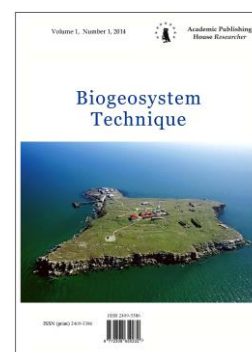


Copyright © 2018 by Academic Publishing House Researcher s.r.o.



Published in the Slovak Republic
Biogeosystem Technique
Has been issued since 2014.
E-ISSN: 2413-7316
2018, 5(1): 110-128

DOI: 10.13187/bgt.2018.1.110
www.ejournal19.com



Conceptual and Mathematical Statement of the Process of Heavy Metals Migration in the System «Soil – Agricultural Plant»

Tatyana V. Perevolotskaya ^{a, *}, Vyacheslav S. Anisimov ^a

^a Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

Abstract

The mathematical modeling was used to describe the functioning and organization of natural ecosystems as well as various approaches to the classification of environmental models to describe both the individual processes and their interactions on the base of the real system patterns.

Using the system analysis, the components of the system «soil – agricultural plant» are identified and analyzed separately interconnected by bilateral cause – effect relationships. It was shown that the origin of the studied system is artificial, while specific of the components is material. By the nature of interaction with the environment it is an open system, the sequence of events in which is not deterministic and is probabilistic. In developing the conceptual model of heavy metal migration in the system «soil – agricultural plant», a number of assumptions were made: the main mechanism of heavy metals input into crops is the root one; the process of chemical element transfer between the components of the system can occur in forward and reverse directions; in the processes of migration between the components of ecosystems, the transit of heavy metals can take place; the foliar flow of heavy metals is taken into account, mediated, in the transfer constants from the soil to the above-ground phytomass of crops; it is assumed that the investigated chemical element is isolated from the parts of plants into the soil.

The accepted limitation in the development of the conceptual model of the TM migration process in the system «soil – agricultural plant» is the formalization of the initial information to quantifiable indicators. Based on the results of the system analysis, adopted approaches and assumptions, a conceptual model of TM migration in the system of «soil – agricultural plants» is developed, with the allocation of the main blocks (compartment): arable soil layer (0-30 cm), aerial phytomass of plants, the root system of plants (root and tuber fields), the subsurface layer of the soil. Mathematical description of the dynamics of migration of chemical elements between the individual components of the studied system «soil – agricultural plant» is presented by a system of linear differential equations of 1st order. The process of migration between the compartments are determined by the constants of transfer of a chemical elements, based on literature data and average values of coefficients of accumulation of Zn, cu, Pb, Cd in the most common crops.

Keywords: heavy metals, chemical elements, accumulation coefficient, conceptual model, algorithm, factor.

1. Введение

Использование методов и подходов системного анализа с применением методов математического моделирования представляет собой концептуальный инструмент,

* Corresponding author

E-mail addresses: forest_rad@mail.ru (T.V. Perevolotskaya)

