



УДК 502.5

DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-1-116-123

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С.А. Павлова

Российская Академия народного хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации
пр. Вернадского, 82, стр. 1, г. Москва, Россия, 119571

Высокая поглотительная способность водных растений делает их идеальными тестовыми объектами для количественного и качественного определения антропогенных химических нагрузок на водоем.

В моделировании радиоэкологических процессов большое значение имеют методы логического описания, которые используют при невозможности нахождения математически точных зависимостей. В случае радиоактивного загрязнения экосистемы, собрав необходимые для расчетов по модели данные, можно спрогнозировать ситуацию.

Ключевые слова: модель, биоиндикация, экосистема, компонента радиоэкологические исследования

Введение

«Лучшей моделью кошки будет другая кошка» [1]. Любая модель ограничена (по определению), так как отбрасываются незначительные детали и выделяется суть.

Моделирование радиоэкологических процессов — направление, которое активно развивается в настоящее время. Моделирование радиоэкологических процессов — это решение многомерных задач, каждая из которых преследует определенную цель и решает специфические задачи.

Анализ существующих моделей

Для описания перехода и миграции радионуклидов в экосистемах часто используют метод камерных моделей. В камерных моделях цепь перехода радионуклидов для простоты разделяют по камерам. В математических моделях взаимодействие между камерами задают с помощью коэффициентов. По способам взаимодействия между камерами модели разделяют на стационарные и динамические.

Стационарные камерные модели строят на основе постулата о наличии постоянного статистического равновесия в системе «Экосистема — организм — среда». Цикл исследований по моделированию распределения радионуклидов в трофических цепях экосистем на территории Украины после аварии на ЧАЭС был выполнен в лабораториях Георгиевского В.Б., в Национальном украинском

университете (г. Киев), Кутлахметовым Ю.А., в Институте атомной энергетики им. Курчатова (г. Москва) [2]. Используя стационарную камерную модель, вычисляют активность радионуклидов в камерах. По известным значениям коэффициентов перехода ($K_{п}$) радионуклидов между камерами или по известным количествам стабильного аналога радионуклида в определенной камере рассчитывают удельную активность радионуклида. Распределение активности радионуклидов в каждой из выделенных камер считают равномерным.

Модель, разработанная Кутлахметовым Ю.А., наглядно демонстрирует простоту расчетного метода. В двухкамерной модели рассматриваются две камеры: камера «Окружающая среда» (ОС) (вода, почва и т.д.) и камера «Биота» (наземные и водные растения, лес и т.д.) (рис. 1) [2]. Скорости перехода между камерами: a_{12} — скорость перехода из камеры ОС в камеру «Биота», a_{21} — скорость обратного перехода (оттока) из камеры «Биота» в камеру ОС. Размерность таких скоростей — доля радионуклидов ΔA от величины запаса радионуклидов в конкретной камере A , которая переходит из одной камеры в другую, за единицу времени Δt . Размерность $[a] = \Delta A/A \Delta t$. t — может измеряться часами, днями, месяцами, годами и т.п.

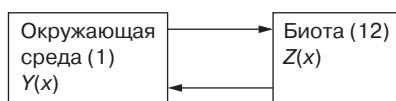


Рис. 1. Схематическое изображение двухкамерной модели (модельной экосистемы) [2]
(Schematic representation of the two chamber model (model ecosystems) [4])

Исходный запас радионуклидов в камере 1 — составляет Y_0 Бк (^{137}Cs). Расчет камерной модели можно вести с использованием математического продукта MAPLE 6. Расчетная модель представлена системой из двух обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\text{dif1} := \text{diff}(y(x), x) = a_{21} \cdot z(x) - a_{12} \cdot y(x);$$

$$\text{dif2} := \text{diff}(z(x), x) = a_{12} \cdot y(x) - a_{21} \cdot z(x).$$

Решение системы:

$$\text{dif1} := \frac{\partial}{\partial x} y(x) = a_{21} z(x) - a_{12} y(x)$$

$$\text{dif2} := \frac{\partial}{\partial x} z(x) = a_{12} y(x) - a_{21} z(x)$$

$$\text{inicond} := y(0) = Y_0, z(0) = 0$$

$$\text{sol} := \left\{ \begin{array}{l} y(x) = \frac{a_{21} Y_0}{a_{12} + a_{21}} + \frac{Y_0 a_{12} e^{-(a_{12} + a_{21})x}}{a_{12} + a_{21}}, \\ z(x) = \frac{-\frac{Y_0 a_{12} e^{-(a_{12} + a_{21})x} a_{21}}{a_{12} + a_{21}} + \frac{a_{12} a_{21} Y_0}{a_{12} + a_{21}}}{a_{21}} \end{array} \right\}.$$

