



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 4 (38). Декабрь, 2020

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов

Редакционная коллегия

Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
А. М. Макаров
А. Ю. Мейгал
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов
A. Gugolek B.
J. B. Jakovlev
R. Krasnov
J. P. Kurhinen

Службы поддержки

А. А. Зорина
А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





УДК 504:064:57.084.1(470.25)

БИОТЕСТИРОВАНИЕ ПОЧВ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТЕНИЙ

КУЛЬНЕВ
Вадим Вячеславович

кандидат географических наук, Центрально-Черноземное межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, kulneff.vadim@yandex.ru

НАСОНОВ
Андрей Николаевич

кандидат технических наук, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, adn22@yandex.ru

ЦВЕТКОВ
Илья Викторович

доктор технических наук, ФГБОУ ВО Тверской государственный университет, tapci@mail.ru

КОРОЛЬ
Татьяна Степановна

кандидат биологических наук, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, tskorol@gmail.com

ШАХОВСКАЯ
Кира Александровна

ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, sh.kira2014@yandex.ru

Ключевые слова:
биотестирование
лимитирующие факторы
показатель Херста
почва
поллютанты
самоорганизация
фрактал
фрактальная размерность

Аннотация: Интенсивное техногенное воздействие на компоненты окружающей среды очередной раз объясняет необходимость детального анализа взаимодействия человека и природы. Оценка степени загрязнения окружающей среды может быть построена на реакции биологических тест-объектов на внешнее воздействие, в том числе и на такое, как химическое, реализуемое через поступление из почвы в вегетативные части растений широкого спектра загрязняющих веществ. Целью исследования является разработка новых моделей, повышающих информативность биотестирования почв за счет описания самоорганизации как переходного процесса. При этом одним из перспективных методов определения загрязнения почвы является метод биотестирования, при котором оценивается динамика изменения параметров структуры тест-объекта во времени (длина проростка, развитость корневой системы). В этом аспекте фракталы оказались чрезвычайно удобным математическим инструментом описания динамики развития природного объекта в изменяющихся условиях среды, в которых природный объект сохраняет свое самоподобие, т. е. ведет себя как одно целое. В отличие от детерминированного подхода, который позволяет оценить лишь вероятность наступления кризисного

состояния в развитии растения, предложенное авторами моделирование показывает динамику и направление развития процесса: либо синтез, либо деструкция. Эта особенность является методической основой оценки влияния техногенного загрязнения почв на динамику метаболизма используемого тест-объекта. В данной работе исследовалась зависимость фрактальных характеристик проростков овса в зависимости от места его прорастания и почвы. В нашем случае фрактальные параметры позволяют судить о степени развитости растения и о том, насколько благоприятны внешние условия для его роста.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 18 мая 2020 года

Подписана к печати: 27 декабря 2020 года

Введение

Общеизвестно, что почвы являются основой экологической пирамиды и базисом развития наземных экосистем. В условиях техногенно нагруженных территорий почвы претерпевают значительные качественные изменения вследствие негативного воздействия химического, бактериологического и других видов загрязнения, так и вследствие механического преобразования, а именно уплотнения и разубоживания почвенного покрова. В этой связи в геоэкологию было введено понятие «урбоземы» – почвы селитебных территорий и городских агломераций.

Биотестирование почв методологически является определением их экологического состояния в лабораторных условиях (*in vitro*). В отечественной и зарубежной научной литературе описываются методические подходы к биотестированию экологического качества почв.

В исследовании О. А. Пестовой и А. И. Чупахиной описаны специфические физиологические группы микроорганизмов, которые встречаются лишь в присутствии определенных загрязняющих веществ и реагируют только на специальные химические соединения, например на содержание тяжелых металлов в почве (Пестова, Чупахина, 2017).

В работе самарских авторов показано, что наиболее информативным показателем качества почвы, загрязненной нефтепродуктами, является соотношение длин надземной и подземной частей фасоли. Загрязненность почвы нефтью проявляется в уменьшении данного показателя: 0.8 в нефтезагрязненной почве, 1.2 – в рекультивированной почве и 1.5 – в контрольной пробе (Баландина, Шабанова, 2007).

Исследование авторского коллектива из Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина посвящено оценке качества городских почв с использованием в качестве тест-объектов

червей энхитреид (*Enchytraeus crypticus*). Тест-реакции, регистрируемые в процессе проведения эксперимента, включают в себя смертность и изменение прироста численности особей (Смирнова и др., 2020).

Учеными из Лотарингии (Франция) в горнодобывающих районах, расположенных на юге Марокко, были отобраны пробы почв для проведения исследования с помощью набора для биотестирования MetPAD™. При этом тест на токсичность проводился одновременно с химическим анализом водных экстрактов хвостового материала и почв с целью оценки потенциальной доступности тяжелых металлов. Показано, что основными поллютантами являются цинк, медь и кадмий. Выявлено, что общая тенденция заключалась в увеличении токсичности металлов, измеряемой биотестом, с увеличением содержания доступных металлов в хвостохранилищах и грунтах. Поэтому испытание MetPAD™ может использоваться в качестве быстрого и чувствительного средства прогнозирования для оценки наличия тяжелых металлов в почвах, сильно загрязненных в результате горнодобывающей деятельности (Boulabah et al., 2005).

В работе исследователей из Монпелье (Франция) приведен сравнительный анализ модели активности свободных ионов (FIAM), модели наземного биотического лиганда (TBLM), модели диффузионных градиентов в тонких пленках (DGT) и биотеста растительного происхождения RHIZOtest по способности предсказывать концентрацию корневой меди в выращенной твердой пшенице (*Triticum turgidum durum* L.). Предполагалось, что ни один из методов не предусматривал адекватного прогноза концентрации корневой меди, что в основном коррелировало с общим количеством почвенной меди. Результаты измерений DGT и тем более прогноза FIAM отрицательно коррелировали с pH почвы и повышенным содержанием корневой меди в кислых почвах. Внедрение

TBLM улучшило численное предсказание FIAM, но все же не смогло предсказать адекватную концентрацию корневой меди, т. к. формализм TBLM не учитывал щелочение ризосферы, как это наблюдалось на месте. Напротив, измерения RHIZOtest учитывали щелочение ризосферы и были в основном соотнесены с общим содержанием меди в почве (Bravin et al., 2010).

Учеными из Италии и Швейцарии в качестве тест-объектов почв, загрязненных нефтепродуктами, были использованы эктомикоризные грибы, произрастающие на саженцах норвежской ели и тополя. Продолжительность времени между загрязнением почвы и посевом влияет как на рост саженцев, так и на микоризальный инфекционный потенциал почвы. Полученные результаты подтверждают важность микоризальных грибов в биоремедиации почв, загрязненных сырой нефтью (Nicolotti, Egli, 1998).

