

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛИСТОВЫХ ПЛАСТИН БЕРЕЗЫ И ОСИНЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ТЕХНОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Гурова Н.Н.¹, Дигурова И.И.², Гусев С.Д.³

¹ Сибирский федеральный университет

пр. Свободный, 79/10, г. Красноярск, 660041, РФ; e-mail: nina-guro@mail.ru

² Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова
ул. Островитянова, 1, г. Москва, 117997, РФ; e-mail: digurova56@mail.ru

³ Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого
Минздрава России

ул. Партизана Железняка, 1, г. Красноярск, 660022, РФ; e-mail: sgd53@rambler.ru

Поступила в редакцию: 07.07.2021

Аннотация. В статье рассматриваются результаты исследования морфометрических показателей листьев основных лесобразующих пород около постоянно действующего факела по сжиганию попутных газов. Сравнительному анализу подвергались результаты измерения периметра и площади листовых пластин, а также фрактального параметра – отношения периметра листа к корню квадратному из его площади. Длительное влияние техногенного фактора на смешанное осиново-березовое насаждение оценивалось с помощью альтернативных математических методов, направленных на возможное обнаружение скрытой информации и обеспечивающих надежную интерпретацию в крупных массивах данных. Полученные результаты позволили предположить наличие оптимизации морфометрических параметров листьев, более выраженной у березы. Вдоль трансекты фрактальный показатель возрастал при приближении к источнику загрязнения.

Ключевые слова: морфометрия листовой пластины, факел сжигания попутных газов, осиново-березовое насаждение.

Реакция растений на воздействия выбросов промышленных предприятий позволяет оценить глубину экологической проблемы и выявить возможные адаптационные изменения. Из комплекса морфологических параметров важными для оценки устойчивости древесного растения к техногенным воздействиям и его адаптивного потенциала являются линейные размеры и площадь листовой пластинки. В работах разных авторов отмечают разные направления изменений морфометрических показателей при воздействии вредных факторов техногенного характера. Так некоторые исследователи не обнаружили изменений площади листьев березы в ответ на негативное воздействие [1]. В то же время другие авторы отмечают наличие разных компенсаторных реакций древесных растений на техногенный стресс: а) аномальное увеличение площади листовой пластинки [2, 3] и б) уменьшение площади листовой пластинки [4-9]. Во втором случае наибольшие значения наблюдаются на самых дальних от источника загрязнения исследованных участках [10]. Снижение площади листа расценивается как адаптационные изменения [11]. На этот показатель влияет тип загрязнения [12] и время воздействия неблагоприятного фактора. Многие авторы отмечают, что при длительном пребывании в условиях техногенеза у растений наблюдается уменьшение линейных размеров и площади листьев [13, 14]. Однако роль многолетнего влияния факелов по сжиганию попутных газов, действующих на нефтеперерабатывающих заводах и удаленных от населенных пунктов, недостаточно изучена. В том числе, мало информации о влиянии данного техногенного фактора на морфометрические показатели лесобразующих пород в естественных насаждениях умеренной зоны, примыкающих к промышленным центрам. В связи с этим ранее нами было проведено исследование морфологических параметров листьев березы и осины около действующего факела для сжигания попутных газов Ачинского нефтеперерабатывающего завода. Анализ полученных данных с использованием стандартных методов описательной статистики не выявил статистически значимых изменений средних значений морфометрических показателей в зоне 30-летнего техногенного воздействия вдоль трансекты, пересекающей естественное березово-осиновое насаждение в направлении преобладающих ветров. Также не отмечено статистически значимых различий при сравнении с фоновыми значениями [15, 16]. Однако применение альтернативных математических методов (классификационный анализ - Divisive Analysis и непараметрический критерий Краскела-Уоллиса) позволило получить дополнительную информацию и возможность новой интерпретации экспериментальных данных [16, 17]. В результате была отвергнута нулевая гипотеза о том, что периметр и площадь листовых пластин каждой из изучаемых древесных пород для разных площадок трансекты и удаленного фона относятся к одной совокупности. Таким образом, на разных расстояниях от факела было выявлено различие исследуемых показателей; также отмечено уменьшение размеров листовых пластин на участке, более приближенном к факелу. Целью настоящей работы явился сравнительный анализ морфометрических показателей листьев березы и осины при длительном воздействии факела по сжиганию попутных газов, в том числе фрактального показателя (отношения периметра листовой пластины к корню квадратному из ее площади). В этом случае использовались данные, полученные на удаленном фоне (13,5 км от факела), а также на наветренной и подветренной опушках (соответственно 500 м и 800 м от факела).