ориентированный на анализ и прогнозирование процессов функционирования и организации природных экосистем, что позволяет значительно расширить экспериментальные исследования (Ляпунов, Багриновская, 1975; Краснощеков, Петров, 1983; Пеннинг де Фриз, Ван Лаар (ред.), 1986; Карпачевский (ред.), 1987; Марчук, 1982; Кремер, Морозов, 1988; Dube et al., 2001; Сурмин, 2003; Новосельцев (ред.), 2006; Guala et al., 2010; Guala et al., 2013; Franklin et al., 2014; Campbell, Paustian, 2015; Lurgi et al., 2015; Endovitsky et al., 2015; Endovitsky, Kalinichenko, Minkina, 2015; Batukaev et al., 2016; Field et al., 2016; Naskova, 2017; Antle et al., 2017; Chuine, Régnière, 2017; Donatelli et al., 2017; Bourhis et al., 2017; Janssen et al., 2017; Okamoto et al., 2018; Amuti et al., 2018). В зависимости от формы реализации математические модели можно разделить на имитационные и аналитические (Сельскохозяйственная радиоэкология, 1992; Новожилов, Семенова, Петрова, 1999; Семенова и др., 2003; Boulangeat et al., 2014; Jones et al., 2017; Sándor et al., 2017; Ehrhardt et al., 2017; Cammarano et al., 2017; Donatelli et al., 2017; Van Oijen et al., 2018). Под имитационными моделями обычно понимают «формализованное описание с помощью современных компьютерных технологий изучаемого явления во всей его полноте на грани нашего понимания» (Нейлор, 1975, Шеннон, 1978, Джефферс, 1981). Значение аналитических моделей определяется тем, что они дают достаточно простые формулы для приближенных практических расчетов и часто служат методической основой для создания больших имитационных моделей. В зависимости от степени определенности получаемых результатов как имитационные, так и аналитические модели делят на детерминированные и стохастические (Сельскохозяйственная радиоэкология, 1992; Bai et al., 2007; Porporato et al., 2015). При этом, если в детерминированных моделях значения переменных определяются точно, то стохастические модели оперируют с распределениями параметров. В этом случае они рассматриваются как случайные величины и характеризуются вероятностными показателями, такими, как математические ожидания, дисперсия и т.п. В зависимости от того, описывают ли модели временную динамику процессов или нет, их можно классифицировать на статические и динамические (Фрид, 1987; Рыжова, 1987; Иванова, 1989; Полуэктов, 1991, Прохорова, Фрид, 1993; Хомяков, 1994; Полуэктов и др., 2002; Кошелева, 2009; Полуэктов и др., 2012; Snell et al., 2014; Yu et al., 2014; Guillem et al., 2015; Баденко и др., 2015; Medvedev et al., 2015; Harding, Twine, 2015; Sun et al., 2016; Tan et al., 2016; Ozturk et al., 2017; Jones et al., 2017; Winter et al., 2017; Renzi et al., 2018).

Широкий диапазон моделируемых процессов (от глобальной экологии до отдельных компонентов агроэкосистем) обусловил различные подходы классификации экологических моделей (Джефферс, 1981; Бондаренко, Жуковский, Мушкин, 1982; Дмитриев, 1995; Франс, Торнли, 1987; Робертс, 1986; Poluektov, Topaj, 2001; Tipping et al., 2012; Duru et al., 2015; Bellocchi et al., 2015; Campbell, Paustian, 2015; C Rowe et al., 2015; Antle et al., 2017; Holzkämper, 2017). Наиболее часто, для описания сложных процессов, происходящих в агроэкосистемах, применяют статистические модели, балансовые, вероятностные модели (Рыжова, 1987; Бровкин, 1988; Прохорова, 1993; Кошелева, 2002, 2004; Keller et al., 2001; Москвин, 2011; Hou et al., 2014; Porporato et al., 2015; Demková et al., 2017; Lázaro et al., 2017; Hu et al., 2018). Построение статистических моделей агроэкосистем основывается на допущении о случайности исследуемого процесса и может быть изучено с помощью методов математической статистики, что отражено в целом ряде работ (Иванова, 1989; Рыжова, 1987; Образцов, 1990; Литвак, 1990; Уланова, Забелин, 1990; Laflen, Jane, 1991; Прохорова, Фрид, 1993; Porporato et al., 2015; Demková et al., 2017; Lázaro et al., 2017; Hu et al., 2018). Моделированию потоков вещества и энергии в относительно однородных средах посвящены работы (Дмитриев, 1991; Икконен, Толстогузов, 1996; Фельдман, 1999; Tipping et al., 2012 и др.), балансовые модели на основе дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений, описывающих динамику развития систем как совокупность процессов переноса вещества и энергии, применены в работах Пачепский, 1992; Богатырев, Рыжова, 1994; Кошелева, 2009; Bergez et al., 2013. Оптимизационные модельные разработки ведения сельского хозяйства в регламентированных условиях нашли отражение в работах (Сельскохозяйственная радиоэкология, 1992; Фесенко, Яцало, Спиридонов, 1994; Porporato et al., 2015; Amuti et al., 2018 и др.).

Вне зависимости от типа моделей математическое моделирование представляет собой сложный процесс и включает в себя постановку задачи исследования, создание

концептуальной модели, формальное описание объекта моделирования, алгоритмическое описание модели, верификацию, оценку адекватности модели.

Основу для создания концептуальной модели миграции тяжелых металлов (ТМ) в системе «почва – сельскохозяйственное растение», определяющей переход от реальной системы к логической схеме ее функционирования, посредством логико-математического описания объекта составляет цель исследования с учетом всех допущений, необходимых для построения данной модели.

