

УДК 504.53.06

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИСТОВОГО ОПАДА ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД В КАЧЕСТВЕ ПРИРОДНОГО СОРБЕНТА

**Пилецкая Анастасия Сергеевна,**

студент 4 курса

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологий и энергетики, Санкт-Петербург, Российская Федерация

piletzkaya2020@gmail.com

### Аннотация

В статье представлен сравнительный анализ химического состава листового опада пяти древесных пород (береза повислая, осина обыкновенная, клен остролистный, дуб черешчатый, липа мелколистная), широко распространенных в озеленении Санкт-Петербурга. Определены ключевые показатели: влажность, зольность, содержание экстрактивных веществ, танинов, лигнина и целлюлозы. Установлена прямая корреляция между высоким содержанием лигнина и танинов в опаде дуба черешчатого и его максимальной сорбционной способностью, описанной в литературе. Показано, что различия в химическом составе определяют потенциал использования опада каждой породы в качестве основы для природных сорбентов тяжелых металлов, что открывает перспективы для их экологически рациональной утилизации в рамках концепции циркулярной экономики.

**Ключевые слова:** листовой опад, природный сорбент, лигнин, танины, ионообменные свойства, тяжелые металлы, утилизация отходов, целлюлоза, древесные породы.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND PROSPECTS OF USING TREE LEAF LITTER AS A NATURAL SORBENT

**Piletskaya Anastasia Sergeevna,**

fourth-year student

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,  
Higher School of Technology and Energy,

Saint Petersburg, Russian Federation

### ABSTRACT

The article presents a comparative analysis of the chemical composition of the leaf litter of five tree species (hanging birch, aspen, holly maple, petiolate oak, small-leaved linden), widely distributed in the landscaping of St. Petersburg. The key indicators were determined: humidity,

ash content, extractive substances, tannins, lignin and cellulose. A direct correlation has been established between the high content of lignin and tannins in oak leaf litter and its maximum sorption capacity described in the literature. It is shown that differences in chemical composition determine the potential of using the litter of each rock as the basis for natural heavy metal sorbents, which opens up prospects for their environmentally sound disposal within the framework of the circular economy concept.

---

**Keywords:** leaf litter, natural sorbent, lignin, tannins, ion-exchange properties, heavy metals, waste disposal, cellulose, wood species.

---

Ежегодно на территориях городов образуются значительные объемы листового опада, который коммунальными службами рассматривается как отход, требующий вывоза и утилизации путем захоронения на полигонах или сжигания. Такой подход не только создает экономическую и экологическую нагрузку, но и игнорирует биогеохимическую роль опада как важнейшего звена круговорота веществ в природных экосистемах [1, 2]. С химической точки зрения листовая опад представляет собой сложный многокомпонентный природный материал. В его состав входят структурные биополимеры — целлюлоза, лигнин, гемицеллюлозы, а также разнообразные экстрактивные вещества, включая фенольные соединения, таннины и органические кислоты. Наличие в структуре этих компонентов кислородсодержащих функциональных групп (карбоксильных, фенольных гидроксильных, карбонильных) обуславливает принципиальную способность листового опада выступать в роли природного ионообменника и комплексообразователя по отношению к катионам металлов. Ранее было показано, что сорбционная способность опада напрямую зависит от его химического состава, который существенно различается у разных видов деревьев [3, 4]. Однако систематические сравнительные исследования химического состава опада наиболее распространенных в озеленении пород представлены в литературе фрагментарно. В связи с этим, целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа химического состава листового опада пяти древесных пород и оценка их потенциала как перспективного сырья для получения сорбционных материалов.

Объекты и методы исследования.

Объектами исследования служили образцы листового опада пяти древесных пород, широко используемых в озеленении Санкт-Петербурга и Ленинградской области: березы повислой (*Betula pendula*), осины обыкновенной (*Populus tremula*), клена остролистного (*Acer platanoides*), дуба черешчатого (*Quercus robur*) и липы мелколистной (*Tilia cordata*). Сбор опада производился в период массового листопада (сентябрь-октябрь) с поверхности почвы на участках, удаленных от автомобильных дорог, для минимизации техногенного загрязнения. Подготовка проб к анализу включала очистку от посторонних включений, высушивание до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре и измельчение. В подготовленных образцах определяли следующие показатели с использованием стандартизированных методик [5]: влажность ( $W$ , %) — гравиметрическим методом путем высушивания навески до постоянной массы при  $105^{\circ}\text{C}$ ; зольность ( $A$ , %) — методом сухого озоления в муфельной печи при  $600^{\circ}\text{C}$ ; содержание веществ, экстрагируемых горячей водой ( $E$ , %) — путем обработки навески дистиллированной водой на кипящей водяной бане в течение 3 часов, на основе этих данных рассчитывали коэффициент экстрагирования ( $K_{\text{э}} = (100 - E)/100$ ); содержание танинов ( $T$ , %) — титриметрическим методом Левенталю (перманганатометрическое титрование); содержание лигнина ( $L$ , %) — сернокислотным методом Комарова, основанным на гидролизе полисахаридов концентрированной серной

кислотой; содержание целлюлозы (С, %) – азотнокислотным методом Кюршнера и Хоффера.