Исследование польских ученых было направлено на определение степени снижения незначительного загрязнения почв бензином и дизельным топливом за счет внесения бентонита, компоста и оксида кальция. При этом в качестве тест-объектов были использованы культуры рапса и посевного овса, в которых проводилось измерение содержания азота. Показано, что добавление бентонита, окиси кальция или компоста в почву, загрязненную нефтепродуктами, обычно снижало отрицательное влияние бентонита и дизельного топлива на рост растений, содержание белкового азота и увеличивало общее содержание азота в растениях. Наиболее эффективным оказался бентонит, окись кальция и компост – чуть менее эффективными. Наиболее положительные результаты были получены для ярового рапса как основной культуры. Добавление в почву компоста, бентонита и окиси кальция оказало более сильное модифицирующее влияние на содержание азота в растениях на загрязненных дизельным топливом почвах, чем бензином (Wyszkowski, Ziolkowska, 2009).

Китайскими специалистами оценивалось влияние тяжелых металлов (Cd, Cu, Pb, Zn) на активность EROD и CYP3A4 с помощью дождевого червя (*Eisenia fetida*) для выяснения их возможной индукции и потенциала в качестве биомаркеров загрязнения почвы тяжелыми металлами. Показано, что среди четырех тяжелых металлов кадмий был наиболее сильно индуцирован EROD и CYP3A4. В то время как активность EROD и CYP3A4

показала схожую тенденцию, EROD является более чувствительным, чем активность CYP3A4 при использовании *E. fetida* в качестве биомаркера загрязнения тяжелыми металлами (Cao et al., 2012).

Все вышеперечисленные подходы к определению загрязнения почв объединяет детерминированный аспект, который позволяет оценить лишь вероятность наступления кризисного состояния в развитии растения или популяции особей животных – тест-объектов. Одним из перспективных методов определения загрязнения почвы является метод биотестирования, при котором оценивается динамика изменения параметров структуры тест-объекта во времени. В этом аспекте фракталы оказались чрезвычайно удобным математическим инструментом описания динамики развития природного объекта в изменяющихся условиях среды, в которых природный объект сохраняет свое самоподобие, т. е. ведет себя как одно целое.

Таким образом, одним из методов, позволяющим оценивать размер природного объекта или развитость его структуры в изменяющихся условиях внешней и внутренней среды, является фрактальная геометрия (Mandelbrot, Hudson, 2017). Такой подход широко применяется при оценке воздействия на биологические объекты, поскольку они обладают фрактальными свойствами, или самоподобием (рис. 1) (Розенберг, 2018; Насонов и др., 2018).

В основе предлагаемого метода лежит оценка фрактальной размерности – меры изменения сложности природного объекта в зависимости от масштаба. Математически это величина описывает статистическую меру сложности используемого шаблона фрактала при его масштабировании (Молчатский и др., 2016).

Материалы

Были выбраны три точки наблюдения, расположенные в различных локациях Москвы: ул. Фестивальная (Северный административный округ), Лосиный остров (Восточный административный округ) и станция метро Лермонтовский проспект (Юго-восточный административный округ).

10–14 января 2020 г. интегральные пробы почв отбирались с глубины от 0 до 20 см около жилого дома на ул. Фестивальной, у станции метро Лермонтовский проспект и в национальном парке «Лосиный остров» методом конверта (10 * 10 м). Масса

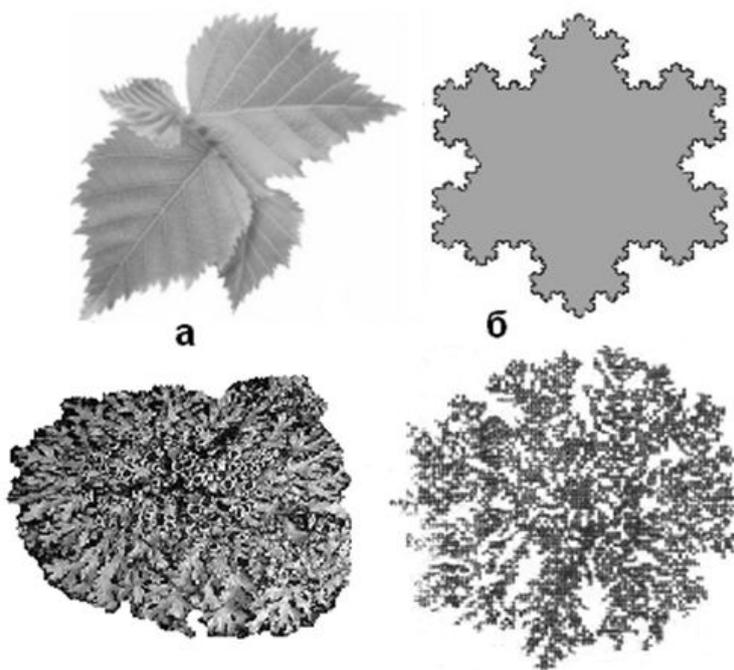


Рис. 1. Биоиндикаторы: лист березы и таллом лишайника (а) и моделирующие их фракталы (б)
 Fig. 1. Bioindicators: birch leaf and lichen thalla (a) and fractals modeling them (б)

каждой объединенной пробы составила около 1 кг. Для исключения ситуаций вторичного загрязнения исследуемых материалов все образцы были помещены в отдельные герметичные пакеты, чтобы обеспечить защиту от внешнего воздействия. Эксперимент проходил с 16 по 25 января 2020 г. Для проращивания был взят овес посевной (*Avena sativa* L.). Заранее пророщенные семена овса по одному были посажены в стаканчики с почвой.

Применительно к нашему эксперименту динамика пророста овса посевного в почвах с различным содержанием поллютантов будет различаться значениями фрактальной размерности $D_{\square}(1;2)$, которые для удобства можно нормировать к показателю Херста $H = 2 - D$, отражающему динамику системного метаболизма (Насонов и др., 2019).

При этом развитость структуры проростков овса, последовательно оцениваемых в ходе эксперимента, связана с фрактальной размерностью степенной зависимостью:

$$M(\delta) = \mu\delta^{1-D}, \quad [1]$$

где $M(\delta)$ – размер проростков; $\mu\delta$ – масса штабы измерения; D – фрактальная размерность.

Чрезмерное содержание загрязняющих веществ может приводить к нарушениям системного метаболизма (Жукова, 2010),

математически описываемого фракталом как статистическое нарушение самоподобия обменных процессов. Это означает, что природный объект не способен к своему воспроизведению как единого целого со средой существования: среда и объект существуют как отдельные системные целостности, не связанные друг с другом (Насонов и др., 2019).

При этом самоорганизация развития биотеста заключается в конкурентной динамике двух разнонаправленных процессов: ускорение метаболизма (при увеличении содержания биогенных компонентов – неорганических соединений азота, фосфора, серы и калия) и замедление обмена веществ (при увеличении концентрации, например, нефтепродуктов).

