



УДК 504.064

Применение фрактального анализа при лишеноиндикации техногенного воздействия от линейного источника загрязнения атмосферы

А. Н. Насонов, В. В. Кульнев, И. В. Цветков,
Г. В. Шибалова, А. Н. Кизеев, С. Н. Насонов



Насонов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, adn22@yandex.ru

Кульнев Вадим Вячеславович, кандидат географических наук, ведущий специалист-эксперт, отдел государственного экологического надзора по Воронежской области Центрально-Черноземного межрегионального управления Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, Воронеж, kulnev@36.rpn.gov.ru

Цветков Илья Викторович, доктор технических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, manc@mail.ru

Шибалова Галина Вячеславовна, доцент, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, virginsoil@yandex.ru

Кизеев Алексей Николаевич, кандидат биологических наук, Институт имени Н. А. Аврорина Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, aleksei.kizeev@mail.ru

Насонов Сергей Николаевич, старший преподаватель, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, snnasonov@gmail.com

Предложен новый способ обработки фактического материала лишеноиндикационных исследований, основанный на изучении морфологических изменений таллома лишайника. Оценка степени техногенного воздействия на компоненты окружающей природной среды от линейного источника загрязнения атмосферы производилась путем расчета и корреляции фрактального показателя уровней антропогенной нагрузки и процессов ее биотической компенсации. Предложенный экспресс-метод оценки степени техногенного влияния позволит усовершенствовать методический аппарат геоэкологического моделирования природных и техногенных геосистем, используемый для разработки и проведения природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: таллом лишайника, постоянная Хёрста, лишеноиндикация, метод триангуляции, гомеостаз, природоохранные мероприятия.

The Application of Fractal Analysis for the Lichen Indication of Technogenic Impact from a Linear Source of Atmospheric Pollution

A. N. Nasonov, V. V. Kul'nev, I. V. Tsvetkov, G. V. Shibalova,
A. N. Kizeev, S. N. Nasonov

Andrey N. Nasonov, <https://orcid.org/0000-0002-4927-2192>, Russian State Agrarian University – Moscow Academy of Agriculture named

K. A. Timiryazev, 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russia, adn22@yandex.ru

Vadim V. Kul'nev, <https://orcid.org/0000-0002-1646-9183>, Office of the Federal service for supervision of natural resources in the Voronezh region, 105 Lomonosov St., Voronezh 394087, Russia, kulneff.vadim@yandex.ru

Ilya V. Tsvetkov, <https://orcid.org/0000-0002-5284-880X>, Russian State Agrarian University – Moscow Academy of Agriculture named K. A. Timiryazev, 49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia, manc@mail.ru

Galina V. Shibalova, <https://orcid.org/0000-0002-0141-2926>, Russian State Agrarian University – Moscow Academy of Agriculture named K. A. Timiryazev, 49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia, virginsoil@yandex.ru

Aleksey N. Kizeev, <https://orcid.org/0000-0002-8689-7327>, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named N. A. Avrorin Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 18 Academgorodok md, Apatity 184209, Russia, aleksei.kizeev@mail.ru

Sergey N. Nasonov, <https://orcid.org/0000-0001-8927-0418>, Russian State Agrarian University – Moscow Academy of Agriculture named K. A. Timiryazev, 49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia, snnasonov@gmail.com

A new method of processing the actual material of lichen-indication studies, based on the study of morphological changes in the lichen thallus, is proposed. Assessment of the degree of technogenic impact on the components of the environment from a linear source of atmospheric pollution is performed by calculating and correlating the fractal index of anthropogenic load levels and the processes of its biotic compensation. The proposed rapid method for assessing the degree of technogenic influence will allow to improve the methodological apparatus of geoecological modeling of natural and technogenic geosystems used to develop and apply environmental protection measures.

Keywords: lichen thallus, Hirst constant, lichen indication, triangulation method, homeostasis, environmental measures.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-4-233-240>

Введение

Влияние автотранспорта на экологическое состояние компонентов окружающей природной среды представляет собой непростую и глобальную экологическую проблему. Сложность данного типа техногенного воздействия автомобильного транспорта заключается в его многоплановости.



