

## ГЕОЭКОЛОГИЯ / GEOECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.11>**ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В БИОИНДИКАЦИИ КАЧЕСТВА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПО БЕРЕЗЕ ПОВИСЛОЙ (*BETULA PENDULA ROTH.*)**

Научная статья

**Нафикова Э.В.<sup>1</sup>, Платонова А.С.<sup>2</sup>\*, Александров Д.В.<sup>3</sup>, Насырова Э.С.<sup>4</sup>, Гаянова К.Р.<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Российская Федерация

\* Копирующий автор (platonova-anastasiya[at]inbox.ru)

**Аннотация**

В данной работе рассмотрены особенности оценки состояния окружающей среды по биоиндикации на основе различий между левой и правой половинами листа берёзы повислой (*Betula pendula Roth.*), коррелирующей со степенью антропогенного воздействия на территорию. Предложена реализация методики биоиндикации экологического состояния местности по сравнению фрактальных размерностей проекций половин листа с помощью программы *FrakOur*. Исследовано влияние уровня антропогенной нагрузки на состояние берёзы повислой (*Betula pendula Roth.*) предлагаемым фрактальным методом и классическим инструментальным (на примере территории Республики Башкортостан). Сопоставлена пространственно-временная динамика асимметрии данных методов и оценена точность их результатов.

**Ключевые слова:** биоиндикация, береза повислая (*Betula pendula Roth.*), геоэкологическая оценка, фрактальный анализ, оценка окружающей среды.

**FRactal ANALYSIS IN BIOINDICATION OF ENVIRONMENTAL QUALITY IN EUROPEAN WHITE BIRCH (*BETULA PENDULA ROTH.*)**

Research article

**Nafikova E.V.<sup>1</sup>, Platonova A.S.<sup>2</sup>\*, Aleksandrov D.V.<sup>3</sup>, Nasirova E.S.<sup>4</sup>, Gayanova K.R.<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

\* Corresponding author (platonova-anastasiya[at]inbox.ru)

**Abstract**

This work considers the specifics of assessing the state of the environment by bioindication based on the differences between the left and right leaf halves of European white birch (*Betula pendula Roth.*), correlating with the degree of anthropogenic impact on the area. The implementation of the methodology of bioindication of the ecological condition of the area by comparing the fractal dimensions of the leaf halves projections with the *FrakOur* program is proposed. The influence of the level of anthropogenic burden on the state of European white birch (*Betula pendula Roth.*) by the proposed fractal method and the classical instrumental method (on the example of the territory of the Republic of Bashkortostan) was studied. The spatial and temporal dynamics of asymmetry of these methods is compared and the accuracy of their results is evaluated.

**Keywords:** bioindication, European white birch (*Betula pendula Roth.*), geo-ecological assessment, fractal analysis, environmental assessment.

**Введение**

На сегодняшней день анализ качества окружающей среды становится неотъемлемой частью планирования и разработки мероприятий социально-экологического развития территорий. Требуется оперативная оценка экологической обстановки, сопряженная с таким рядом препятствий как сложность экологических систем, малая осведомленность об их взаимодействиях и о зависимостях между их компонентами, необходимость учета изменчивых внешних факторов среды [1], [2], [3].

Зачастую физико-химические методы не дают комплексного представления о воздействии на биологическую систему, а сложность и дороговизна инструментальных методов исследования приводит к затруднениям в экспресс-оценках для широкого круга исследователей на больших территориях и к сложностям в охвате достаточного количества материалов. Методы статистической и математической обработки данных и применение географических информационных систем отражают лишь общую тенденцию привязки экологических данных к пространственным объектам и не всегда могут рассматриваться для более детального анализа.

Наиболее простым, перспективным и позволяющим масштабироваться на разные территории при оценке качества окружающей среды, является анализ состояния и развития биоты исследуемой территории (биоиндикация) по значениям асимметрии фитоморфологических показателей растений [1], [2], [3].

Известны методы, активно использующие в качестве биоиндикатора лишайники, хвою деревьев, водоросли, активный ил. Однако исследования проводить тем легче, чем крупнее, проще и более распространен организм. Например, высшие древесные растения, неотъемлемая часть природообустройства урбанизированных территорий. Привязанные к локальной территории в условиях неблагоприятной окружающей среды они наиболее полно отражают комплекс стрессовых воздействий на экосистему, изменяя свойства своих фитоморфологических структур: недоразвитость или асимметрию листовых пластин [4]. Поэтому значительный ряд работ авторов посвящен научно-обоснованному применению березы повислой (*Betula pendula Roth.*) в качестве биоиндикатора состояния окружающей среды [5], [6].