Результаты химического анализа образцов листового опада пяти древесных пород представлены в Таблице 1.

Полученные данные демонстрируют существенные межвидовые различия по всем изученным показателям.

| Образец            | W, % | Ксух | A, %  | E, %  | Кэ     | T, %  | Л, % | С, %  |
|--------------------|------|------|-------|-------|--------|-------|------|-------|
| Береза повислая    | 8,67 | 0,91 | 0,102 | 8,26  | 0,9174 | 6,68  | 33,9 | 19,6  |
| Осина обыкновенная | 9,68 | 0,90 | 0,099 | 7,54  | 0,9246 | 4,59  | 30,1 | 23,06 |
| Клен остролистный  | 8,89 | 0,91 | 0,139 | 5,16  | 0,9484 | 4,59  | 34,1 | 15,4  |
| Дуб черешчатый     | 8,97 | 0,91 | 0,108 | 14,57 | 0,8543 | 12,46 | 60,2 | 19,7  |
| Липа мелколистная  | 7,60 | 0,92 | 0,131 | 11,29 | 0,8871 | 5,68  | 30,6 | 21,9  |

Анализ влажности (W) показывает, что наибольшей влагоемкостью обладает свежесобранный опад осины (9,68%), что, вероятно, связано с морфологическим строением ее листовой пластинки. Наименьшая влажность зафиксирована у липы мелколистной (7,60%), что может свидетельствовать о физиологической готовности этого вида к зимнему периоду покоя. Зольность (A) отражает содержание минеральных элементов в опаде. Максимальные значения этого показателя отмечены у клена остролистного (0,139%) и липы мелколистной (0,131%), что указывает на активное накопление этими породами минеральных веществ в течение вегетационного периода [1]. Минимальная зольность у осины обыкновенной (0,099%) говорит о меньшем содержании минеральных компонентов в ее листовой массе.

Содержание экстрактивных веществ (E), извлекаемых горячей водой, является важнейшей характеристикой, так как в эту группу входят низкомолекулярные углеводы, органические кислоты, аминокислоты и, что особенно важно, часть фенольных соединений, включая танины [5]. Максимальное значение (14,57%) зафиксировано для дуба черешчатого, что более чем в 2,5 раза превышает минимальное значение, обнаруженное у клена остролистного (5,16%). Коэффициент экстрагирования (Кэ), показывающий долю нерастворимого остатка, закономерно минимален для дуба (0,8543). Содержание танинов (T) – один из ключевых показателей для оценки сорбционного потенциала. Подтверждена видовая специфика дуба черешчатого, содержание танинов в опаде которого (12,46%) более чем вдвое выше, чем у березы (6,68%) и почти втрое выше, чем у осины и клена (по 4,59%). Высокое содержание танинов коррелирует с известной устойчивостью дубового опада к разложению и его способностью к комплексообразованию с ионами металлов [3, 4, 6].

Содержание лигнина (Л), наиболее устойчивого к биodeградации компонента клеточной стенки, также максимально у дуба черешчатого (60,2%). Это значение практически вдвое превышает содержание лигнина у других исследованных пород (30,1–34,1%). Клен остролистный и береза повислая содержат 34,1% и 33,9% лигнина соответственно, тогда как минимальные значения отмечены у осины (30,1%) и липы (30,6%) [3, 4, 7]. Содержание целлюлозы (С) варьирует от 15,4% у клена остролистного до 23,06% у осины обыкновенной. Высокое содержание целлюлозы в опаде осины и липы (21,9%) в

сочетании с низким содержанием лигнина может способствовать более быстрой биодеструкции их опада в естественных условиях [1, 2].

Проведенный анализ позволяет четко дифференцировать исследованные породы по их потенциальной сорбционной способности, определяемой химическим составом. Согласно литературным данным, наибольший вклад в сорбцию ионов тяжелых металлов вносят лигнин, с его разветвленной сеткой ароматических колец и фенольными гидроксильными группами, а также танины, выступающие в роли эффективных хелатирующих агентов [3, 4, 6]. Исходя из этого, дуб черешчатый является безусловным лидером и наиболее перспективным сырьем. Сочетание экстремально высокого содержания лигнина (60,2%) и максимального количества танинов (12,46%) создает уникальную матрицу с огромным количеством потенциальных центров связывания катионов металлов как по ионообменному, так и по комплексообразовательному механизмам. Это полностью согласуется с данными [4], где опад дуба демонстрировал наивысшую сорбционную емкость по отношению к ионам железа.

Береза повислая и клен остролистный занимают промежуточное положение. Они содержат умеренное количество лигнина (~34%) и значительно меньше танинов, чем дуб. Их сорбционная способность, согласно [4], будет ниже, однако их опад является более доступным и многотоннажным видом отходов озеленения. Осина обыкновенная и липа мелколистная характеризуются минимальным содержанием лигнина (около 30%) и невысоким содержанием танинов. Их нативная сорбционная емкость, вероятно, будет наименьшей среди исследованных пород. Однако, благодаря меньшей степени лигнификации клеточных стенок, их растительная матрица может быть более доступна для различных видов химической или физической модификации, направленной на увеличение сорбционных свойств.

