переход ясный по окраске и структуре, граница слабоволнистая.
AB1 (62–83)	Свежий, буровато-серый, тяжелосуглинистый, крупнокомковато-призматический, плотный. Присутствуют корни и отбеленные зерна кварца (меньше, чем в вышележащем горизонте). Переход

		постепенный по цвету и плотности.
AB2 (83–98(105))		Свежий, неоднородно окрашен (буровато-серый, желтовато-бурый), тяжелосуглинистый, мелкопризматический, уплотненный. Присутствуют единичные корни. Встречаются прямые и обратные кротовины. Переход резкий, граница волнистая.
BCAmc 98(105)–140(145)		Влажный, желтовато-палевый, тяжелосуглинистый, мелкопризматически-плитчатый, самый плотный в профиле, пористый. Обилие новообразований карбонатов в виде псевдомицелия. Переход постепенный.
BCsmc1 140(145)–180		Влажный, палевый, тяжелосуглинистый, крупнопризматически-плитчатый, менее плотный по сравнению с вышележащим горизонтом. Присутствуют новообразования карбонатов в виде псевдомицелия (в меньшей степени, чем в предыдущем горизонте). На глубине 180 см прослеживаются карбонатные кутаны (кальцетаны). Переход постепенный.
BCsmc2 (180–200)		Влажный, палевый, тяжелосуглинистый, крупнопризматически-плитчатый, плотный, пористый. Заметны карбонатные кутаны, локально выражен карбонатный псевдомицелий. Внутри призм выделяются каналы с карбонатными налетами по их внутренним стенкам.

Почва: *Серая типичная маломощная легкосуглинистая на карбонатных лессовидных суглинках*

Координаты: 50,60965° с.ш., 35,96760° в.д.

Местоположение: Белгородская область, заповедник «Белогорье», участок «Лес на Ворскле».

Макрорельеф: южная часть Среднерусской возвышенности.

Мезорельеф: пологий склон юго-восточной экспозиции.

Растительность: широколиственный лес (*Acer platanoides* L., *Fraxinus excelsior* L., *Quercus robur* L., *Tilia cordata* Mill.); напочвенный покров: *Aegopodium podagraria* L., *Asarum europaeum* L., *Pulmonaria obscura* Dum., *Stellaria holostea* L.).

Климатические характеристики заповедника «Белогорье» участок «Дубрава»: умеренно-континентальный климат с жарким сухим летом и довольно холодной зимой. Среднегодовая температура воздуха +6 °С. Сумма положительных температур выше 10° составляет 2600°. Среднегодовая сумма атмосферных осадков 530 мм в год, около половины осадков выпадает летом (Аксенов и др., 1980). ГТК составляет 1,1 (Чендев и др., 2015).

Морфологическое описание профиля

Индекс горизонта; мощность, см	Описание горизонта
Подстилка (0+1)	сухая, состоит из листьев дуба и клена прошлого и позапрошлого года.
AУ (0-20)	свежий, серый, легкосуглинистый, средне-мелкокомковатый, рыхлый, в нижней части — уплотнен. Обилие мелких корней, встречаются отбеленные зерна кварца, копролиты. Переход ясный по окраске, граница слабоволнистая.
AЕL (20–36)	свежий, серый с буроватым оттенком, легкосуглинистый, ореховато-комковатый. Обилие отбеленных кварцевых зерен, встречаются мелкие корни. Переход ясный по окраске, граница слабоволнистая.
BEЛ (36–54)	свежий, темно-серый с буроватым оттенком, внутриведная масса — бурого цвета, среднесуглинистый, крупно-среднеореховатый, плотный. Встречаются единичные крупные корни, копролиты, небольшое количество отбеленных кварцевых зерен, тонкие кутаны. Переход ясный по цвету, граница слабоволнистая.
BT1 (54–67)	свежий, неоднородный по цвету: бурый с темно-серыми пятнами, среднесуглинистый, крупно-среднеореховатый. Присутствуют единичные крупные корни, силтаны, кутаны. Переход ясный по плотности и структуре, граница почти ровная.
BT2 (67–112)	свежий, охристо-бурый, среднесуглинистый, крупно-ореховатопризматический, очень плотный. Присутствуют силтаны, обилие крупных кутан. Переход ясный по цвету, граница почти

ровная.

ВСт
(112–130) (дно
разреза) свежий, желтовато-палевый, среднесуглинистый, плитчатый, очень плотный. Есть тонкие кутаны, силтаны.

Почва: *Бурозем мелкий тяжелосуглинистый на элюво-делювии известняков*

Координаты: 44,42127° с.ш., 33,84304° в.д.

Местоположение: Крым, перевал Шайтан-Мердвен.

Макрорельеф: западный отрог плато Ай-Петри (580–590 м над у.м.).

Мезорельеф: нижняя часть склона юго-западной экспозиции, крутизна склона достигает 7–10°.

Растительность: мертвопокровный буковый лес (*Fagus sylvatica* L.).

Климатические характеристики: средиземноморский тип климата. Среднегодовая температура воздуха +10°C. Среднегодовая сумма атмосферных осадков 806 мм, большая часть из которых (423 мм) выпадает в виде дождя и снега в прохладный период года (с ноября по март) (Никифоров, Костенко, 2019). Показатель ГТК составляет 1,1–1,3 (Агроклиматический справочник, 1959).

Морфологическое описание профиля

Индекс горизонта; мощность, см	Описание горизонта
Подстилка (0+1)	Сухая, состоит из листьев бука, веточек.
АУ (0-13)	Сухой, светло-серый, тяжелосуглинистый, комковато-порошистый, рыхлый. Включения мелких корней. Переход постепенный, переход ясный по плотности, граница слабоволнистая.
АВ (13–32)	Сухой, серовато-бурый, среднесуглинистый, мелкокомковатый, плотный. Встречаются единичные крупные корни, заметно меньше мелких корней. Переход ясный по окраске, граница почти ровная.
ВМ	Сухой, бурый, среднесуглинистый, ореховато-комковатый, очень

(32–70) (дно разреза) плотный.

Почва: *Перегноино-темногумусовая маломощная тяжелосуглинистая на элюво-делювии известняков*

Координаты: 44,42317° с.ш., 33,84255° в.д.

Местоположение: Крым, перевал Шайтан-Мердвен.

Макрорельеф: западный отрог плато Ай-Петри (580–590 м над у.м.).

Мезорельеф: днище карстовой воронки.

Растительность: мезофильный луг, типчаково-мятликово-луговая-трясунковая ассоциация: (*Agrimonia eupatoria* L., *Alchemilla taurica* Juz., *Briza media* L., *Cerastium holosteoides* Fries., *Cirsium arvense* (L.) Scop., *Dactylis glomerata* L., *Elymus repens* (L.) Gould, *Festuca pratensis* Huds., *Filipendula vulgaris* Moench, *Galium verum* L., *Leucanthemum vulgare* Lam., *Pastinaca umbrosa* Stev. ex DC., *Poa pratensis* L., *Stellaria graminea* L., *Taraxacum officinale* Wigg., *Trifolium hybridum* L., *Trifolium pratense* L., *Vicia cracca* L.) (Никифоров, Костенко, 2019).

Климатические характеристики: средиземноморский тип климата. Среднегодовая температура воздуха +10°C. Среднегодовая сумма атмосферных осадков 806 мм, большая часть из которых (423 мм) выпадает в виде дождя и снега в прохладный период года (с ноября по март) (Никифоров, Костенко, 2019). Показатель ГТК составляет 1,1–1,3 (Агроклиматический справочник, 1959).

Морфологическое описание профиля

Индекс горизонта;

Описание горизонта

мощность, см

АН (0–40)	сухой, темно-серый с буроватым оттенком, тяжелосуглинистый, мелкокомковато-порошистый, рыхлый, в нижней части уплотненный. Обилие мелких корней. Переход постепенный.
С (40–70)	сухой, буровато-палевый, тяжелосуглинистый, слабо оструктурен, плотный, книзу — очень плотный.

В таблице 1 представлена характеристика физико-химических свойств исследуемых объектов.

Таблица 1. Физико-химические свойства объектов исследования

Гори- зонт	Мощность, см	рН		Гидро- литическая кислот- ность (Нг)	Сумма обменных основа- ний (S)	Потери при прокалива- нии (ППП), %	Гигро- скопичес- кая влага, %
		H ₂ O	KCl				
Каштановая почва							
AJ	0–13	7,69	6,72	0,3	18,4	7,04	1,28
Чернозем миграционно-мицелярный							
AU1	0–15	7,10	5,64	1,8	44,4	10,43	3,72
Серая типичная почва							
AУ	0–20	6,02	5,34	2,7	25,4	10,34	2,44
Бурозем							
AУ	0–13	6,75	5,78	2,6	39,4	16,20	4,98
Перегнойно-темногумусовая							
АН	0–20	6,55	5,32	2,75	49	17,14	4,63

2.2. Методы исследования

В соответствии с общепринятыми в почвоведении методами (Растворова и др., 1995) в исследуемых почвенных образцах были определены:

1. Водородный показатель (рН) водной и солевой вытяжки — потенциометрическим методом.
2. Гидролитическая кислотность (Нг) — методом кислотно-основного титрования.
3. Сумма обменных оснований (S) — по Каппену.
4. Гигроскопическая влажность — термостатно-весовым методом.
5. Потери при прокаливании (ППП) — прокаливанием в муфеле при 900°С.

