

УДК 504.05  
DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-1-71-80

## Мультифрактальные модели воздействия на водную экосистему: отклик, риск, управление

<sup>1</sup>Кочуров Б.И., <sup>2</sup>Кульnev В.В., <sup>3</sup>Цветков И.В.

<sup>1</sup>Институт географии Российской академии наук,  
Россия, 109017, Москва, Староманетный переулок, 29

<sup>2</sup>Центрально-Черноземное межрегиональное управление  
Федеральной службы по надзору в сфере природопользования,  
Россия, 394087, Воронеж, ул. Ломоносова, 105

<sup>3</sup>Тверской государственный университет,  
Россия, 170100, Тверь, ул. Желябова, 33

E-mail: b.i.kochurov@igras.ru, kulnev@grn36.ru, mancu@mail.ru

**Аннотация.** Природные и природно-антропогенные экосистемы и ландшафты являются сложными эмерджентными системами. Для их адекватного описания, оценки состояния и управления необходимо использовать степенное распределение параметров. Детерминированные (усреднённые) параметры, в значительной мере, упрощают описание такой системы и не позволяют в полной мере определять вероятность возникновения в экосистеме негативных изменений (риска) при антропогенных воздействиях. Использование фрактального подхода в экологических исследованиях решают эту проблему. Целью работы является разработка мультифрактальной модели воздействия на водную экосистему, основанной на принципах самоорганизации природной экосистемы. Суммарный отклик экосистемы на антропогенное воздействие предложено оценивать путем наложения ее мультифрактального образа на выделенные формы критической организации экосистемы, которая отвечает пределам самовосстановления структуры гидробиоценоза. Нарушение самоорганизации экосистемы эквивалентно нарушению фрактальности, обеспечивающей ее жизнеспособность в изменяющихся условиях внешней среды. Проведена формализация показателей, регламентирующих предельно допустимую экологическую нагрузку (ПДЭН), когда хозяйственная деятельность человека не превышает порогов устойчивости экосистемы. Это позволяет на примере альгоремедиации водоемов обеспечить наиболее приемлемые параметры хозяйственной деятельности и контроль за восстановлением техногенно-нарушенных водных экосистем.

**Ключевые слова:** альгоремедиация, водная экосистема, гидробиоценоз, мультифрактальная динамика, управление рисками

**Благодарность:** Работа выполнена по государственному заданию «Оценка физико-географических, гидрологических и биотических изменений окружающей среды и их последствий для создания основ устойчивого природопользования». FMGE-2019-0007 АААА-А19-119021990093-8.

**Для цитирования:** Кочуров Б.И., Кульнев В.В., Цветков И.В. 2022. Мультифрактальные модели воздействия на водную экосистему: отклик, риск, управление. Региональные геосистемы, 46(1): 71–80. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-1-71-80



# Multifractal Models of Impact on the Aquatic Ecosystem: Response, Risk, Management

**<sup>1</sup>Boris I. Kochurov, <sup>2</sup>Vadim V. Kulnev, <sup>3</sup>Ilya V. Tsvetkov**

<sup>1</sup>Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,

29 Staromonetny Lane, Moscow 109017, Russia,

<sup>2</sup>Central Chernozem Interregional Administration

Federal Service for Supervision of Nature Management, Voronezh, Russia

105 Lomonosov St, Voronezh 394087, Russia

<sup>3</sup>Tver State University,

33 Zhelyabova St, Tver, 170100, Russia

E-mail: b.i.kochurov@igras.ru, kulnev@rpn36.ru, mancu@mail.ru

**Abstract.** Natural and natural-anthropogenic ecosystems and landscapes are complex emergent systems. For their adequate description, assessment of the state and control, it is necessary to use the power-law distribution of parameters. Deterministic (averaged) parameters greatly simplify the description of such a system and do not allow to fully determine the probability of negative changes (risk) occurring in the ecosystem under anthropogenic impacts. The use of the fractal approach in ecological research solves this problem. The aim of the work is to develop a multifractal model of the impact on the aquatic ecosystem based on the principles of self-organization of the natural ecosystem. The total response of ecosystems to anthropogenic impact is proposed to be assessed by superimposing its multifractal image on the selected forms of critical organization of the ecosystem, which meets the limits of self-healing of the structure of hydrobiocenosis. Violation of ecosystem self-organization is equivalent to violation of fractality, which ensures its viability in changing environmental conditions. The formalization of indicators regulating the maximum permissible environmental load (PDN), when human economic activity does not exceed the thresholds of ecosystem stability, has been carried out. This makes it possible, using the example of the algoremediation of reservoirs, to provide the most acceptable parameters of economic activity and control over the restoration of technogenically disturbed aquatic ecosystems.

