УДК: 574:502/504:911.2

Рожкова Елена Владимировна, старший преподаватель, аспирант
(ЮТИ ТПУ, г. Юрга)
Elena V. Rozhkova, Senior Lecturer, PhD Student
(YTI TPU, Yurga)
Перегудина Елена Владимировна, старший преподаватель, к.г.-м.н.
(ТПУ, г. Томск)
Elena V. Peregudina, Senior Lecturer, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences
(TPU, Tomsk)
Барановская Наталья Владимировна, профессор, д.б.н.
(ТПУ, г. Томск)
Natalia V. Baranovskaya, professor, doctor of Sciences in Biology
(TPU, Tomsk)

МИКРОМИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ НА ЛИСТЬЯХ ТОПОЛЯ КАК ИНДИКАТОР ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

BIOINDICATION OF ATMOSPHERIC POLLUTION BY MINERAL INCLUSIONS ON POPLAR LEAF BLADES IN THE TERRITORY OF YURGA

Аннотация

Методом СЭМ-ЭДС изучен минеральный состав микрочастиц на листьях тополя (*Populus nigra* L.) в г. Юрга. Идентифицированы техногенные фазы, содержащие редкоземельные элементы (La, Ce, Nd, Th – предположительно монацит), циркон и торий, железо-кремниевые агрегаты. Состав и морфология частиц согласуются с данными о выбросах ТЭЦ и металлургических предприятий города [1]. Листья тополя – эффективный биоиндикатор источников техногенного загрязнения.

Annotation

The mineral composition of microparticles on poplar leaves (*Populus nigra* L.) in Yurga was studied by SEM-EDS. Technogenic phases were identified: monazite (La, Ce, Nd, Th), zircon (Zr, Th), and Fe-Si aggregates. The composition and morphology of the particles agree with literature data on emissions from CHP plants and metallurgy [1]. Poplar leaves are an effective bioindicator of technogenic pollution sources.

Современный этап развития биосферы сопровождается усилением антропогенной нагрузки, обусловленной ростом промышленности, энергетики и урбанизационных процессов [1]. Особую озабоченность

вызывает состояние экосистем Кузбасса – региона с высокоразвитой угледобывающей и металлургической промышленностью, где активное освоение минерально-сырьевой базы приводит к трансформации природных геохимических ландшафтов [1]. Малые и средние промышленные города, где предприятия теплоэнергетики, машиностроения и транспорта создают сложный полиэлементный ореол загрязнения, требуют особого внимания, поскольку система экологического мониторинга в них часто недостаточно развита [2, 3].

Для оценки аэрозольного загрязнения широко используются методы биоиндикации, основанные на способности растений накапливать поллютанты из атмосферы [4]. Листья древесных растений, в частности тополя (*Populus* spp.), благодаря высокой пылеудерживающей способности, большой листовой поверхности и повсеместному распространению в городской среде, признаны эффективными биоиндикаторами техногенного загрязнения [5, 7]. Листья тополя накапливают химические элементы как из почвы (через корневую систему), так и из атмосферы (путём осаждения аэрозолей на листовую поверхность), что позволяет рассматривать их в качестве интегрального индикатора полиэлементного загрязнения [7, 8].

Актуальным является изучение минерального состава микрочастиц на поверхности листьев тополя на территории г. Юрга – типичного малого промышленного города Кемеровской области, где функционируют Юргинская ТЭЦ, предприятия машиностроения и металлургии (ферросплавные и машиностроительные заводы), химической промышленности, стройиндустрии, а также крупный железнодорожный узел [4]. Цель настоящей работы – идентификация микроминеральных включений на поверхности листьев тополя для выявления источников аэрозольного загрязнения и оценки биоиндикационных свойств данного субстрата.

Листья тополя чёрного (*Populus nigra* L.) отобраны в сентябре 2024 г. на пяти участках г. Юрга, приуроченных к различным промышленным зонам. Листья не промывали для сохранения пылевой составляющей. Исследование выполнено на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с энергодисперсионной приставкой Bruker XFlash 5010 на базе Отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ.

Среди осаждённых микрочастиц зафиксированы алюмосиликатные частицы (Si, Al, Fe, Ca, Mg, K), перекрывающие устьичные щели (рис. 1), что свидетельствует о негативном воздействии аэрозольного загрязнения на физиологическое состояние растений [4].