На наш взгляд, единственным решением для изучения качественного состава ПОВ являются методы, позволяющие последовательно выделять определенные группы органических соединений.

Во-первых, из ПОВ необходимо выделить индивидуальные органические соединения, растворимые в широко используемых органических растворителях: диметилкетоне (ацетоне), этаноле, метаноле и проч. (Ritchie, 2006; Castle et al., 2011; Sumanta et al., 2014). Эта группа органических соединений в основном состоит из хлоринов (хлорофиллов и феофитинов) и каротиноидов.

Во-вторых, необходимо выделить «чистые» ГВ (предположительно, с меланинами). Эти специфические соединения должны быть переведены в жидкую фазу (точнее дисперсную среду) путем создания определенных условий. Чтобы сделать это, мы должны помнить, что ГВ являются коллоидными дисперсиями, имеющими как гидрофильные, так и гидрофобные части, то есть молекулы этих веществ являются амфифильными или дифильными (Милановский и др., 1993; Милановский, 2000). Поэтому ГВ являются поверхностно-активными веществами и способны самопроизвольно образовывать структурированные коллоидные мицеллы, чаще всего сфероидные (Лактионов, 1978; Engebretson, von Wandruszka, 1997; von Wandruszka, 1998; Tombácz, Rice, 1999; von Wandruszka et al., 1999; Piccolo et al., 2001). Физически рыхлые и химически неоднородные глобулы (или ассоциаты) ГВ являются кинетически стабильными единицами этих коллоидных дисперсных систем (Лиштван и др., 1976). Эти специфические вещества следует рассматривать как самособирающиеся супрамолекулярные ассоциации, состоящие из гетерогенных и относительно малых молекул (Piccolo, 2002). В структурированных коллоидных мицеллах молекулы ГВ связаны друг с другом ионами поливалентных металлов (von Wandruszka, 2000). Мы предполагаем, что для «разборки» структурированными коллоидными мицелл ГВ и их перехода в жидкую фазу необходимо «удалить» ионы поливалентных металлов. Для этого необходимо ввести основания Льюиса в неводный низкополярный раствор. Эти основания, вступая в реакцию с кислотами Льюиса (ионами металлов), будут способствовать «разборке» мицелл ГВ. При «разборке» структурированных коллоидных мицелл ГВ и меланинов могут высвобождаться молекулы некоторых солубилизаторов, которые глубоко не проникают в мицеллы, а фиксировались на их поверхности. Такими веществами могут быть гломалины (Miller et al., 1995; Wright et al., 1996; Wright, Upadhyaya, 1998; Nichols, 2003; Steinberg, Rillig, 2004; Семенов, Когут, 2015). Последние представляют собой сложные органические гидрофобные соединения — гликопротеины (Wright, Upadhyaya, 1998; Nichols, 2003). По нашему мнению, ГВ можно отделить от гломалинов на основе различных значений агрегативной устойчивости этих органических соединений.

В-третьих, необходимо выделить такие гидрофобные органические соединения такие, как липиды (Flaig, 1971; Паников и др., 1984; Розенцвет и др., 2019).

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, хлорофилл c_1+c_2 , феофитин *a*, каротиноиды) в почвенных образцах определялось в соответствии с требованиями ГОСТ 17.1.4.02-90. В основе метода лежит спектрофотометрирование неводного раствора, содержащего пигменты. Извлечение пигментов из почвенного органического вещества проводилось 90 % водным раствором диметилкетона (ацетона), отношение раствор:почва было 10:1. Выделение было исчерпывающим. Расчет концентрации пигментов проводился на основании величины светопоглощения вытяжек при $\lambda = 430, 470, 664$ (без добавления и с добавлением HCl), 647, 630, 750 нм.

Соединения белковой природы (к которым предположительно относятся гломалины) извлекались из почвы с помощью 90 % водного раствора ацетона с добавлением гидроксиламина (1 г/л), а также 90 % водного раствора ацетона с добавлением соляной кислоты (10:1). Определение содержания проводилось массовым методом. Для качественной реакции на белок проводилась ксантопротеиновая проба (или реакция Мульдера).

ГВ выделялись из почвы 90 % водным раствором ацетона с добавлением соляной кислоты (10:1) до и после декальцирования 10% соляной кислотой. Содержание ГВ определялось массовым методом.

Разделение соединений белковой природы и ГВ в одной вытяжке проводилось на основании их различной агрегативной устойчивости при разных значениях водородного показателя (рН). Гломалины осаждались при рН=7, ГВ — при рН=1 в вытяжке, разбавленной водой в 3 раза. Содержание гломалинов определялось массовым методом.

Липиды извлекались с помощью спирто-бензольной смеси (1:1). Содержание липидов определялось массовым методом.

Оптическая плотность гуминовых веществ была измерена с помощью спектрофотометра.

Во всех случаях повторность была трехкратной. Для статистической обработки экспериментальных данных мы использовали дисперсионный анализ (Дмитриев, 1972; Доспехов, 1985; de Smith, 2018).

3. Результаты и обсуждение

Как следовало из наших экспериментальных данных, хлорофиллы *a* и *b* и феофитин *a*, фитопорфирины (хлорофиллы c_1+c_2) и каротиноиды присутствовали в ПОВ всех объектов (рис. 2–6). Так, содержание хлорофилла *a* было наименьшим в горизонте АУ серой почвы, а наибольшим — в горизонтах АУ1 чернозема миграционно-мицелярного и АУ бурозема (рис. 2). При этом содержание хлорофилла *b* было самым низким в горизонте АУ1 чернозема миграционно-мицелярного, в остальных объектах содержание этого пигмента повышалось в ряду АН перегнойно-темногумусовой почвы → АУ серой почвы → АЖ каштановой почвы → АУ бурозема (рис. 3).

Высокое содержание хлорофилла *a* и очень низкое содержание хлорофилла *b* в горизонте АУ1 чернозема миграционно-мицелярного, вероятно, могло быть связано с наличием водорослей. Это объяснение отчасти может подтверждаться присутствием хлорофиллов c_1+c_2 (рис. 3), которые встречаются лишь у некоторых видов водорослей (Beale, 1999; Zapata et al., 2006).

Содержание хлорофиллов c_1+c_2 было очень небольшим в горизонте АН перегнойно-темногумусовой почвы, что могло свидетельствовать об отсутствии водорослей в составе педобиоты. Максимальное содержание этих хлорофиллов наблюдалось в горизонтах АЖ каштановой почвы и АУ бурозема (рис. 3).

Выявлено, что минимальное содержание феофетина *a* было в горизонте АЖ каштановой почвы, а максимальное — в горизонтах АУ1 чернозема миграционно-мицелярного и АУ бурозема (рис. 5). Данный факт, вероятно, был связан с различными условиями трансформации хлорофилла *a*.

Разрушение хлорофиллов происходит в два этапа: первый, очень быстрый, происходит в тканях самих растений, второй, более медленный, — в почвах под влиянием почвенной биоты. Интенсивность микробного разложения регулируется такими условиями, как кислотность почвы, влажность и температура, а также наличие токсичных веществ и др. Из хлорофиллов хлорофилл *a* подвергался наибольшему деструкционному воздействию, наиболее устойчивым к разложению был феофитин (Нойт, 1966).

Содержание каротиноидов было наименьшим в горизонтах АН перегнойно-темногумусовой, АУ серой и АЖ каштановой почв. Более высокое содержание этих пигментов было приурочено к горизонтам АУ1 чернозема миграционно-мицелярного и АУ бурозема (рис. 6).

Каротиноиды — другой широко распространенный класс природных пигментов изопреноидной природы в ПОВ, они синтезируются прокариотами, водорослями, грибами, высшими растениями и другими живыми организмами (Бриттон, Sun et al., 2020). Следует отметить, что для большинства растений характерно низкое содержание каротиноидов в корнях (Walter et al., 2015). Каротиноиды и хлорофиллы могут сохраняться в погребенных почвах до нескольких тысяч лет (Valentine, 1955; Бирюкова, Орлов, 1978). Как было выявлено (Simonart et al., 1959), разложение ^{14}C -меченых хлорофиллов и β -каротина в почве происходит медленнее по сравнению с разложением глюкозы, гемицеллюлоз и целлюлозы. При этом в аэробных условиях лесной подстилки каротиноиды, как оказалось, были менее устойчивы к разложению по сравнению с феофитинами (Sanger, 1971).. Это может быть связано с тем, что каротиноиды обладают высокой антиоксидантной активностью (Stahl, Sies, 2003). Благодаря этому свойству каротиноиды могут сохраняться в ПОВ. Кроме того, фотосинтетические пигменты могут соллюбилизироваться в мицеллах ГВ (Попов, 2018).

Больше всего всех фотосинтетических пигментов было выявлено в горизонте АУ бурозема (рис. 7), что, по всей видимости, связано с большим их наличием в опаде. Высокое содержание фотосинтетических пигментов в АУ1 чернозема миграционно-мицеллярного обусловлено поступлением растительных остатков в почву вследствие периодического подкашивания травянистых растений, что, вероятно, создает возможность для развития альгоценоза. Содержание всех фотосинтетических пигментов в АУ каштановой, АН перегнойно-темногумусовой и АУ серой почв было сопоставимым.

