

ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ЛИХЕНОИНДИКАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ТЕХНОГЕННО НАГРУЖЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

**А.Н. Насонов, И.В. Цветков, А.Н. Кизеев, В.В. Кульнев,
Д.Ю. Мартынов, В.И. Сметанин**

**РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, Тверской государственный университет,
Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Кольского научного
центра Российской академии наук, г. Апатиты,
Управление Федеральной службы по надзору в сфере природопользования по Воро-
нежской области, г. Воронеж**

Предложен способ моделирования и оценки степени загрязнения атмосферного воздуха техногенно нагруженных территорий на основе фрактального анализа.

Ключевые слова: техно-природные процессы, фрактальная размерность, лишеноиндикация, таллом лишайника, загрязнение атмосферного воздуха

Application of Fractal Analysis in Lichenoindication of Atmospheric Air Pollution of Technogenically Disturbed Territories

A.N. Nasonov, I.V. Tsvetkov, A.N. Kizeev, V.V. Kulnev, D.Yu. Martynov, V.I. Smetanin

**RSAU Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 127550 Moscow, Russia,
Tver State University, 170100 Tver, Russia, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after
N.A. Avrorin Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 184209 Apatity, Russia,
Supervision Department of the Federal Service for Supervision of Nature Management in the Voronezh
Region, 394087 Voronezh, Russia**

A method for modeling and assessing the degree of air pollution in Technogenically disturbed areas based on fractal analysis is proposed.

Keywords: techno-natural processes, fractal dimension, lichenoindication, lichen thallus, atmospheric air pollution

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-34-38

Загрязнение окружающей природной среды промышленными выбросами представляет собой глобальную проблему. С развитием техногенеза в биосферу поступает большое количество вредных выбросов, представляющих серьезную угрозу геоэкологической безопасности. При изучении степени загрязнения окружающей среды важна реакция биологических объектов на поллютанты. Лишайники обладают уникальными свойствами, позволяющими использовать их для общей оценки степени загрязненности атмосферного воздуха.

В последнее время вопросам применения достаточно эффективных и сравнительно недорогих технологий мониторинга окружающей среды, например биоиндикации, уделяется повышенное внимание. Наиболее перспективным направлением биоиндикации является лишеноиндикация.

Лишеноиндикация основана на изучении как изменения структуры таллома под воздействием загрязнителей, так и количественного соотношения видового состава лишайников или их проективного покрытия на определенной территории. Долговременное воздей-

ствие даже малых концентраций загрязняющих веществ на окружающую среду вызывает у лишайников повреждения слоевищ, которые не исчезают вплоть до их гибели, что влияет на их рост, а, следовательно, и на изменение их сложной геометрии [1].

Таким образом, накопление загрязняющих веществ слоевищами различных видов лишайников — один из наиболее часто используемых лишеноиндикационных показателей. Наиболее часто лишайники используются для оценки загрязнения природной среды соединениями серы, тяжелыми металлами и радио-

нуклидами. Применение лишайников для индикации качества природной среды основано на существовании среди представителей лишайнобиоты видов, отличающихся повышенной чувствительностью к загрязнению, а также строгой приуроченностью к определенным экологическим условиям среды.

Известно, что большинство токсичных веществ попадают из атмосферного воздуха в дождевую воду, которую впитывают лишайники. В этом отношении лишайники отличаются от цветковых растений, поглощающих воду в основном из почвы. Важен и тот факт, что лишайники, в отличие от высших растений, не способны избавляться от пораженных частей своего слоевища и могут расти не только летом, но и при отрицательных температурах воздуха.

В связи с этим лишайники реагируют на загрязнение атмосферы раньше и сильнее, чем высшие растения, что вызвано характером их взаимодействия с окружающей средой, а также:

- высокой чувствительностью талломов лишайников к содержанию поллютантов атмосферного воздуха;
- большой абсорбционной поверхностью таллома (все вещества, включая газообразные и растворенные в воде поллютанты, поглощаются поверхностью таллома);
- высокой гидрофильностью таллома (осадки, стекающие по стволу, содержат значительно более высокие концентрации поллютантов, чем осадки на открытых местах).

Применение фрактального анализа в лишайноиндикации загрязнения атмосферного воздуха полностью удовлетворяет требованиям к современным методам контроля окружающей среды [2, 3].

Предлагаемый подход позволяет провести статистическую обработку полученных результатов, выявить не только случайное распределение факторов (оптимум), но и смещения от него, связанные с негативными состояниями окружающей среды.