В работе (Корчагина, 2015) представлены результаты исследований особенностей пигментного аппарата, фотосинтетической активности листьев и продуктивной активности растений в условиях нефтяного загрязнения. В качестве объектов исследования были выбраны растения пушицы влагалищной (*Eriophorum vaginatum*), осоки острой (*Carex acuta*) и рогоза широколистного (*Typha latifolia*), произрастающие на территории Самолторского месторождения. Показано, что нефтяное загрязнение значительно снижает интенсивность фотосинтеза, общее количество пигментов в ассимилирующих органах растений и биологическую продуктивность.

То есть исследуется воздействие поллютантов, действующих вкуче с абиотическими факторами, в природных условиях.

В нашем случае при биотестировании загрязнения почв влияние абиотических факторов стремится к нулю. В ходе нашего эксперимента решается задача влияния загрязнения почв на динамику фрактальных параметров проростков овса посевного. При этом чрезмерное загрязнение приводит к хаотическим процессам роста овса, а умеренное – к балансу детерминированных и хаотических процессов в пределах экологической емкости среды, что порождает так называемый предельный экологический цикл воспроизводства овса в условиях загрязненной почвы.

При этом наблюдается устойчивая тенденция: чем выше загрязнение почвы, тем

более хаотичной становится динамика роста тест-объекта, и наоборот. Поэтому сравнение наблюдаемых динамик в ходе эксперимента на предмет усиления хаотичности (увеличение амплитуды и частоты колебаний до пределов устойчивости $D_d - D_k$) может являться критерием загрязненности почв, которую также можно ранжировать по степени опасности. То есть по характеру фрактальной динамики мы можем определить степень загрязненности почвы, получая тот же результат, что и при дорогостоящем количественном химическом анализе почв. Иными словами, в схеме техно-природного объекта пропадает контур обратной связи с внешней средой, и объект далее не может устойчиво воспроизводиться как системная целостность (рис. 2).



Рис. 2. Схема техно-природного объекта с обратной связью (Кульнев и др., 2020)

Fig. 2. Scheme of a techno-natural object with feedback (Kulnev et al., 2020)

В этом смысле фрактальность, как свойство природного объекта, обеспечивающее системно достаточную развитость структуры при изменении параметров внешней среды, объясняет биотическую компенсацию приносимых в него техногенных субстанций вещества и энергии за счет самоорганизации (Манжуров, 2002). Отсюда следует, что устойчивость природного объекта, обеспечиваемая самоорганизацией его развития, является первичным качеством, без которого он неизбежно погибает (Розенберг, 2018). В условиях техногенеза только сложноорганизованные природные объекты способны к самоорганизации за счет масштабно-инвариантной перестройки своей структуры (Насонов, Цветков, 2018).

В соответствии с принципом толерантности нарушение самоорганизации при-

родного объекта происходит в случае, когда значения системных показателей достигают лимитирующих значений, а именно:

- дефицита факторов, при котором объекту не хватает ресурсов для выживания в среде (показатель предельно низкого метаболизма, равносильного отсутствию обратной связи экосистемы с внешней средой);

- избыточности факторов, когда объект не успевает адаптироваться к частым изменениям внешней среды (показатель предельно высокого метаболизма с внешней средой, приводящего к нарушению функциональной целостности экосистемы) (Насонов и др., 2019).

В моделировании и анализе динамики сложноорганизованных техно-природных объектов ключевым атрибутом выступает их самоорганизация как компенсаторный био-

тический механизм внешних возмущений, который выстраивается на двух типах конкурирующих процессов: одни обеспечивают самосохранение системы, закрепляют ее строение и функциональные особенности за счет действия биотических факторов, другие обеспечивают развитие системы за счет действия техногенных факторов. Благодаря масштабно-инвариантной перестройке структуры экосистема имеет возможность балансировать эти процессы в обновляющейся среде существования (Иудин, Копосов, 2010).

С учетом принципа толерантности экосистемы уравнение самоорганизации техно-природных процессов задается соотношениями:

$$H(t) = \sum_{t=1}^n (\alpha_t F_1) + \beta t F_2, \quad [2]$$

$$(H_d < H(t) < H_k) \rightarrow (H_0) = 0.5, \quad [3]$$

где $H(t)$ – динамика метаболизма экосистемы в пределах лимитирующих факторов, измеренных в шкале показателя Херста; (H_0) – состояние экологического оптимума; H_d – состояние дефицита факторов; H_k – состояние избыточности факторов; $\sum_{t=1}^n (\alpha_t F_1)$ – возмущающие техногенные факторы; $\beta t F_2$ – компенсирующие возмущение биотические факторы; $(\alpha_t; \beta t)$ – весовые коэффициенты соответствующих факторов.

Уравнение самоорганизации говорит о том, что в устойчивой экосистеме после снятия нагрузки ее состояния всегда обратимы за счет действия биотического фактора. При этом соотношение [2] определяет состояние сбалансированности техно-природных процессов относительно экологического оптимума (H_0), а соотношение [3] определяет область устойчивости экосистемы и направленность процессов (рис. 3).

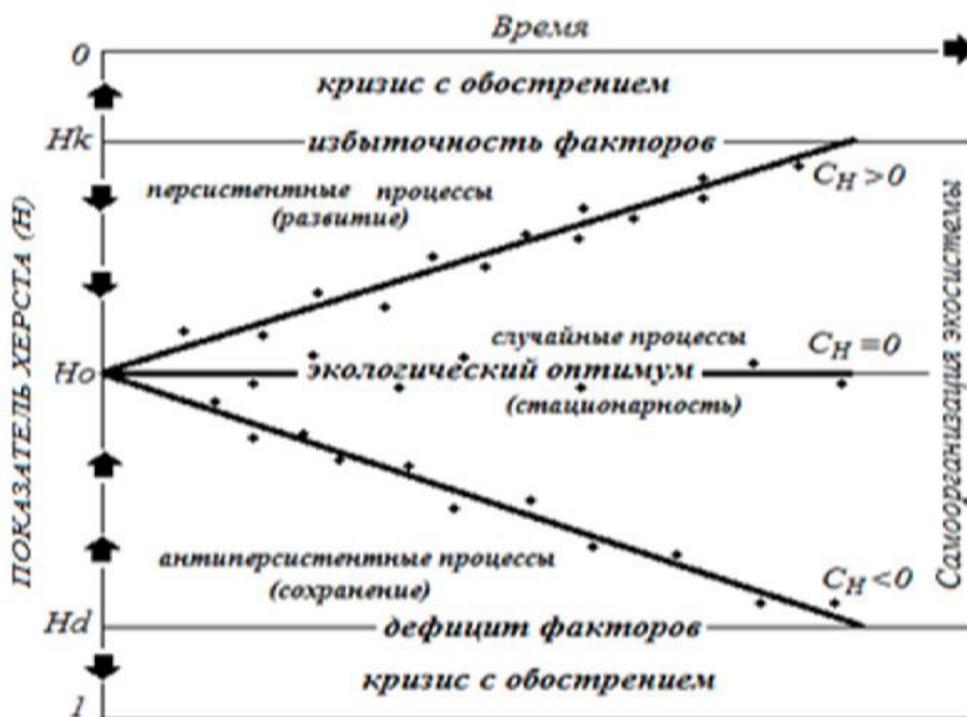


Рис. 3. Тренды метаболизма экосистемы. Стрелками на оси ординат обозначена направленность техно-природных процессов (Кульнев и др., 2020)