В работе [7] установлено, что проявление ненаправленной асимметрии листьев древесных растений может зависеть не только от атмосферного переноса загрязняющих веществ, но и от их миграции с поверхностным стоком. Кроме того, исследователи [8] отмечают, что оценка экологического состояния биоценозов должна проводиться по разным индикаторам, критериям и параметрам в комплексе.

Фрактальная геометрия позволяет анализировать сложные геометрические структуры геоэкологических объектов, которые остаются за пределами возможности анализа евклидовой геометрией [9]. А фрактальная размерность способна описывать сложную геометрическую структуру листовой пластинки древесных растений, характеристики которой меняются пропорционально концентрации загрязнителей в окружающей среде. Поэтому значение величины фрактальной размерности листовой пластинки древесных растений можно использовать как показатель в биоиндикации окружающей среды, что отмечается и другими исследованиями [6], [10].

Целью работы является исследование влияния уровня антропогенной нагрузки на березы повислой (*Betula pendula Roth.*) методом биоиндикации с помощью фрактального анализа.

Для достижения цели ставятся следующие задачи:

- сбор материала с разных территорий города Уфа;
- оценка состояния березы повислой (*Betula pendula Roth.*) с помощью фрактального анализа;
- проведение оценки инструментальным методом;
- сопоставление результатов.

В качестве объекта исследования выступает берёза повислая (*Betula pendula Roth.*), в качестве предмета – состояние атмосферного воздуха на территории города Уфа.

### Методы и принципы исследования

Авторами разработан способ оценки загрязнения воздуха [11] по сравнению усредненных величин модулей разницы фрактальной размерности правой и левой части листьев берёзы повислой (*Betula pendula Roth.*).

Для апробации разработанного авторами метода сравнения усредненных величин модулей разницы фрактальной размерности половин листьев проводилась выборка проб по 10 штук с одного дерева в исследуемых точках отбора проб (таблица 1). Листья отбирались с нижней части кроны на уровне поднятой руки.

После осуществлялось сканирование отобранных поверхностей листовых пластинок, на основании которых в компьютерной программе *FrakOur* производился выбор исследуемого фрагмента и определялась фрактальная размерность половин листа методом *box-counting*. Для этого задавалось максимально возможное количество делений и вручную выделялись ячейки, совпадающие с исследуемой половиной листа (рисунок 1).