Наличие функциональных групп в составе биополимеров опада предопределяет механизмы сорбции. Карбоксильные группы целлюлозы и гемицеллюлоз участвуют в катионном обмене, а фенольные гидроксильные группы лигнина и орто-дигидроксильные группы танинов образуют с ионами металлов устойчивые комплексы [3, 6]. В исследовании [4] показано, что сорбция ионов  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  листовым опадом протекает в две стадии: быстрая (первые 30-60 минут) и медленная, причем процесс является лишь частично обратимым. Регенерация позволяет восстановить не более 40% исходной емкости, что указывает на необратимое хемосорбционное связывание части ионов. Это позволяет рассматривать листовую опад как эффективный материал для одностадийной очистки загрязненных сред с последующей утилизацией насыщенного сорбента, что решает одновременно и задачу очистки, и задачу утилизации самого отхода.

В результате проведенного сравнительного анализа химического состава листового опада пяти древесных пород можно сделать следующие выводы. Установлены статистически значимые межвидовые различия по содержанию влаги, зольности, экстрактивных веществ, танинов, лигнина и целлюлозы, что определяет дифференцированный подход к оценке их сорбционного потенциала. Максимальное содержание ключевых для сорбции компонентов – лигнина (60,2%) и танинов (12,46%) – характерно для опада дуба черешчатого (*Quercus robur*). Это позволяет рассматривать его как наиболее перспективное сырье для получения эффективных природных сорбентов тяжелых металлов. Опад березы повислой (*Betula pendula*) и клена остролистного (*Acer platanoides*) характеризуется средними показателями и может использоваться как основа для сорбционных материалов с умеренной емкостью. Опад осины обыкновенной (*Populus tremula*) и липы мелколистной (*Tilia cordata*), обладая минимальным содержанием лигнина, является наименее эффективным в нативном виде, однако представляет интерес для последующих исследований по химической или физической модификации. Выявленные

закономерности обосновывают необходимость перехода от стратегии удаления листового опада как отхода к его рациональному использованию в качестве возобновляемого сырья для получения функциональных материалов, что соответствует принципам «зеленой химии» и циркулярной экономики.

#### Список литературы:

1. Иванова Е. А. Формирование и разложение древесного опада в лесных экосистемах в фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4. № 3. Ст. 87.
2. Брянин С. В., Абрамова Е. Р. Опад фитомассы в постпирогенных лиственничниках Зейского заповедника (Верхнее Приамурье) // Сибирский лесной журнал. 2017. № 2. С. 93–101.
3. Никифорова Т. Е., Козлов В. А., Модина Е. А. Сольватационно-координационный механизм сорбции ионов тяжелых металлов целлюлозосодержащим сорбентом из водных сред // Химия растительного сырья. 2010. № 4. С. 23–30.
4. Шаймарданова А. Ш., Степанова С. В., Шайхиев И. Г. Исследование возможности многократного использования листового опада в качестве сорбционного материала по отношению к ионам железа // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. № 7. С. 164–172.
5. Оболенская А. В., Ельницкая З. П., Леонович А. А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
6. Hagerman A. E. Extraction of tannin from fresh and preserved leaves // Journal of Chemical Ecology. 1988. Vol. 14. No. 2. P. 453–461.
7. Fengel D., Wegener G. Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin: Walter de Gruyter, 1984. 613 с.

#### References:

1. Ivanova E. A. Formation and decomposition of wood litter in forest ecosystems under background conditions and under aerotechnogenic pollution // Voprosy lesnoi nauki. 2021. Vol. 4. No. 3. P. 87.
2. Bryanin S. V., Abramova E. R. Phytomass litter in post-pyrogenic larch forests of the Zeisky Nature Reserve (Upper Amur Region) // Siberian Forestry Journal. 2017. No. 2. Pp. 93–101.
3. Nikiforova T. E., Kozlov V. A., Modina E. A. Solvation-coordination mechanism of heavy metal ion sorption by a cellulose-containing sorbent from aqueous media // Chemistry of plant raw materials. 2010. No. 4. Pp. 23–30.
4. Shaimardanova A. Sh., Stepanova S. V., Shaikhiev I. G. Study of the possibility of repeated use of leaf litter as a sorption material for iron ions // News of universities. Applied chemistry and biotechnology. 2017. Vol. 7. No. 7. pp. 164–172.
5. Obolenskaya A. V., Elnitskaya Z. P., Leonovich A. A. Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose. Moscow: Ecology, 1991. 320 p.
6. Hagerman A. E. Extraction of tannin from fresh and preserved leaves // Journal of Chemical Ecology. 1988. Vol. 14. No. 2. pp. 453–461.
7. Fengel D., Wegener G. Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin: Walter de Gruyter, 1984. 613 pp.