Для оценки качества среды используются морфометрические показатели, характеризующие важнейшие признаки рас-

сматриваемой биосистемы и ее функционирования, которые напрямую зависят от внешних условий развития природного объекта.

- Фрактальный метод связывает физические характеристики изучаемого биообъекта, изменяемые под действием факторов окружающей среды, с его геометрическими характеристиками (скейлинг). Эта связь может отслеживаться на всех уровнях организации биообъекта выше надмолекулярного.

- Метод применим для всех антропогенно преобразованных биологических объектов, сформированных в результате протекания глубоко неравновесных процессов.

- Методы, основанные на определении фрактальных геометрических характеристик изучаемых биологических объектов, легко переносимы и настраиваемы под виды изучаемых объектов.

- Метод оценки качества окружающей среды с использованием фрактальной геометрии может использоваться в экологическом мониторинге, прост и "дешев" в применении, для его реализации не требуется дорогостоящее оборудование.

Определение фрактальной размерности биологических объектов даёт основу для разработки перспективных методов биоиндикации, которые являются менее трудоёмкими и более точными [3, 4].

Материал и методы исследований

Цель данного эксперимента — оценка применения фрактального анализа в биоиндикации качества атмосферного воздуха техногенно нагруженных территорий.

План эксперимента включал следующую последовательность действий:

1. Выбор экспериментальных площадок для исследования динамики изменений талломов лишайника, произрастающих на деревьях одного возраста.

2. Фотофиксация талломов лишайников на исследуемых площадках с периодичностью одна серия снимков в три недели.

3. Мониторинг динамики изменения индекса качества атмосферы AQI на станциях контроля качества атмосферного воздуха, располагающихся вблизи с исследуемыми площадками.

4. Расчет фрактальных размерностей талломов лишайников в программе "Gwyddion".

5. Установление корреляции фрактальной размерности таллома лишайника *H. Physodes* с индексом AQI на основе существующих градаций качества атмосферного воздуха.

Для эксперимента были выбраны три площадки, располагающиеся в разных районах Москвы и отличающиеся степенью техногенной нагруженности.

Площадка № 1 — "Тимирязевская" является условно чистой, так как вблизи отсутствуют источ-

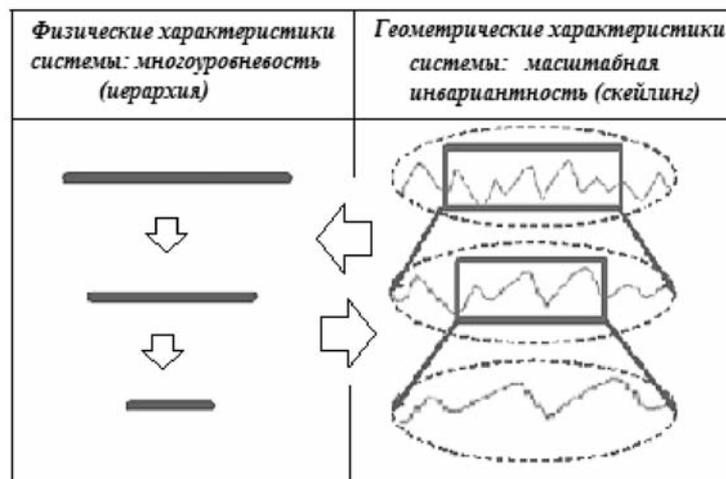


Рис. 1. Фрактальное моделирование техно-природных объектов – нахождение связи геометрических и физических характеристик по масштабируемости объекта

Fig. 1. Fractal modeling of techno-natural objects – finding the relationship of geometric and physical characteristics of the scalability of the object



Рис. 2. Диалоговое окно программы "Gwyddion" для расчета фрактальной размерности

Fig. 2. Dialog window of the program "Gwyddion" for the calculation of the fractal dimension

ники загрязнения атмосферы. Это подтверждается данными со станции контроля качества атмосферного воздуха, расположенной в районе Останкино. В связи с этим принимаем данную площадку в качестве фоновой. Площадка № 2 — "Черемушки" и площадка № 3 — "Кучино" являются экспериментальными. Размеры всех площадок составляют 20×20 м, а их выбор делался в пользу участков с наибольшим числом одновозрастных деревьев, на которых произрастали лишайники (табл. 1).