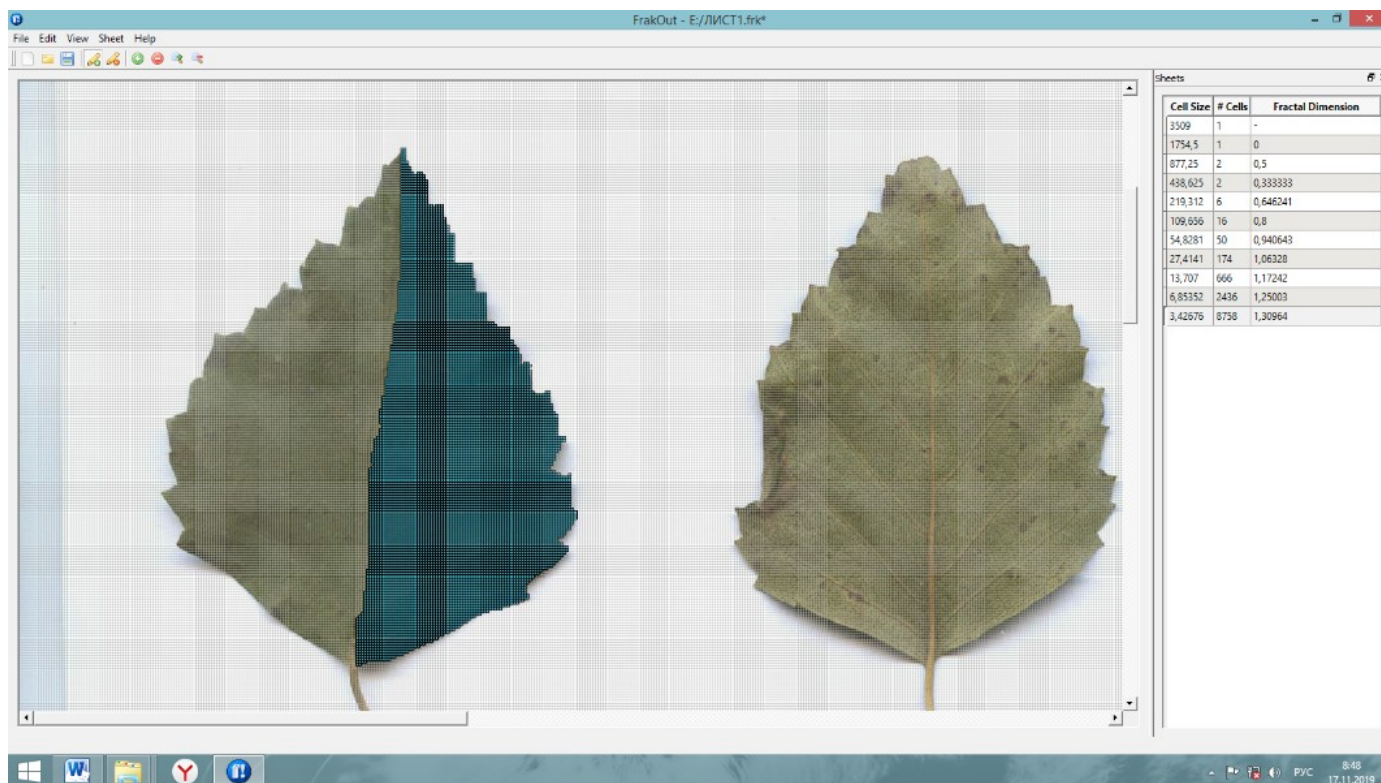


Рисунок 1 - Определение фрактальной размерности правой части одного из отобранных листьев березы повислой (*Betula pendula Roth.*)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.11.1>

Искомая фрактальная размерность находилась как модуль коэффициента, полученного из линии тренда на построенном из значений графике в программе *Excel*.

Для определения достоверности предлагаемого фрактального метода и сопоставления с классическими известными методами биооценки определялась также и флуктуирующая асимметрия отобранных листьев березы

повислой (*Betula pendula Roth.*) известным инструментальным методом [2] по интегральному показателю – величине среднего относительного различия на признак.

Для той же отобранной пробы измерения проводятся с помощью линейки и транспортира. С каждого листа отобранных в исследуемых точках листьев были сняты показатели по 5-ти параметрам с левой и правой стороны: ширина половинки листа, длина второй жилки второго порядка от основания листа, расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка, расстояние между концами этих жилок, угол между главной жилкой и второй от основания жилки второго порядка. Дальнейшие вычисления проводились по указанному инструментальному методу.

### Результаты и их обсуждение

Для каждой точки отбора листьев березы повислой (*Betula pendula Roth.*) значение модуля разницы фрактальных размерностей половинок листа и значения интегрального показателя по инструментальному методу были усреднены и занесены в таблицу 1.

Таблица 1 - Результаты определения фрактальной размерности и среднего относительного различия половинок листовой пластинки березы повислой (*Betula pendula Roth.*) в исследуемых областях Республики Башкортостан

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.11.2>

Точка отбора 10-ти проб	Модуль разницы фрактальных размерностей правой и левой половинок листа (Критерий предложенного метода оценки)	Среднее относительное различие Z (Критерий инструментального метода оценки)
1. Площадь им. Салавата Юлаева, г.Уфа	0,57	0,042
2. Санаторий «Зеленая Роща», г.Уфа	0,17	0,052
3. Парк им. М.И. Калинина, г.Уфа	0,45	0,053
4. Парк им. И. Якутова, г.Уфа	0,46	0,064
5. Парк Победы, г.Уфа	0,51	0,072
6. Сквер им. 50-летия Победы, г.Уфа	0,54	0,069
7. АО «УППО», г.Уфа	0,71	0,083
8. Уфимская ТЭЦ-2, г.Уфа	0,210	0,090
9. ПАО «УМПО», г.Уфа	0,64	0,092
10. д. Шарипово	0,022	0,001
11. Национальный парк «Башкирия», Мелеузовский район	0,021	0,042
12. База отдыха «Красный ключ», Нуримановский район	0,069	0,072
13. г. Сибай (в районе детского сада «Белочка»)	0,058	0,061
14. Центр г. Нефтекамск	0,034	0,050

Многолетними исследованиями авторов в области оценки состояния окружающей среды по флуктуирующей асимметрии березы повислой (*Betula pendula Roth.*) установлена шкала стабильности развития по среднему относительному различию на признак, представленная в 1, 2 и 4 столбцах таблицы 2.