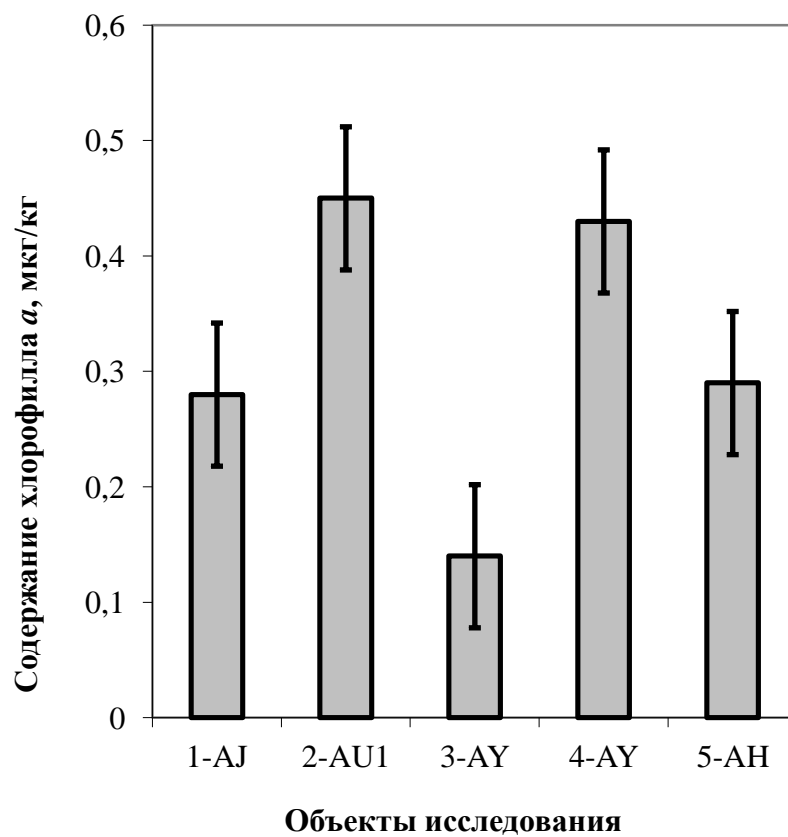


Рисунок 2. Содержание хлорофилла *a* в ПОВ.

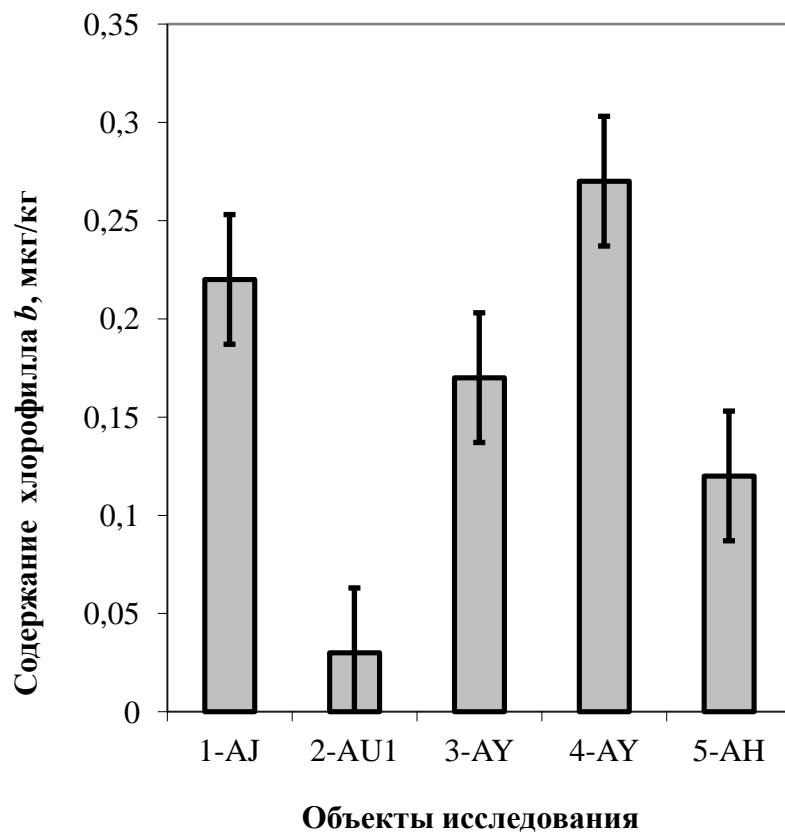


Рисунок 3. Содержание хлорофилла *b* в ПОВ.

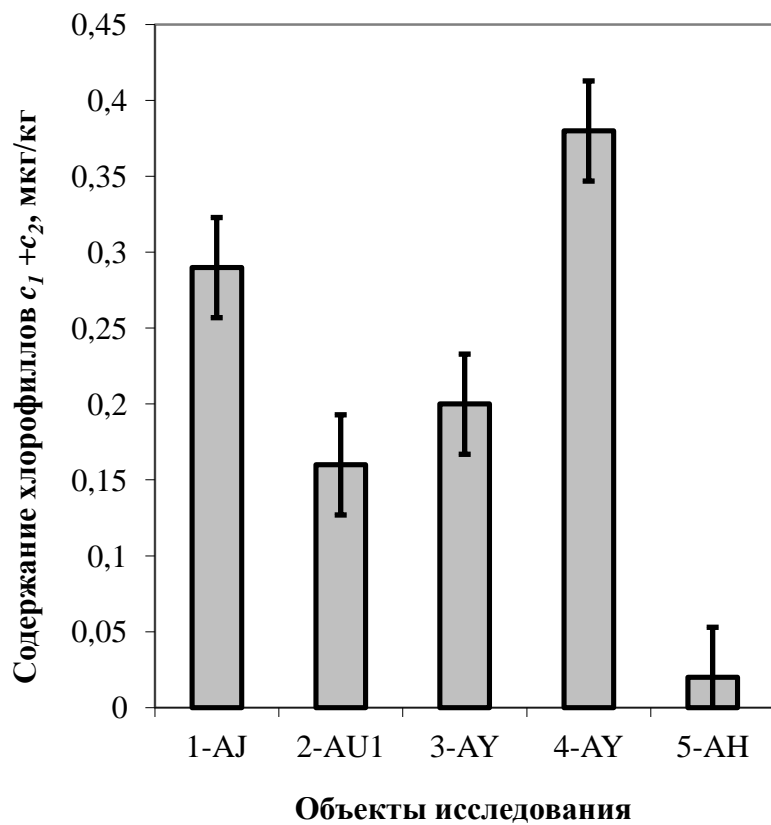


Рисунок 4. Содержание хлорофиллов c_1+c_2 в ПОВ.

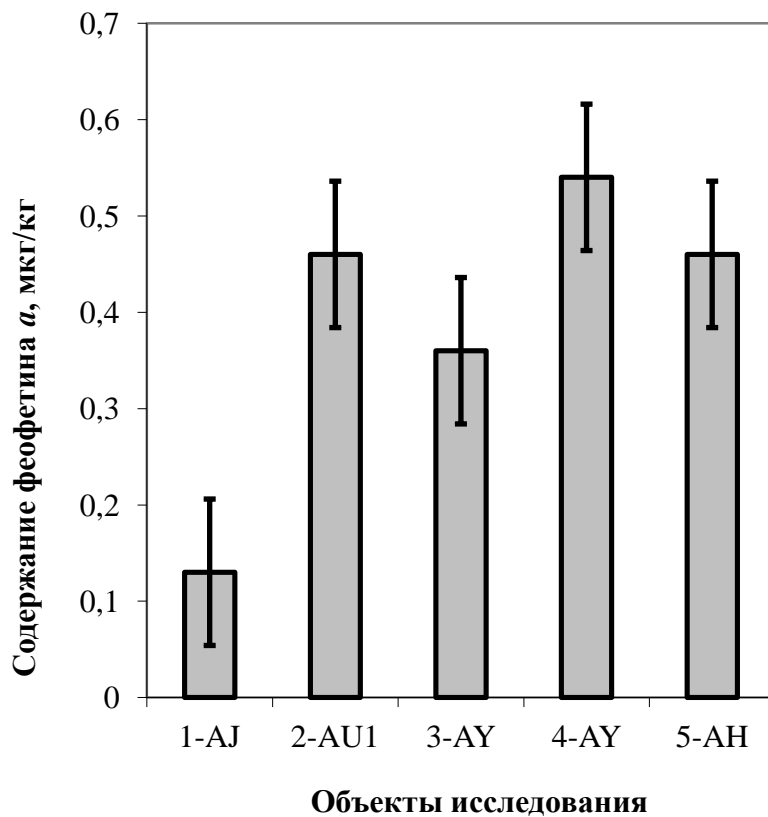


Рисунок 5. Содержание феофитина a в ПОВ.

