

10. Lu, H. Complexity of public transport networks [Text] / H. Lu, Y. Shi // Tsinghua Science & Technology. – 2007. – Vol. 12, Issue 2. – P. 204–213. doi: 10.1016/s1007-0214(07)70027-5
11. Chatterjee, A. Statistical Analysis of Bus Networks in India [Electronic resource] / A. Chatterjee, M. Manovar, G. Ramadurai. – Available at: <http://arxiv.org/abs/1509.04554>
12. Kuz'kin, O. F. Rozvytok marshrutnyh mrezh gromads'kogo transportu velykyh mist Ukrainy [Text] / O. F. Kuz'kin // Naukovi notatky. – 2014. – Vol. 46. – P. 332–340.
13. Derrible, S. Network analysis of world subway systems using updated graph theory [Text] / S. Derrible, C. Kennedy // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2009. – Vol. 2112. – P. 17–25. doi: 10.3141/2112-03
14. Parthasarathi, P. Network structure and metropolitan mobility [Text] / P. Parthasarathi // Journal of transport and land use. – 2014. – Vol. 7, Issue 2. – P. 153–170. doi: 10.5198/jtlu.v7i2.494
15. Osnovni pokaznyky roboty pidpryemstv mis'kogo elektrotransportu Ukrainy za 2013 rik [Electronic resource]. – Available at: http://www.korpmet.org.ua/?page_id=48
16. Harrari, F. Teorija grafov [Text] / F. Harrari. – Moscow: Editorial URSS, 2003. – 296 p.
17. Von Ferber, C. Public transport networks: empirical analysis and modeling [Text] / C. Von Ferber, T. Holovatch, Y. Holovatch, V. Palchykov // The European Physical Journal B. – 2009. – Vol. 68, Issue 2. – P. 261–275. doi: 10.1140/epjb/e2009-00090-x
18. Dorogovtsev, S. M. A shortest path to complex network [Electronic resource] / S. M. Dorogovtsev, J. F. F. Mendes. – 2004. – 25 p. – Available at: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0404593>
19. Kobzar', A. I. Prikladnaja matematicheskaja statistika. Dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov [Text] / A. I. Kobzar'. – Moscow: FIZMATLIT, 2006. – 816 p.
20. Lashheny, O. A. Imovirnisni i statystyko-eksperymental'ni metody analizu transportnyh procesiv i system [Text] / O. A. Lashheny, O. F. Kuz'kin, S. V. Grycaj. – Zaporizhzhja: ZNTU, 2012. – 419 p.

Представлені результати аналізу моделей нелінійної кінетики екосистемних процесів при впливі забруднювачів і поширенні органічних домішок у довкіллі. Обґрунтовано необхідність врахування при аналізі антропогенного впливу на біосферу процесів автокаталізу і самоорганізації живих систем. Розроблено модель синергетичних закономірностей еволюції видів у контексті традиційного континуальної уявлення при обліку біфуркаційних механізмів синергетичної теорії пізнання

Ключові слова: нелінійна кінетика, екосистемні процеси, моделі, техногенні чинники, синергетичні закономірності

Представлены результаты анализа моделей нелинейной кинетики экосистемных процессов при воздействии загрязнителей и распространении органических примесей в окружающей среде. Обоснована необходимость учета при анализе антропогенного влияния на биосферу процессов автокатализа и самоорганизации живых систем. Разработана модель синергетических закономерностей эволюции видов в контексте традиционного континуального представления при учете бифуркационных механизмов синергетической теории познания

Ключевые слова: нелинейная кинетика, экосистемные процессы, модели, техногенные факторы, синергетические закономерности

УДК 001.51
DOI: 10.15587/1729-4061.2016.64285

ФОРМАЛІЗАЦІЯ НЕЛІНІЙНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РОЗВИТКУ ЕКОСИСТЕМНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ВПЛИВІ АНТРОПОГЕНЕЗУ

Л. Д. Пляцук

Доктор технічних наук,
професор, завідувач кафедри*
E-mail: l.plyacuk@ecolog.sumdu.edu.ua

Є. Ю. Черниш

Кандидат технічних наук, старший викладач*

E-mail: e.ur.chernish@gmail.com

*Кафедра прикладної екології

Сумський державний університет

вул. Римського-Корсакова, 2,

м. Суми, Україна, 40007

1. Вступ

Екосистема с ее структурными единицами (подсистемами) рассматривается как открытая термодинамическая система, в которой постоянно происходит

обмен энергией и веществом с внешней средой. При подаче энергии в экосистему часть ее рассеивается, а другая часть превращается в тепло. Рассмотренная система соответствует требованиям, предъявляемым к системам способным к самоорганизации [1, 2]:

– незамкнутость (обмен с внешней средой энергией и веществом);

– неустойчивость (система находится в далеком от равновесия состоянии и поддерживается в этом состоянии за счет потоков вещества и энергии. Последнее приводит к появлению некой общей структуры, несмотря на непрерывный поток и изменение компонентов);

– нелинейность (далеко от равновесия поточные процессы в системе взаимосвязаны через многочисленные петли обратной связи, соответствующие нелинейным процессам);

– динамическая иерархичность (основной принцип прохождения системой точек бифуркации – возникновение нового качества системы за счет перестройки на более низком структурном уровне).