Общеизвестно, что наряду с шумовым, тепловым и вибрационным загрязнением существует воздействие на придорожные территории таких поллютантов, как оксиды серы, азота, углерода, 3,4-бенз(а)пирена, нефтепродуктов, свинца, цинка, меди и кадмия.

Вышеназванные химические соединения оказывают токсичное воздействие на почвы и другие компоненты окружающей природной среды, особенно на придорожные полосы.

Для автомобильных дорог, за исключением тех, что расположены в границах населенных пунктов, устанавливаются придорожные полосы [1].

В зависимости от класса и (или) категории автомобильных дорог с учетом перспектив их развития ширина каждой придорожной полосы устанавливается в размере:

- 75 м – для автомобильных дорог первой и второй категорий;
- 50 м – для автомобильных дорог третьей и четвертой категорий;
- 25 м – для автомобильных дорог пятой категории;
- 100 м – для подъездных дорог, соединяющих административные центры (столицы) субъектов Российской Федерации, города федерального значения с другими населенными пунктами, а также для участков автомобильных дорог общего пользования федерального значения, построенных для объездов городов с численностью населения до 250 тыс. человек;
- 150 м – для участков автомобильных дорог, построенных для объездов городов с численностью населения свыше 250 тыс. человек [1].

В настоящее время в научной литературе все чаще можно встретить примеры решения геоэкологических задач с использованием методов мультифрактальной динамики. В частности, в работе [2] приведены примеры мониторинга экологической обстановки, наводнений, функционирования авиационной системы.

При изучении степени загрязнения придорожных полос стержневым моментом является выбор метода исследования. По нашему мнению, наиболее подходящим в данном случае способом оценки степени техногенного воздействия является биоиндикационный подход, при котором важна реакция биологических объектов на поллютанты.

Среди прочих биоиндикаторов лишайники обладают уникальными свойствами, позволяющими использовать их для общей оценки степени загрязненности атмосферного воздуха и придорожных полос. Применение лишайников для индикации качества природной среды основано на существовании среди представителей лишайнобиоты видов, отличающихся повышенной чувствительностью к загрязнению, строгой приуроченностью к определенным экологическим условиям среды.

Поэтому наиболее перспективным направлением биоиндикации является лишайноиндикация,

которая применяется в экологической практике и 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 воздействие даже малых концентраций загрязняющих веществ в окружающей среде вызывает у лишайников такие повреждения слоевищ, которые не исчезают вплоть до их гибели, что влияет на их рост, а следовательно, и на изменение их сложной геометрии.

Таким образом, накопление загрязняющих веществ слоевищами разных видов лишайников – один из наиболее используемых лишайноиндикационных показателей. Чаще всего лишайники используются для оценки загрязнения природной среды соединениями серы, тяжелыми металлами и радионуклидами.

Известно, что большинство токсичных веществ, скапливающихся в атмосферном воздухе, концентрируются в дождевой воде, которую впитывают лишайники. Тем самым 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 [3].

Материалы и методы

Для проведения исследований была выбрана территория биостанции Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, расположенной в окрестностях города Звенигорода Одинцовского городского округа Московской области. Эта территория имеет статус государственного природного заказника областного значения.

Согласно п. 3 ст. 24 Федерального закона РФ «Об особо охраняемых природных территориях» задачи и особенности режима особой охраны конкретного государственного природного заказника регионального значения определяются органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, принявшими решение о создании этого государственного природного заказника [4].

В этой связи территория заказника разделяется автодорогой «Московское Малое кольцо – Аниково – Агафоново – Кубинка» на три условных участка. Участок № 1 (южный) заказника граничит с садовым товариществом «Заготовитель» у деревни Волково. Участок № 2 (северный) включает земельный участок между автодорогой и Москвой-рекой. Участок № 3 (северо-западный) включает земельный участок у санатория им. Чкалова.

Чтобы оценить изменения в воздухе, происходящие непосредственно под влиянием линейного источника загрязнения атмосферы (дороги), кроме



экспериментальной площадки для сравнений была выбрана контрольная (фоновая) территория.