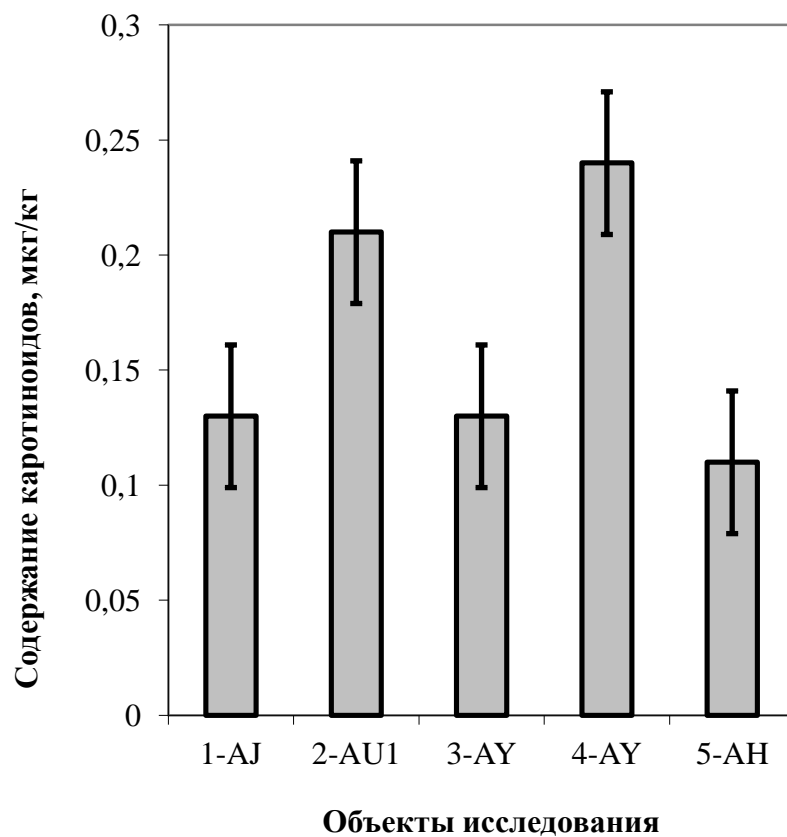


Рисунок 6. Содержание каротиноидов в ПОВ.

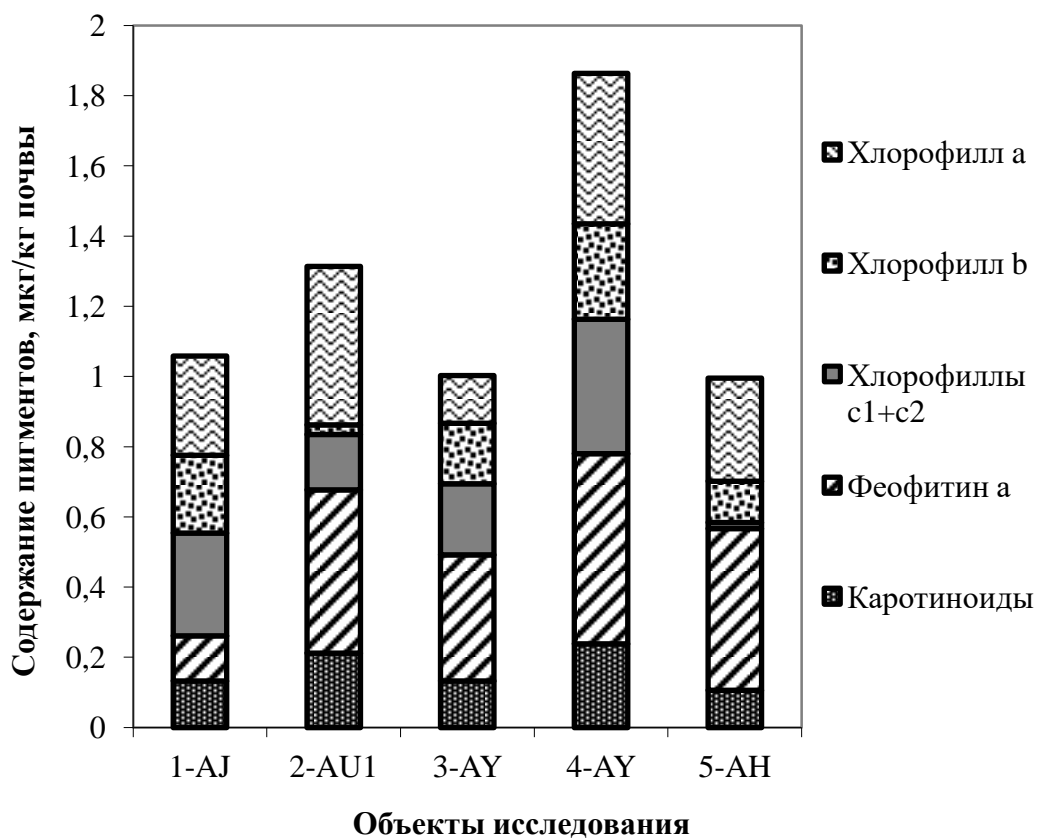


Рисунок 7. Содержание фотосинтетических пигментов в ПОВ.

Наибольшее содержание веществ белковой природы (предположительно гломалинов) обнаружено в горизонте AU1 чернозема миграционно-мицелярного, наименьшее — в АУ бурозема (рис. 8). В АJ каштановой, АН перегнойно-темногумусовой и АУ серой почв их содержание было сопоставимым. Присутствие большого числа гломалинов в составе ПОВ было обусловлено, по всей видимости, наличием в большом количестве арбускулярных микоризных грибов (Nichols, 2003; Wright, 1998).

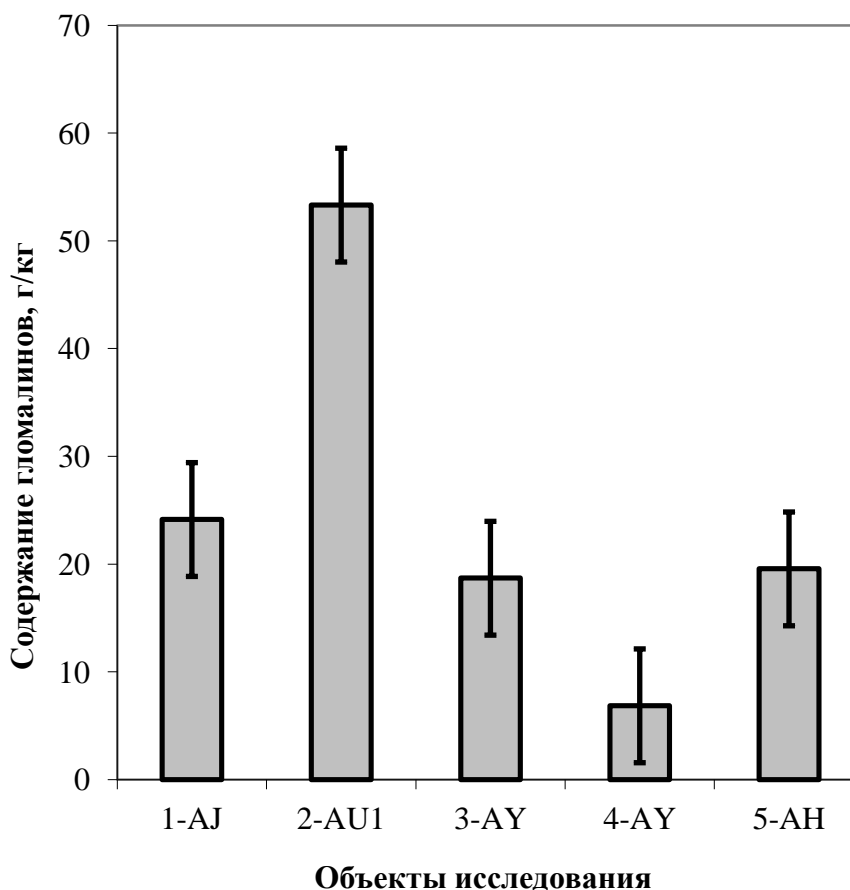


Рисунок 8. Содержание гломалинов в ПОВ.

Содержание ГВ, извлеченных из ПОВ 90 % раствором диметилкетона, иначе — ГВ I фракции представлено на рисунке 9, содержание ГВ после декальцирования (обработки образцов почвы 10 % раствором HCl), иначе — ГВ II фракции — на рисунке 10. Сумма ГВ двух фракций — на рисунке 11.

ГВ (фракция ГВ-II), предположительно связанных с кальцием, было заметно больше в составе ПОВ, чем ГВ (фракция ГВ-I), предположительно связанных с несиликатными полуторными оксидами (рис. 9,10), что обусловлено наличием карбонатов в почвообразующих породах, на которых сформировались исследуемые почвы.

В результате анализа полученных нами данных была выявлена следующая закономерность: содержание ГВ возрастало с увеличением поступления влаги в почву, как с осадками, так и поверхностным стоком. Так, максимальное содержание ГВ было присуще перегнойно-темногумусовой почве, сформированной в аккумулятивной позиции при сочетании условий благоприятного температурного режима и избыточного увлажнения, способствующих развитию мощного травянистого покрова. В каштановой почве, сформированной в сухом континентальном климате, содержание ГВ было минимальным (рис. 11).