Итак, экосистемные процессы целесообразно рассматривать с точки зрения синергетической концепции научного познания мира с использованием системного подхода для проведения исследований изменений состояния биосферы. Следовательно, все большую актуальность приобретают задачи моделирования динамических неравновесных состояний экосистемы, развивающихся под действием техногенеза и нерационального природопользования.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

На сегодняшний день все большего развития приобретает объектно-ориентированное моделирование биосферных процессов для определения балансов веществ в экосистемах разного уровня организации [3]. Достоинством такого типа моделей является возможность формализации эмерджентных свойств экосистем. Однако реализация таких моделей имеет ряд сложностей, в первую очередь связанных со сложностью вычисления даже при математическом описании систем микро- и наноуровней, в частности молекулы ДНК. Кроме того, важной задачей остается оптимизация процесса систематизации научных знаний со стохастической динамикой их развития и выявления трудно детерминируемых исходных параметров формирования объектно-ориентированных моделей.

В направлении развития нелинейного экосистемного моделирования разработан проект международной программы «Динамическая модель биосферы» [4], который направлен на создание устойчивой стратегии развития общества при учете техногенного воздействия на блоки подсистем биосферы. Стоит отметить, что этот проект имеет большей степени интегральный характер структурированной базы данных, имеющей в основе междисциплинарный подход в направлении развития философии синергии познания Г. Пригожина и И. Николоса. При этом все задачи, описанные в программе, являются большей степени декларационными.

Теория системного синтеза, изложенная в [5], опирается на формализацию процессов направленной самоорганизации и управления в сложных динамических макросистемах. При этом значительное внимание уделяется развитию новых методов аналитического конструирования объективных законов управления,

позволяющих частично учесть естественные (физические, химические, биологические и др.) свойства синтезируемых нелинейных систем. В большей степени учитываются фундаментальные физические законы развития мира, при этом не уделено внимание описанию методов нелинейного анализа в экологических исследованиях. Кроме того, теорию управления сложными макросистемами не всегда возможно эффективно применить на микроуровнях системной организации, в частности природо-техногенных систем, а также относительно формализации синергетических закономерностей влияния факторов техногенеза на развития экосистемных процессов.

В работе [6] было сделано количественное описание пространственной структуры природных систем с использованием фрактального моделирования, что позволило выделять иерархические уровни структурной организации природных систем. Однако фрактальный подход является только частью методологии синергетической теории, и рассматривать динамику экологических процессов под призмой этого подхода однобоко. Нелинейный характер экосистемных процессов подчиняется теории самоорганизации и автокатализа живых систем с учетом динамического характера изменения их состояний под действием, как внутренних факторов, так и внешних. При этом важным является развитие междисциплинарного подхода в этой сфере.

Так, междисциплинарный подход к синергетической теории познания мира широко освещен в трудах [7, 8], где раскрываются фундаментальные вопросы современной науки и ряд ключевых высоких технологий, непосредственно на стыке разных научных направлений. Однако не уделено должного внимания синергии развития экосистем и возможности применения нелинейного моделирования в экологических исследованиях и оценке уровня антропогенной нагрузки на окружающую среду.

Исследование динамического равновесия в системе «хищник-жертва» при случайных возмущениях в [9] по существу очень близки к работе [10], где рассматриваются несколько сценариев взаимодействия в системе «загрязнение–экосистема» на основе классической модели «хищник-жертва». Однако эти работы не оценивают возможность влияния популяционного генезиса на восстановительный потенциал экосистем.

В работе [11] подчеркивается важность нелинейности N-аддитивных воздействий на потоки экосистемного углерода C, которые должны быть включены в модели глобального прогнозирования будущего баланса C. Полученные результаты моделирования также могут использоваться для контроля рационального использования удобрений при восстановлении деградированных пастбищ, учитывая, что добавление азота может стимулировать производство биомассы и поглощение экосистемами углерода. Однако отметим, что изменение компонентного состава экосистемы должно рассматриваться как интегральная оценка взаимодействия всех биогеохимических циклов и синергетические закономерности влияния биоты на ассимиляционный потенциал экосистем в этой работе отображены частично.