**Keywords:** algoremediation, aquatic ecosystem, hydrobiocenosis, multifractal dynamics, risk management

**Acknowledgment:** He work was carried out according to the state task "Assessment of physical, geographical, hydrological and biotic changes in the environment and their consequences for creating the foundations of sustainable nature management". FMGE-2019-0007 AAAAA-A19-119021990093-8.

**For citation:** Kochurov B.I., Kulnev V.V., Tsvetkov I.V. 2022. Multifractal Models of Impact on the Aquatic Ecosystem: Response, Risk, Management. Regional Geosystems, 46(1): 71–80 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-1-71-80

## Введение

Экологические системы различают по уровню и иерархической организации, которая формируется определенными системообразующими факторами, имеющими самостоятельный круговорот веществ и энергии. Болотную кочку, лужу можно рассматривать как экосистему микроуровня. Небольшое озеро служит примером водной экосистемы мезоуровня. Экосистема отдельно взятого материка или географической области находится на макроуровне организации. Наша планета является экологической системой глобального уровня. Каждый уровень организации исследования характеризуется своими особенностями и предъявляет свои требования при использовании для хозяйственных целей по функциональному соподчинению более мелких и простых в более крупные системы.

Исходя из этого можно «сворачивать» и «разворачивать» экологические системы, то есть изменять их масштабируемость во времени и в пространстве. В математике для описания указанного процесса принято определение фрактальности как меры системной

сложности объектов и систем. Данный подход применительно к водным экологическим системам мы попытаемся описать в настоящей статье, имея в виду, что фрактальность экосистемы означает воспроизведение ее структуры в динамике при соблюдении принципа соразмерности условий хозяйственного использования и сохранения экосистемы.

## Объекты и методы исследования

Как известно, любая динамическая система, равно как и геосистема и её составная часть экосистема обладает открытостью и т. д., функционирует в характерных для неё лимитах достаточности действующих факторов, в пределах действия которых экосистема не утрачивает своей устойчивости. Благодаря саморегуляции состояний поддерживается гомеостаз экосистемы, под которым понимается ее способность поддерживать устойчивое динамическое равновесие в изменяющихся условиях внешней среды [Кочуров и др., 2021].

В гомеостазе экосистема достигает наибольшей эффективности функционирования, однако, по мере приближения уровней действующих факторов к лимитирующим показателям устойчивости, эффективность функционирования экосистемы резко снижается, и она переходит в режим самосохранения. При этом гомеостаз сменяется на бистабильность (неустойчивое равновесие), а в экосистеме происходят необратимые морфологические изменения. Эксплуатация водных ресурсов, равно как и в целом природных ресурсов, имеет свои пределы: увеличивая нагрузку на природную среду, ее нельзя истощать, нарушая естественный природный цикл регенерации биоресурса [Кочуров и др., 2021].

Во многих исследованиях отмечается повышенная аккумуляция ксенобиотиков в водной среде как рек [Ясинский и др., 2007; Лисецкий и др., 2015; Баскакова и др., 2020; Koronkevich et al., 2020; Zhiltsov et al., 2020], так и водохранилищ [Воробьев и др., 2000; Иванова, 2020; Крупа et al., 2020].

Оценка состояния водной экосистемы включает несколько действий (этапов) [Подгорный, 2017]:

- разработка системы критериев показателей, описывающих основные структурно-функциональные характеристики экосистемы; они должны быть количественными, построенными на основе имеющихся баз данных и временных рядов, чутко реагирующими на различные изменения в экосистеме;

- анализ возникающих рисков – вероятность возникновения того или иного изменения в экосистеме при антропогенном воздействии или при принятии управлеченческих решений для достижения определённого состояния экосистемы; разработка стратегии управления состоянием экосистемой, оценка её эффективности, возникающие новые риски;

- мониторинг и управление состоянием экосистемой, оценка отклонения от нормального состояния (режимный сдвиг).