В качестве биоиндикатора в эксперименте выбран лишайник *Hypogymnia Physodes* из семейства *Parmeliaceae*. Вегетативное тело лишайника (таллом) — листовое, разнообразное по форме. Обитает лишайник преимущественно на ветвях и стволах лиственных и хвойных пород и активно реагирует на умеренное загрязнение атмосферного воздуха. Чаще всего при "активном" мониторинге ка-

чества атмосферного воздуха наблюдают этот вид лишайника, который искусственно высаживают в исследуемом месте, и по воздействию на него окружающей среды (изменение окраски таллома, структуры) судят о его качестве. С точки зрения фрактальной геометрии, таллом лишайника является многоуровневой структурой, которая может быть описана фрактальной размерностью.

Фрактальная размерность — это величина, описывающая статистическую меру сложности изменения шаблона фрактала при его масштабировании, которым измеряется таллом лишайника как многоуровневая структура. При деградации таллома лишайника (слоевища), связанной с увеличением концентрации поллютантов в окружающей среде, фрактальная размерность также будет закономерно изменяться, поэтому значение фрактальной размерности можно достоверно

использовать в качестве биоиндикационного маркера загрязнения окружающей среды [3].

В этих условиях задача исследований заключается в том, чтобы установить взаимосвязь развитости структуры природного объекта, определяемой его фрактальной размерностью, с мерами загрязнения среды его обитания. При этом надо учитывать, что на разных масштабах делимости природные объекты проявляют различные свойства, и иерархия как геометрия делимости объекта оказывается физическим фактором, детерминирующим эти свойства [5–7].

Таким образом, фрактальное моделирование (рис. 1) выступает как инструмент изучения структуры объекта, связывающий его интегральные свойства с локальными параметрами различной природы, появляющимися при его декомпозиции [8].

Искомым параметром нашего исследования является фрактальная размерность таллома лишайника, которая определяется опытным путем.

Результаты и их обсуждение

Для определения фрактальной размерности таллома лишайника использовалась модульная программа визуализации и анализа данных "Gwyddion", в которой применялся метод фрактального анализа, известный как клеточный метод (рис. 2).

Метод основан на подсчёте квадратов, покрывающих изображение таллома лишайника

$$\text{Log}N(\epsilon) = -D\text{Log}(\epsilon),$$

где D — фрактальная размерность таллома лишайника; $N(\epsilon)$ — число квадратов, покрывающих изображение таллома лишайника; (ϵ) — варьируемый масштаб решетки покрытия.

В основе клеточного метода лежит следующий алгоритм. Квадратная решетка с постоянной (ϵ) накладывается на расширенную по z поверхность изображения таллома. Изначально (ϵ) задаётся равной $X/2$ (где X — длина края поверхности). Тогда $N(\epsilon)$ — это число всех квадратов, содержащих хотя бы один пиксель изображения.

Постоянная решетки (ϵ) на каждом шаге уменьшается в два раза, и процесс повторяется до

Таблица 1. Характеристики экспериментальных площадок

Table 1. Characteristics of the experimental sites

Площадка	Адрес	Период исследования	Расстояние до ближайшей станции контроля качества воздуха
№1 "Тимирязевская"	г. Москва, ул. Большая Академическая, д. 44, к. 1	7.08.17 – 9.10.17	4,5 км (Останкино)
№2 "Черемушки"	г. Москва, ул. Академика Пилюгина, д. 12, к. 1	7.08.17 – 9.10.17	2,6 км (Черемушки)
№3 "Кучино"	Московская обл., г. Балашиха, мкр. Кучино, ул. Смельчак, д. 16	7.08.17 – 9.10.17	6,3 км (Вешняки)

Примечание. Размер всех площадок 400 м².

тех пор, пока (ϵ) не станет равной расстоянию между двумя соседними пикселями. Наклон аппроксимирующей прямой, выделяющий область скейлинга (масштабной инвариантности), позволяет определить фрактальную размерность D [10].

Результат оценки фрактальной размерности талломов лишайника с различных экспериментальных площадок представлен на рис. 3.

Получив динамику изменения фрактальной размерности талломов лишайника на экспериментальных площадках, необходимо сопоставить эту динамику со статистикой индексов качества атмосферного воздуха (AQI) для выбранных площадок.

AQI — это интегральный показатель качества атмосферного воздуха, который учитывает концентрации отдельных загрязняющих веществ и опасность каждого из них для человека. Ресурс aqicn.org дает возможность наблюдать количественные изменения индекса AQI в режиме реального времени и отображать их на качественной шкале установленных градаций.