Аналогичная шкала оценивания (без выделения определенного загрязнителя) разработана и для фрактального метода биоиндикации по листовой пластинке березы повислой (*Betula pendula Roth.*), где в качестве критерия выступает диапазон величин модулей разницы фрактальных размерностей половинок листа (столбец 3 таблицы 2).

Таблица 2 - Шкала стабильности развития березы повислой (*Betula pendula Roth.*) по классическому инструментальному и фрактальному методам оценки

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.11.3>

Балл	Значения показателя асимметричности	Модуль разницы фрактальных размерностей половинок листа	Оценка уровня стабильности развития
1 балл	<0,04	0,01-0,055	Условная норма

2 балла	0,04-0,044	0,055-0,075	Слабое отклонение от стабильного развития
3 балла	0,045-0,049	0,075-0,25	Нарушение стабильного развития
4 балла	0,50-0,054	0,25-0,5	Отклонение от стабильного развития
5 баллов	>0,054	>0,5	Высокое отклонение от стабильного развития

Апробация оценки состояния окружающей среды и фрактального, и инструментального метода показала, что отобранный материал на выбранных фоновых территориях (д. Шарипово и национальный парк «Башкирия») соответствует нормальному состоянию уровня стабильности развития и означает отсутствие загрязнений. Это говорит о том, что влияние погодных условий в ходе анализа исключается,

На территории промышленной зоны (точки отбора 7-9) наблюдается угнетение роста березы повислой (*Betula pendula Roth.*) за счет загрязнения окружающей среды, что отражено и в докладах о состоянии окружающей среды. Остальные точки отбора также подвергнуты загрязнению.

На рисунке 2 приведен график среднего значения показателя асимметричности по инструментальному и фрактальному методам биоиндикации в исследуемых точках отбора проб.