Содержание радионуклидов в камере ОС и камере «Биота» составляет:

$$Y(x) = Y_0 / (a_{12} + a_{21}) \{ a_{21} + a_{12} \cdot \exp[-(a_{12} + a_{21}) \cdot x] \}$$

$$Z(x) = Y_0 \cdot a_{12} / (a_{12} + a_{21}) \{ 1 - \exp[-(a_{12} + a_{21}) \cdot x] \}.$$

Моделирование экологических процессов с помощью метода камерных моделей активно развивается в современной радиоэкологии. Расчеты в камерных моделях позволяют моделировать параметры радиоэкологической емкости и сделать детальный прогноз накопления и динамики радионуклидов в компонентах экосистем. В камерных моделях, в которых введен метод расчета параметров скорости перехода между камерами экосистемы, а не скорости перехода, рассчитанные на единицу веса или объема, позволяют получить общую оценку состояния потоков радионуклидов и спрогнозировать их динамику.

Модель «Накопление радионуклидов гидробионтами» иллюстрирует зависимость от времени. Рацион рыб различной массы рассчитывается так [3]:

энергия прироста + энергия обмена = усвоенная энергия рациона.

Динамика содержания радионуклида в биоте может быть рассчитана по формуле

$$\frac{dy}{dt} = -a(\tau)Y + \varphi(\tau)C_1(t),$$

где Y — удельная активность радионуклида в биоте (Бк/кг); t — время с момента загрязнения (год); τ — возраст организма биоты (гидробионта (год));

$$a(\tau) = \lambda_p + \gamma^* F(\tau) + \varepsilon_p - \varepsilon_m,$$

где λ_p — постоянная радиоактивного распада (1/год); γ — коэффициент, характеризующий усвоение пищи гидробионтом (для рыб: 0,6 — карп, 0,7 — судак); $F(\tau)$ — средний годовой рацион гидробионта, в долях среднегодовой биомассы (рыбы) (1/год); ε_p — скорость метаболических потерь радиоцезия (1/год); ε_m — скорость метаболических потерь биомассы (1/год).

$$\Phi(\tau) = \gamma * F(\tau) * q * CF(\tau),$$

где q — отношение концентраций стабильного аналога радионуклида в гидробионте и в его пище (каarp = 1; судак = 1.2); $CF(\tau)$ — коэффициент накопления радионуклида в пище.

Если скорость метаболических потерь радиоцезия соответствует скорости основных метаболических потерь, тогда

$$\varepsilon_p = \varepsilon_m \text{ и } a(\tau) = \lambda_p + \gamma * F(\tau).$$

Начальные значения содержания радионуклидов в биоте выбираются нулевыми. Но величины коэффициентов накопления в гидробионтах зависят от возраста гидробионта (τ_0) в момент загрязнения:

$$\tau = t + \tau_0.$$

Из-за сложности проблем, возникающих в радиоэкологических и радиобиологических исследованиях, тип логико-информационных моделей наиболее ценен. Он позволяет не только охватить большой объем самых разнообразных данных, но и проанализировать их, построить логические цепочки, а затем определить приоритеты и отсечь ненужную информацию. Модели концептуальны, информативны, позволяют спрогнозировать ситуацию, что позволяет в кратчайшие сроки определить мероприятия по управлению ситуацией. Их целесообразно применять при изучении эффектов сочетанного воздействия.

Основные подходы логико-информационного моделирования были заложены работами академика В.И. Беляева и М.Ю. Худошиной [4]. Структурно-логические модели являются концептуально новым типом моделей, которые позволяют представить процесс или явление визуально. Этот тип моделей универсален, и в последнее время возрастает их использование в самых различных отраслях естествознания. Исследования процессов и систем в системной экологии на базе структурно-логических модельных схем позволяет описывать системы, состоящие из большого количества компонент, устанавливать прямые и обратные связи, определять причинно-следственные связи и выявлять эффекты при смещении балансового равновесия между взаимосвязанными компонентами. На базе модельных схем исследования возможна разработка имитационных действующих моделей.