Интерес вызывает работа [12], в которой проводилось математическое моделирование динамики

развития планктонной экосистемы путем разработки системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающей рост планктона под влиянием дефицита кислорода. Стоит отметить, что эта модель имеет узкую направленность, что существенно ограничивает ее применение.

Следовательно, представляет интерес дальнейшее развитие нелинейного моделирования экосистемных процессов, в частности формализации влияния биотической составляющей экосистем на процесс ассимиляции загрязняющих веществ и восстановительный потенциал окружающей среды.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – анализ моделей нелинейной кинетики экосистемных процессов при воздействии на них загрязнителей и обоснование возможности применения синергетического подхода к моделированию экосистемных процессов.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- анализ результатов моделирования динамики распространения примесей в экосистеме на примере нелинейных моделей;
- разработка модели синергетических закономерностей эволюции видов в контексте традиционного непрерывного представления.

4. Анализ результатов моделирования нелинейной динамики распространения примесей в экосистеме

4. 1. Нелинейная кинетика распада органических примесей в водной экосистеме

Синергия проектирования в прикладном аспекте направлена на разработку различных решений (технических, технологических, информационных, организационных и т. д.), которые основаны на синергетических законах функционирования сложных систем.

Предположим, что имеется точечный источник загрязнения, окруженный некоторой однородной окружающей средой. В начальный момент времени происходит выброс загрязнения в окружающую среду концентрации u_0 . Через фиксированный промежуток времени T концентрация загрязнения уменьшится, так как происходит естественная диссипация загрязнения и, кроме того, окружающая среда поглощает загрязнение. Таким образом, рекуррентное уравнение имеет вид [13]:

$$u_1 = f(u_0, T), u_1 < u_0, \tag{1}$$

или для произвольного момента времени:

$$u_{t+1} = f(u_t, T). \tag{2}$$

Данная функциональная зависимость имеет вид, представленный на рис. 1. Вид кривой деструкции обусловлен тем, что до некоторого значения концентрации загрязнения u^* окружающая среда активно вступает в реакцию с загрязнением, затем происходит насыщение, имеет место пороговый эффект. Величина

ε обозначает постоянный фон загрязнения, который всегда существует.

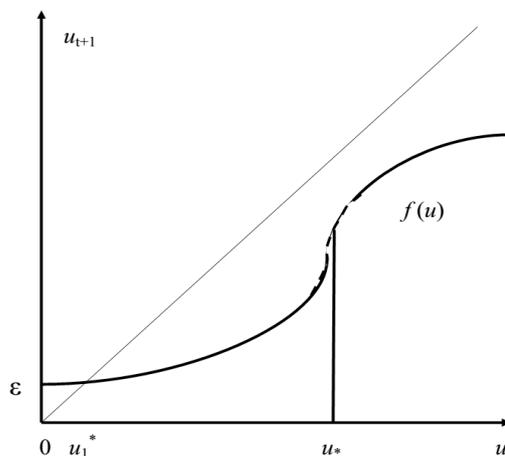


Рис. 1. Кривая деструкции органических примесей в водной среде

Как видно из рис. 1, кривая деструкции имеет S-образную форму. В [14] отмечается, что вид кривой зависит от выбранного промежутка времени T между измерениями концентраций загрязнителя. Следует отметить, что нелинейный характер зависимости отвечает динамике биотрансформации примесей в биотической компоненте экосистемы, что соответствует изменению длительности лаг-фазы роста микроорганизмов, использующих органические примеси в качестве питательных веществ.

Если взять T очень маленьким, то кривая деструкции будет просто биссектрисой первого координатного угла (сколько выбросили – столько осталось), если взять T достаточно значительным, то, как бы ни была велика начальная концентрация загрязнения, оно после T единиц времени будет мало – кривая деструкции будет стремиться к оси абсцисс. Поэтому величина T выбирается из соображений наглядности, так, чтобы отразить основные качественные черты кривой деструкции. Далее не будет указываться явно то, что отображение зависит от T .

Математическая формализация процесса трансформации органических примесей в окружающей среде также в отдельных ее нелинейных аспектах описана в работах [15, 16].

Кривая деструкции является одномерной дискретной динамической системой, которая имеет единственную устойчивую неподвижную точку u_1^* , так как из вида кривой следует, что $0 < f'(u_1^*) < 1$. Точнее, u_1^* – глобальный аттрактор рассматриваемой динамической системы, так как любая орбита будет сходиться к этому положению равновесия.