Очевидно, что нарушение естественного воспроизведения экосистемы определяет предельно допустимую экологическую нагрузку (ПДЭН), под которой понимается возникающая в процессе хозяйственной или иной деятельности человека нагрузка, которая не нарушает устойчивости (гомеостаза) экологической системы. Она определяется характеристическими фрактальными показателями ( $D_d, D_k$ ) [Кульев и др., 2021]:

$$\text{ПДЭН} = D_p \rightarrow (D_d V D_k) \text{ при } Re (0,1) \rightarrow 1.$$

Достижение ПДЭН эквивалентно состоянию бистабильности экосистемы, при котором уровень внешнего воздействия, например, поступление загрязняющих веществ, сравнивается с пределом его биотической компенсации,  $R = P$ , когда самовосстановление экосистемы прекращается (рис. 1).

Природное восстановление биоресурсов происходит за счет естественных природных механизмов – биопродукционных, климатических и гидрологических. В случае, когда природное восстановление не происходит и продолжается ухудшение экологического состояния водного объекта (начинается «цветение» водоема синезелеными водорослями, в результате которого значительно ухудшаются органолептические характеристики воды, снижается рекреационный потенциал водоема и водная среда загрязняется, в том числе, цианотоксинами), наступает момент возможности применения управляющего действия, которое может быть представлено, например, альгоремедиацией.

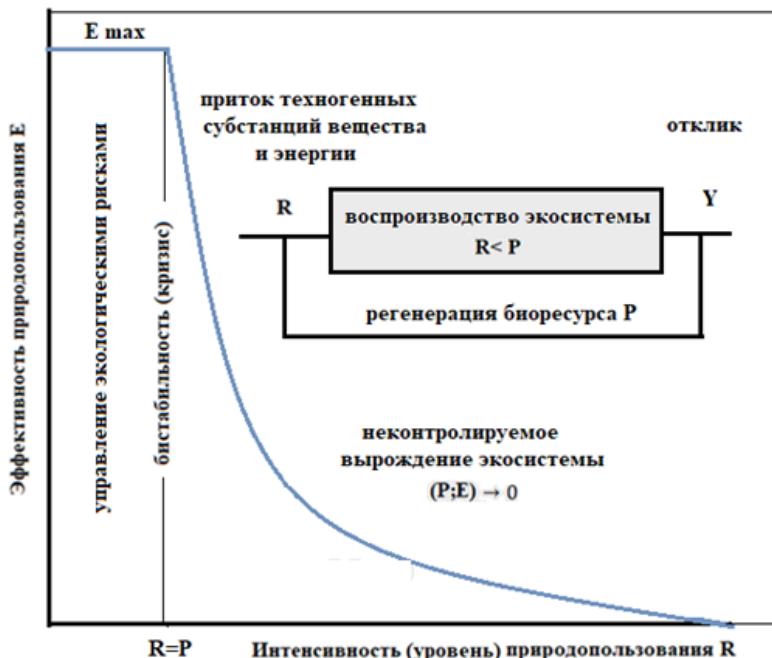


Рис. 1. Схема техноприродного цикла хозяйственной эксплуатации экосистем  
 Fig. 1. Scheme of technoprirodny cycle of economic exploitation of ecosystems

Под альгоремедиацией понимается восстановление экологического состояния водных объектов за счет метаболического потенциала планктонной альгофлоры [Кульев и др., 2021]. Альгоремедиация, корректирующая нарушение метаболизма водного объекта, улучшает гидрохимические [Кульев и др., 2021], гидробиологические (по фитопланктону) [Кульев, Почечун, 2016] и органолептические показатели, восстанавливает водные объекты до рыбохозяйственного и рекреационного назначения, а также может применяться для обеспечения экологической безопасности промышленного водопользования [Короневич, Мельник, 2017].

Если обозначить  $R$  – интенсивность (уровень) природопользования;  $Z$  – антропогенно возобновимые ресурсы;  $P$  – природно-возобновимые ресурсы, то эффективность природопользования будет определяться соотношением

$$E = R / (Z + P). \quad (1)$$

Очевидно, что чем интенсивнее природопользование, тем ниже его эффективность, т. е. эксплуатация природного ресурса становится все дороже, поскольку затраты на его восстановление возрастают. В этой связи все более актуальной становится задача превентивного управления (прогнозирования) возникающими экологическими рисками.

В плане описания экосистем, которые способны управлять адаптацией к внешнему фактору в динамически развивающейся среде, фракталы являются наиболее удобным математическим инструментом [Арнольд, 2004; Ясинский, Сидорова, 2018]. Механизм са-

морегуляции, описываемый фракталом, задает такой структурный каркас сообществ, который сохраняется и развивается за счет оптимального распределения потоков вещества и энергии [Кульев, Почечун, 2016; Ясинский, Сидорова, 2018; Кульев и др., 2021].