Диаграммы Box-and-Whisker-Plot, компактно изображающих распределение вероятностей и характеризующих плотность группировки данных, представлены на рисунках 1-4. Для морфометрических показателей обеих древесных пород имело место сужение прямоугольников, в которых заключено 50% наблюдений в 1,2-1,4 раза (за исключением площади листа березы). В то же время интерквартильный размах значений периметра листа березы с наветренной стороны был сужен в 1,7 раза, а его площади – в 2,2 раза по сравнению с фоновыми значениями. Для площади листа осины и его периметра наблюдалось уменьшение интерквартильного размаха в 1,2 и 1,3 раза соответственно по сравнению с контрольными значениями.

Полученные результаты могут свидетельствовать об оптимизации изучаемых показателей вследствие продолжительного действия техногенного фактора, причем менее выраженной для листа осины по сравнению с такими же показателями для листовой пластины березы. Возможно, причиной являются различия в степени устойчивости к неблагоприятному воздействию [1, 18].

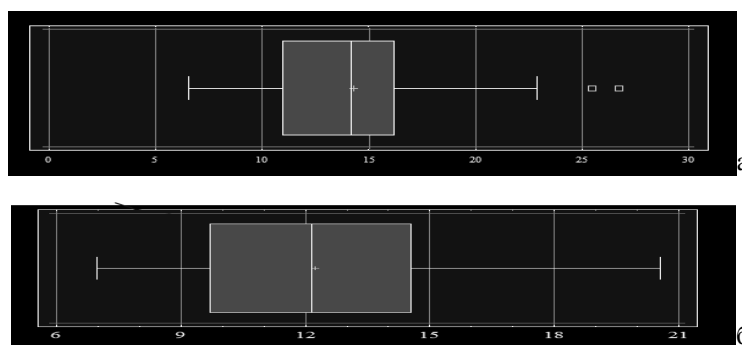


Рисунок 1. Диаграммы Box-and-Whisker-Plot. Площадь листовой пластины березы на удаленном фоне (а) и на опушке с наветренной стороны (б)

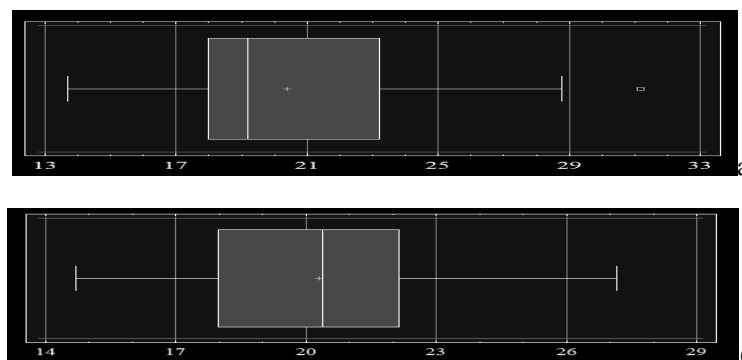


Рисунок 2. Диаграммы Box-and-Whisker-Plot. Периметр листовой пластины березы на удаленном фоне (а) и на опушке с наветренной стороны (б)

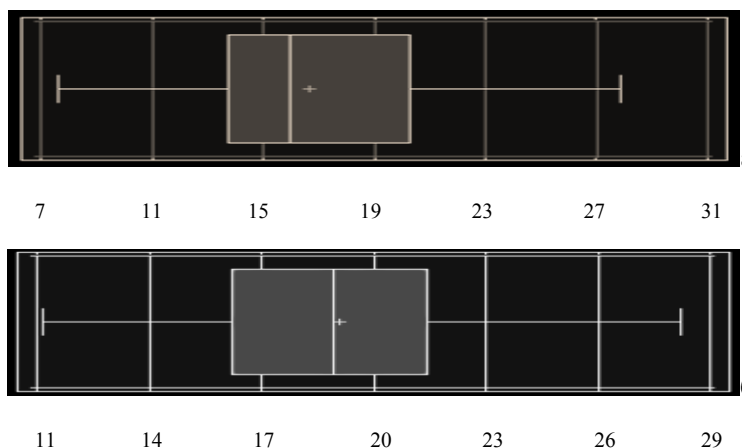


Рисунок 3. Диаграммы Box-and-Whisker-Plot. Площадь листовой пластины осины на удаленном фоне (а) и на опушке с наветренной стороны (б)