Следует отметить, что при многократном выбросе зависимость между выброшенной и оставшейся концентрацией загрязнения на i -м шаге качественно эквивалентна кривой деструкции в том смысле, что она имеет единственную точку перегиба, что показано в.

4. 2. Нелинейные аспекты передвижения нефтепродуктов в грунтовых водах

На рис. 2 показаны процессы, происходящие с нефтью при ее разливе в водной среде. Особое внима-

ние стоит уделить переносу легких нефтепродуктов при их инфильтрации в грунтовые воды.

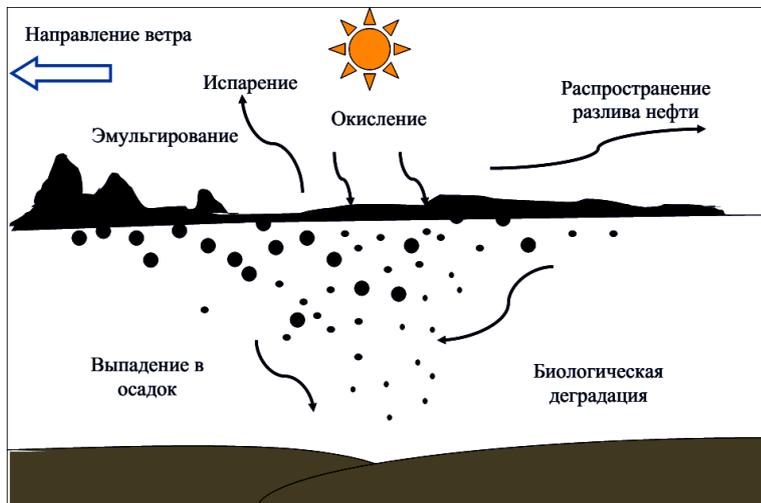


Рис. 2. Физико-химические и биохимические процессы, имеющие место при разливе нефти

При разработке мероприятий по детоксикации природных сред, необходимой вследствие попадания в них нефтепродуктов, важным является формирование единого подхода с учетом нелинейного характера передвижения различных фракций нефти в пористых средах. При этом в процессе физико-химических и биохимических трансформаций происходит изменение состояния нефтепродуктов, диффундирование и миграция фракций в сопредельные среды, что требует формализации понимания открытого характера взаимодействия загрязнителя (фракций нефти) со средой.

Для рассмотрения процесса впитывания легкой фракции нефти в гумусовый слой почвы необходимо использовать уравнение, описывающее динамику взаимодействия несмешивающихся жидкостей в пористой среде [17, 18]:

– для воды

$$m \cdot C_{вн} \cdot \frac{\partial H_{в}}{\partial t} - m \cdot \frac{\rho_{н}}{\rho_{в}} \cdot C_{вн} \cdot \frac{\partial H_{н}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{в} \cdot f_{в} \cdot \frac{\partial H_{в}}{\partial x} \right], \quad (3)$$

– для нефтепродуктов

$$m \cdot \frac{\rho_{н}}{\rho_{в}} \cdot C_{вн} \cdot \frac{\partial H_{н}}{\partial t} - m \cdot (C_{вн} - C_{в}) \times \frac{\partial H_{в}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{н} \cdot f_{н} \cdot \frac{\partial H_{н}}{\partial x} \right], \quad (4)$$

где m – пористость; $\rho_{н}, \rho_{в}$ – емкостные коэффициенты; $H_{нв}, H_{в}$ – напоры нефтепродуктов и воды; $k_{н}, k_{в}$ – коэффициент фильтрации нефтепродуктов и воды; $f_{н}, f_{в}$ – коэффициенты относительных фазовых проницаемостей; $C_{в}$ и $C_{вн}$ – ёмкостные коэффициенты, связывающие насыщенности и напоры:

– при $0 < S_{в} + S_{н} < 1$,

$$C_{в} = - \frac{\partial (S_{в} + S_{н})}{\partial \psi_{в}}, \quad (5)$$

– при $S_{в}^* < S_{в} < (1 - S_{н}^*)$,

$$C_{вн} = - \frac{\partial S_{в}}{\partial \psi_{вн}}, \quad (6)$$

где $S_{в}$ и $S_{н}$ – насыщенность водой и нефтепродуктом, то есть отношение объёма жидкости к объёму пор; $S_{в}^*$ и $S_{н}^*$ – насыщенность гидравлически неподвижной водой и нефтепродуктом (для песка соответственно 0,10–0,15 и 0,07–0,10); ψ – гидростатическая или капиллярная составляющая напора: в зоне полного насыщения $\psi_{в} > 0$, а в капиллярной кайме $\psi_{в} < 0$.