## Результаты и их обсуждение

Применительно к задачам геоэкологии фрактальность отражает меру самоподобия взаимодействующих сред (хозяйственной и природной), ограничивающей развитость структуры экосистемы [Коронкевич, Мельник, 2017; Ясинский, Сидорова, 2018; Кульев и др., 2021]:

$$N(\delta) = \mu\delta^{1-D}, \quad (2)$$

где  $N(\delta)$  – структура (размер) экосистемы,  $\mu\delta$  – шаг масштабирования,  $D$  – фрактальная мера самоподобия техногенных процессов.

В математическом плане оценка фрактальности техногенных процессов сводится к их воспроизведению через фрактальный шаблон (рис. 2) и сводится к одному числу – фрактальной размерности  $D \in (1; 2)$  [Moon et al., 2007; Кульев, Почечун, 2016; Wang et al., 2018].

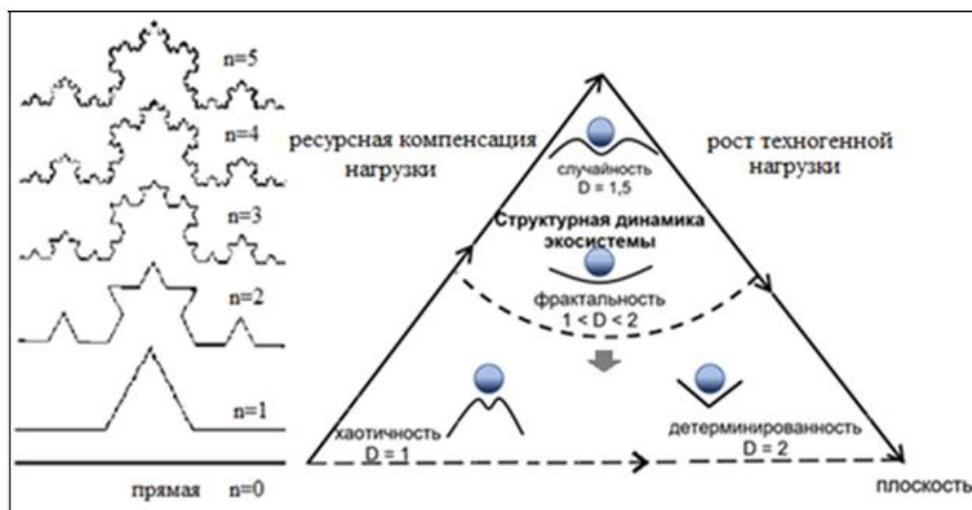


Рис. 2. Фрактал как математический инструмент описания техногенных процессов  
Fig. 2. Fractal as a mathematical tool for describing technogenic processes

В соответствии с принципом толерантности, устойчивость экосистемы, определяющая ее жизнеспособность, ограничена дефицитом и избыточностью факторов, достижение которых говорит об изменении устойчивого цикла на предельный неустойчивый [Кульев, Почечун, 2016].

Для связи фрактальности экосистемы с ее жизнеспособностью введем непрерывную функцию фрактальной «температуры» техногенных процессов на интервале  $D \in (1; 2)$  следующим образом:

$$T_f = a \times \left( \frac{1}{(n - D)} - \frac{1}{n} \right), \quad (3)$$

где  $D$  – фрактальный показатель экосистемы,  $n$  – размерность пространства, в которое вложен фрактальный объект,  $a$  – поправочный коэффициент, выбираемый индивидуально (в нашем случае  $n = 2$ ,  $a = 1$ ).

Физический смысл функции (3) состоит в идентификации пределов экологической емкости среды, ограниченной характеристическими значениями фрактальных показателей

экосистемы. Наилучшая линейная аппроксимация функции (3), определяющая область фрактальности (скейлинга параметров), достигается в характеристических точках  $D_d = 1,2$ ;  $D_k = 1,7$ , вне которых показатели процессов практически скачком увеличиваются от значения  $D = 1,7$  до  $D = 1,9$ , что свидетельствует о нарушении гомеостаза и начале неконтролируемого вырождения экосистемы (рис. 3, таблица).

На основании изложенного, мультифрактальную динамику техногенеральных процессов можно представить следующей моделью:

$$D = \sum_{j=1}^2 a_{ij} F_j(D)/2; 1,2 \leq D \leq 1,7, \quad (4)$$

где  $D$  – фрактальная мера техногенного преобразования экосистемы,  $F_j(D)$  – факторные нагрузки экосистемы,  $a_{ij}$  – весовые коэффициенты действующих факторов.