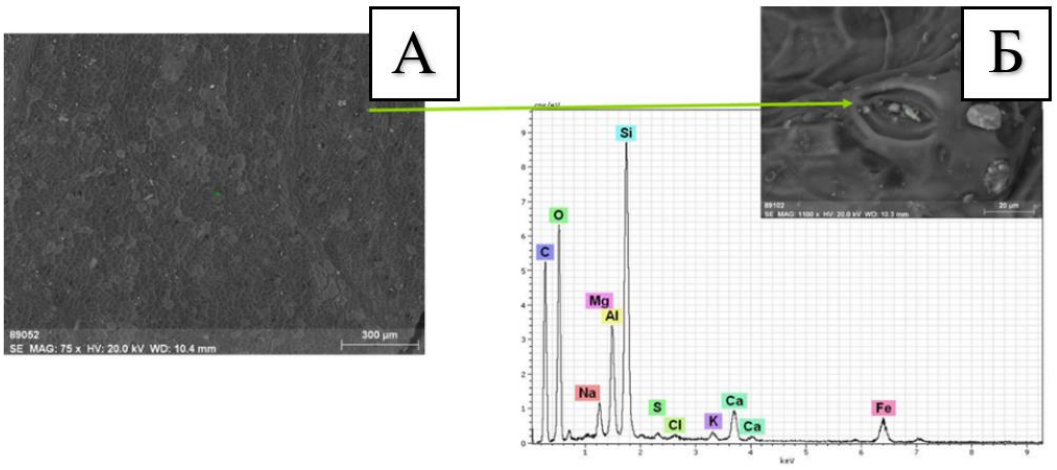

Рис. 1 – Общий вид листа (А) и минеральные фазы на поверхности листа тополя в области устьица (Б)

Также на поверхности листа тополя (рис. 2 (А)) обнаружена микрочастица размером около 2 мкм, основными элементами которой являются церий, лантан, неодим, торий, фосфор и кремний. Состав частицы соответствует предположительно монациту ($(Ce,La,Nd)PO_4$), ассоциированному с алюмосиликатной матрицей.

На рисунке 2 (Б) представлена микрочастица размером около 5 мкм, основными компонентами которой являются Zr и Si, с примесью Th, а также Al, Ca, K, Fe, Mg. Состав частицы соответствует предположительно циркону ($ZrSiO_4$) с примесью Th, ассоциированному с алюмосиликатной матрицей. Обнаруженные частицы имеют техногенное происхождение и, вероятнее всего, являются продуктом высокотемпературного сжигания угля на ТЭЦ, в котором циркон и торий концентрируются в золе и поступают в атмосферу [1].

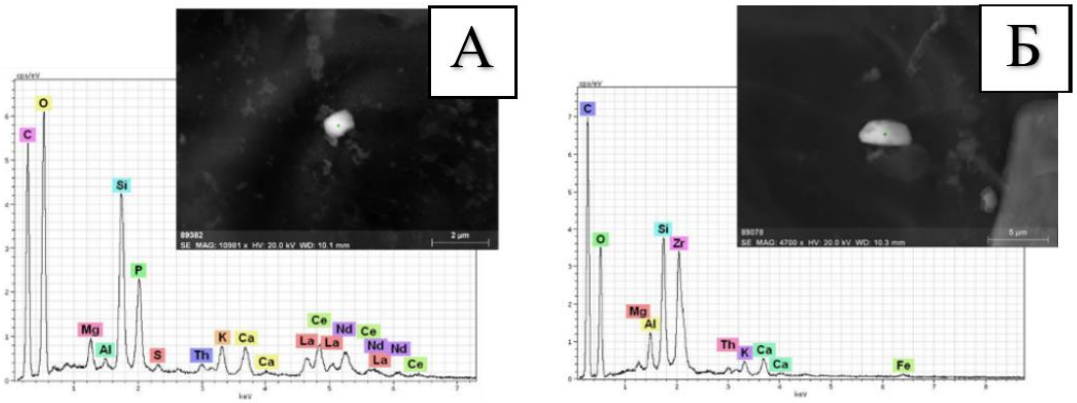

Рис. 2 – Минеральные фазы на поверхности листа тополя.

Примечание: А – Ce-La-Nd-Th-P-Si - содержащая минеральная фаза, по составу близкая к монациту; Б – Zr-Si-Th-содержащая минеральная фаза, по составу близкая к циркону ($ZrSiO_4$) с примесью Th.

Обнаружена железосодержащая сферула размером около 2 мкм на поверхности листа (рис. 3). Частица имеет сферическую форму и

техногенное происхождение. Наиболее вероятным источником является ферросплавный завод, где при производстве ферросилиция образуются мелкодисперсные железосодержащие аэрозоли.

Полученные данные согласуются с результатами ИНАА тех же проб: для Th, La, Ce, Nd, Fe, Co, Cr и Br рассчитанные коэффициенты концентрации (КК) относительно «референтного растения» (по Маркерту – 1992) и регионального фона (по Юсупову – 2022) превышают 1 в соответствующих функциональных зонах [6, 8]. Для Ca, Sr и Ba выявлено природное обогащение, обусловленное геологическим строением территории; их дополнительный прирост вблизи промышленных объектов свидетельствует о техногенном вкладе [2, 3].