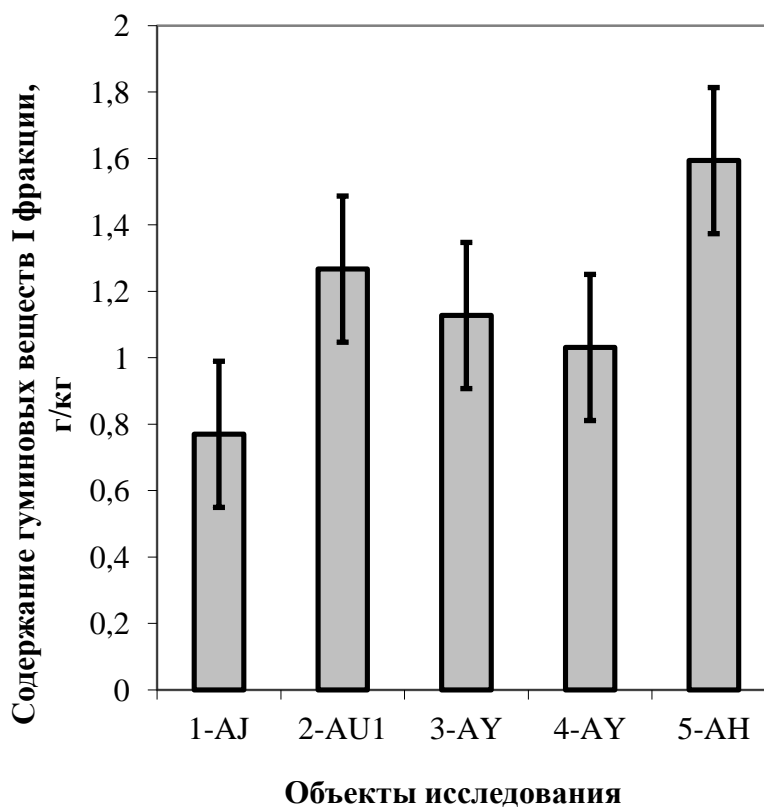


Рисунок 9. Содержание гуминовых веществ (ГВ-I).

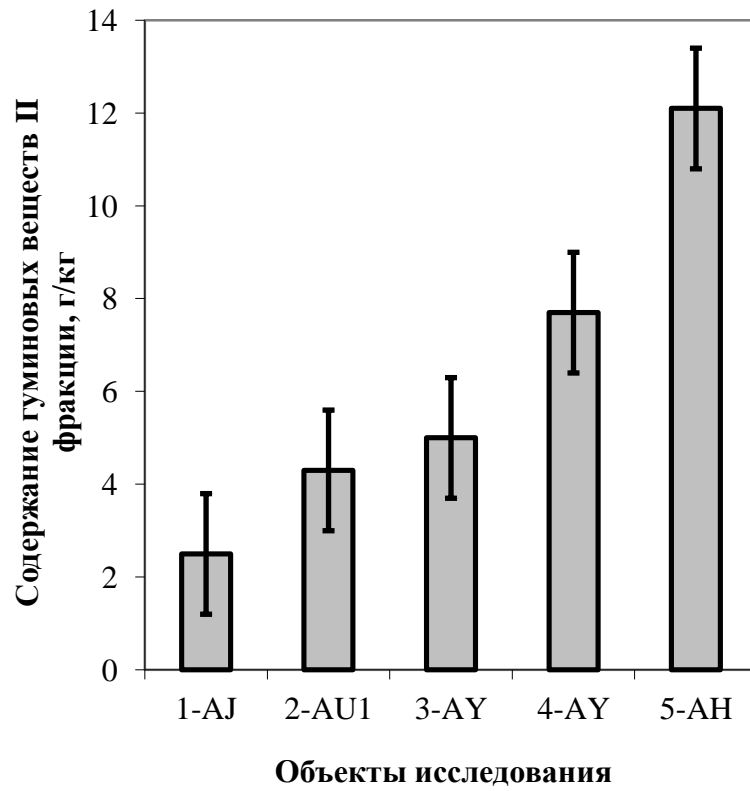


Рисунок 10. Содержание гуминовых веществ (ГВ-II).

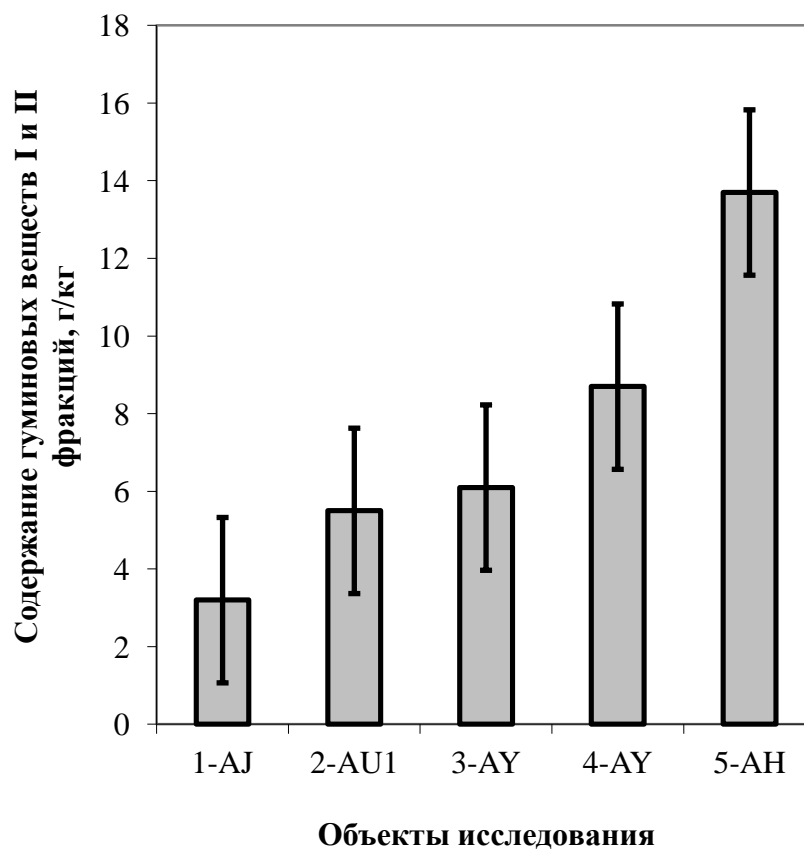


Рисунок 11. Суммарное содержание гуминовых веществ в ПОВ.

Из анализа оптических показателей растворов гуминовых веществ (табл. 2, 3) следует, что значения $Q_{4/6}$ ГВ-I были самыми высокими в горизонтах АУ бурозема и АН перегнойно-темногумусовой почвы и самыми низкими в горизонтах АУ1 чернозема миграционно-мицеллярного и АУ серой почвы. Значения $Q_{4/6}$ ГВ-II были наибольшими в горизонте АJ каштановой почвы, а наименьшими — в АУ1 чернозема миграционно-мицеллярного и АУ бурозема.

Судя по коэффициентам цветности, ГВ II фракции имели более высокую степень ароматичности по сравнению с ГВ I фракции (табл. 2, 3).

Таблица 2. Коэффициенты цветности гуминовых веществ I фракции.

Объекты исследования	Оптическая плотность, нм		$E_{465}:E_{650}$
	465	650	
1–AJ	0,656	0,046	14,26
2–AU1	1,245	0,106	11,75
3–AY	1,039	0,085	12,22
4–AY	0,579	0,033	17,55
5–АН	0,804	0,050	16,08

Таблица 3. Коэффициенты цветности гуминовых веществ II фракции.

Объекты исследования	Оптическая плотность, нм		$E_{465}:E_{650}$
	465	650	
1–AJ	0,049	0,009	5,44
2–AU1	0,245	0,067	3,66
3–AY	0,123	0,029	4,24
4–AY	0,188	0,053	3,55
5–АН	0,278	0,07	3,97

Общепринято, что, чем ниже оптические показатели ($Q_{4/6}$) растворов ГВ, тем больше степень конденсации молекул — преобладания ароматических структур над алифатическими (Кононова, 1963; Черников, Кончиц, 1972; Milori et al., 2002; Fasurova, Rospisilova, 2011). Известно, что значения $Q_{4/6}$ для ГК составляли: около 5,0 для подзолистых почв, 3,5 для темно-серых почв и 3,0–3,5 для черноземов, в то же время значения $Q_{4/6}$ для ФК всех почв колебались от 6,0 до 8,5 (Кононова, 1963).

Содержание липидов в горизонтах АУ бурозема, АУ1 чернозема миграционно-мицеллярного и АН перегнойно-темногумусовой почвы было равновеликим (рис. 12). Меньше всего липидов содержалось в горизонте А1 каштановой почвы, что можно объяснить более засушливыми климатическими условиями. Как было установлено, содержание липидов было связано с уровнем влагообеспеченности территории — чем больше поступление влаги в почвы, тем больше в них содержалось липидов. По нашему мнению, увеличение увлажненности почвы снижало вероятность гидролиза и биохимического окисления липидов.

Как известно (White, Ringelberg, 1998; Peacock et al., 2001; Pennanen, 2001), липиды по сравнению с другими органическими соединениями (например, белками, нуклеиновыми кислотами или углеводами) обладают более высокой термодинамической устойчивостью, поэтому эти органические соединения относительно накапливаются в почвах.