Следует отметить, что в уравнениях (3)–(6) не учитываются показатели степени биодеструкции, биоассимиляции и биотоксикации природной среды, что позволило бы проследить возможные направления воздействия нефтепродуктов на биотическую составляющую, а также оценить возможные направления ремедиации территорий загрязненных нефтепродуктами.

Для понимания нелинейных аспектов трансформации загрязнителя на границе смешивания двух сред, подверженных динамическим изменениям в ходе высокой их реакционной способности, используются дифференциальные уравнения с частными производными типа реакция-диффузия [19]. Это так называемые «РД-системы» [20], в которых связи между элементами описываются диффузионными членами уравнений, а динамика изменения параметров среды – неизвестными функциями. В полевых исследованиях таких параметров может быть значительное количество, но для оптимизации процесса вычислений в моделях этого типа ограничиваются использованием двух переменных, при этом реакционный член имеет нелинейный характер.

Общая двухкомпонентная РД-система имеет вид [19]:

$$\partial_t u = D_{11} \Delta u + D_{12} \Delta v + F(u, v), \quad (7)$$

$$\partial_t v = D_{21} \Delta u + D_{22} \Delta v + G(u, v), \quad (8)$$

где t – время; $u(r, t)$ и $v(t, r)$ – неизвестные функции; Δ – оператор Лапласа по пространственным переменным (радиус вектора r); $\hat{D} = \{D_{ij}\}$ – тензор диффузии; $F(u, v), G(u, v)$ – реакционные члены.

Следует отметить, что в зависимости от вида реакционных членов активная среда может оказаться бистабильной, автоколебательной или возбудимой. Поэтому, характеризуя процессы и динамику трансформации нефтепродуктов на границе смежных сред, необходимо учитывать автоволновую теорию фазовых перемещений, которые непосредственно влияют на переход из одного состояния (метастабильного) в другое (нестабильное) экосистемы.

Однако «РД-системы», также как уравнения (3)–(6), не учитывают такие показатели как степень биодеструкции, биоассимиляции и биотоксикации природной среды. Как видно из системы (7) и (8), они описывают только физико-химические характеристики процесса трансформации загрязнителя на границе сред.

5. Результаты разработки формализованной модели синергетических закономерностей эволюции видов

Формализация бифуркационных процессов в биосфере неотъемлемо связана с пониманием синергетических закономерностей эволюционного развития биоты. Дарвиновская эволюция предполагает плавное, почти предсказуемое развитие процесса. Новый взгляд на эволюцию в костном, живом и социальном мирах отличается от дарвиновского учётом стохастичности, неопределённости и бифуркационных механизмов. Существует даже гипотеза [21], что основной причиной смены видов, описанных в эволюционной теории Ч. Дарвина, было именно эволюционное изменение свойств биосферы через бифуркации, обусловленное самой эволюцией жизни на Земле. Согласно законам синергетики [4]: если противодействие при определенных условиях превысит некоторое критическое значение, может возникнуть бифуркация, т. е. реализуется состояние, не вытекающее однозначно из начальных условий.

Разработанная модель, описывающая синергетические механизмы эволюционных процессов, представлена на рис. 3, включает проявление в области бифуркаций наследственной изменчивости через автокатализ процесса мутаций на разных уровнях организации живых объектов.

При этом вследствие естественного отбора посредством саморегуляторных функций вида происходит его адаптация к изменчивым условиям внешней среды с возможностью возникновения новых видов.

Последствия бифуркации могут быть непредсказуемыми на современном уровне развития человеческого общества, и в конечном итоге могут привести к гибели популяции человека как вида в целом, как уже случилось раньше по тем или иным причинам с другими популяциями или видами живых организмов. Однако следует отметить, что эволюция биосферы – это естественный процесс, и даже полный отказ от всех техногенных достижений человечества не сможет остановить эту эволюцию (а, следовательно, и изменение физико-химических характеристик биосферы). Так в [13] отмечается, что эволюционный процесс будет продолжаться всегда (возможно, с иной скоростью), причем даже в том случае, если человечество как популяция исчезнет с лица Земли и антропогенное воздействие на окружающую среду прекратится.

Защита биосферы от «чрезмерной опасности» обеспечивается системой отрицательных обратных связей, действующих в рамках объективно существующих законов природы (II закона термодинамики, биогеохимических циклов, информационного многообразия и т. п.).