2. Объекты и методы

Методическую основу концептуальной и математической постановки процесса миграции тяжелых металлов в системе «почва – сельскохозяйственное растение» составляют методы теории систем и системного анализа, системного подхода, аналитически-численный.

Методика проведения исследования включает в себя сбор, обработку и обобщение информации о процессе миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственное растение». В качестве информационной базы исследования были применены накопленные и систематизированные литературные данные ([Свидетельство о государственной регистрации...](#), 2016), монографии и публикации отечественных и зарубежных ученых, отражающие результаты исследований согласно целям и задачам настоящего исследования.

Принятые гипотезы, ограничения и допущения концептуальной и математической постановки процесса миграции тяжелых металлов в системе «почва – сельскохозяйственное растение»:

Исходные гипотезы:

- объектом для разработки концептуальной схемы модели является процесс миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственное растение»;
- процесс миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственное растение» может быть описан системой дифференциальных уравнений I порядка.

Принято ограничение:

- разработанная концептуальная схема модели процесса миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственное растение» должна позволять формализовать исходную информацию до количественно измеряемых показателей.

Приняты допущения:

- ТМ Cu, Zn, Pb, Cd относятся к числу приоритетных как для фонового мониторинга окружающей среды, так и экологических оценок территории;
- рассмотрены коэффициенты накопления (КН) Cu, Zn, Pb, Cd в наиболее распространенных сельскохозяйственных культурах (пшеница (зерно), ячмень (зерно), соя (зерно), капуста, свекла (корнеплоды), салат, картофель (клубнеплоды), морковь (корнеплоды));
- основной механизм поступления ТМ в сельскохозяйственные культуры – корневой;
- в процессе взаимодействия компонентов системы друг с другом происходит перенос материи и энергии, как в прямом, так и в обратном направлении (в частности, учитывается вынос ТМ с продуктами ассимиляции в почву с корневыми выделениями);
- между компонентами системы существует обмен химическими элементами различной интенсивности, что определяется физико-химическими свойствами и биологической ролью последних;
- допускается транзитный перенос ТМ между компонентами системы (например, из почвы в ассимилирующие или генеративные органы без учета содержания ТМ в проводящей (стебли) системе);
- внекорневое поступление ТМ учтено, опосредовано, в константах переноса от почвы к надземной фитомассе сельскохозяйственных культур;
- предполагалось выделение исследуемого химического элемента из надземной фитомассы в почву (за счет потерь с надземной фитомассой в виде опада, с корневыми выделениями и другими процессами);
- в течение вегетационного периода происходит постепенное снижение корневого поступления химического элемента за счет миграции последнего за пределы корнеобитаемого слоя;

– в начальный момент времени (первые сутки вегетационного периода, $t=0$) начинается поступление исследуемого химического элемента из почвы в сельскохозяйственное растение. Предполагалось, что во всех компартментах экосистемы, на данный момент времени, содержание элемента равно 0;

– дополнительные агротехнические и агрометеорологические мероприятия на кормовых угодьях не проводятся;

– содержание ТМ во всех компартментах системы принято в мг на 1 м^2 поверхности почвы для слоя почвы 0–30 см;

– при расчете концентрации ТМ в имеющих хозяйственную ценность частях сельскохозяйственных растений их фитомасса принята максимальной, что соответствует периоду сбора урожая (зерно $0,3 \text{ кг/м}^2$ (30 ц/га), картофель $2,50 \text{ кг/м}^2$ (250 ц/га), свекла $5,0 \text{ кг/м}^2$ (500 ц/га), капуста $7,5 \text{ кг/м}^2$ (700 ц/га), салат $1,8 \text{ кг/м}^2$ (200 ц/га), морковь 6 кг/м^2 (700 ц/га), соя (зерно) 1 кг/м^2 (18,3 ц/га) (Романов, 1993).

3. Результаты и их обсуждение

Концептуальная постановка задачи – один из важнейших шагов операционного исследования, результатом выполнения которого является концептуальная модель исследуемого объекта с содержательным описанием состава системы, ее компонентов и взаимосвязей между ними на основе принятых подходов и допущений.

На предварительном этапе применение методов системного анализа позволило выделить отдельные, взаимосвязанные двусторонними причинно-следственными связями, компоненты системы «почва – сельскохозяйственное растение», существенные по отношению к цели исследования: пахотный слой почвы (0–30 см), подпахотный слой почвы, надземная продуктивная (1) и вегетативная (2) фитомасса сельскохозяйственных растений, корневая система (корне- и клубнеплоды) растений (рис. 1).