По результатам мониторинга (табл. 2) была построена регрессионная модель связи индексов качества атмосферного воздуха с изменением фрактальной размерности талломов лишайника:

$$AQI = -205,13D + 369,61.$$

Из полученных данных для всех экспериментальных площадок можно заметить устойчивую тенденцию роста фрактальной размерности D при понижении индекса качества атмосферы AQI. Это означает, что увеличение степени атмосферного загрязнения приводит к закономерному уменьшению фрактальной размерности D талломов лишайников *H. Physodes*. Физически это объясняется тем, что поверхностные участки таллома лишайника подвержены

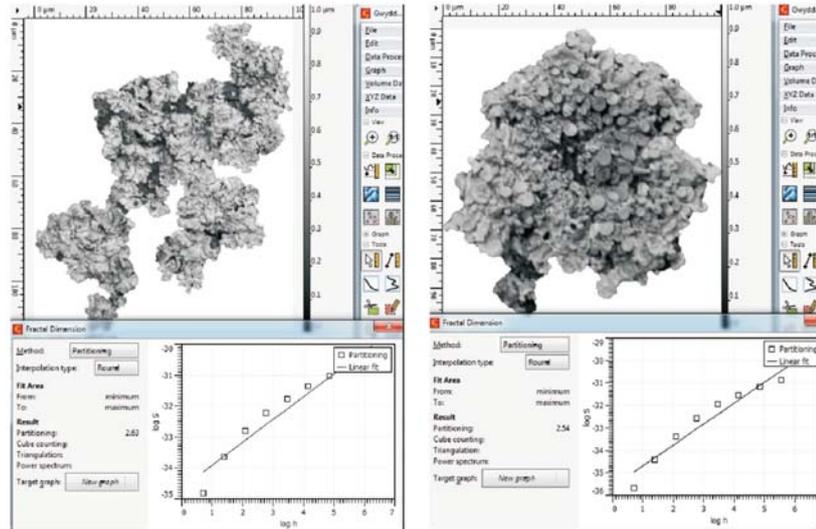


Рис. 3. Оценка фрактальной размерности талломов лишайника в программе "Gwyddion"

Fig. 3. Evaluation of the fractal dimension of lichen thalli in the program "Gwyddion"

максимальному действию токсикантов при минимальной степени их защищенности, что вызывает возникновение некрозов и повреждение талломов (снижение их плотности) [9].

Отображение градаций качества атмосферного воздуха AQI на шкале фрактальных размерностей $D \in [1,2]$ для исследуемых площадок приведено в табл. 3.

Интересен факт соответствия полученной корреляции (см. табл. 3) известному в биоэкологии закону Шелфорда-Либиha, основанному на понятии лимитирующих факторов, детерминирующих жизнедеятельность живых организмов [11].

Полученный результат в этой связи можно трактовать следующим образом: в диапазоне фрактальных размерностей таллома лишайника $D \in [1;1,31]$ происходят кризисные процессы обменных взаимодействий лишайника с внешней средой: токсиканты детерминируют жизненно важные для таллома обменные процессы с внешней средой, что со-

провождается деградацией его структуры.

Оптимальным условиям жизнедеятельности лишайника по результатам эксперимента соответствует фрактальная размерность $D = 1,56$ как показатель случайного воздействия токсикантов на лишайник, при котором он обладает максимально развитой структурой.

Выводы

В работе показана возможность применения метода биоиндикации на основе фрактального анализа при оценке качества атмосферного воздуха техногенно нагруженных территорий.

Предложенный метод, в отличие от традиционных физических, более экономичен, точен, не требует применения дорогостоящего оборудования, поскольку природные структуры лишайников являются более чувствительными сенсорами загрязнений по сравнению с физическим оборудованием.

Таблица 2. Результаты мониторинга параметров* загрязнения атмосферного воздуха

Table 2. The results of monitoring parameters of air pollution *

Площадка	Дата измерения			
	7.08.17	28.08.17	18.09.17	9.10.17
№ 1	57,00/1,54	46,00/1,56	40,00/1,60	37,00/1,63
№ 2	57,00/1,54	50,00/1,58	43,00/1,61	39,00/1,63
№ 3	75,00/1,46	67,00/1,49	63,00/1,50	57,00/1,51

*Числитель – интегральный индекс качества атмосферного воздуха (AQI), знаменатель – фрактальная размерность таллома лишайника (D).