Физически модель (4) интерпретируется следующим образом: область жизнеспособности экосистемы, определяемая ее саморегуляцией, оценивается отклонением факторной нагрузки  $F_j(D)$  от экологического оптимума  $F_j(D = 1,5)$ : чем выше отклонение, тем сильнее конкретный фактор угнетает жизнеспособность экосистемы.

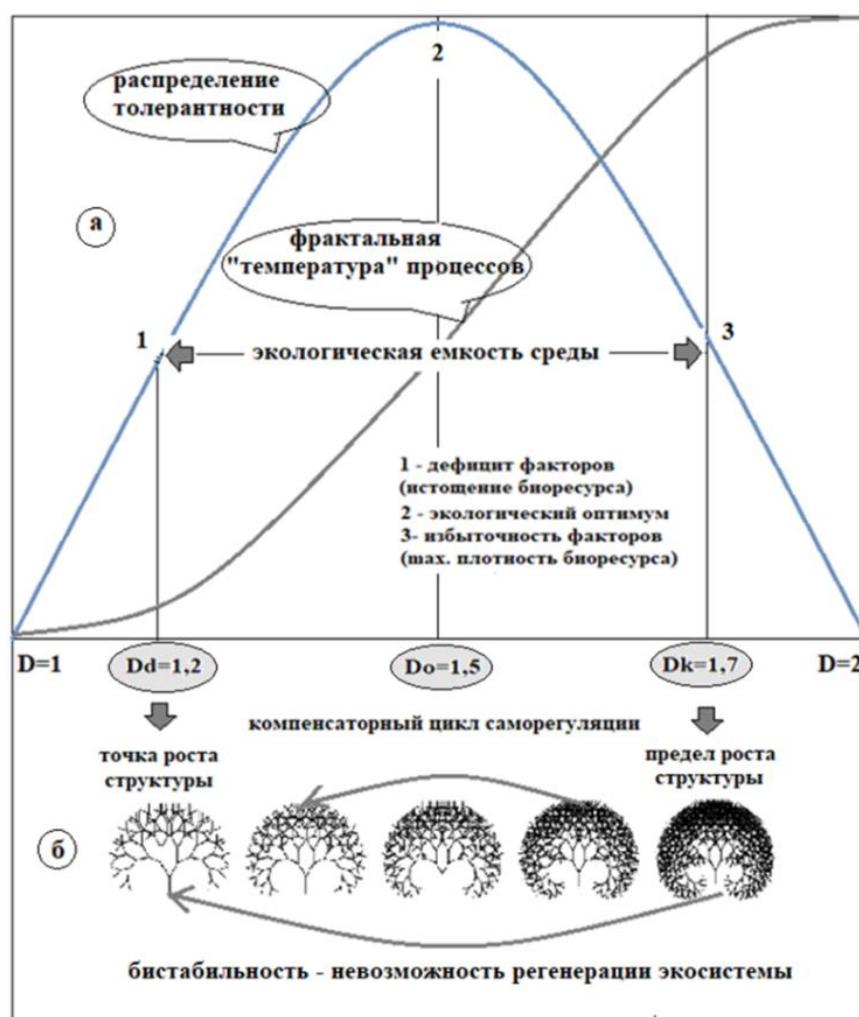


Рис. 3. Фрактальная размерность экосистемы, определяемая Гауссовой кривой: связь фрактальности экосистемы с ее жизнеспособностью (а); метафора структурной динамики экосистемы в условиях факторных нагрузок (б)

Fig. 3. Fractal dimension of the ecosystem determined by the Gaussian curve: Relationship of ecosystem fractality with its viability (a), metaphor of ecosystem structural dynamics under factor loads (b)

Динамика экосистем в условиях лимитирующих фрактальных показателей  
Dynamics of ecosystems under conditions of limiting fractal indicators

Характеристические фрактальные показатели	Особенности системной динамики
Дефицит факторов $D_d = (1,2 \pm 0,1)$	Детерминированная динамика экосистемы, в которой отсутствует само-регуляция ее структуры из-за истощения биоресурса. Поведение экосистемы регулируется некомпенсируемыми односторонними антропогенными факторами влияния – появлением очагов загрязнений, с которыми экосистема не справляется самостоятельно.
Экологический оптимум $D_o = (1,5 \pm 0,1)$	Саморегулируемая динамика экосистемы в пределах экологической емкости среды. При достижении экологического оптимума линейный тренд процесса меняет знак на противоположный, образуя техно-природный цикл. Нарушениям цикла соответствует смещение состояний экосистемы относительно оптимума – чем оно больше, тем хуже саморегулируемость состояний.
Избыточность факторов $D_k = (1,7 \pm 0,1)$	Хаотическая динамика экосистемы, сопровождаемая резкими скачками ее системных характеристик. Начало неконтролируемого вырождения экосистемы из-за роста некомпенсируемых очагов загрязнений.