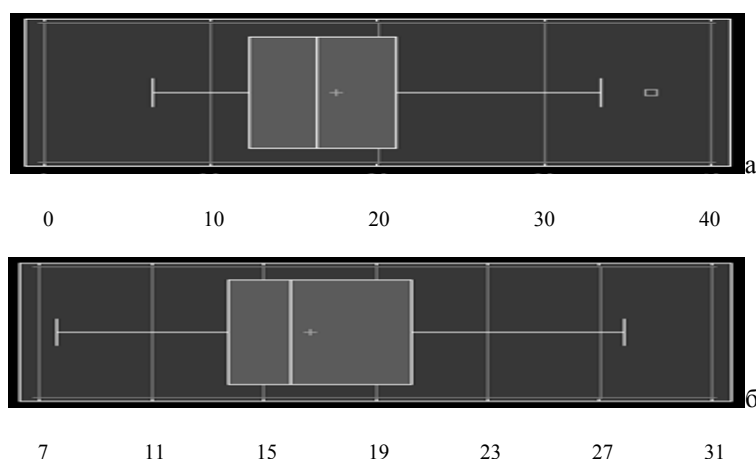


Рисунок 4. Диаграммы Box-and-Whisker-Plot. Периметр листовой пластины осины на удаленном фоне (а) и на опушке с наветренной стороны (б)

Для оценки действия источника загрязнения информативным является фрактальный показатель [19]. Средние значения для листьев березы составили: 5,88 с наветренной стороны, 5,51 - с подветренной стороны, а на удаленном фоне - 5,68. Результаты кластерного анализа данного показателя представлены в таблице 1. При разбиении значений для листовой пластины березы с наветренной стороны на 3, 4 и 5 кластеров 100% листьев относились к кластерам с центрами выше фоновой медианы, с подветренной – от 72 до 100% имели значения ниже этой цифры. При разбиении данных на 3 кластера на фоновом участке 43% объектов относилось к кластеру со средним значением 5,14, в то время как с наветренной стороны 44% листьев относились к кластеру со средним значением 5,853. Дальнейшее увеличение количества кластеров (6 и более) не дало содержательной информации. При исследовании листовых пластин осины получены следующие значения изучаемого параметра: 4,606 (фон), 4,634 (наветренная сторона), 4,556 (подветренная сторона). Для листьев осины распределение по кластерам представлено в таблице 2. Из этих данных следует, что при разбиении на 3 кластера 56% листовых пластин имели среднее значение 4,582 с подветренной стороны; такой же процент листовых пластин на удаленном фоне относились к кластеру с центром 4,575. С наветренной же стороны все центральные значения превышали фоновый показатель. Различия значений на наветренной и подветренной сторонах насаждения более выражены для листьев березы. Следовательно, на ближнем к факелу участке фрактальный показатель возрастает. Это согласуется с данными об увеличении в урбанизированной среде этого параметра, являющегося информативным маркером состояния растений [20].

Таким образом, в подфакельной зоне имела место оптимизация морфометрических показателей листовой пластины (площади, периметра). На ближнем к факелу участке наблюдается увеличение фрактального показателя для листовых пластин обоих видов деревьев. Для березы все отмеченные изменения более выражены, что может быть связано с различной устойчивостью. Следовательно, применение альтернативных методов обработки экспериментальных данных позволило провести сравнительный анализ морфометрических показателей двух лесобразующих пород при длительном воздействии техногенного фактора.

Таблица 1. Результаты кластерного анализа фрактального показателя листовой пластины березы

Кластеры	Наветренная опушка		Подветренная опушка		Фон	
	P/S ^{0,5}	% листьев	P/S ^{0,5}	% листьев	P/S ^{0,5}	% листьев
1	5,759	49	5,440	68	5,78	68
2	5,989	51	5,668	32	5,62	32
1	5,739	33	5,381	24	5,81	38
2	5,853	44	5,449	48	5,14	43
3	6,130	23	5,681	28	5,98	19
1	5,736	33	5,391	22	5,80	34
2	5,983	29	5,429	32	5,26	26
3	5,800	23	5,673	19	5,70	26
4	6,169	15	5,597	27	6,07	14
1	5,743	28	5,461	19	6,16	17
2	5,985	23	5,619	28	5,81	21
3	5,728	19	5,658	5	5,70	30
4	5,856	18	5,583	25	5,14	20
5	6,238	12	5,358	23	4,60	12