Таблица 3. Корреляция фрактальной размерности (D) таллома лишайника с индексом качества атмосферного воздуха (AQI)

Table 3. Correlation of the fractal dimension (D) of the lichen thallus with the air quality index (AQ)

Показатель качества атмосферного воздуха	AQI	D
Хороший	0–50	1,8–1,56
Удовлетворительный	50–100	1,56–1,31
Нездоровый для чувствительных групп	100–150	1,31–1,2
Нездоровый	150+	1,2–1

Применение фрактального анализа в обработке результатов биоиндикации удовлетворяет современным требованиям к методам контроля качества окружающей среды.

Для всех исследуемых территорий с различной степенью техногенной нагруженности была выявлена устойчивая тенденция роста фрактальной размерности талломов лишайника D при понижении индекса качества атмосферы AQI. Это означает, что увеличение степени техногенного загрязнения атмосферы законо-

номерно приводит к уменьшению фрактальной размерности таллома лишайника *Hypogymnia Physodes*.

Установлена положительная корреляция между понижением фрактальной размерности таллома лишайника $D \in [1,2]$ и ухудшением качественных показателей атмосферного воздуха AQI.

Предложена интерпретация выявленной эмпирической закономерности на основе существующего в биоэкологии принципа толерантности Шелфорда-Либиха: оптимальным условиям жизнедея-

тельности лишайника *Hypogymnia Physodes* по результатам эксперимента соответствует фрактальная размерность $D = 1,56$ как показатель случайного воздействия токсикантов на лишайник, при котором он обладает максимально развитой структурой. В диапазоне фрактальных размерностей таллома лишайника $D \in [1;1,31]$ происходят кризисные процессы: токсиканты детерминируют жизненно важные для таллома обменные процессы с внешней средой, что сопровождается деградацией его структуры.

Литература

1. Сафранкова Е.А. Комплексная лишеноиндикация общего состояния атмосферы урбоэкосистем. Автореф. ... дис. канд. биол. наук. Брянск, 2014. 23 с.
2. Захаров В.М. Здоровье среды: методика оценки. М., Изд-во "Центр экологической политики России", 2000. 68 с.
3. Молчатский С.Л., Казанцев И.В., Матвеева Т.Б. Применение метода фрактального анализа для биоиндикационной оценки состояния окружающей среды. Самарский научный вестник. 2016. № 4. С. 28–31.
4. Белопухов С.Л., Жогин И.М., Насонов А.Н., Цветков И.В. Фрактальные методы биоиндикации загрязнения атмосферного воздуха. М., ФГБОУ "Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева", 2017.
5. Насонов А.Н., Цветков И.В. Комплексная оценка природно-антропогенных объектов фрактальными методами. Матер. 14 Всесоюзной науч.-техн. конф. "Состояние и проблемы измерения". МГТУ им. Н.Э. Баумана 18-20 апреля 2017. С. 70–73.
6. Насонов А.Н., Цветков И.В., Кульнев В.В., Базарский О.В., Жогин И.М. Фрактальный анализ биологической реабилитации водных объектов методом коррекции альгоценоза. Матер. Междунар. научного форума "Проблемы управления водными и земельными ресурсами". В 3 ч. М., 2015. С. 165–180.
7. Насонов А.Н., Цветков И.В., Жогин И.М., Кульнев В.В., Репина Е.М., Кириосов С.Л., Звягинцева А.В., Базарский О.В. Фракталы в науках о Земле. Учеб. пособие. Воронеж, 2018. 82 с.
8. Изотов А.Д., Маврикиди Ф.И. Фракталы: делимость вещества как степень свободы в материаловедении: монография. Самара, Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 128 с.
9. Миннулина Г.Р. Совершенствование методов лишеноиндикации для оценки качества атмосферного воздуха урбанизированной территории. Автореф. ... канд. биол. наук. 2006. 106 с.
10. Zahn W., Zösch A. The dependence of fractal dimension on measuring conditions of scanning probe microscopy. Fresenius J Analen Chem. 1999. 365(1–3). P. 168–172.
11. Хамзина Ш.Ш., Жумабекова Б.К. Экология и устойчивое развитие. Учеб. для вузов. М., Изд. дом Академии Естествознания, 2016. 329 с.