Экспериментальная и контрольная площадки были определены по однородным геоморфологическим, почвенным и биотическим признакам, которые выразились в схожести рельефа, типа почв (дерново-подзолистые) и видов древесной растительности (хвойные леса – сосновые и еловые).

Следует отметить, что биоиндикатором в эксперименте служил лишайник *Hypogymnia Physodes* (Гипогимния Вздутая) из семейства Пармелиевых (*Parmeliaceae*). Этот вид эпифитных лишайников был выбран в качестве биоиндикатора в силу его повсеместного распространения.

Экспериментальную площадку посередине пересекает прямолинейный участок вышеназванной автодороги. На контрольной площадке присутствуют только квартальные просеки и редкие тропы. Для проведения исследований обе площадки были выбраны в пределах первого участка.

Участок № 3 заказника в своей северной части представлен древней аллювиально-водно-ледниковой (долино-зандровой) равниной, осложненной всхолмлениями ледникового генезиса, и водно-ледниковой равниной в южной части. На вершинах холмов в северной окраине участка отмечаются наивысшие абсолютные отметки – до 191 м. Поверхности долино-зандровой равнины сложены водно-ледниковыми песками и супесями, местами перекрытыми покровными суглинками. Холмы сложены валунными суглинками и песчано-гравийным материалом.

Плоские и слабоволнистые водно-ледниковые равнины, сформировавшиеся в южной части Участка № 3, сложены водно-ледниковыми песками и супесями, перекрытыми покровными суглинками. Местами равнины осложнены эрозионными формами и западинами. Юго-западная часть территории включает отрезок долины р. Сетуни в ее нижнем течении протяженностью 1,8 км. Долина реки имеет трапецеидальную форму профиля, часто асимметричную. Ширина днища долины составляет около 50–90 м. Центральную часть Участка № 3 с востока на запад прорезает крупная овражно-балочная система – правый отрог долины р. Сетуни – протяженностью в заказнике порядка 3 км со значительным количеством более мелких отрогов. Высота склонов в его средней и нижней части достигает 10–20 м.

Для изучения биотического и абиотического компонентов экосистем практикуется закладка трансект или квадратов, при этом сбор биоматериала территориально ограничивается их площадью.

Выбор типа трансекта зависит от качественного и количественного характера исследования, особенностей биоты, требуемой степени точности, размеров обследуемой территории и времени, отведенного на работу. На небольшом расстоянии вполне применим непрерывный линейный трансект.

В качестве контрольного участка была выбрана территория с идентичным экспериментальному

участку биогеоценозом. В соответствии с условиями эксперимента для обеспечения однородности (гомогенности) данных расстояние между точками внутри обоих участков составило 200 м. (шаг измерения). Расстояние между участками составило 800 м. Местоположение точек определялось при помощи системы GPS/ГЛОНАСС, точность позиционирования которой составляет от 2 до 12 м.

Для чистоты эксперимента местоположение контрольного участка выбиралось в лесном массиве с учетом параметров розы ветров для данной местности (таблица). Северо-восточные ветра здесь достаточно редки (0,5%), и летучие ингредиенты загрязнений (сера, угарный газ и пр.) с автомобильной дороги преимущественно рассеиваются в других направлениях.

Параметры розы ветров для исследуемых площадок

Направление ветра	Частота
Северный	7,2
Северо-восточный	0,5
Восточный	5,9
Юго-восточный	7,7
Южный	18,5
Юго-западный	23
Западный	19,8
Северо-западный	17,6

В общем случае состояние лишайника определяется отношением уровня нагрузок к уровню их биотической компенсации в динамике [3, 5]:

$$I(D) = (1/H) - 1, \quad (1)$$

$$H = (2 - D); H \in (0; 1), \quad (2)$$

где $I(D)$ – фрактальная функция отклика лишайника, определяемая отношением уровня нагрузок к уровню их биотической компенсации в динамике;

H – постоянная Хёрста;

D – фрактальные показатели уровня нагрузок (меры антропогенной изменённости таллома лишайника).