Максимально  $F_j(D = 1,7)$  и минимально  $F_j(D = 1,2)$  переносимые значения факторов являются теми лимитирующими значениями, за пределами которых существование экосистемы уже невозможно [Арнольд, 2004; Трубецков, 2011].

Близость фрактальной меры техногенного преобразования экосистемы к характеристическим показателям ее устойчивости определяет следующую оценку экологического риска:

$$R_e(0,1) = D * Q = \begin{cases} R_e \rightarrow 1, & \text{если } D \rightarrow (1,2 \vee 1,7) \\ R_e \rightarrow 0, & \text{если } D \rightarrow 1,5 \\ 0 < R_e < 1, & \text{если } (1,2 < D < 1,7) \end{cases}, \quad (5)$$

где  $R_e(0,1)$  – вероятность экологического риска,  $Q$  – предполагаемая величина ущерба от техногенного воздействия.

### Заключение

Анализ решений вероятности экологического риска (5) для исследуемого техногенприродного объекта сводится к оценке предельности смещений его состояний относительно экологического оптимума и ранжированию возникших при этом экологических рисков:

– решениям  $D \rightarrow 1,5; R_e \rightarrow 0$  соответствует наиболее благоприятная динамика экосистемы, при которой загрязнения утилизируются без затрат биоресурса. В этом состоянии обеспечивается наиболее продуктивный метаболизм экосистемы, определяющий максимальную развитость структуры при минимизации экологических рисков;

– решениям  $1,2 < D < 1,7; 0 < R_e < 1$  соответствует саморегулируемая динамика экосистемы, при которой обеспечивается утилизация загрязнений с частичными затратами биоресурса, восстанавливаемыми естественным образом после снятия нагрузки;

– решениям  $D \rightarrow (1,2 \vee 1,7); R_e \rightarrow 1$  соответствует неустойчивая динамика (бистабильность) экосистемы, при которой утрачиваются свойства резистентности (саморегуляции состояний) в результате истощения биоресурса. В этом состоянии ресурса экосистемы явно недостаточно, чтобы запустить саморегуляцию, а, значит, утилизировать поступающие извне загрязнения;

– решениям  $D > 1,7$ ;  $R_e = 1$  соответствует наиболее неблагоприятная, кризисная динамика, при которой наблюдаются необратимые качественные изменения экосистемы, несмотря на снятие внешней нагрузки.

Когда водная экосистема по причине негативного воздействия техногенных факторов приходит к дисбалансу (выведению из динамической устойчивости) в своём существовании, который выражается, например, в массовом развитии сине-зеленых водорослей, тогда возникает потребность в управляющем воздействии. Отличным примером управления геоэкологическими рисками при современном водопользовании является альгоремедиция водных объектов различного назначения с одновременным контролем состояния экосистемы согласно приведенному методологическому подходу.

Таким образом, разработанная модель воздействия антропогенных факторов на водную экосистему позволяет на основе опытных данных оценить предельно допустимую экологическую нагрузку (ПДЭН), обеспечить наиболее приемлемые параметры хозяйственной деятельности и контроль за восстановлением нарушенных экосистем.