Fig. 3. Trends in ecosystem metabolism. The arrows on the ordinate axis indicate the orientation of techno-natural processes (Kulnev et al., 2020)

Очевидно, что аппроксимация полученной статистики фрактальных показателей дает тренд смещения развития овса от экологического оптимума, вызванного нарушением процессов техно-природного обмена, которое тем больше, чем выше загрязнение

почвы. При этом корреляция процессов, определяющая самоорганизацию параметров овса, задается соотношением:

$$C_H = 2^{H-1} - 1. \quad [4]$$

Корреляция процессов [4] происходит в

пределах устойчивого развития экосистемы, которая нарушается в точках H_k , H_d , когда они переходят в неустойчивое равновесие со средой, а их рост сменяется деградацией (Насонов и др., 2019).

В статистическом плане принципиальным отличием применяемых нами фрактальных

моделей является их большая информативность в сравнении с традиционно используемыми линейными детерминированными и случайными гауссовскими распределениями, являющимися частными случаями фрактальных моделей с показателями Херста $H = 1$ и $H = 1/2$ соответственно (рис. 4).

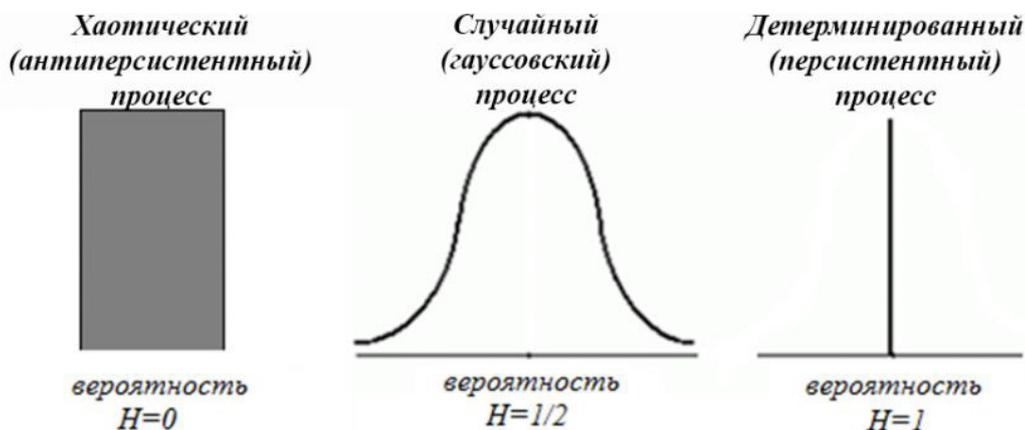


Рис. 4. Распределение вероятности статистических событий при различных значениях постоянной Херста (H)

Fig. 4. Probability distribution of of statistical events at different values of Hearst constant (H)

Поскольку случайные (гауссовские) процессы в шкале показателя Херста имеют параметры $C_H = 0; H = H_0 = 1/2$. (Подлазов, 2005), то такой режим трактуется нами как экологический оптимум, обеспечивающий устойчивость обменных взаимодействий природного объекта с внешней средой.

Динамические смещения статистических значений от экологического оптимума к показателю $H = H_k$ при $C_H > 0$ увеличивают вероятность развития детерминированных (трендоустойчивых) процессов, обуславливающих развитие природного объекта. И наоборот, приближение статистических значений к показателю $H = H_d$ при $C_H < 0$ увеличивает вероятность развития хаотических процессов со знакопеременным трендом, обуславливающих самосохранение природного объекта.

Если в динамике происходит резкое упрощение состояний экосистемы $H_k \Rightarrow H_d$, то наступает истощение (дефицит) ресурса экосистемы. Вероятностное наступление такого события говорит о том, что экосистема перешла в неустойчивое равновесие со средой и уже не может регулировать свое состояние. При этом резко возрастает роль случайностей в развитии кризисных процессов.

Методы

Схема эксперимента и обработка полученных статистических данных для верифи-

кации уравнения самоорганизации овса в различных образцах почв состояла в реализации следующих этапов:

1. В различных районах Москвы (Лосиный остров, Фестивальная ул., Лермонтовский пр-т) были отобраны пробы почвы для проращивания заранее подготовленных семян овса (рис. 5). В качестве модельных тест-растений были использованы семена Овса посевного (*Avena sativa* L.).

2. Проращивание семян *Avena sativa* L. на отобранных образцах почв производилось в течение 10 дней с ежедневной фотофиксацией образцов (рис. 6).

Важным обстоятельством является обеспечение для всех экспериментальных образцов одинаковых абиотических факторов: времени освещения, комнатной температуры 24 °С, ежедневного полива образцов 20 мл. Это необходимо для выделения влияния техногенного фактора, обусловленного наличием поллютантов в почвах.

3. Расчет фрактальных размерностей D по изображениям проростков овса через свободно распространяемую программу «Gwyddion» и построение графиков динамики фрактальных показателей в шкале постоянной Херста (рис. 7).

Результаты

В основе способа расчета фрактальной размерности, используемого в програм-

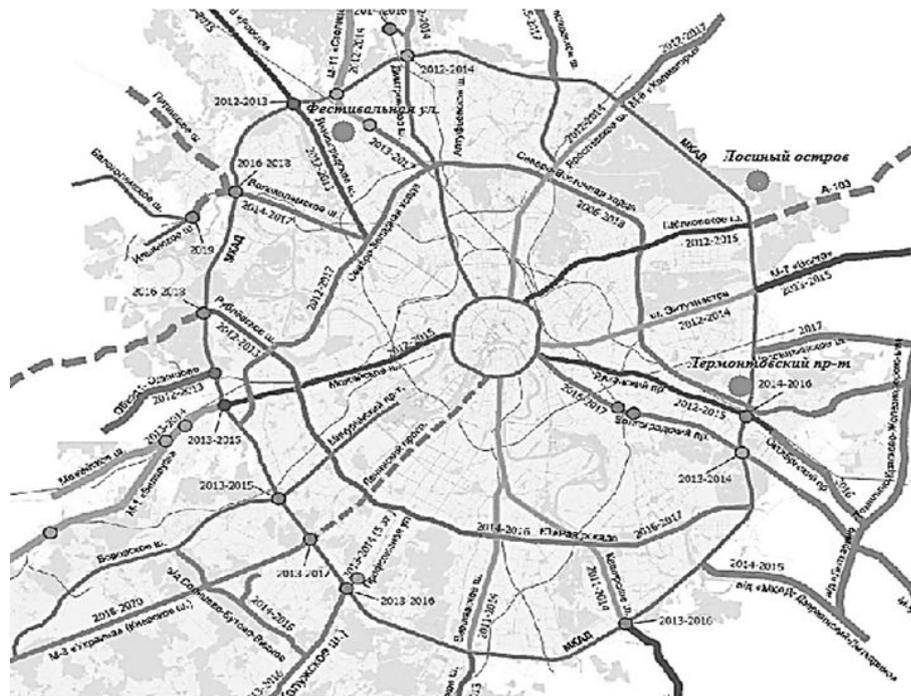


Рис. 5. Места отбора проб почв для проращивания овса
 Fig. 5. Soil sampling sites for oat germination