Согласно принципу толерантности экологическому оптимуму, относительно которого оценивается смещение состояний лишайника под действием внешних факторов, соответствует максимально развитая структура таллома. Это означает, что внешние возмущения полностью компенсируются биотической составляющей лишайника, что трактуется как непотревоженная биота [3].

Очевидно, что подобные состояния наиболее благоприятны для экосистемы и характерны для территорий заповедников, заказников и особо охраняемых природных территорий, в которых техногенное загрязнение сведено к минимуму.



В основе принципа толерантности лежит понятие динамической стабильности развития лишайника, которая ограничена двумя лимитирующими факторами, дефицитом развития лишайника, наступающим спонтанно (фазовый переход) в результате избыточности загрязнения среды его обитания (рис. 1).



Рис. 1. Толерантность лишайника к антропогенному загрязнению среды обитания

Гомеостазу лишайника, определяющему область его стабильных состояний, соответствуют следующие соотношения:

$$C_n = 2^{H-1} - 1, \quad (3)$$

$$D_d < D < D_k; D \in (1; 2), \quad (4)$$

где C_n – фрактальный показатель корреляции уровней антропогенной нагрузки и процессов ее биотической компенсации, определяемый на основе постоянной Хёрста, (H);

D_d – фрактальный показатель дефицита развития;

D_k – фрактальный показатель избыточности загрязнения.

По условиям толерантности соотношения (3) и (4) отвечают экологическому субоптимуму, при котором сохраняется пластичность структуры таллома лишайника за счет ее масштабной инвариантности к внешним возмущающим факторам [6].

Это согласуется с утверждением о том, что стабильность развития экосистемы обусловлена ее стремлением к гомеостазу за счет двух противоположно направленных процессов [7]:

– самосохранения (процессы с фрактальными показателями $D_d < D < D_0$);

– саморазвития (процессы с фрактальными показателями $D_0 < D < D_k$).

Кризисным процессам деградации лишайника в связи с избыточностью атмосферных загрязнений и наступающей стагнации развития отвечают следующие соотношения:

$$1 < D < D_d; D \in (1; 2), \quad (5)$$

$$D_k < D < 2; (D) \in (1; 2). \quad (6)$$

Для определения фрактальной размерности таллома лишайника использовалась модульная программа визуализации и анализа данных “Gwyddion” (рис. 2), в которой доступны несколько методов фрактального анализа.

1. Метод покрывающих кубов (квадратов). Применительно к изображению лишайника метод основан на подсчете кубов (квадратов), покрывающих его изображение:

$$\text{Log}N(\epsilon) = -D \text{Log}(\epsilon), \quad (7)$$

где D – фрактальная размерность таллома лишайника;

$N(\epsilon)$ – число квадратов, покрывающих его изображение;

(ϵ) – варьируемый масштаб решетки покрытия.

В основе метода лежит следующий алгоритм: кубическая (квадратная) решетка с постоянной решетки (ϵ) накладывается на расширенную по z поверхность изображения таллома.

Изначально (ϵ) задается равной $X/2$ (где X – длина края поверхности). Тогда $N(\epsilon)$ – число всех кубов (квадратов), содержащих хотя бы один пиксель изображения. Постоянная решетки (ϵ) на каждом шаге уменьшается в 2 раза, и процесс повторяется до тех пор, пока (ϵ) не станет равной расстоянию между двумя соседними пикселями. Наклон линейно аппроксимированного графика $\text{Log}N(\epsilon)$ от $\text{Log}N(\epsilon)$ даёт численное значение фрактальной размерности D (рис. 3).

Метод триангуляции похож на алгоритм подсчета кубов (квадратов), покрывающих элементы изображений. Метод работает следующим образом: сетка с размером ячейки в одну единицу измерения (ϵ) помещается на поверхность. Это определяет положение вершин набора треугольников. Площади всех треугольников рассчитываются и суммируются, чтобы получить приближенную площадь поверхности, соответствующую (ϵ). Размер сетки последовательно уменьшается в 2 раза на каждом шаге, а процесс продолжается до тех пор, пока он не станет равным расстоянию между двумя соседними точками. Наклон графика $\text{Log}S(\epsilon)$ от $\text{Log}S(\epsilon)$ при этом соответствует $D - 2$. Основным инструментом анализа пространственной связи опытных данных является вариограмма. По определению вариограмма представляет собой один из моментов второго порядка стационарной случайной функции $Z(x)$:

$$\gamma^* = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2, \quad (8)$$

где x_i – местоположение проб;

$Z(x_i)$ – их значения;

$N(h)$ – количество пар (x_i, x_i+h) , разделенных расстоянием h , которые используются в расчете.