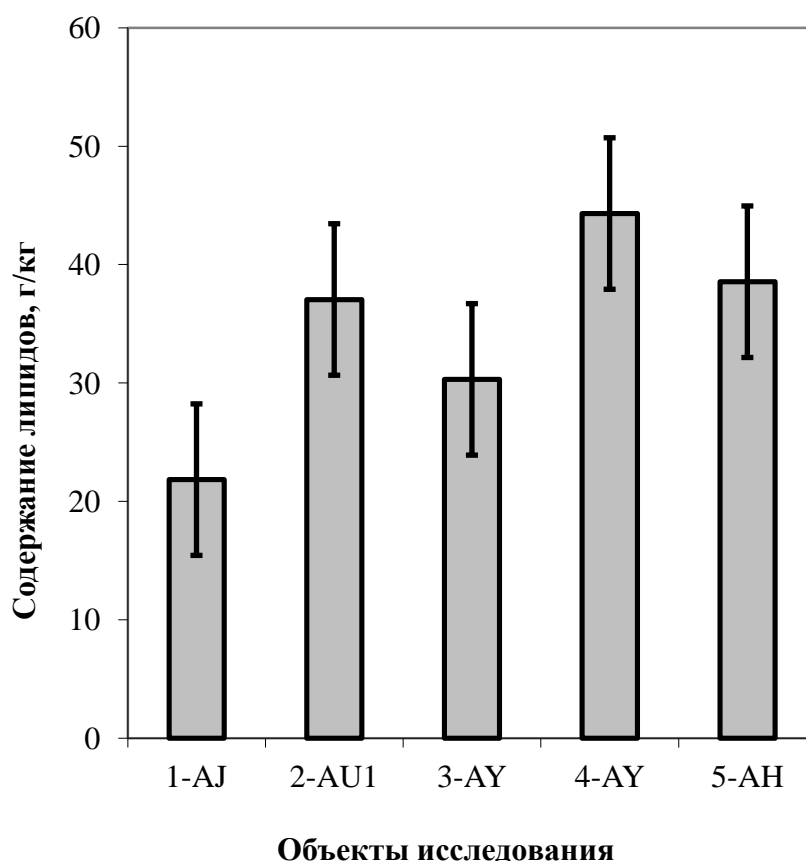


Рисунок 12. Содержание липидов в ПОВ, г/кг.

На рисунке 13 представлен компонентный состав ПОВ, выраженный в процентах от величины ППП.

Как показал анализ полученных нами данных (рис. 13), доля ГВ в ПОВ составляла менее 10 %. Значительная часть ПОВ приходилась на липиды (от 17,4 % в буроземе до 34,3 % в черноземе миграционно-мицеллярном), а также соединения белковой природы (предположительно гломалины), содержание которых варьировало в исследуемых почвах от 2,7 % до 49,3 %.

Большую часть ПОВ составляли органические соединения, которые не удалось идентифицировать. В эту группу соединений могут входить кероген, постморальные остатки биоты (по всей видимости, в виде детрита), а также индивидуальные органические соединения, нерастворимые в ацетоне.

Больше всего неидентифицированных соединений было выявлено в горизонтах АУ бурозема и АН перегнойно-темногумусовой почвы, меньше всего — в АУ1 чернозема миграционно-мицеллярного, что может быть связано с особенностями условий почвообразования в различных природных зонах.

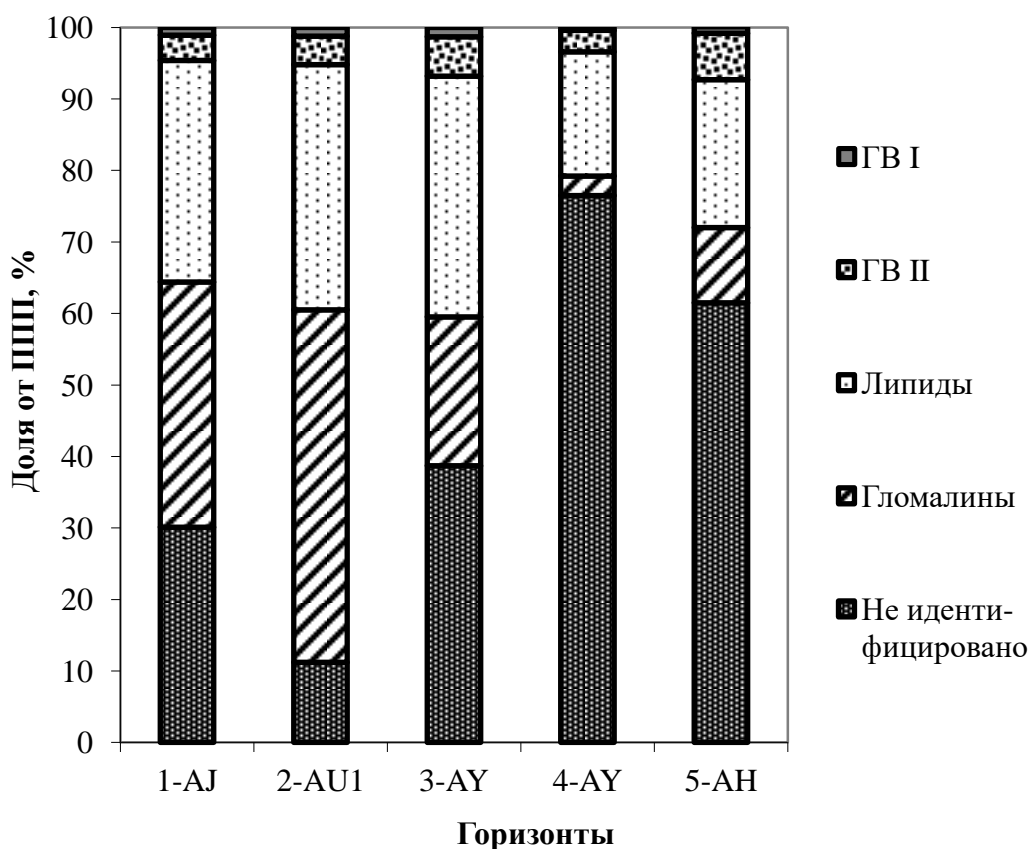


Рисунок 13. Компонентный состав почвенного органического вещества.

4. Выводы

1. Из почвенного органического вещества последовательно были выделены фотосинтетические пигменты (хлорофиллы *a*, *b*, c_1+c_2 , феофитин *a*, каротиноиды), белки (предположительно, гломалины), гуминовые вещества (предположительно, связанные с несиликатными полуторными оксидами и кальцием) и липиды.

2. Наибольшее количество всех фотосинтетических пигментов было обнаружено в горизонте АУ бурозема.

3. Показано, что при выделении гуминовых веществ в соответствии с новым способом, их содержание в ПОВ составляло менее 10 %.

4. Липиды и гломалины суммарно могут составлять более половины ПОВ. Причем содержание как липидов, так и гуминовых веществ возрастало с увеличением уровня влагообеспеченности территории.

5. Выявлено, что содержание гуминовых веществ было наибольшим в перегнойно-темногумусовой почве, испытывающей переувлажнение в результате воздействия на нее комплекса почвообразующих факторов.

Список литературных источников

1. Агроклиматический справочник по Крымской области. Ленинград: Гидрометеиздат, 1959, 135 с.
2. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров: Учебник для вузов. СПб.: СПбЛТА, 1999, 628 с.
3. Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980, 287 с.
4. Багрова С.М., Бронникова М.А., Власов О.П., Глазунов Г.П., Голеусов П.В., Григорьева Т.М., Гунова В.Н., Золотухин Н.И., Коркка М.А., Лукин С.В., Л.В. Непочатых, Пономаренко Е.В., Пушкина П.Р., Русаков А.В., Рыжков О.В., Рыжкова Г.А., Седов С.Н., Симакова А.Н., Соловиченко В.Д., Сычева С.А., Филатова Т.Д., Хитров Н.Б., Хохлова О.С., Чевердин Ю.И., Чендев Ю.Г., Шеремецкая Е.Д. Путеводитель научных полевых экскурсий VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с зарубежным участием научной конференции «Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны» (Белгород, 15–22 августа 2016 г.). Под ред. Ю.Г. Чендева. Москва-Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2016, 122 с.
5. Белозерская Т.А. Гидрофобины грибов: структура и функции // Микология и фитопатология, 2001. Т. 35. № 1. С. 3–11.
6. Берёзов Т.Т., Коровкин Б.Ф. Биологическая химия: Учебник / 3-е изд., перераб. и доп. М.: Медицина, 1998, 704 с.
7. Бирюкова О.Н., Орлов Д.С. О содержании хлорофилла в современных и погребенных почвах в ископаемых почвах и ископаемых осадках // Известия АН СССР. Биол. науки, 1978. № 6. С. 119–122.
8. Богородская Л.И., Конторович А.Э., Ларичев А.И. Кероген: методы изучения, геохимическая интерпретация. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005, 254 с.
9. Бриттон Г. Биохимия природных пигментов / Пер. с англ. М.: Мир, 1986, 422 с.
10. Бушнев Д.А., Бурдельная Н.С. Химическая структура керогена // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2010. № 9. Т. 189. С. 36–37.