При анализе антропогенного влияния на биосферные процессы необходимо также учитывать те природные механизмы, которые заложены в организации и эволюции экосистемы на глобальном уровне. Крупномасштабные катастрофические антропогенные воздействия на биосферу, которые подаются современному математическому моделированию, не исчерпывают всех реальных угроз деградации и впоследствии разрушение механизмов поддержания гомеостаза экосистем.

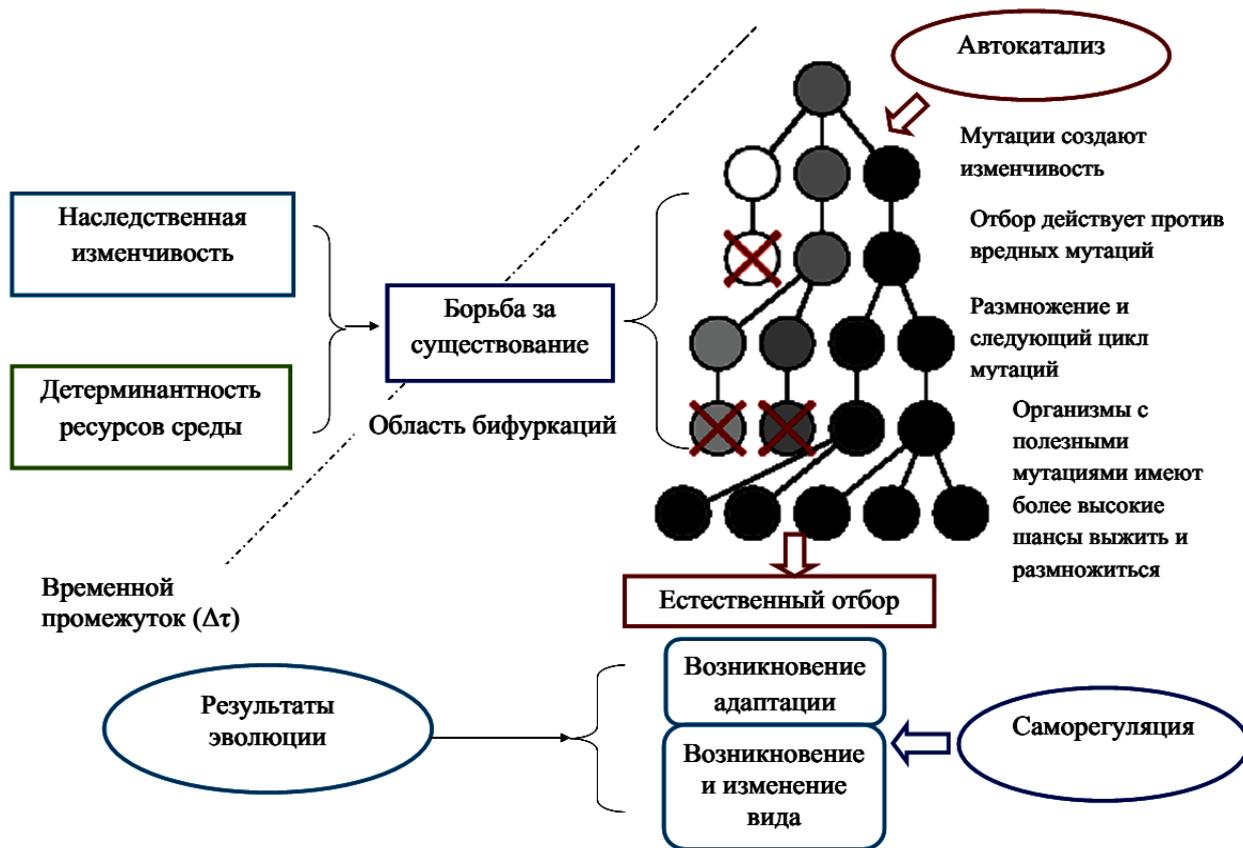


Рис. 3. Модель синергетических закономерностей эволюции видов в контексте традиционного континуального представления

Реакция на незначительные на первый взгляд изменения среды (появление поллютанта, интродукции, инвазии и т. д.) характерна в первую очередь для «живого вещества» биосферы – особей, видов, биоценозов. Если изменения затрагивают те или иные граничные условия, обеспечивающие поддержание гомеостаза экосистемы, то со временем возможны существенные перестройки ее структуры и функции, вплоть до разрушения самой экосистемы.

Предложенная модель не стремится ответить на вопросы усовершенствования общей двухкомпонентной РД-системы или сформировать способы определения параметров математического описания (7), (8). Она дает возможность разработки математического аппарата для описания и анализа влияния живых объектов разного уровня организации на экосистемные процессы. Изменения в понимании функции генезиса популяции с учетом их синергетических характеристик имеет первостепенное значение при оценке влияния инвазивных видов интродуцированных в природные экосистемы и их воздействие на коренное преобразование биотических взаимосвязей.