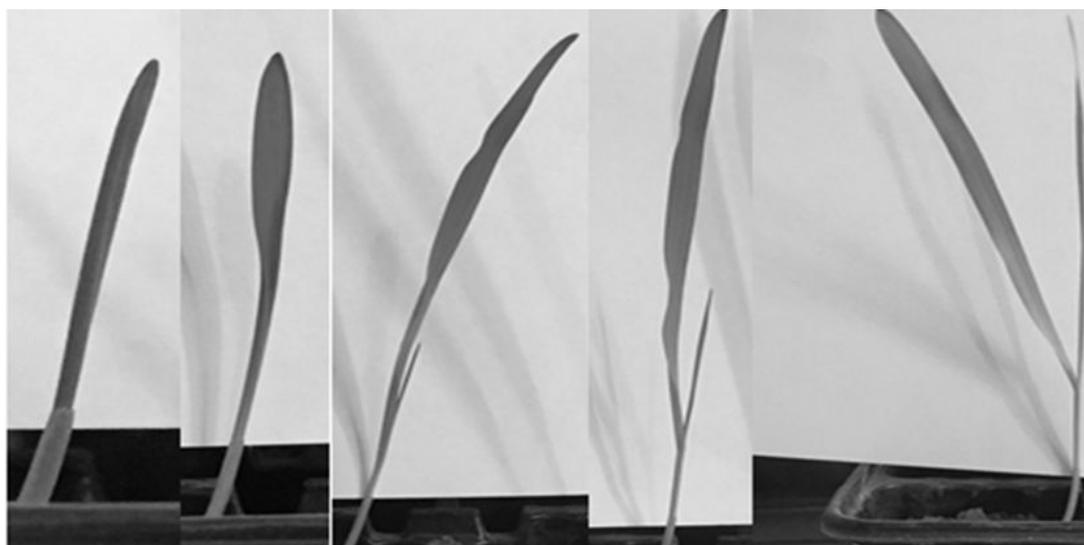


Рис. 6. Динамика проростков овса на отобранных пробах почв
 Fig. 6. Dynamics of oats sprouts on selected soil samples

ме «Gwyddion», лежит наиболее распространенный клеточный метод: квадратная решетка с постоянной (δ) накладывается на поверхность изображения. Изначально (δ) задается равной $X/2$ (где X – это длина края поверхности). Тогда $N(\delta)$ – число всех квадратов, содержащих хотя бы один пиксель изображения. Постоянная решетки на каждом шаге уменьшается в два раза, и процесс повторяется до тех пор, пока (δ) не станет равной расстоянию между двумя соседними пикселями. Наклон аппроксимиру-

ющей прямой, выделяющий область скейлинга (область масштабов, в которых объект сохраняет самоподобие), позволяет определить фрактальную размерность D (Терехов, 2011).

Применительно к изображению проростков овса этот метод основан на подсчете числа квадратов, покрывающих его изображение:

$$\text{Log}N(\delta) = -D\text{Log}(\delta), \quad [5]$$

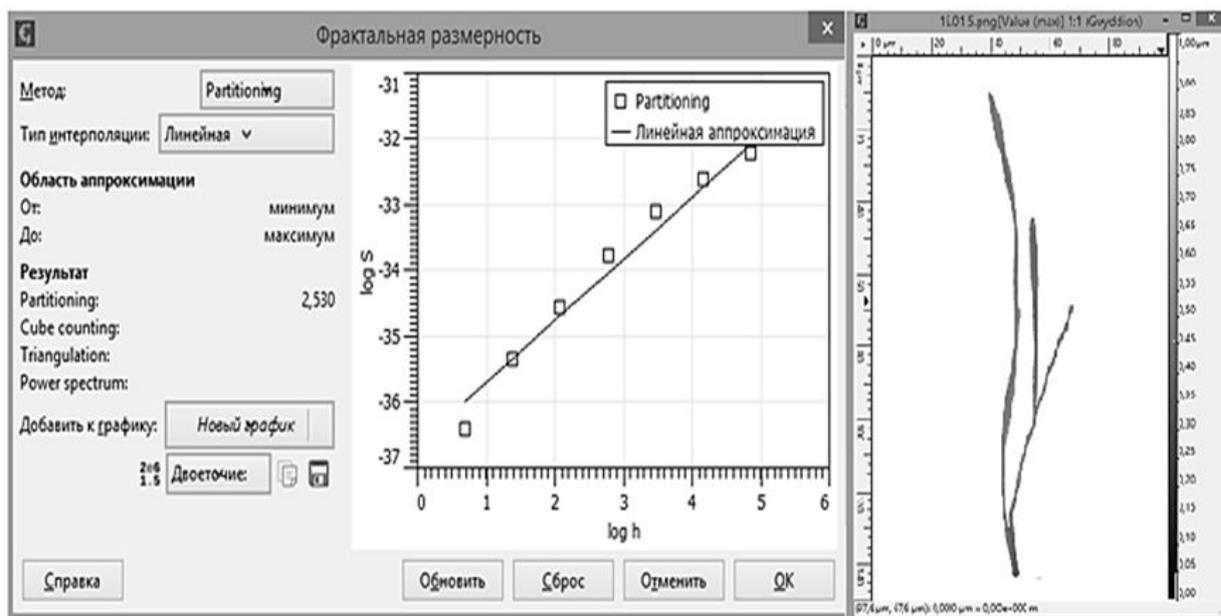


Рис. 7. Интерфейс программы «Gwyddion»
Fig. 7. Gwyddion Interface

где D – фрактальная размерность; $N(\delta)$ – число квадратов, покрывающих изображение проростков овса; (δ) – варьируемый масштаб решетки покрытия.

Для нашего случая уравнение самоорганизации динамики роста овса, определяемое корреляцией процессов действующих факторов [2], задается уравнением тренда:

$$\text{Log}N(\delta) = -D\text{Log}(\delta), \quad [6]$$

где $\alpha; \beta$ – весовые коэффициенты действующих факторов (техногенных и биотических).