11. Вильямс В.Р. Рецензия на диссертацию П.Р. Слёзкина «Этюды о гумусе» // Собрание сочинений. В двух томах. Т. 1. М.: Сельхозгиз, 1949. С. 238–253.
12. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972, 320 с.
13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований): Учебник для студентов / Изд-е 5-е, перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1985, 351 с.
14. Завгородняя Ю.А. Сравнительная характеристика гуминовых кислот и грибных меланинов. Автореф. дисс. канд. биол. наук. М.: МГУ, 2000, 22 с.
15. Звягинцев Д.Г., Мирчинк Т.Г. О природе гуминовых кислот почв // Почвоведение, 1986. № 5. С. 68–75.
16. Ковалев И.В. Биохимия лигнина в почвах. Автореф. дис. д. с.-х. наук. М., 2015, 50 с.
17. Козырев Ф.Н. Почвенный хлорофилл как индикатор переувлажнения почвы // Доклады ВАСХНИЛ, 1991. № 5. С. 30–33.
18. Колесников Б.А., Ларионов И.В., Шамцян М.М. Получение поверхностно-активных белков из глубинной культуры гриба *Trichoderma viride* // Известия С.-Петербург. гос. технологич. ин-та (технич. ун-та), 2014. № 25. С. 47–50.
19. Кононова М.М. Органическое вещество почвы, его природа, свойства и методы изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1963, 314 с.
20. Лактионов Н.И. Гумус как природное коллоидное поверхностно-активное вещество. Харьков, 1978, 25 с.
21. Лиштван И.И., Круглицкий Н.Н., Третинник В.Ю. Физико-химическая механика гуминовых веществ. Минск: Наука и техника, 1976, 262 с.
22. Лях С.П., Рубан Е.Л. Микробные меланины. М.: Наука, 1972, 185 с.
23. Макарычев С.В. Теплофизические свойства каштановых почв Кулундинской степи // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2016. № 3. С. 54–58.
24. Милановский Е.Ю. Амфифильные компоненты гумусовых веществ почвы // Почвоведение, 2000. № 6. С. 706–715.
25. Милановский Е.Ю., Шеин Е.В., Степанов А.А. Лиофильно-лиофобные свойства органического вещества и структуры почвы // Почвоведение, 1993. № 6. С. 122–126.

26. Мишустин Е.Н., Драгунов С.С., Пушинская О.И. Роль микроорганизмов в синтезе перегнойных соединений // Известия АН СССР, 1956. № 6. С. 83–94.
27. Никифоров А. Р., Костенко И. В. Почва и растительность карстовой воронки западного отрога плато Ай-Петри в Горном Крыму // Экосистемы, 2019. № 19. С. 54–60.
28. Олешко В.П., Гаркуша А.А., Пургин Д.В., Кравченко В.И. Продуктивность и экономическая эффективность зернопарового севооборота в Кулундинской степи в зависимости от агротехнологий // Земледелие, 2016. № 7. С. 27–30.
29. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990, 325 с.
30. Орлов Д.С. Химия почв. – М.: Изд-во МГУ, 1985, 376 с.
31. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996, 254 с.
32. Орлова О.В., Фомичева Т.Н. Технология лаков и красок: Учебник для техникумов. М.: Химия, 1990, 384 с.
33. Паников Н.С., Садовникова Л.К., Фридланд Е.Н. Неспецифические соединения почвенного гумуса. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984, 144 с.
34. Попов А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование. Под ред. Е.И. Ермакова. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2004, 248 с.
35. Попов А.И., Сун Гэ Гломалин — новая характеристика состояния агропочв? // Агроэкологический вестник. Вып. 8: Междунар. сб. науч. трудов. В двух частях Ч. 2. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. С. 51–56.
36. Попов А.И., Чертов О.Г. Биogeоценотическая роль органического вещества почв // Вестник С.-Петербур. ун-та, 1996. № 2. С. 88–97.
37. Попов А.И., Сазанова Е.В., Холостов Г.Д., Бирилко Д.А. Поправки к некоторым показателям гумусового состояния почв // Гуминовые вещества в биосфере / Материалы 7-й Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящённой 90-летию со дня рождения профессора Д.С. Орлова, и 3-й Междунар. науч. школы «Методы оценки биологической активности гуминовых продуктов (Москва, 4–8 декабря 2018 г.). М.: МАКС ПРЕСС, 2018. С. 27–28.

38. Попов А.И., Коноплина Л.Ю., Комолкина Н.А., Прилепа С.В., Сазанова Е.В., Холостов Г.Д. Компонентный состав почвенного органического вещества // *The Scientific Heritage*, 2021. № 65. С. 11–19.
39. Розенцвет О.А., Федосеева Е.В., Терехова В.А. Липидные биомаркеры в экологической оценке почвенной биоты: анализ жирных кислот // *Успехи современной биологии*, 2019. Т. 139. № 2. С. 1–17.
40. Саиз-Гименез С., Мартин Ф. Химическая структура гумусоподобного пигмента // *Известия АН СССР*, 1979. № 1. С. 59–64.
41. Семёнов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015, 233 с.
42. Семёнов В.М., Лебедева Т.Н., Паутова Н.Б. Дисперсное органическое вещество в необрабатываемых и пахотных почвах // *Почвоведение*, 2019. № 4. С. 440–450.
43. Слесарев В.И. Химия: Основы химии живого: Учебник для вузов / 2-е изд., испр. и доп. СПб: Химиздат, 2001, 784 с.
44. Трусов А.Г. Материалы к изучению почвенного гумуса / Часть 1-я. Процессы образования «гуминовой кислоты». Экспериментальное исследование. Петроград: Типография М.М. Стасюлевича, 1917, 210 с.
45. Туев Н.В. Микробиологические процессы гумусообразования. М.: Агропромиздат, 1989, 239 с.
46. Хьюз Р. Гликопротеины / Пер. с англ. М.: Мир, 1985, 140 с.
47. Чендев Ю.Г., Соэр Т.Д., Геннадиев А.Н., Новых Л.Л., Петин А.Н., Петина В.И., Заздравных Е.А., Буррас С.Л. Накопление органического углерода в черноземах (моллисолях) под полезащитными лесными насаждениями в России и США // *Почвоведение*, 2015. № 1. С. 49–60.
48. Черников В.А., Кончиц В.А. Сравнение показателей цветности (Q4/6 и A) растворов гуминовых веществ дерново-подзолистых почв и краснозёма // *Доклады Моск. с.-х. акад. им. К.Д. Тимирязева*, 1972. № 176. С. 45–49.
49. Чернов Д.В., Федорос Е.И., Попов А.И. Содержание хлорофиллоподобных соединений в профилях почв различной степени гидроморфизма // *Гумус и почвообразование / Сб. научн. трудов С.-Петербур. гос. аграрн. ун-та. СПб.*, 2000. С. 56–63.

50. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедев И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004, 342 с.
51. Beale S.I. Enzymes of chlorophyll biosynthesis // *Photosynth Res.*, 1999. V. 60. Is 1. P. 43–73.
52. Bedini S., Pellegrino E., Avio L., Pellegrini S., Bazzoffi P., Argese E., Giovannetti M. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices* // *Soil Biology and Biochemistry*, 2009. V. 41. Is. 7. P. 1491–1496.
53. Boguta P., Sokołowska Z. Influence of phosphate ions on buffer capacity of soil humic acids // *International Agrophysics*, 2012. V. 26. No. 1. P. 7–14.
54. Castle S.C., Morrison C.D., Barger N.N. Extraction of chlorophyll a from biological soil crusts: A comparison of solvents for spectrophotometric determination // *Soil Biology & Biochemistry*, 2011. V. 43. P. 853–856.
55. Coelho R.R.R., Sacramento D.R., Linhares L.F. Amino sugars in fungal melanins and soil humic acids // *European J. Soil Sci*, 1997. V. 48. P. 425–429.
56. de Smith M.J. *Statistical Analysis Handbook. A Comprehensive Handbook of Statistical Concepts, Techniques and Software Tools*. Edinburgh: The Winchelsea Press, Drumlin Security Ltd., 2018, 638 p.
57. Engebretson R.R., Von Wandruszka R. The effect of molecular size on humic acid associations // *Organic Geochemistry*, 1997. V. 26. Is. 11–12. P. 759–767.
58. Epstein E.A., Chapman M.R. Polymerizing the fibre between bacteria and host cells: the biogenesis of functional amyloid fibres // *Cellular Microbiology*, 2008. V. 10. P. 1413–1420.
59. Fasurova N., Pospíšilova L. Spectroscopic Characteristics of Humates Isolated from Different Soils // *Soil & Water Res*, 2011. V. 6. Is. 3. P. 147–152.
60. Flaig W. Organic compounds in soil // *Soil. Sci.*, 1971. V. 111. Is. 1. P. 19–33.
61. Haile-Mariam S., Collins H.P., Wright S., Paul E.A. Fractionation and long-term laboratory incubation to measure soil organic matter dynamics // *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2008. V. 72. P. 370–378.
62. Hayes M.H.B. Solvent systems for the isolation of organic components from soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006. V. 70. P. 986–994.