Рис. 2. Диалоговое окно программы «Gwyddion» для расчета фрактальной размерности

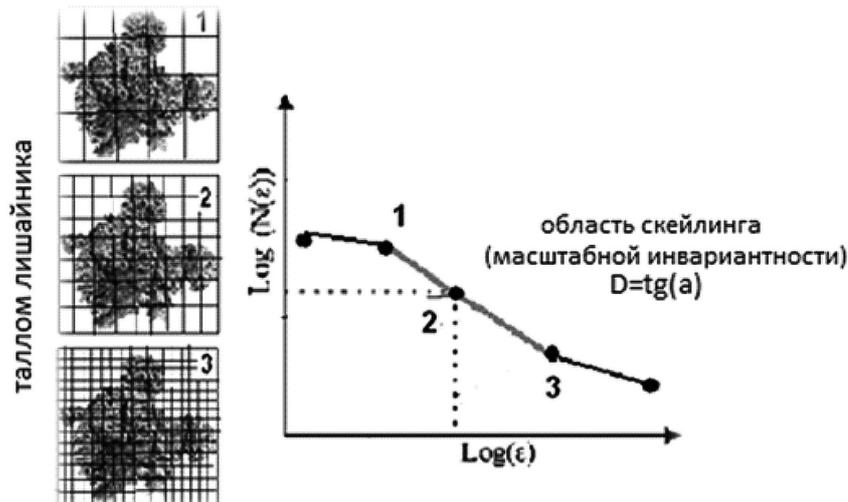


Рис. 3. Определение фрактальной размерности (мер деградации) таллома лишайника с использованием программы «Gwyddion»

Математически соотношение (1) описывает корреляционную связь между двумя случайными величинами $Z(x)$ и $Z(x+h)$, разделенными в пространстве вектором h . Сила связи зависит от изменения расстояния между точками и направления разделяющего вектора.

Эту формулу очень легко использовать, когда пробы регулярно расположены в одномерном пространстве, например вдоль выбранного профиля. Если пробы не расположены по регулярной сети, то нельзя отсутствующие значения рассчитывать по соседним пробам или приравнивать нулю, потому что истинная изменчивость будет искажаться. Квадрат разности вычисляется для всех имеющихся пар проб.

Если данные не регулярны, то вариограммы вычисляются для классов расстояний с каким-либо связанным допуском, обычно 50%, потому

что он перекрывает все возможные расстояния. Когда данные нерегулярно расположены в двухмерном пространстве, вариограммы рассчитываются как для классов расстояний, так и для углов (азимутов), характеризующих разные направления.

Если разделяющий вектор h нулевой, это выражение равно нулю. Вариограмма симметрична относительно h : $y(h) = y(-h)$. Связь может быть *изотропной*, если зависит только от модуля вектора h (то есть $y(h) = y(|h|)$), или *анизотропной*, если зависит как от модуля, так и от направления h .

В нашем случае вариограмма применяется для оценки вариации фрактальной размерности талломов лишайника в зависимости от расстояния между точками на экспериментальном и контрольном участках. Соответственно экспериментальный участок находится около дороги, а контрольный уча-



сток – в лесном массиве в одномерном пространстве вдоль выбранного профиля (трансекты).

Формула (1) для нашего эксперимента позволяет оценить дисперсию экспериментальных данных как внутри, так и между исследуемыми участками и по результатам сравнения сделать выводы относительно влияния линейного антропогенного источника (автодороги) на деградацию таллома лишайника, связанную с загрязнением воздуха от выбросов, поступающих от линейных источников загрязнения атмосферы.