В нашем эксперименте мы анализируем прямое влияние загрязнений почв на адаптационные возможности овса посевного (*Avena sativa* L.) и по характеру этого влияния делаем вывод о способности почв (при прочих благоприятных условиях) поддержи-

вать сложившееся биоразнообразие. Решение таких задач в настоящее время входит в проблему формирования экологического каркаса территории (Манжуров, 2002).

Обсуждение

4. На основании расчетных статистических динамик геометрических параметров проростков овса строим тренды смещений от экологического оптимума и по характеру их направленности и весовым коэффициентам делаем формальную оценку влияния загрязнения почв на развитие биотеста.

Для почвы, отобранной на Лосином острове, функция фрактальных показателей для овса имеет вид:

$$H(t) = 0.003t + 1.41. \quad [7]$$

Соответствующий график функции [7] изображен на рис. 8.

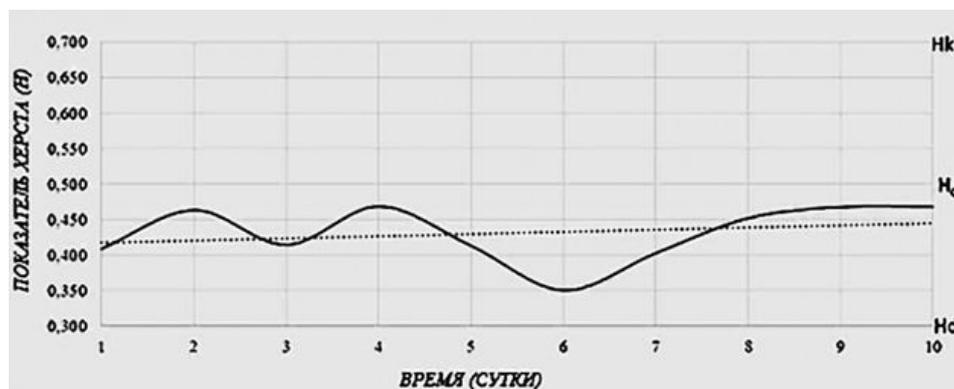


Рис. 8. Динамика фрактальных показателей биоиндикатора для почвы, отобранной на Лосином острове
Fig. 8. Dynamics of fractal parameters of the test object for the soil selected on Losiny Island

Характер динамики тренда говорит о том, что здесь мы имеем наименее загрязненную из всех образцов почву, практически не влияющую на динамику развития проростков овса, поскольку обменные процессы имеют слабо выраженную тенденцию приближения к экологическому оптимуму, а адаптационный процесс проходит в пределах устойчивости.

Более выраженная реакция тест-объекта на загрязнения почвы наблюдается на Фестивальной улице, для образцов которых уравнение динамики фрактальных показате-

телей имеет вид:

$$H(t) = 0.016t + 1.30 . \quad [8]$$

Характер динамики аппроксимирующего тренда уравнения [8] говорит о том, что здесь среда развития овса оказывается менее благоприятна, чем на Лосином острове, что может быть следствием наличия в таких почвах более токсичных поллютантов. Однако образец демонстрирует стабилизацию процесса к концу эксперимента, что не свидетельствует о критичности загрязнений (рис. 9).

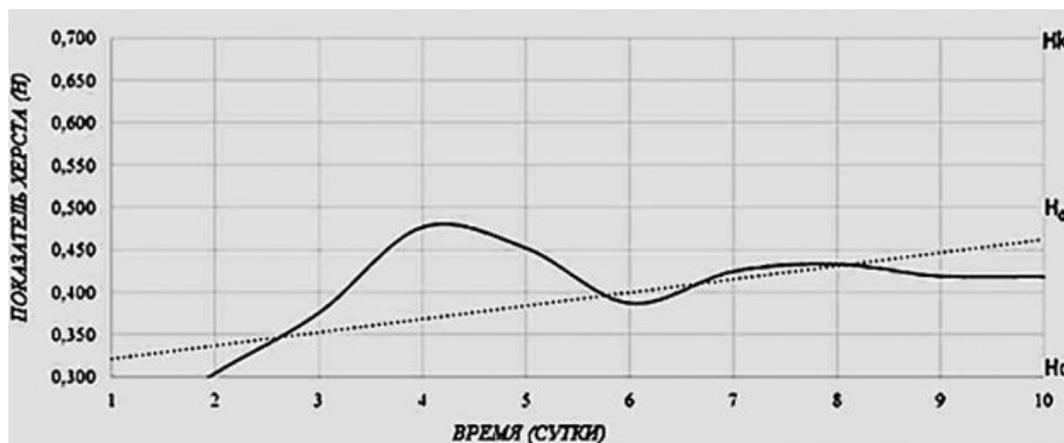


Рис. 9. Динамика самоорганизации биоиндикатора для почвы, отобранной на ул. Фестивальной
Fig. 9. Dynamics of self-organization of the test object for the soil selected on Festival Street

Наиболее загрязненная почва, оказывающая слабо выраженный отрицательный эффект на развитие *Avéna sativa* L., отмечается для образцов почв, отобранных на Лермонтовском проспекте (рис. 10). Здесь уравнение самоорганизации имеет вид

$$H(t) = -0.002t + 1.42 . \quad [9]$$

Слабо выраженная направленность тренда к показателю $H = H_d$ говорит о том, что

процессы стабилизации тест-объекта незначительно преобладают над процессами его развития. Однако, находясь в области знакопеременных трендов, ситуация, скорее всего, придет к стабилизации за более длительный промежуток времени, чем время эксперимента. Поэтому с точки зрения критичности загрязнения почвы ситуация здесь равнозначна ситуации на ул. Фестивальной.

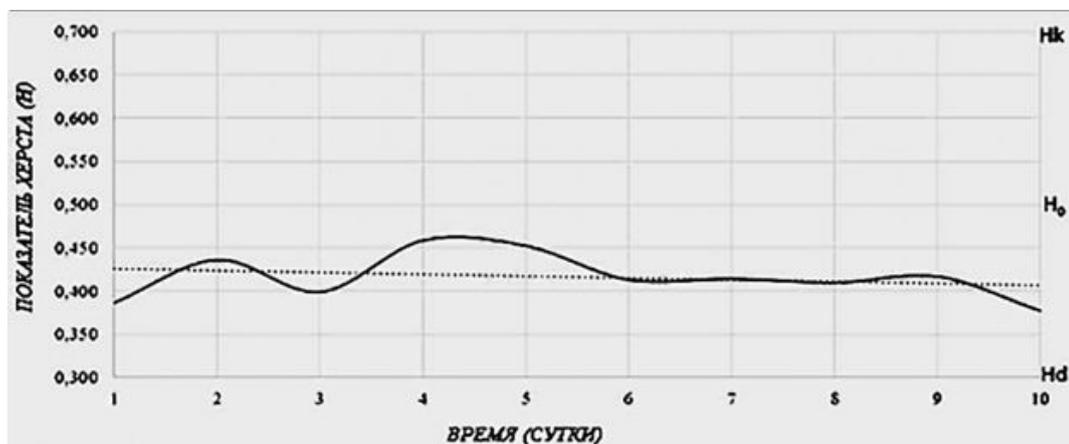


Рис. 10. Динамика самоорганизации тест-объекта для почвы, отобранной на Лермонтовском проспекте
Fig. 10. Dynamics of self-organization of the test object for the soil selected on Lermontovsky Avenue

Результаты эксперимента наглядно демонстрируют прямое влияние загрязнений почв на адаптационные возможности тест-объекта, по характеру влияния которых можно делать вывод об их способности (при прочих благоприятных условиях) поддерживать необходимое биоразнообразие, что наиболее актуально в условиях техногенной нагруженности территорий.