Наиболее простой пример построения графа логико-информационной модели можно рассмотреть на основе воспроизводства поголовья овец, которых в эксперименте облучали различными дозами путем кормовой затравки Йода-131 (рис. 2). Графическая модель наглядно демонстрирует, сколько потомков получено от облученных в эксперименте в разных дозах овец [5; 6].

Модели пространственного агрегирования компонент экосистемы учитывают динамические процессы в среде (например, учет гидродинамических процессов в водоеме). Высшие водные растения являются неотъемлемой средообразующей компонентой водных экосистем. Они относятся к автотрофным организмам, создают первичную пищевую продукцию в результате своей фотосинтетической деятельности, обуславливают структуру биотического сообщества водоема. Гидро-

Расчет основных параметров для макрофитов [7]:

$$v^1 \frac{\delta i_1^2}{\delta x^1} + v^2 \frac{\delta i^3}{\delta x^2} + v^3 \frac{\delta i_2^5}{\delta x^3} = A^1 \frac{\delta i_i}{\delta x_1^1} + A^2 \frac{\delta i^3}{\delta x_2^2} + \frac{\delta i_i}{\delta x^3} A^3(x^3) \frac{\delta^2 i_2^2}{\delta x^3} + F^{*i}(i^1, \dots, i^7, \dots),$$

где i_i — неконсервативная переменная; v_1, v_2, v_3 — составляющие вектора скорости течения по осям x_1, x_2, x_3 ; $A_1, A_2, A_3(x_3)$ — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии; F^{*i} — неконсервативный член, который может иметь более широкий смысл, т.е.:

$$F^{*i}(x_1, x_2, t) = i_2(x_1, x_2, t) a_{22},$$

где i_2 — функция распределения плотности, т.е. распределение биомассы макрофитов на единицу площади во всем объеме воды.

Для макрофитов удельная скорость роста биомассы будет определяться согласно уравнению

$$\Pi_{2i} = \frac{\Pi_{jM} i_j(x_1, x_2, t)}{\Pi_{jM} + i_j(x_1, x_2, t)}; \quad j = 0; 4; 5,$$

где $i_0 = L_1, \Pi_{0M}, \Pi_{5M}, \Pi_{4M}, i_{0M}, i_{4M}, i_{5M}$ — константы.

Для приближения модельных расчетных уравнений общей концентрации биомассы макрофитов к процессам, реально влияющим на величину накопления (концентрацию) загрязняющих веществ в биомассе, необходимо ввести в уравнение ряд коэффициентов, которые могли бы конкретизировать и охарактеризовать эффекты воздействия различных факторов на сообщество макрофитов. С учетом этих коэффициентов по модельному уравнению можно оценить негативные воздействия, выявить динамику развития сообщества макрофитов. Уравнение для оценки биомассы водорослей-макрофитов, находящихся под воздействием ряда факторов:

$$a = \Pi_2 - E_{23}^1(t) - E_2^2(t) - (d_{22}(t) - d_{12}(t)E_2^3 - E_2^4(t) - E_2^5(t)),$$

где $\Pi_2 = \min(\Pi_{21}, \Pi_{24}, \Pi_{26})$.

Коэффициенты: E_2^1 — отмирание (или токсичность среды, вещества — LD; LD50); E_2^2 — хищники; E_2^3 — активность ферментов метаболических циклов синтеза субстрат-продукт или катаболизма, или альтернативного губительного синтеза; E_2^4 — угнетение роста и развития по ряду причин, в том числе и при действии биогенных факторов с динамикой (–); ρ_1 — концентрация субстрата, динамика (+); ρ_2 — концентрация субстрата альтернативного губительного метаболита, динамика (–); ρ_3 — концентрация токсического вещества; E_2^5 — антропогенное влияние. В этой формуле учтены негативные воздействия факторов, которые могут привести к возникновению губительных мутаций, морфо-структурным нарушениям экосистемы для расчета концентрации биомассы макрофитов по видам для каких-либо биоценозов, районов и т.п.

Способность высших водных растений накапливать вещества в концентрациях, превышающих фоновые значения, зафиксированные в окружающей среде, обусловила их использование в системе мониторинга и контроля за состоянием водной среды. Гидрофиты характеризуются видоспецифичными различиями по концентрации поглощенных химических элементов. Проявляются эти различия даже на уровне органов и частей одного и того же растения, они зависят и от времени года, фазы развития растения, продолжительности его вегетации и т. п. Высокая поглотительная способность водных растений делает их идеальными тестовыми объектами для количественного и качественного определения антропогенных химических нагрузок на водоем, происходящих во время всего вегетационного цикла.