В свою очередь, восстановительный потенциал экосистемы и ее способность к ассимиляции разного рода загрязнителей связаны со структурой биотических взаимодействий, которые имеют открытый характер, и нелинейное описание влияния антропогенеза и распространения инвазивных видов вследствие антропогенной экспансии дает возможность оценить степень последующих деградационных процессов в экосистемных компонентах.

6. Обсуждение результатов исследования нелинейных закономерностей развития экосистемных процессов при воздействии антропогенеза

При рассмотрении примеров нелинейного моделирования процессов в экосистемах при влиянии на них техногенеза и антропогенеза были выявлены возможные направления практической реализации моделей нелинейной кинетики в экологических исследованиях. В частности, можно выделить несколько закономерностей, которые должны учитываться при изучении процесса деструкции органических примесей в окружающей среде:

- деструкция в общем виде может быть получена экспериментально, например, при значительных выбросах загрязняющих веществ (например, разливе нефтепродуктов при аварии на нефтяной платформе);

- полевые наблюдения не ложатся в точности на изображенную на рис. 1 кривую, образуя некоторое облако значений, окружающее кривую деструкции, которая получается только как аппроксимация измеренных величин;

- термины «загрязнение» и «окружающая среда» могут быть конкретизированы в каждом конкретном случае по-своему. Например, под загрязнением можно понимать скиды сточных вод промышленным предприятием, заболачивание, разлив нефтепродуктов и т. п.;

- описание зависимости между концентрацией загрязнителя и временем его нахождения в окружающей среде отвечает нелинейному характеру биотрансформации примесей в биотической компоненте экосистемы.

Предложенная модель формализации синергетических аспектов эволюции видов имеет следующие

достоинства: расширяет рамки понимания традиционного континуального представления, а также обосновывает влияние бифуркационных процессов на видовое разнообразие и популяционный рост. Такие видимые достоинства обусловлены, тем, что модель имеет общий вид, позволяющий формализовать широкий класс живых систем, и в ней учтены факторы саморегуляции и автокатализа на разных уровнях организации популяции и организма.

Становление системно-синергетического подхода к изучению эколого-антропогенных процессов является важным этапом развития общей методологии познания физического мира и необходимым условием для становления концепции устойчивого развития общества. Соответственно анализ нелинейных моделей, описывающих действия разного рода загрязнителей на экосистемные компоненты, и разработка модели синергетических закономерностей эволюции видов является важным этапом формирования концептуальной основы нелинейного моделирования экосистемных процессов.

Работа над моделированием биосферных процессов включает в себя как математические и формализованные модели, так и экспериментальные исследования на реальных экосистемах и искусственных. Так, в дальнейших исследованиях синергетических закономерностей развития живых систем было бы целесообразным проведение математической формализации полученных результатов моделирования синергии в эволюции видов. Кроме того, необходимы лабораторные исследования нелинейных аспектов развития микрорекосистем и обработка их результатов с помощью морфометрической программы „SEO Image Lab 2.0” и другого специального программного обеспечения. При этом особое внимание должно быть уделено методу нелинейных оценок антропогенного давления на компоненты экосистем, в частности при инвазии чужеродных видов в природные комплексы и истреблении автохтонных видов, а также при моделировании микрорекосистем как природных, так и природно-техногенных (биотехнологических).

8. Выводы

1. В результате анализа нелинейных аспектов кинетики распада органических примесей в водной экосистеме были обоснованы закономерности деструкции загрязняющего вещества в окружающей среде с учетом биотической составляющей; также при анализе перемещений и трансформаций фракций нефти в пористых средах показано, что анализируемые модели не учитывают такие показатели, как степень биодеструкции, биоассимиляции и биотоксикации природной среды, что влияет на качество оценки ассимиляционного потенциала экосистемы.

2. Разработанная формализованная модель синергетических закономерностей эволюции видов позволяет рассмотреть восстановительный потенциал экосистем и их способность ассимиляции разного рода загрязнителей в связи с генезисом видов и их популяций. Это связано с тем, что данная модель представлена в общем виде, что позволяет формализовать живые системы разных таксономических рангов, и в ней учтены факторы саморегуляции и автокатализа на разных уровнях организации популяции и организма.