Заключение

Результаты полностью соотносятся с местами отбора проб почв. Лосиный остров относится к особо охраняемым природным территориям (национальный парк), наименее подверженным техногенному загрязнению. Территории, относящиеся к Фестивальной улице и Лермонтовскому проспекту, демонстрируют более загрязненные почвы, однако ситуация на них далека от критической. Показателен факт, что на почвах, ото-

бранных на границе Лосиногостовского острова, прилегающей к автодороге и жилому сектору, ситуация по загрязнению почвы оказалась равнозначна Фестивальной улице.

Описанный метод может также эффективно использоваться при мониторинге загрязнения почв, а при дополнении – в уточнении границ санитарно-защитных зон через распределения плотности поверхностных загрязнений почв от стационарных и передвижных источников (Манжуров, 2002).

Таким образом, мы получаем возможность оценки влияния и классификации загрязнений почв урбанизированных территорий по характеру самоорганизации динамики развития тест-объекта. Это становится возможным благодаря определению структурных параметров биологических объектов в динамике, которые дают основу для разработки новых малозатратных и более информативных методов биотестирования.

Библиография

- Баландина Л. П., Шабанова А. В. Опыт оценки качества рекультивации нефтезагрязненных почв методом биотестирования // Экология и промышленность России. Т. 11. № 11. М.: Калвис, 2007. С. 46–47.
- Жукова Л. А. Экологические шкалы и методы анализа экологического разнообразия растений : Монография. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского ун-та, 2010. 368 с.
- Иудин Д. И., Копосов Е. В. Фракталы: от простого к сложному : Монография. Н. Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2012. 200 с.
- Кульнев В. В., Насонов А. Н., Жогин И. М., Цветков И. В., Грабарник В. Е., Карелин Н. В. Об опыте проведения управляемой альгоремедиации рекреационного водоема // Экология и промышленность России. Т. 24. № 3. М.: Калвис, 2020. С. 58–64. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-3-58-64.
- Манжуров И. Л. Фрактальная модель распределения плотности поверхностных загрязнений : Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2002. 24 с.
- Молчатский С. Л., Казанцев И. В., Матвеева Т. Б. Применение метода фрактального анализа для биоиндикационной оценки состояния окружающей среды . // Самарский научный вестник. 2016. № 4 (17). С. 28–31.
- Насонов А. Н., Цветков И. В. Особенности управления развитием техно-природных процессов на основе мультифрактальной динамики // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2018: Труды одиннадцатой Международной конференции: В 3 т. / Под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. М.: Изд-во ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, 2018. С. 83–88.
- Насонов А. Н., Кульнев В. В., Графкина М. В. Моделирование динамики и прогноза экологических состояний воздушной среды селитебных территорий // Экология и развитие общества. 2019. № 2 (29). С. 56–64.
- 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. 2019. Т. 23. № 3. С. 34–38. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-34-38.
- Насонов А. Н., Цветков И. В., Жогин И. М., Кульнев В. В., Репина Е. М., Киринос С. Л., Звягинцева А. В., Базарский О. В. Фракталы в науках о Земле : Учеб. пособие. Воронеж: Ковчег, 2018. 82 с.
- Пестова О. А., Чупахина А. И. Биотестирование почв с помощью микроорганизмов // Декада экологии: Материалы XI Международного конкурса. Омск, 2017. С. 39–43.
- Подлазов А. В. Будущее прикладной математики: Лекции для молодых исследователей . М.: Эдиториал УРСС, 2005. С. 404–426.
- Розенберг Г. С. Фрактальные методы анализа структуры сообществ // Принципы экологии. 2018. № 4. С. 4–43. DOI: 10.15393/j1/art.2018.8406.
- Смирнова Т. С., Челознова К. В., Галкина А. А. Применение червей энхитреид в биодиагностике состояния городских почв // Экологические системы и приборы. 2020. № 2. С. 15–22.

Терехов С. В. Фракталы и физика подобия . Донецк, 2011. 255 с.

Benoit B. Mandelbrot, Richard L. Hudson. The (mis) Behavior of Markets. A Fractal View of Risk, Ruin, and Reward. Basic Books, 2017.

Boularbah A., Schwartz C., Bitton G., Morel J. L. Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils // Chemosphere. 2006. Vol. 63. Issue 5. P. 802–810. DOI: 1016/j.chemosphere.2005.07.079.

Matthieu N. Bravin, Aurélie M. Michaud, Bourane Larabi. Philippe Hinsinger RHIZOtest: A plant-based biotest to account for rhizosphere processes when assessing copper bioavailability // Environmental Pollution. 2010. Vol. 158. Issue 10. P. 3330–3337. DOI: 1016/j.envpol.2010.07.029.

Nicolotti G., Egli S. Soil contamination by crude oil: impact on the mycorrhizosphere and on the revegetation potential of forest trees // Environmental Pollution. 1998. Vol. 99. Issue 1. P. 37–43. DOI: 10.1016/S0269-7491(97)00179-6.

Wyszkowski M., Ziolkowska A. Role of compost, bentonite and calcium oxide in restricting the effect of soil contamination with petrol and diesel oil on plants // Chemosphere. 2009. Vol. 74. Issue 6. P. 860–865. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.10.035.

Xiufeng Cao, Yufang Song, Jianrong Kai, Xiaoxia Yang, Puhui Ji. Evaluation of EROD and CYP3A4 activities in earthworm *Eisenia fetida* as biomarkers for soil heavy metal contamination // Journal of Hazardous Materials. 2012. Vol. 243. P. 146–151. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.012.

Благодарности

Авторский коллектив выражает глубокую признательность Владимиру Николаевичу Большакову за поддержку и стимул к проведению исследований.