### Список литературы

- Арнольд В.И. 2004. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. М., Изд-во МЦНМО, 32 с.
- Баскакова А.Г., Иванова Е.Ю., Куролап С.А. 2020. Оценка содержания генотоксических соединений в поверхностных водах Донского бассейна на территории Воронежской области. Региональные геосистемы, 44 (2): 221–230. DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-2-221-230.
- Воробьев Ю.Л., Малинецкий Г.Г., Махутов Н.А. 2000. Управление риском и устойчивое развитие: Человеческое измерение. Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика, 8 (6): 12–26.
- Иванова Е.Ю. 2020. Аккумуляция генотоксических соединений некоторыми компонентами водных и прибрежных экосистем Воронежского водохранилища. Региональные геосистемы, 44 (1): 113–120. DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-1-113-120.
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С. 2017. Изменение стока реки Москвы в результате антропогенных воздействий. Водные ресурсы, 44 (1): 3–14. DOI: 10.7868/S0321059617010072.
- Кочуров Б.И., Ивашкина И.В., Ермакова Ю.И. 2021. Самоорганизация и саморазвитие урбогеосистем. География и природные ресурсы, 42 (3): 37–44. DOI: 10.15372/GIPR20210304.
- Кульев В.В., Насонов А.Н., Цветков И.В., Межова Л.А. 2021. Оценка техногенной нагруженности Нижнетагильского городского пруда и управление геоэкологическими рисками на основе мультифрактальной динамики. Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле, 21 (1): 4–11. DOI: 10.18500/1819-7663-2021-21-1-4-11.
- Кульев В.В., Почечун В.А. 2016. Применение альголизации питьевых водоемов Нижнетагильского промышленного узла. Медицина труда и промышленная экология, 1: 20–22.
- Лисецкий Ф.Н., Дегтярь А.В., Буряк Ж.А., Павлюк Я.В., Нарожняя А.Г., Землякова А.В., Маринина О.А. 2015. Реки и водные объекты Белогорья. Белгород, Константа, 362 с.
- Подгорный К.А. 2017. Требования и подходы к разработке биологических индикаторов и проведению интегрированного анализа состояния водных экосистем: обзор. Труды Атлантического научно-исследовательского института, 1 (4): 5–45.
- Трубецков Д.И. 2011. Феномен математической модели Лотки-Вольтерры и сходных с ней. Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика, 19 (2): 69–88. DOI: 10.18500/0869-6632-2011-19-2-69-88.
- Ясинский С.В., Гуров Ф.Н., Шилькрот Г.С. 2007. Метод оценки выноса биогенных элементов в овражно-балочную и речную сеть малой реки. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 4: 44–53.
- Ясинский С.В., Сидорова М.В. 2018. Динамика водоёмкости в России и её регионах. Вопросы географии, 145: 406–413.

- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G., Zaitseva I.S. 2020. Environmental and Economic Indicators of Anthropogenic Impacts on Water Resources in Russia and the World. Herald of the Russian Academy of Sciences, 90 (4), 428–436. DOI: 10.1134/S1019331620040103.
- Krupa E., Barinova S., Romanova S., Aubakirova M., Ainabaeva N. 2020. Planktonic invertebrates in the assessment of long-term change in water quality of the sorbulak wastewater disposal system (Kazakhstan). Water, 12 (12): 3409. DOI:10.3390/w12123409.
- Moon B.-H., Seo G.-T., Jang D.-J., Kim S.-S. 2007. Size and fractal dimension of particles in the River Nakdong. Water Science and Technology, 55 (1–2): 113–120. DOI: 10.2166/wst.2007.060.
- Wang X.J., Jiang R.G., Xie J.C., Wang Y.P., Zhang Y.J., Wang J., Wen C.C. 2018. Spatiotemporal variability of runoff using fractal dimension in the Weihe River Basin. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 191 (1): 012059. DOI: 10.1088/1755-1315/191/1/012059.
- Zhiltssov S.S., Zonn I.S., Semenov A.V., Grishin O.E., Markova E.A. 2020. Role of water resources in the modern world. The Handbook of Environmental Chemistry, 105: 13–29. DOI: 10.1007/698\_2020\_598.