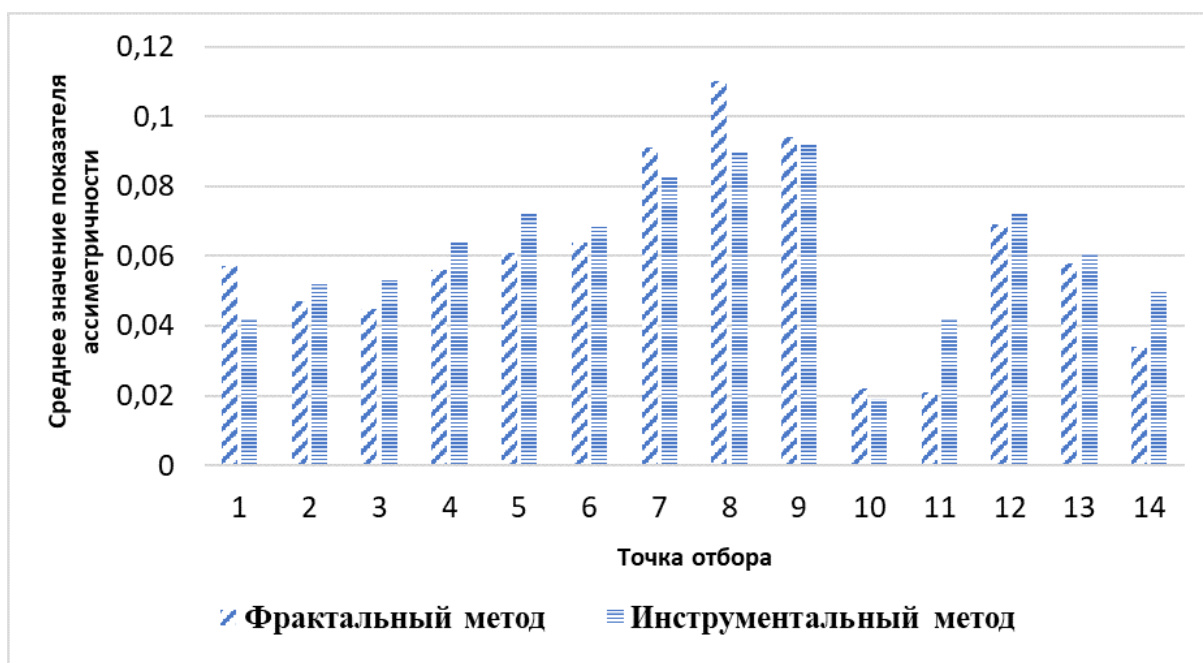


Рисунок 2 - Графическое сравнение классического и фрактального методов биоиндикации по березе повислой (*Betula pendula Roth.*)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.11.4>

Из рисунка видно, что разница между двумя методиками составляет около 5%. При классическом инструментальном методе оценки флуктуирующая асимметрия может выявиться по одному признаку, а по второму отсутствовать на некоторых листьях. Тогда фрактальная оценка выступает как более точный метод, решая данную проблему.

### Заключение

Таким образом, сопоставление результатов инструментального метода и предлагаемого фрактального метода анализа асимметричности листовой пластинки для биоиндикации по березе повислой (*Betula pendula Roth.*) показало, что методы сопоставимы на 5%-ом уровне. Выявлено, что показатель модуля разницы фрактальной размерности половины листовой пластинки может служить сверткой информации об асимметричности листа дерева, учитывая не измеряемые инструментальными методами геометрические характеристики листовой пластинки.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Рахимова Н.Н., Оренбургский государственный университет, Оренбург, Российская Федерация  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.11.5>