Таблица 2. Результаты кластерного анализа фрактального показателя листовой пластины осины

Кластеры	Наветренная опушка		Подветренная опушка		Фон	
	P/S ^{0,5}	% листьев	P/S ^{0,5}	% листьев	P/S ^{0,5}	% листьев
1	4,634	54	4,569	28	4,613	58
2	4,633	46	4,551	72	4,594	42
1	4,626	40	4,582	56	4,707	12
2	4,625	29	4,534	33	4,575	56
3	4,652	31	4,496	11	4,603	32
1	4,615	31	4,513	7	4,600	6
2	4,679	12	4,585	47	4,579	36
3	4,636	30	4,589	20	4,625	50
4	4,633	27	4,492	26	4,604	8
1	4,544	17	4,585	47	4,600	6
2	4,699	13	4,532	7	4,604	8
3	4,598	35	4,602	18	4,589	32
4	4,665	33	4,492	26	4,602	26
5	4,679	12	4,383	2	4,629	28

Список литературы / References:

1. Бухарина И.Л. Эколого-биологические особенности адаптации древесных растений в условиях усиленной техногенной нагрузки. *Принципы и способы сохранения биоразнообразия*. Матер. IV Всерос. науч. конф. Йошкар-Ола: Изд-во Мар. гос. ун-та, 2010, с. 4-7. [Bukharina I.L. Ecological and biological features of adaptation of woody plants in conditions of increased anthropogenic load. *Principles and methods of biodiversity conservation*. Mater. IV Vseros. nauch. konf. Ioshkar-Ola: Izd-vo Mar. gos. un-ta, 2010, pp. 4-7. (In Russ.)]
2. Коробова Н.Л., Коробова А.Н. К вопросу о целесообразности биоиндикации загрязнения атмосферы урбосистем с помощью высших растений. *Естествознание и гуманизм*, 2007, т. 4, № 4, с. 70-71. [Korobova N.L., Korobova A.N. To the question of expediency of bioindication of air pollution of urban systems by means of higher plants. *Estestvoznaniye i gumanizm*, 2007, vol. 4, no. 4, pp. 70-71. (In Russ.)]
3. Бельская Е.А., Воробейчик Е.Л. Динамика трофической активности филлофагов березы в период снижения атмосферных выбросов медеплавильного завода. *Экология*, 2018, т. 1, с. 74-80. [Bel'skaya Ye.A., Vorobeychik Ye.L. Dynamics of trophic activity of birch phyllophages during the period of decreasing atmospheric emissions from a copper smelter. *Ekologiya*, 2018, vol. 1, pp. 74-80. (In Russ.)]
4. Павлов И.Н. Биологический мониторинг техногенного загрязнения по морфометрическим показателям древесных растений. *Фундаментальные исследования*, 2006, № 8, с. 34-37. [Pavlov I.N. Biological monitoring of technogenic pollution by morphometric indicators of woody plants. *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2006, no. 8, pp. 34-37. (In Russ.)]
5. Хузина Г.Р. Влияние урбаноcреды на морфометрические показатели листа березы повислой (*Betula pendula* Roth.). *Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле*, 2010, № 3, с. 53-57. [Khuzina G.R. Influence of urban environment on morphometric parameters of birch leaf (*Betula pendula* Roth.). *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Biologiya. Nauki o Zemle*, 2010, no. 3, pp. 53-57. (In Russ.)]
6. Колмогорова Е.Ю. Морфометрическая характеристика древесных растений, произрастающих в условиях воздействия выбросов автотранспорта. *Живые и биокосные системы*, 2013, № 4. [Kolmogorova Ye.Yu. Morphometric characteristics of woody plants growing under the influence of vehicle emissions. *Zhivyye i biokosnyye sistemy*, 2013, no. 4. (In Russ.)]
7. Кончина Т.А., Гусева М.В. Влияние техногенного загрязнения на некоторые биологические характеристики рудеральных растений. *Молодой ученый*, 2015, № 23, т. 2 (103.2), с. 118-122. [Konchina T.A., Guseva M.V. Influence of technogenic pollution on some biological characteristics of ruderal plants. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 23, vol. 2 (103.2), pp. 118-122. (In Russ.)]
8. Петункина Л.О., Сарсацкая А.С. Береза повислая как индикатор качества городской среды. *Вестник Кемеровского государственного университета*, 2015, с. 68. [Petunkina L.O., Sarsatskaya A.S. Hanging birch as an indicator of the quality of the urban environment. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, p. 68. (In Russ.)]
9. Ростунов А.А., Кончина Т.А. Влияние техногенных загрязнений на физиологические показатели листьев древесных растений. *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология»*, 2016, т. 15, с. 68-79. [Rostunov A.A., Konchina T.A. Influence of technogenic pollution on the physiological parameters of leaves of woody plants. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Biologiya. Ekologiya»*, 2016, vol. 15, pp. 68-79. (In Russ.)]