Заключение

Моделирование — это один из важнейших методов научного познания, с помощью которого создается модель (условный образ) объекта исследования. В моделировании радиоэкологических процессов большое значение имеют методы логического описания, которые приходят на помощь тогда, когда невозможно найти математически точные зависимости. Модели пространственного агрегирования компонент системы учитывают пространственную координату. В настоящее время существует достаточно математических методов, которые позволяют проводить моделирование и поучать прогнозные оценки радиоэкологической ситуации, но развитие методологии моделирования актуально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Ивахненко А.Г.* Непрерывность и дискретность. Киев: Наукова думка, 1990.
- [2] *Кутлахмедов Ю.А.* Дорога к теоретической радиоэкологии. К.: Фитосоцицентр, 2015 г.
- [3] *Винберг Г.Г., Анисимов С.И.* Математическая модель водной экосистемы. Фотосинтезируемые системы высокой продуктивности. М.: Наука, 1966.
- [4] *Беляев В.И., Худошина М.Ю.* Основы логико-информационного моделирования сложных геосистем. Киев: Наукова думка, 1989.
- [5] *Павлова С.А.* Модельные схемы радиоэкологической ситуации в животноводстве, определенные по логико-информационной методике в хозяйствах Гомельской области после аварии на Чернобыльской АЭС: автореф. дисс. канд. ... наук. Казань: ВНИВИ, 1997.
- [6] *Павлова С.А.* Фактор радиации — радиобиологические, радиоэкологические эффекты. Симферополь: КГМУ, 2000.
- [7] *Павлова С.А.* Антропогенные загрязнения морской среды. Симферополь, 2002.

© Павлова С.А., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 8 ноября 2016

Дата принятия к печати: 20 ноября 2016

Для цитирования:

Павлова С.А. Моделирование радиоэкологических процессов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности.* 2017. Т. 25. № 1. С. 116–123.

Сведения об авторе:

Павлова Светлана Анатольевна, доктор биологических наук, профессор кафедры управления природопользованием и охраны окружающей среды Российской Академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва. Контактная информация: e-mail: s_pavlova@mail.ru

MODELLING OF RADIO ECOLOGICAL PROCESSES

S.A. Pavlova

The Russian Academy of National Economy and Public service
at the President of the Russian Federation
pr. Vernadskogo, 82/5, Moscow, Russia, 119571

High absorption ability of water plants makes them ideal test objects for quantitative and qualitative determination of anthropogenic chemical loads to the pond.

In modelling the radioecological processes of great importance are the methods of logical descriptions, which use, if you cannot find a mathematically precise dependencies. In the case of radioactive contamination of ecosystems, gathering necessary for the calculation of the model data to predict the situation.

Key words: model, bioindication, ecosystem, component of radioecological research

REFERENCES

- [1] Ivahnenko A.G. *The continuity and step-type behaviour*. Kiev: Naykova dymka; 1990. (In Russ)
- [2] Kytlatmetov J.A. *The theoretical radio ecology*. Kiev: Fitocosiocenter; 2015. (In Russ)
- [3] Vinberg G.G., Anisimov S.I. *Mathematical model of a water ecosystem. Photosynthesized systems of high efficiency*. M.: the Science; 1966. (In Russ)
- [4] Beljaev V.I., Hudoshina M.U. *Bases of logic-information modelling of difficult geosystems*. Kiev: Naykova dymka; 1989. (In Russ)
- [5] Pavlova S.A. Modelling schemes of a radio ecological situation in the animal industries, defined by a logic-information technique in economy of the Gomel area after failure on the Chernobyl atomic power station. The master's thesis author's abstract. Kazan, VNIVI; 1997. (In Russ)
- [6] Pavlova S.A. *The factor of radiation — radio biological, radio ecological effects*. Simferopol: Publishing center KGMU; 2000. (In Russ)
- [7] Pavlova S.A. *The anthropogenous of pollution of the sea environment. The St.-Petersburg un y trade unions*. The Sevastopol branch. 2002.

Article history:

Received: 8 November 2016

Revised: 20 November 2016

Accepted: 10 January 2016

For citation:

Pavlova S.A. (2017) Modelling of radio ecological processes. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (1), 116–123.

Bio Note:

Pavlova S.A., PhD, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Natural Resources and Protection of the Environment management of the Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation. Contact information: e-mail: s_pavlova@mail.ru