### Reference

- Arnol'd V.I. 2004. "Zhestkie" i "myagkie" matematicheskie modeli ["Hard" and "soft" mathematical models]. Moskow, Pabl. MTsNMO, 32 p.
- Baskakova A.G., Ivanova E.Yu., Kurolap S.A. 2020. Assessment of the content of genotoxic compounds in natural waters on the example of the Don basin in the Voronezh region. Regional Geosystems, 44 (2): 221–230 (in Russian). DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-2-221-230.
- Vorob'ev Yu.L., Malinetskiy G.G., Makhutov N.A. 2000. Risk Management and Sustainable Development. Humanitarian Dimension. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics, 8 (6): 12–26 (in Russian).
- Ivanova E.Y. 2020. The accumulation of genotoxic compounds some components of the aquatic and coastal ecosystems of the Voronezh reservoir. Regional Geosystems, 44 (1): 113–120 (in Russian). DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-1-113-120.
- Koronkevich N.I., Mel'nik K.S. 2017. Changes in Moskva r. runoff under anthropogenic impacts. Water Resources, 44 (1): 1–11 (in Russian). DOI: 10.7868/S0321059617010072.
- Kochurov B.I., Ivashkina I.V., Ermakova Yu.I. 2021. Self-Organization and Self-Development of Urbogeosystems. Geography and Natural Resources, 42 (3): 37–44 (in Russian). DOI: 10.15372/GIPR20210304.
- Kul'nev V.V., Nasonov A.N., Tsvetkov I.V., Mezhova L.A. 2021. Assessment of Technogenic Load of Nizhny Tagil City Pond and Environmental Risk Management Based on Multifractal Dynamics. Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 21 (1): 4–11 (in Russian). DOI: 10.18500/1819-7663-2021-21-1-4-11.
- Kul'nev V.V., Pochechun V.A. 2016. Algolization of drinkable water basins in Nizhny Tagil industrial complex. Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology, 1: 20–22 (in Russian).
- Lisetskii F.N., Degtyar A.V., Buryak Zh.A., Pavluk Ya.V., Narozhnyaya A.G., Zemlyakova A.V., Marinina O.A. 2015. Reki i vodnyye obyekty Belogoria [Rivers and water bodies of Belogorye]. Belgorod, Pabl. Constanta, 362 p.
- Podgornyy K.A. 2017. Requirements and approaches for developing biological indicators and performing an integrated analysis of aquatic ecosystems state: an overview. Trudy AtlantNIRO, 1 (4): 5–45 (in Russian).
- Trubetskoy D.I. 2011. Phenomenon of Lotka-Volterra Mathematical Model and Similar Models. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics, 19 (2): 69–88 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2011-19-2-69-88.
- Yasinsky S.V., Goorov F.N., Shilkrot G.S. 2007. Method of Drifted-Over Evaluation of Biogenic Elements to Ravine-Balka and River System by Small River. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya, 4: 44–53 (in Russian).
- Yasinsky S.V., Sidorova M.V. 2018. Dynamics of water intensity of the economy in Russia and its regions. Questions of geography, 145: 406–413 (in Russian).



- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G., Zaitseva I.S. 2020. Environmental and Economic Indicators of Anthropogenic Impacts on Water Resources in Russia and the World. Herald of the Russian Academy of Sciences, 90 (4), 428–436. DOI: 10.1134/S1019331620040103.
- Krupa E., Barinova S., Romanova S., Aubakirova M., Ainabaeva N. 2020. Planktonic invertebrates in the assessment of long-term change in water quality of the sorbulak wastewater disposal system (Kazakhstan). Water, 12 (12): 3409. DOI:10.3390/w12123409.
- Moon B.-H., Seo G.-T., Jang D.-J., Kim S.-S. 2007. Size and fractal dimension of particles in the River Nakdong. Water Science and Technology, 55 (1–2): 113–120. DOI: 10.2166/wst.2007.060.
- Wang X.J., Jiang R.G., Xie J.C., Wang Y.P., Zhang Y.J., Wang J., Wen C.C. 2018. Spatiotemporal variability of runoff using fractal dimension in the Weihe River Basin. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 191 (1): 012059. DOI: 10.1088/1755-1315/191/1/012059.
- Zhiltssov S.S., Zonn I.S., Semenov A.V., Grishin O.E., Markova E.A. 2020. Role of water resources in the modern world. The Handbook of Environmental Chemistry, 105: 13–29. DOI: 10.1007/698\_2020\_598.

*Поступила в редакцию 29.11.2021;  
поступила после рецензирования 15.12.2021;  
принята к публикации 28.12.2021*

*Received November 29, 2021;  
Revised December 15, 2021;  
Accepted December 28, 2021*

**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.  
**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кочуров Борис Иванович**, профессор, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник отдела физической географии и проблем природопользования Института географии РАН, Москва, Россия

**Кульnev Вадим Вячеславович**, кандидат географических наук, ведущий специалист-эксперт отдела государственного экологического надзора Центрально-Черноземного межрегионального управления Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, г. Воронеж, Россия

**Цветков Илья Викторович**, доктор технических наук, профессор Тверского государственного университета, г. Тверь, Россия

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Boris I. Kochurov**, Professor, Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher, Department of Physical Geography and Environmental Problems of the Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

**Vadim V. Kulnev**, Candidate of Geographical Sciences, Leading Specialist-Expert of the Department of State Environmental Supervision of the Central Chernozem Interregional Administration of the Federal Service for Supervision of Nature Management, Voronezh, Russia

**Ilya V. Tsvetkov**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Tver State University, Tver, Russia