10. Савинов А.Б., Ерофеева Е.А., Никитин Ю.Д. Морфологическая изменчивость и биохимические показатели листьев в ценопопуляциях *Aegopodium podagraria* L. (Apiaceae, Apiales) при разных уровнях загрязнения почв тяжелыми металлами. *Поволжский экологический журнал*, 2018, № 3, с. 315-326. [Savinov A.B., Yerofeeva Ye.A., Nikitin YU.D. Morphological variability and biochemical parameters of leaves in cenopopulations of *Aegopodium podagraria* L. (Apiaceae, Apiales) at different levels of soil contamination with heavy metals. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2018, no. 3, pp. 315-326. (In Russ.)]
11. Еськова Е.Н. Влияние автотранспортной загрязненности придорожной территории на морфометрические характеристики подорожника большого (PLANTO MAIOR). *Вестник КрасГАУ*, 2018, № 4, с. 235-239. [Yes'kova Ye.N. Influence of road traffic pollution on the morphometric characteristics of the large plantain (PLANTO MAIOR). *Vestnik KrasGAU*, 2018, no. 4, pp. 235-239. (In Russ.)]
12. Тюлькова Е.Г. Морфометрические параметры и зольность древесных и травянистых растений гомельского региона как факторы их адаптации к техногенным условиям среды. *Известия Гомельского университета им. Ф.Скорины*, 2017, т. 94, № 1, с. 28-36. [Tjul'kova Ye.G. Morphometric parameters and ash content of woody and herbaceous plants of the Gomel region as factors of their adaptation to technogenic environmental conditions. *Izvestiya Gomel'skogo universiteta im. F.Skoriny*, 2017, vol. 94, no. 1, pp. 28-36. (In Russ.)]
13. Агафонова Д.А., Артеменко С.В. Влияние антропогенной нагрузки на морфобиологические показатели ивы ломкой (*salix fragilis*) в районах г. Тюмени. *Экология городской среды: история, современность и перспективы*. Сборник статей всероссийской научно-практической конференции с международным участием 25-26 октября 2018 г., г. Астрахань, с. 11-17. [Agafonova D.A., Artemenko S.V. Influence of anthropogenic load on the morphophysiological parameters of the brittle willow (*salix fragilis*) in the districts of Tyumen // *Ekologiya gorodskoy sredy: istoriya, sovremennost' i perspektivy*. Sbornik statey vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem 25-26 oktyabrya 2018 g., g. Astrakhan', pp. 11-17. (In Russ.)]
14. Сейдафаров Р.А. Возрастная динамика площади листовой пластинки липы мелколистной в различных типах техногенных условий. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2013, № 1, с. 121-124. [Seydafarov R.A. Age dynamics of the leaf blade area of small-leaved linden in various types of technogenic conditions. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 2013, no. 1, pp. 121-124. (In Russ.)]
15. Гурова Н.Н., Гуров А.В. Изменение параметров листовой пластинки березы и активность филофагов в зоне воздействия Ачинского НПЗ. *Лесные биогеоценозы бореальной зоны: география, структура, функции, динамика*. Матер. междунар. конференции. Красноярск, Россия, 16-19 сентября 2014, с. 319-321. [Gurova N.N., Gurov A.V. The change in the parameters of the leaf blade of birch and the activity of phyllophagous in the zone of influence of Achinsk refinery. *Forest biogeocenoses of the boreal zone: geography, structure, functions, dynamics*. Mater. Mezhdunar. konf. Krasnoyarsk, Russia, 16-19 sent. 2014, pp. 319-321. (In Russ.)]
16. Гурова Н.Н., Дигурова И.И., Гусев С.Д. Оценка влияния постоянно действующего факела Ачинского НПЗ на морфологические параметры листьев березы и осины. *Актуальные вопросы биологической физики и химии*, Севастополь, 2019, т. 4, № 4, с. 585-589. [Gurova N.N., Digurova I.I., Gusev S.D. Assessment of the effect of a permanent torch of the Achinsk refinery on the morphological parameters of birch and aspen leaves. *Russian Journal of Biological Physics and Chemistry*, Sevastopol', 2019, vol. 4, no. 4, pp. 585-589. (In Russ.)]
17. Гурова Н.Н., Дигурова И.И. Изменение морфометрических параметров листовой пластины при действии техногенного фактора. *Сборник научных трудов VI съезда биофизиков России*, 2019, том. 2, с. 342-343. [Gurova N.N., Digurova I.I. Changes in the morphometric parameters of the leaf plate under the influence of the technogenic factor. *Sbornik nauchnykh trudov VI s"yezda biofizikov Rossii*, 2019, vol. 2, pp. 342-343. (In Russ.)]
18. Легощина О.М. Дендрэкологическая характеристика березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях смешанного типа загрязнения окружающей среды: Уфимский промышленный центр: Автореф дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2018, 24 с. [Legoshchina O.M. *Dendroecological characteristics of silver birch (Betula pendula Roth.) In conditions of mixed type of environmental pollution*: Ufa industrial center: Avtoref dis. ... kand. biol. nauk. Tomsk, 2018, 24 p. (In Russ.)]
19. Федоряка Н.И. Морфобиологические особенности и математическая интерпретация параметров листьев сортов земляники в условиях ЦЧР: Автореф. дисс. ... канд.с-х.наук. Мичуринск, 2004, 24 с. [Fedoryaka N.I. *Morphobiological features and mathematical interpretation of the parameters of the leaves of strawberry varieties in the conditions of the Central Black Earth Region*: Avtoref.diss. ... kand.s-kh.nauk. Michurinsk, 2004, 24 p. (In Russ.)]
20. Алексейченко Н.А., Лиханов А.Ф. Вариабельность морфологических и биохимических признаков листьев растений рода *PILTA* L. в урбанизированной среде. *Наук. праці Лісівничої акад. наук України*, 2017, № 14, с. 23-30. [Alekseychenko N.A., Likhanov A.F. Variability of morphological and biochemical characteristics of leaves of plants of the genus *PILTA* L. in an urbanized environment. *Science. works of the Forestry Academy. Sciences of Ukraine*, 2017, no. 14, pp. 23-30. (In Russ.)]