63. Hayes M.H.B., Clapp C.E. Humic substances: considerations of compositions, aspects of structure, and environmental influences // *Soil Sci.*, 2001. V. 166 P. 723–737.
64. Hoyt P.B. Chlorophyll-type compounds in soil. II. Their decomposition // *Plant and Soil*, 1966. V. 25. P. 313–328.
65. Hoyt P. Fate of chlorophyll in soil // *Soil Science*, 1971. V. 111. Is. 1. P. 49–53.
66. Kleber M., Lehmann J. Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems // *Journal of Environmental Quality*, 2019. V. 48. Is. 2. P. 207–216.
67. Liang C., Cheng G., Wixon D.L., Balsler T.C. An absorbing Markov Chain approach to understanding the microbial role in soil carbon stabilization // *Biogeochemistry*, 2011. V. 106. P. 303-309.
68. MacCarthy P. The principles of humic substances // *Soil Science*, 2001. V. 166. Is.11. P. 738–751.
69. Miller R.M., Reinhardt, D.R., Jastrow J.D. External hyphal production of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in pasture and tallgrass prairie communities // *Oecologia*, 1995. V. 103. P. 17–23.
70. Milori D.M.B.P., Martin-Neto L., Bayer C., Mielniczuk J., Bagnato V.S. Humification degree of soil humic acid determined by fluorescence spectroscopy // *Soil Science*, 2002. V. 167. P. 739–749.
71. Nichols K.A. Characterization of glomalin, a glycoprotein produced by arbuscular mycorrhizal fungi / Dissertation ... for the degree of Doctor of Philosophy, 2003, 285 c.
72. Nichols K.A., Wright S.F. Comparison of gloialin and humic acid in eight native U.S. soils // *Soil Science*, 2005. V. 170. Is. 12. P. 985–997.
73. Olk D.C., Gregorich E.G. Overview of the symposium proceedings. Meaningful pools in determining soil carbon and nitrogen dynamics. // *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006. V. 70. P. 967–974.
74. Peacock A.D., Mullen M.D., Ringelberg D.B. Soil microbial community responses to dairy manure or ammonium nitrate applications // *Soil Biol. & Biochem*, 2001. №33. P. 1011-1019.
75. Pennanen T Microbial communities in boreal coniferous forest humus exposed to heavy metals and changes in soil pH — a summary of the use of phospholipid fatty acids. *Biolog*

- (R) and H-3-thymidine incorporation methods in field studies // *Geoderma*, 2001. № 100. P. 91–126.
76. Piccolo A. The Supramolecular structure of humic substances. A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science // *Advances in Agronomy*, 2002. V. 75. P. 57–134.
77. Piccolo A., Conte P., Cozzolino A. Chromatographic and Spectrophotometric Properties of Dissolved HS Compared with Macromolecular Polymers // *Soil Sci*, 2001. V. 166. No. 3. P. 174–185.
78. Rillig M.C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin and soil quality // *Canadian Journal of Soil Science*, 2004. V. 84. P. 355–363.
79. Rillig M.C., Caldwell B.A., Wosten H.A.B., Sollins P. Role of proteins in soil carbon and nitrogen storage: controls on persistence // *Biogeochemistry*, 2007. V. 85. P. 25–44.
80. Ritchie R. Consistent sets of spectrophotometric chlorophyll equations for acetone, methanol and ethanol solvents // *Photosynthesis Research*, 2006. V. 89. P. 27–41.
81. Roca M, Chen K, Pérez-Gálvez A. Chapter 6: Chlorophylls // *Handbook on Natural Pigments in Food and Beverages: Industrial Applications for Improving Food Color*. Eds: R. Carle, R. Schweiggert. Woodhead Publishing (Elsevier), 2016. P. 125–158.
82. Sanger J.E. Identification and quantitative determination of plant pigment in soil humus // *Ecology*, 1971. V. 52. Is. 6. P. 959–963.
83. Schnitzer M. Humus Substances: Chemistry and Reactions // *Soil Organic Matter*. Eds. M. Schnitzer and S.U. Khan. *Development of Soil Sci*. Ottawa, 1978. No. 8. P. 1–64.
84. Simonart P., Mayaudon, J., Batistic, L. Étude de la décomposition de la matière organique dans le sol au moyen de carbone radioactif. IV. Décomposition des pigments foliaires // *Plant and soil*, 1959. V. 11. P. 176–80.
85. Simpson A.J., Simpson M.J., Smith E., Kelleher B.P. Microbially derived inputs to soil organic matter: Are current estimates too low? // *Environmental Science and Technol*, 2007. V. 41. P. 8070–8076.
86. Stahl W., Sies H. Antioxidant activity of carotenoids // *Molecular Aspects of Medicine*, 2003. V. 24. P. 345–351.
87. Steinberg P.D., Rillig M.C. Differential decomposition of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae and glomalins // *Soil Biol. Biochem*, 2003. V. 35. P. 191–94.

88. Sumanta N., Haque C.I., Nishika J., Suprakash R. Spectrophotometric Analysis of Chlorophylls and Carotenoids from Commonly Grown Fern Species by Using Various Extracting Solvents // *Research Journal of Chemical Sciences*. 2014. V. 4. Is. 9. P. 63–69.
89. Sun T., Tadmor Y., Li L. Pathways for Carotenoid Biosynthesis, Degradation, and Storage // *Plant and Food Carotenoids. Methods in Molecular Biology*. Eds M. Rodríguez-Concepción and R. Welsch. New York, NY: Humana, 2020. V. 2083 P. 3–23.
90. Sutton R., Sposito G. Molecular structure in soil humic substances: the new view // *Environmental Science and Technol*, 2005. V. 39. P. 9009–9015.
91. Tombácz E., Rice J.A. Changes of Colloidal State in Aqueous Systems of Humic Acids // *Understanding HS. Advanced Methods, Properties and Applications*. Edited by E.A. Ghabbour and G. Davies. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1999. P. 69–78.
92. Vallentyne J.R. Sedimentary chlorophyll determination as a paleobotanical method // *Can. J. Bot*, 1955. V. 33. P. 304–313.
93. von Wandruszka R. The Micellar Model of Humic Acid: Evidence From Pyrene Fluorescence Measurements // *Soil Sci*, 1998. V. 163. No. 12. P. 921–930.
94. von Wandruszka R. Humic acids: Their detergent qualities and potential uses in pollution remediation // *Geochem Trans*, 2000. V. 1. 10 p.
95. von Wandruszka R. Schimpf M., Hill M., Engebretson R. Characterization of humic acid size fractions by SEC and MALS // *Org. Geochem*, 1999. V. 30. No. 4. P. 229–235.
96. Walter M.H., Stauder R., Tissier A. Evolution of root-specific carotenoid precursor pathways for apocarotenoid signal biogenesis // *Plant Sci*, 2015. V. 233. P. 1–10.
97. White D.C., Ringelberg D.B. Signature lipid biomarker analysis // *Techniques in microbial ecology* / Eds R.S. Burlage, R. Atlas, D. Stahl, G. Geesey, G. Saylor. N.Y.: Oxford Univ. Press, 1998. P. 255-272.
98. Wright S.F., Franke-Snyder M., Morton J.B., Upadhyaya A. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots // *Plant Soil*, 1996. V. 181. Is. 2. P. 193–203.
99. Wright S.F., Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi // *Plant and soil*, 1998. V. 198. No. 1. P. 97–107.

- 100.Xiao W., Feng S., Liu Z., Su Y., Zhang Y., He X. Interactions of soil particulate organic matter chemistry and microbial community composition mediating carbon mineralization in karst soils // *Soil Biol. Biochem*, 2017. V. 107. P. 85–93.
- 101.Yilmaz C., Gökmen V. Chlorophyll // *Encyclopedia of Food and Health*, 2016. V. 2. P. 37–41.
- 102.Zapata M., Garrido J.L., Jeffrey S.W. Chlorophyll c Pigments: Current Status. In: Grimm B., Porra R.J., Rüdiger W., Scheer H. (eds) *Chlorophylls and Bacteriochlorophylls. Advances in Photosynthesis and Respiration*. Dordrecht: Springer, 2006. V. 25.

Приложение

Таблица 1. Содержание фотосинтетических пигментов в ПОВ.

Объекты исследования	Хлорофилл <i>a</i>	Хлорофилл <i>b</i>	Хлорофиллы c_1+c_2	Феофитин <i>a</i>	Каротиноиды
	мкг/кг почвы				
1–АJ	0,28	0,22	0,29	0,13	0,13
2–AU1	0,45	0,03	0,16	0,46	0,21
3–AY	0,14	0,17	0,20	0,36	0,13
4–AY	0,43	0,27	0,38	0,54	0,24
5–АН	0,29	0,12	0,02	0,46	0,11
F _{факт.}	42,60	80,21	96,08	44,41	33,41
F ₀₅	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48
HCP ₀₅	0,06	0,03	0,05	0,08	0,03

Таблица 2. Содержание гломалинов, ГВ-I и ГВ-II, липидов в ПОВ.

Объекты исследования	Гломалины	ГВ-I	ГВ-II	Липиды
	г/кг почвы			
1–АJ	24,15	0,77	2,47	21,83
2–AU1	53,33	1,27	4,28	37,05
3–AY	18,72	1,13	4,96	30,30
4–AY	6,86	1,03	7,70	44,31
5–АН	19,57	1,59	12,12	38,55
F _{факт.}	106,96	19,59	82,83	17,93
F ₀₅	3,48	3,48	3,48	3,48
HCP ₀₅	5,28	0,22	1,30	6,42