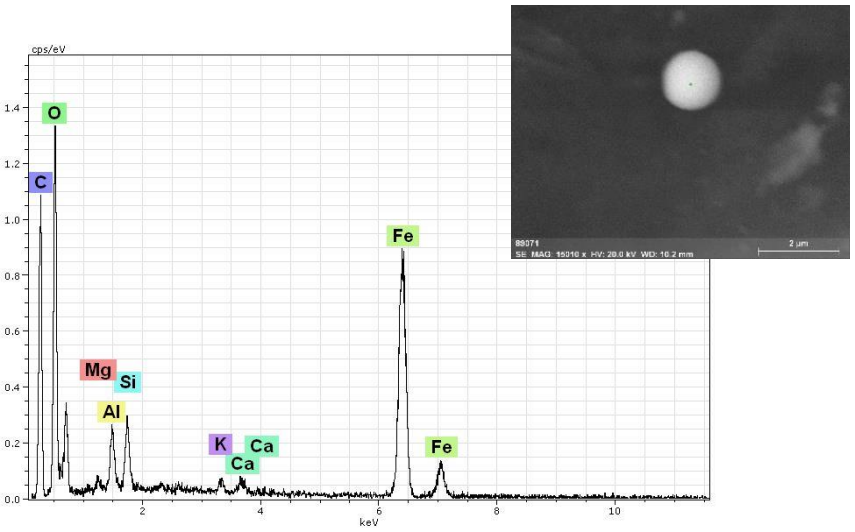

Рис.3 – Железосодержащая сферула на поверхности листа тополя

Методом СЭМ-ЭДС на поверхности листьев тополя идентифицированы микрочастицы различных техногенных минеральных фаз: монацит (РЗЭ + Th), циркон (Zr + Th) и железо-кремниевые агрегаты. Выявленные минеральные ассоциации коррелируют с выбросами конкретных промышленных источников: ТЭЦ, котельные (монацит, циркон) и ферросплавного завода (Fe-агрегаты).

Микрочастицы имеют характерную округлую (оплавленную) и неправильную осколочную морфологию, что свидетельствует об их высокотемпературном происхождении и осаждении из атмосферы. Листья тополя являются эффективным биоиндикатором для визуальной и аналитической идентификации источников техногенного аэрозольного загрязнения в малых промышленных городах.

Список литературы

1. Арбузов, С. И. Геохимические исследования углей в Сибири [Текст] / С. И. Арбузов, Л. П. Рихванов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2009. – Т. 314, № 1. – С. 96–100.

2. Перегудина, Е. В. Элементный состав листьев тополя в оценке техногенного загрязнения и обосновании перехода на малоотходные технологии (на примере г. Юрга) [Текст] / Е. В. Перегудина, Е. В. Рожкова // Инновационные технологии в машиностроении : сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции. – Томск, 2026. – С. 174–176.

3. Рожкова, Е. В. Элементный состав листьев тополя (*Populus Nigra* L.) на территории города Юрга [Текст] / Е. В. Рожкова, Е. В. Перегудина // Проблемы геохимической экологии в условиях техногенеза биосферы : материалы XIV Международной биогеохимической школы-конференции. – Томск, 2025. – С. 635–637.

4. Юсупов, Д. В. Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий [Текст] / Д. В. Юсупов, Л. П. Рихванов, Н. В. Барановская, А. Р. Ялалтдинова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 6. – С. 25–36.

5. Levei, L. Use of Black Poplar Leaves for the Biomonitoring of Air Pollution in an Urban Agglomeration [Text] / L. Levei, O. Cadar, V. Babalau-Fuss [et al.] // Plants. – 2021. – Vol. 10, No. 3. – P. 548. – DOI: 10.3390/plants10030548.

6. Markert, B. Presence and significance of naturally occurring chemical elements of the periodic system in the plant organism / B. Markert. – Text : direct // Vegetatio. – 1992. – Vol. 103. – P. 1–30.

7. Perri, G. Nature-Based Options for Improving Urban Environmental Quality: Using Black Poplar Trees for Monitoring Heavy Metals Pollution in Urbanized Contexts [Text] / G. Perri, D. Gargano, L. Randazzo [et al.] // Resources. – 2024. – Vol. 13, No. 6. – P. 85. – DOI: 10.3390/resources13060085.

8. Юсупов, Д. В. Методология биогеохимической индикации урбанизированных и горнопромышленных территорий на основе анализа древесной растительности : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук : спец. 1.6.21 / Д. В. Юсупов ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет ; науч. конс. Л. П. Рихванов, Н. В. Барановская. – Томск, 2022.