References

1. Safrankova E.A. Kompleksnaya likhenoindikatsiya obshchego sostoyaniya atmosfery urboekosistem. Avtoref. ... dis. kand. biol. nauk. Bryansk, 2014. 23 s.
2. Zakharov V.M. Zdorov'e sredy: metodika otsenki. M., Izd-vo "Tsentr ekologicheskoi politiki Rossii", 2000. 68 s.
3. Molchatskii S.L., Kazantsev I.V., Matveeva T.B. Primenenie metoda fraktal'nogo analiza dlya bioindikatsionnoi otsenki sostoyaniya okruzhayushchei sredy. Samarskii nauchnyi vestnik. 2016. № 4. S. 28–31.
4. Belopukhov S.L., Zhogin I.M., Nasonov A.N., Tsvetkov I.V. Fraktal'nye metody bioindikatsii zagryazneniya atmosfernogo vozdukha. M., FGBOU "Rossiiskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet – MSKha imeni K.A. Timiryazeva", 2017.
5. Nasonov A.N., Tsvetkov I.V. Kompleksnaya otsenka prirodno-antropogennykh ob'ektov fraktal'nymi metodami. Mater. 14 Vsesoyuznoi nauch.-tekhn. konf. "Sostoyanie i problemy izmereniya". MG TU im. N.E. Baumana 18-20 aprelya 2017. S. 70–73.
6. Nasonov A.N., Tsvetkov I.V., Kul'nev V.V., Bazarskii O.V., Zhogin I.M. Fraktal'nyi analiz biologicheskoi reabilitatsii vodnykh ob'ektov metodom korrektsii al'gotseenoza. Mater. Mezhdunar. nauchnogo foruma "Problemy upravleniya vodnymi i zemel'nymi resursami". V 3 ch. M., 2015. S. 165–180.
7. Nasonov A.N., Tsvetkov I.V., Zhogin I.M., Kul'nev V.V., Repina E.M., Kirnosov S.L., Zvyagintseva A.V., Bazarskii O.V. Fraktaly v nauках o Zemle. Ucheb. posobie. Voronezh, 2018. 82 s.
8. Izotov A.D., Mavrikidi F.I. Fraktaly: delimost' veshchestva kak stepen' svobody v materialovedenii: monografiya. Samara, Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 2011. 128 s.
9. Minnullina G.R. Sovershenstvovanie metodov likhenoindikatsii dlya otsenki kachestva atmosfernogo vozdukha urbanizirovannoi territorii. Avtoref. ... kand. biol. nauk. 2006. 106 s.
10. Zahn W., Zösch A. The dependence of fractal dimension on measuring conditions of scanning probe microscopy. Fresenius J Analen Chem. 1999. 365(1–3). P. 168–172.
11. Khamzina Sh.Sh., Zhumabekova B.K. Ekologiya i ustoychivoe razvitiye. Ucheb. dlya vuzov. M., Izd. dom Akademiya Estestvoznaniya, 2016. 329 s.

A.N. Nasonov – канд. техн. наук доцент, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 127550 Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская 49 ● И.В. Цветков – д-р техн. наук, профессор, Тверской государственный университет, 170100 Россия, г. Тверь, ул. Желябова 33 ● А.Н. Кизеев – канд. биол. наук, научный сотрудник, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Кольского научного центра Российской академии наук, 184209 Россия, г. Апатиты, мкр. Академгородок, ул. Ферсмана 18-а ● В.В. Кульнев – канд. геогр. наук, исполняющий обязанности специалиста-эксперта отдела надзора Управления Федеральной службы по надзору в сфере природопользования по Воронежской области, 394087 Россия, г. Воронеж, ул. Ломоносова 105, e-mail: kulneff.vadim@yandex.ru ● Д.Ю. Мартынов – канд. техн. наук, доцент, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 127550 Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская 49 ● В.И. Сметанин – д-р техн. наук, профессор A.N. Nasonov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, RSAU Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 127550 Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str. 49 ● I.V. Tsvetkov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Tver State University, 170100 Russia, Tver, Zhelyabova Str. 33 ● A.N. Kizeev – Cand. Sci. (Biol.), Research Fellow, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N.A. Avrorin Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 184209, Russia, Murmansk region, Apatity, Akademgorodok, Fersman Str. 18-a ● V.V. Kulnev – Cand. Sci. (Geogr.), Acting Specialist Expert of the Supervision Department of the Federal Service for Supervision of Nature Management in the Voronezh Region, 394087 Russia, Voronezh, Lomonosov Str. 105, e-mail: kulneff.vadim@yandex.ru ● D.Yu. Martynov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, RSAU Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 127550 Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str. 49 ● V.I. Smetanin – Dr. Sci. (Eng.), Professor