Результаты и их обсуждение

В качестве экспериментальных данных брались фрактальные размерности талломов лишайника, трактуемые как мера его деградации, вызванной загрязнением воздуха. Для обоих участков были получены следующие поверхности распределения фрактальных размерностей талломов лишайника (рис. 4).

Фрактальная размерность талломов лишайников на участке вдоль дороги существенно понижена (преобладание зон с низкой фрактальной размерностью $D = 1,25-1,45$) – здесь талломы лишайника характеризуются большей угнетенно-

стью под действием токсикантов и соответственно обладают меньшей развитостью структуры.

Напротив, на фоновом участке наблюдается преобладание зон с более высокой фрактальной размерностью ($D=1,4-1,6$), что говорит о развитой структуре талломов с соответственно лучшим состоянием лишайников.

Коэффициент корреляции между обоими массивами данных высок – 0,442. Это свидетельствует о достаточно близких абиотических условиях, в которых произрастают лишайники на контрольной и экспериментальной площадках, а следовательно, о достоверности полученных распределений.

Полученные результаты поверхностного распределения меры деградации талломов лишайников свидетельствуют о техногенном влиянии автодороги на качество воздуха. Это выражается в преобладании более благоприятных для лишайника зон с мерой деградации таллома ($D = 1,4-1,6$), которые удалены от автодороги.

Этот результат не противоречит исследованиям в области лишайноиндикации: увеличение степени атмосферного загрязнения закономерно приводит к уменьшению фрактальной размерности D талломов лишайников. Физически это