SOIL BIOTESTING BASED ON FRACTAL CHARACTERISTICS OF PLANTS

KUL'NEV
Vadim Vyacheslavovich *PhD, Central Black Earth Interregional Office of the Federal Service for Supervision of Natural Resources, kulneff.vadim@yandex.ru*

NASONOV
Andrey Nikolaevich *PhD, Russian State Agrarian University - K.A. Timiryazev Moscow Academy of Agricultural Sciences, adn22@yandex.ru*

TSVETKOV
Ilya Viktorovich *D.Sc., Tver State University, mancu@mail.ru*

KOROL'
Tatyana Stepanovna *PhD, Russian State Agrarian University - K.A. Timiryazev Moscow Academy of Agricultural Sciences, tskorol@gmail.com*

SHAKHOVSKAYA
Kira Aleksandrovna *Russian State Agrarian University - K.A. Timiryazev Moscow Academy of Agricultural Sciences, sh.kira2014@yandex.ru*

Keywords:
biotesting
limiting factors
Hearst index
soil
pollutants
self-organization
fractal
fractal dimension

Summary: Intense technological impact on the components of the environment once again explains the need for a detailed analysis of interaction between man and nature. Assessment of the degree of environmental pollution can be based on the reaction of biological test objects to external influences, including such as chemical ones, implemented through the flow of a wide range of pollutants from the soil to the vegetative parts of plants. The aim of the study is to develop new models that increase the informativity of soil biotesting by describing self-organization as a transitional process. One of prospective methods for determining soil pollution is a method of biotesting, in which the dynamics of changes in the structural parameters of the test object is evaluated in time (length of germ, development of root system). In this aspect, fractals have proved to be an extremely convenient mathematical tool for describing the dynamics of the development of a natural object in changing environmental conditions, in which a natural object retains its self-similarity, i.e. behaves as a single unite. In contrast to the deterministic approach, which allows us to evaluate only the probability of a crisis state in the development of a plant, the modeling proposed by the authors shows the dynamics and direction of the process: either synthesis or destruction. This feature is a methodological basis for assessing the impact of technogenic pollution of soils on the dynamics of metabolism of the test-object under examination. In this work, the dependence of the fractal characteristics of oat seedlings on the place of its germination and soil was studied. In our case, the fractal parameters allow us to judge the degree of development of the plant and how favorable the external conditions are for its growth

Received on: 18 May 2020

Published on: 27 December 2020

References

- Balandina L. P. Shabanova A. V. Experience in assessing the quality of reclamation of oil-contaminated soils using bio-testing method, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. T. 11. No. 11. M.: Kalvis, 2007. P. 46–47.
- Benoit B. Mandelbrot, Richard L. Hudson. The (mis) Behavior of Markets. A Fractal View of Risk, Ruin, and Reward. Basic Books, 2017.
- Boularbah A., Schwartz C., Bitton G., Morel J. L. Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils, *Chemosphere*. 2006. Vol. 63. Issue 5. P. 802–810. DOI: 1016/j.chemosphere.2005.07.079.
- Iudin D. I. Koposov E. V. Fractals: from simple to complex: Monografiya. N. Novgorod: Izd-vo NNGASU,

2012. 200 p.
- Kul'nev V. V. Nasonov A. N. Zhogin I. M. Cvetkov I. V. Grabarnik V. E. Karelin N. V. On the experience of managed algoremediation of a recreational pond, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. T. 24. No. 3. M.: Kalvis, 2020. P. 58–64. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-3-58-64.
- Manzhurov I. L. Fractal model of surface contamination density distribution: Avtoref. dip. ... kand. fiz, mat. nauk. Ekaterinburg, 2002. 24 p.
- Matthieu N. Bravin, Aurélie M. Michaud, Bourane Larabi. Philippe Hinsinger RHIZOtest: A plant-based biotest to account for rhizosphere processes when assessing copper bioavailability, *Environmental Pollution*. 2010. Vol. 158. Issue 10. P. 3330–3337. DOI: 10.1016/j.envpol.2010.07.029.
- Molchatskiy S. L. Kazancev I. V. Matveeva T. B. Application of the fractal analysis method for bioindication environmental assessment., *Samarskiy nauchnyy vestnik*. 2016. No. 4 (17). P. 28–31.
- Nasonov A. N. Cvetkov I. V. Kizeev A. N. Kul'nev V. V. Martynov D. Yu. Smetanin V. I. Application of fractal analysis in lichenoidication of atmospheric air pollution of anthropogenically loaded territories, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019. T. 23. No. 3. P. 34–38. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-34-38.
- Nasonov A. N. Cvetkov I. V. Zhogin I. M. Kul'nev V. V. Repina E. M. Kirnosov S. L. Zvyaginceva A. V. Bazarskiy O. V. *Fractals in Earth Sciences: Ucheb. posobie*. Voronezh: Kovcheg, 2018. 82 p.
- Nasonov A. N. Cvetkov I. V. Peculiarities of management of technological processes development based on multifractal dynamics, *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem MLS'D'2018: Trudy odinnadcatoy Mezhdunarodnoy konferencii: V 3 t., Pod obsch. red. P. N. Vasil'eva, A. D. Cvirikuna*. M.: Izd-vo IPU RAN im. V. A. Trapeznikova, 2018. P. 83–88.
- Nasonov A. N. Kul'nev V. V. Grafkina M. V. Simulation of dynamics and forecast of ecological conditions of the air environment in residential areas, *Ekologiya i razvitie obschestva*. 2019. No. 2 (29). P. 56–64.
- Nicolotti G., Egli S. Soil contamination by crude oil: impact on the mycorrhizosphere and on the revegetation potential of forest trees, *Environmental Pollution*. 1998. Vol. 99. Issue 1. P. 37–43. DOI: 10.1016/S0269-7491(97)00179-6.
- Pestova O. A. Chupahina A. I. Soil biotesting with microorganisms, *Dekada ekologii: Materialy XI Mezhdunarodnogo konkursa*. Omsk, 2017. P. 39–43.
- Podlazov A. V. *The future of applied mathematics: Lectures for young researchers*. M.: Editorial URSS, 2005. P. 404–426.
- Rozenberg G. S. Fractal methods for community structure analysis, *Principy ekologii*. 2018. No. 4. P. 4–43. DOI: 10.15393/j1/art.2018.8406.
- Smirnova T. S. Cheloznova K. V. Galkina A. A. Application of enchytraeid worms in biodiagnostics of urban soil conditions, *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2020. No. 2. P. 15–22.
- Terehov S. V. *Fractals and similarity physics*. Doneck, 2011. 255 p.
- Wyszowski M., Ziolkowska A. Role of compost, bentonite and calcium oxide in restricting the effect of soil contamination with petrol and diesel oil on plants, *Chemosphere*. 2009. Vol. 74. Issue 6. P. 860–865. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.10.035.
- Xiufeng Cao, Yufang Song, Jianrong Kai, Xiaoxia Yang, Puhui Ji. Evaluation of EROD and CYP3A4 activities in earthworm *Eisenia fetida* as biomarkers for soil heavy metal contamination, *Journal of Hazardous Materials*. 2012. Vol. 243. P. 146–151. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.012.
- Zhukova L. A. *Ecological scales and methods of analysis of plant ecological diversity: Monografiya*. Yoshkar-Ola: Izd-vo Mariyskogo un-ta, 2010. 368 p.