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

Рахимова N.N., Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.11.5>

**Список литературы / References**

1. Пат. 2736935 , МПК2020105070 G01N33/00 G01N33/46 G01N1/02 G01N1/28. Способ сравнительной оценки загрязнения воздуха по высшим растениям / Э.В. Нафикова, А.Н. Елизарьев, Н.Н. Красногорская и др.; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. – № 2020105070; заявл. 2022-08-22; опубл. 2020-11-23, – 6 с.
2. Опекунова М.Г. Биоиндикация загрязнений: учеб. пособие. / М.Г. Опекунова – СПб: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2016. – 300 с.
3. Чеснокова С.М. Лихеноиндикация загрязнения окружающей среды: Практикум / С.М. Чеснокова – Владимир: Vladimir State University, 1999. – 38 с.
4. Ermakov V.V. Ecological Monitoring of the Unal Depression, Northern Ossetiya–Alania, Using Techniques of Biogeochemical Indication. / V.V. Ermakov, S.F. Tyutikov, V.N. Danilova // *Geochemistry International*. – 2020. – № 3.
5. Pospelova O.A. Identification of Technogenic Disturbances of Urban Ecosystems Using the Methods of Bioindication and Biotesting. / O.A. Pospelova // *Biosciences biotechnology research asia*. – 2015. – № 3.
6. Наумова А.А. Методика оценки степени флуктуирующей асимметрии листовых пластинок на примере березы повислой (бородавчатой) (*Betula pendula* Roth). / А.А. Наумова, А.Б. Стрельцов // *Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet»*. – 2020. – № 3.
7. Гуртяк А.А. Оценка состояния среды городской территории с использованием березы повислой в качестве биоиндикатора. / А.А. Гуртяк, В.В. Углев // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – № 1.
8. Молчатский С.Л. Применение метода фрактального анализа для биоиндикационной оценки состояния окружающей среды. / С.Л. Молчатский // *Самарский научный вестник*. – 2016. – № 4.
9. Тунакова Ю.А. Разработка методики определения самоочищающей способности рек на основе фрактальной геометрии для установления допустимого антропогенного воздействия. / Ю.А. Тунакова, Н.Н. Красногорская, Э.В. Нафикова и др. // *Вестник Технологического университета*. – 2015. – № 19.
10. Баранов С.Г. Флуктуирующая асимметрия как способ оценки экологического состояния окружающей среды. / С.Г. Баранов, Ю.Е. Сафонова, О.А. Никитина и др. // *Актуальные проблемы экологии в XXI веке. Труды III Международной научной конференции (заочной)*; – Владимир: [б.и.], 2016.
11. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур) утв. распоряжением Росэкологии от 16 октября 2003 года № 460-р.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Pat. 2736935 , МПК2020105070 G01N33/00 G01N33/46 G01N1/02 G01N1/28. Sposob sravnitel'noi otsenki zagryazneniya vozdukhа po visshim rasteniyam [A method of comparative assessment of air pollution by higher plants] / E.V. Nafikova, A.N. Yelizarev, N.N. Krasnogorskaya et al.; the applicant and the patentee Ufa State Aviation Technical University. – № 2020105070; appl. 2022-08-22; publ. 2020-11-23, – 6 p. [in Russian]
2. Opekunova M.G. Bioindikatsiya zagryazneniy [Bioindication of pollution]: textbook allowance / M.G. Opekunova – SPb: Publishing House of St. Petersburg University, 2016. – 300 p. [in Russian]
3. Chesnokova S.M. Lixenoindikatsiya zagryazneniya okruzhayushhej sredy': Praktikum [Lichenoidication of environmental pollution: Workshop] / S.M. Chesnokova – Vladimir: Vladimir State University, 1999. – 38 p. [in Russian]
4. Ermakov V.V. Ecological Monitoring of the Unal Depression, Northern Ossetiya–Alania, Using Techniques of Biogeochemical Indication. / V.V. Ermakov, S.F. Tyutikov, V.N. Danilova // *Geochemistry International*. – 2020. – № 3.
5. Pospelova O.A. Identification of Technogenic Disturbances of Urban Ecosystems Using the Methods of Bioindication and Biotesting. / O.A. Pospelova // *Biosciences biotechnology research asia*. – 2015. – № 3.
6. Naumova A.A. Metodika ocenki stepeni fluktuiruyushhej asimmetrii listovy'x plastinok na primere berezy' povisloy (borodavchatoj) (*Betula pendula* Roth) [A method for assessing the degree of fluctuating asymmetry of leaf blades on the example of drooping (warted) birch (*Betula pendula* Roth)]. / A.A. Naumova, A.B. Strel'czov // *Nauchno-obrazovatel'ny'j zhurnal dlya studentov i prepodavatelej «StudNet»* [Scientific and educational journal for students and teachers "StudNet"]. – 2020. – № 3. [in Russian]
7. Gurtyak A.A. Ocenka sostoyaniya sredy' gorodskoj territorii s ispol'zovaniem berezy' povisloy v kachestve bioindikatora [Assessment of the state of the urban environment using birch as a bioindicator]. / A.A. Gurtyak, V.V. Uglev // *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Tomsk Polytechnic University]. – 2011. – № 1. [in Russian]
8. Molchatskij S.L. Primenenie metoda fraktal'nogo analiza dlya bioindikacionnoj ocenki sostoyaniya okruzhayushhej sredy' [Application of the method of fractal analysis for bioindicative assessment of the state of the environment]. / S.L. Molchatskij // *Samarskij nauchny'j vestnik* [Samara Journal of Science]. – 2016. – № 4. [in Russian]
9. Tunakova Yu.A. Razrabotka metodiki opredeleniya samoochishhayushhej sposobnosti rek na osnove fraktal'noj geometrii dlya ustanovleniya dopustimogo antropogennogo vozdejstviya [Development of a methodology for determining the self-cleaning capacity of rivers based on fractal geometry to establish the permissible anthropogenic impact]. / Yu.A.

Tunakova, N.N. Krasnogorskaya, E'.V. Nafikova et al. // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Technological University]. – 2015. – № 19. [in Russian]

10. Baranov S.G. Fluktuiruyushhaya asimmetriya kak sposob ocenki e'kologicheskogo sostoyaniya okruzhayushhej sredy' [Fluctuating asymmetry as a way to assess the ecological state of the environment]. / S.G. Baranov, Yu.E. Safonova, O.A. Nikitina et al. // Actual problems of ecology in the XXI century. Proceedings of the III International Scientific Conference (correspondence); – Vladimir: [b.i.], 2016. [in Russian]

11. Metodicheskie rekomendacii po vypolneniju ocenki kachestva sredy po sostojaniju zhivyh sushhestv (ocenka stabil'nosti razvitija zhivyh organizmov po urovnju asimmetrii morfologicheskikh struktur) [Guidelines for assessing the quality of the environment according to the state of living beings (assessment of the stability of the development of living organisms by the level of asymmetry of morphological structures)] approved. Decree of Rosecology dated October 16, 2003. № 460-r.