Література

1. Николос Г. Познание сложного [Текст]: монография / Г. Николос, И. Пригожин. – М.: Издательство «Мир», 1990. – 345 с.
2. Фритеф К. Паутина жизни. Новое научное понимание живых систем [Текст] / К. Фритеф; пер. с англ. под ред. В. Г. Трилиса. – К.: София, 2003. – 336 с.
3. Зимницкий, П. В. Единая модель природы – будущее современного моделирования [Электронный ресурс] / П. В. Зимницкий // Биосфера. – 2003. – № 1. – Режим доступа: <http://www.ihst.ru/~biosphere/03-1/Zimnigky.htm>
4. Барский, В. Г. Проект международной программы «Динамическая модель биосферы» [Электронный ресурс] / В. Г. Барский // Биосфера. – 2002. – № 1. – Режим доступа: http://www.ihst.ru/~biosphere/Mag_1/model.htm
5. Колесников, А. А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза [Текст] / А. А. Колесников. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 228 с.
6. Сидоренко, Е. С. Фракталы в моделировании экологических систем [Текст] / Е. С. Сидоренко, В. В. Халиль // Энергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2013. – Вип. 5. – С. 125–129.
7. Малинецкий, Г. Г. Математические основы синергетики: хаос, структуры, вычислительный эксперимент; 6-е изд. [Текст] / Г. Г. Малинецкий. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 312 с.
8. Малинецкий, Г. Г. Синергетика – от прошлого к будущему [Текст] / Г. Г. Малинецкий // Модел. и анализ информ. систем. – 2012. – Т. 19, № 3. – С. 5–31.
9. Wang, S. L. Break-out of dynamic balance of nonlinear ecosystems using first passage failure theory [Text] / S. L. Wang, X. L. Jin, Z. L. Huang, G. Q. Cai // Nonlinear Dynamics. – 2015. – Vol. 80, Issue 3. – P. 1403–1411. doi: 10.1007/s11071-015-1951-2
10. Maystruk, V. Modelling the Effects of Pollution on a Population and a Resource in a Polluted Environment [Text] / V. Maystruk, K. Abdella // Applied Mathematics. – 2011. – Vol. 2011. – P. 1–31. doi: 10.5402/2011/643985
11. Tian, D. Nonlinear responses of ecosystem carbon fluxes and water-use efficiency to nitrogen addition in Inner Mongolia grassland [Text] / D. Tian, S. Niu, Q. Pan, T. Ren, S. Chen, Y. Bai, X. Han // Functional Ecology. – 2015. – Vol. 30, Issue 3. – P. 490–499. doi: 10.1111/1365-2435.12513
12. Destania, Y. Stability Analysis of Plankton Ecosystem Model: Affected by Oxygen Deficit [Text] / Y. Destania, Jaharuddin, P. Sianturi // Applied Mathematical Sciences. – 2015. – Vol. 9, Issue 81. – P. 4043–4052. doi: 10.12988/ams.2015.53255
13. Братусь А. С. Динамические системы и модели биологии [Текст] / А. С. Братусь, А. С. Новожилов, А. П. Платонов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 400 с.
14. Братусь, А. С. Дискретные динамические системы и математические модели в экологии [Текст]: уч. пос. / А. С. Братусь, А. С. Новожилов, Е. В. Родина. – М.: МИИТ, 2005 – 139 с.
15. Новожилов, А. С. Математические модели взаимодействия загрязнения с окружающей средой [Текст]: дис. ... канд. физ.-мат. наук / А. С. Новожилов. – М.: МИИТ, 2002. – 84 с.
16. Соколов, Э. М. Нелинейная кинетика распада фенольных соединений в водной среде [Текст] / Э. М. Соколов, Л. Э. Шейнкман, Д. В. Дергунов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9 (часть 12) – С. 2677–2681.
17. Цивина, И. М. Природно-техногенные комплексы и основы природообустройства [Текст] / И. М. Цивина. – Новочеркасск: НГМА, 2013. – 79 с.
18. Голованов, А. И. Основы природообустройства [Текст]: уч. пос. / А. И. Голованов и др.; под ред. А. И. Голованова. – М.: Колос, 2001. – 214 с.
19. Елькин, Ю. Е. Автоволновые процессы [Текст] / Ю. Е. Елькин // Математическая биология и биоинформатика. – 2006. – Т. 1, № 1. – С. 27–40.
20. Аладьев, В. З. Классические однородные структуры: Теория и приложения [Текст] / В. З. Аладьев, В. К. Бойко, Е. А. Ровба. – Гродно: ГрГУ, 2008. – 486 с.
21. Гордиенко, В. А. Моделирование биосферных процессов и прогнозирование в экологии с позиций синергетики [Текст] / В. А. Гордиенко, М. В. Старкова // Физические проблемы экологии (экологическая физика). – 2011. – № 17. – С. 98–117.