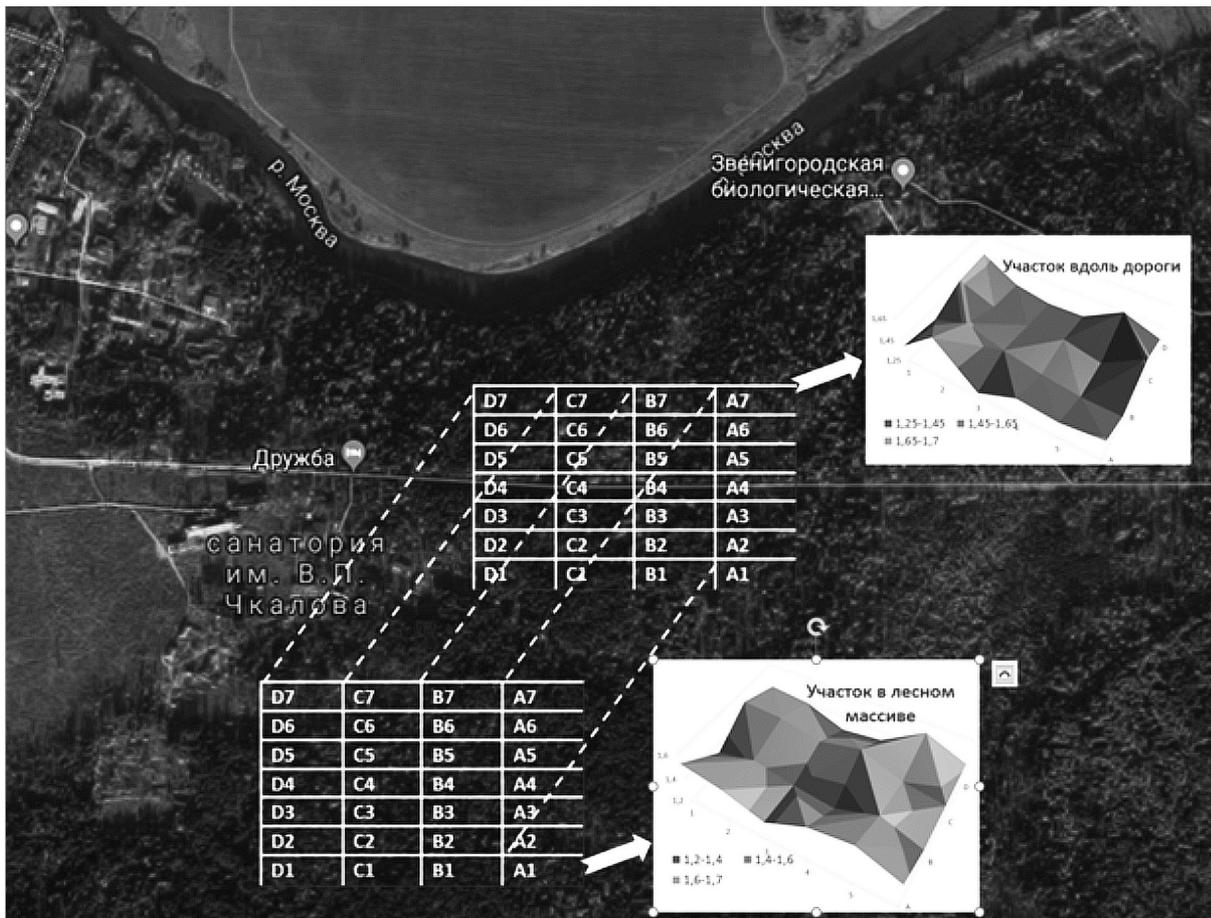


Рис. 4. Расположение и маркировка точек отбора проб на контрольном и опытном участках Звенигородской биостанции



можно объяснить следующим: поверхностные участки таллома подвержены максимальному действию токсикантов при минимальной степени их защищенности, что вызывает возникновение некрозов и повреждение талломов (снижение их плотности).

Для оценки влияния автодороги как линейного источника загрязнения воздуха построим сводную вариограмму на основании расчётных данных образцов контрольной и опытной групп (рис. 5).

На представленной сводной вариограмме по оси абсцисс откладывается расстояние между об-

разцами, а по оси ординат – возможная вариация фрактальной размерности на этом расстоянии. Чем сильнее кривизна графика, тем большая вариативность опытных данных в зависимости от расстояния присуща изучаемой величине (см. рис. 5).

Соответственно применительно к нашим опытным данным такой рост по сводной вариограмме отмечается на расстоянии 0,8–0,85 км. Это можно интерпретировать как существенное различие в распределении изучаемых показателей на двух участках, что говорит о сильной разнице в состоянии лишайников.

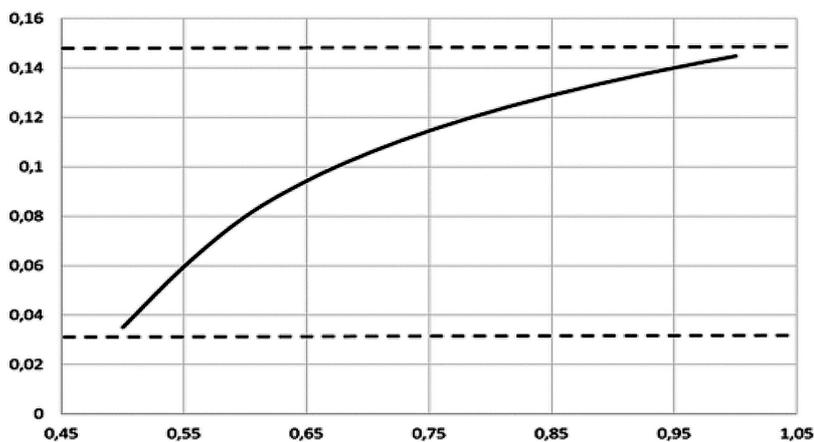


Рис. 5. Сводная вариограмма вариации фрактальной размерности талломов лишайников

Заключение

Внутри контрольного и опытного участков наблюдаются однородные свойства среды обитания лишайников. На это указывает тот факт, что разность между фрактальными размерностями талломов лишайников в двух соседних точках ожидаемо не превышает 0,03, а коэффициент ковариации внутри одной группы измерений составляет 0,039.

При переходе от экспериментального к фоновому участку состояние воздушной среды резко меняется, на что указывают вариации фрактальной размерности талломов лишайников между удаленными точками, максимальное значение которых стремится к 0,15. Разность между 0,15 и 0,03 можно интерпретировать как меру негативного влияния автодороги, которое по границе отбора проб распространяется в среднем на 800 м.