COMPARATIVE ANALYSIS OF MORPHOMETRIC INDICATORS OF BIRCH AND ASPEN LEAF PLATES UNDER LONG TECHNOGENIC EXPOSURE**Gurova N. N.¹, Digurova I. I.², Gusev S. D.³**¹ Siberian Federal University

Svobodnyj av., 79/10, Krasnoyarsk, 660041, Russia; e-mail: nina-guro@mail.ru

² Pirogov Russian National Research Medical University

Ostrovitianov str., 1, Moscow, 117997, Russia; e-mail: digurova56@mail.ru

³ Krasnoyarsk state medical University named after Professor V.F. Voino-Yasenetsky

Partizan Zheleznyak str., 1, Krasnoyarsk, 660022, Russia; e-mail: sdg53@rambler.ru

Abstract. The article discusses the results of a comparative analysis of the morphometric parameters of the leaves of the main forest-forming species near a permanent gas flare torch for burning unprocessed waste gases. Comparative analysis was performed on the results of measuring the perimeter and area of leaf plates, as well as the fractal parameter – the ratio of the perimeter of the sheet to the square root of the leaf sheet area. The long-term influence of the technogenic factor on the mixed aspen-birch plantation was assessed using alternative mathematical methods aimed at the possible detection of hidden information and providing reliable interpretation in large data sets. The results obtained allowed us to assume the presence of optimization of the morphometric parameters of leaves, more pronounced in birch. Along the transect, the fractal exponent increased with approaching the source of pollution.

Key words: foliage plate morphometry, torch for burning of passing gases, aspen-birch plantation.