Дисперсия мер деградаций лишайников на опытном участке вдоль дороги составляет $\sigma(D) = 0,01$; $D = 1,25-1,45$. Дисперсия на контрольном лесном участке численно равна $\sigma(D) = 0,006$; $D = 1,4-1,6$. Двукратная разница в значениях дисперсии свидетельствует о наличии на опытном участке совокупности точечных источников загрязнения атмосферы (автотранспорта), выбросы от которых негативно воздействуют на развитие лишайников. При этом воздействие токсикантов на лишайники на удаленном контрольном участке минимально или отсутствует.

Предлагаемый метод вариограмм, в основе которого лежит анализ вариации параметра структуры биоиндикатора (таллома лишайника), может быть эффективно использован для решения следующих геоэкологических задач:

- зонирования территорий по степени загрязнения атмосферного воздуха как от точечных (например, объекты негативного воздействия, расположенные на территории деятельности горнодобывающего предприятия [8]), так и линейных источников загрязнения атмосферы (автомагистралей);
- разработки реабилитационных мероприятий окружающей природной среды и проведения геосистемного районирования техногенно нагруженных территорий [9];
- корректировки профиля санитарно-защитной зоны сообразно размещению источников негативного воздействия.

Библиографический список

1. Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон : принят Гос. Думой 8 ноября 2007 г. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72386/ (дата обращения: 18.07.2019).
2. Фракталы в науках о Земле : учеб. пособие / А. Н. Насонов, И. В. Цветков, И. М. Жогин [и др.]. Воронеж : Ковчег, 2018. 82 с.



3. Насонов А. Н., Цветков И. В., Кизеев А. Н., Кульнев В. В., Мартынов Д. Ю., Сметанин В. И. Применение фрактального анализа в лишеноиндикации загрязнения атмосферного воздуха техногенно нагруженных территорий // Экология и промышленность России. Москва. 2019. Т. 23, № 3. С. 34–38.
4. Об особо охраняемых природных территориях : федер. закон : принят Гос. Думой 14 марта 1995 г. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_6072/ (дата обращения: 18.07.2019).
5. Хадарцев А. А., Еськов В. М. Системный анализ, управление и обработка информации в биологии и медицине / под ред. В. М. Еськова. Самара : Офорт, 2005. 153 с.
6. Опекунов А. Ю., Ганул А. Г. Теория и практика экологического нормирования в России : учебник. СПб. : Издательство Санкт-Петербургского университета, 2014. 431 с.
7. Васильев А. И. Стационарность, устойчивость и стабильность назначены человечеству «свыше». М. : Академия Тринитаризма, 2009 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0012/001c/00121878.htm> (дата обращения: 20.07.2019).
8. Экогеосистемы горнодобывающего класса северо-запада Восточно-Европейской платформы (Мурманская область) / А. Н. Кизеев, С. Ф. Ушамова, Е. Б. Коклянов [и др.] // Экологическая геология крупных горнодобывающих районов Северной Евразии (теория и практика). Воронеж : Издательство Воронежского университета, 2015. С. 282–326.
9. Почечун В. А., Кульнев В. В. Геосистемное районирование как основа для реабилитационных мероприятий окружающей среды горнометаллургического комплекса (на примере металлургического комбината) // Медицина труда и промышленная экология. Москва. 2016. № 10. С. 36–39.

Образец для цитирования:

Насонов А. Н., Кульнев В. В., Цветков И. В., Шибалова Г. В., Кизеев А. Н., Насонов С. Н. Применение фрактального анализа при лишеноиндикации техногенного воздействия от линейного источника загрязнения атмосферы // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 4. С. 233–240. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-4-233-240>

Cite this article as:

Nasonov A. N., Kul'nev V. V., Tsvetkov I. V., Shibalova G. V., Kizeev A. N., Nasonov S. N. The Application of Fractal Analysis for the Lichen Indication of Technogenic Impact from a Linear Source of Atmospheric Pollution. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2019, vol. 19, iss. 4, pp. 233–240 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-4-233-240>