По происхождению анализируемая система искусственная, по специфике составляющих компонентов – материальная. По характеру взаимодействия со средой представляет собой открытую систему, последовательность событий в которой, не детерминирована и носит вероятностный характер.

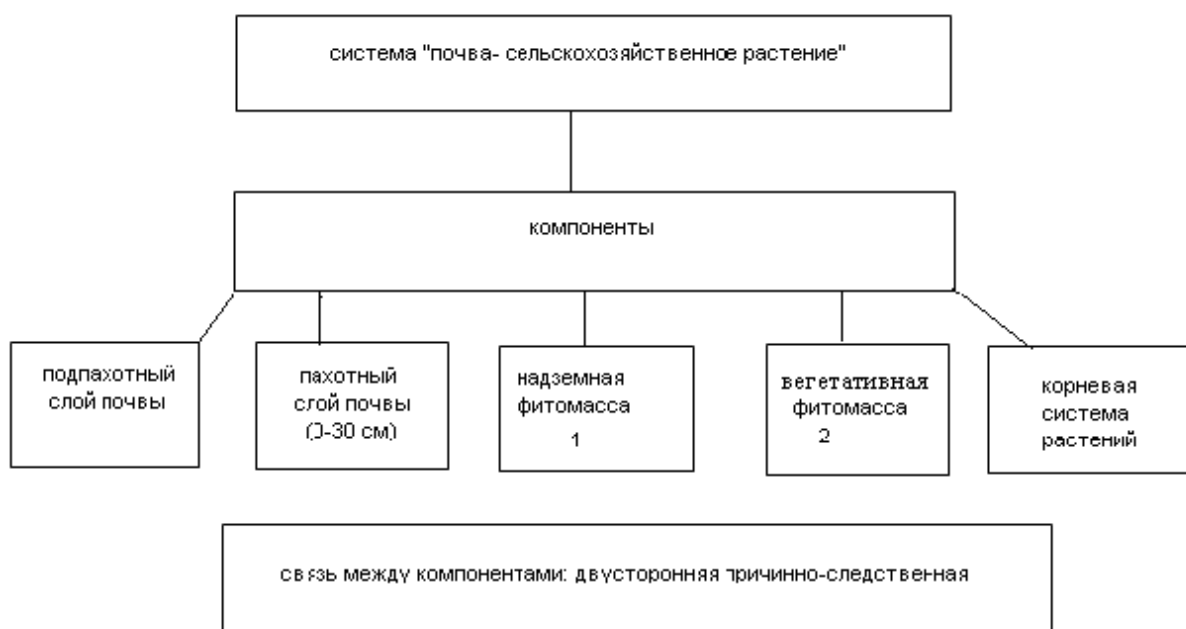


Рис. 1. Структура системы «почва – сельскохозяйственное растение»

Результаты системного анализа объекта исследований были приняты в качестве основы концептуальной модели миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственное растение». Разработанная модель включает в себя 5 основных блоков: A_1 – пахотный слой почвы (0–30 см), A_2 – надземная фитомасса растений (1 – продуктивная), A_3 – надземная

фитомасса растений (2 – вегетативная), A_4 – корневая система растений (корне- и клубнеплоды), A_5 – подпахотный слой почвы (рис. 2).

При этом следует отметить, что концептуальная модель миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственное растение», основу которой составляет систематизация информационных данных исследуемого процесса миграции, не отражает, происходящие в нем, серьезные изменения. Для того, чтобы решить данную задачу, необходима формализация концептуальной (содержательной) модели с учетом принятых гипотез и установленных ограничений на основе выбора адекватного математического отображения.

Для исследования процессов миграции элементов в системе «почва – сельскохозяйственное растение» наиболее широко распространен компартментный подход, в основу которого положен метод системного анализа (Сельскохозяйственная радиоэкология, 1992). Моделируемая экосистема разбивается на блоки, которые называются компартментами, а сама модель – компартментальной. Сложность данных моделей связана главным образом с неоднозначностью выделения компартментов, преимущество заключается в их относительной точности и простоте, описании процессов переноса веществ в потоковой форме в виде констант переноса k_{ij} .

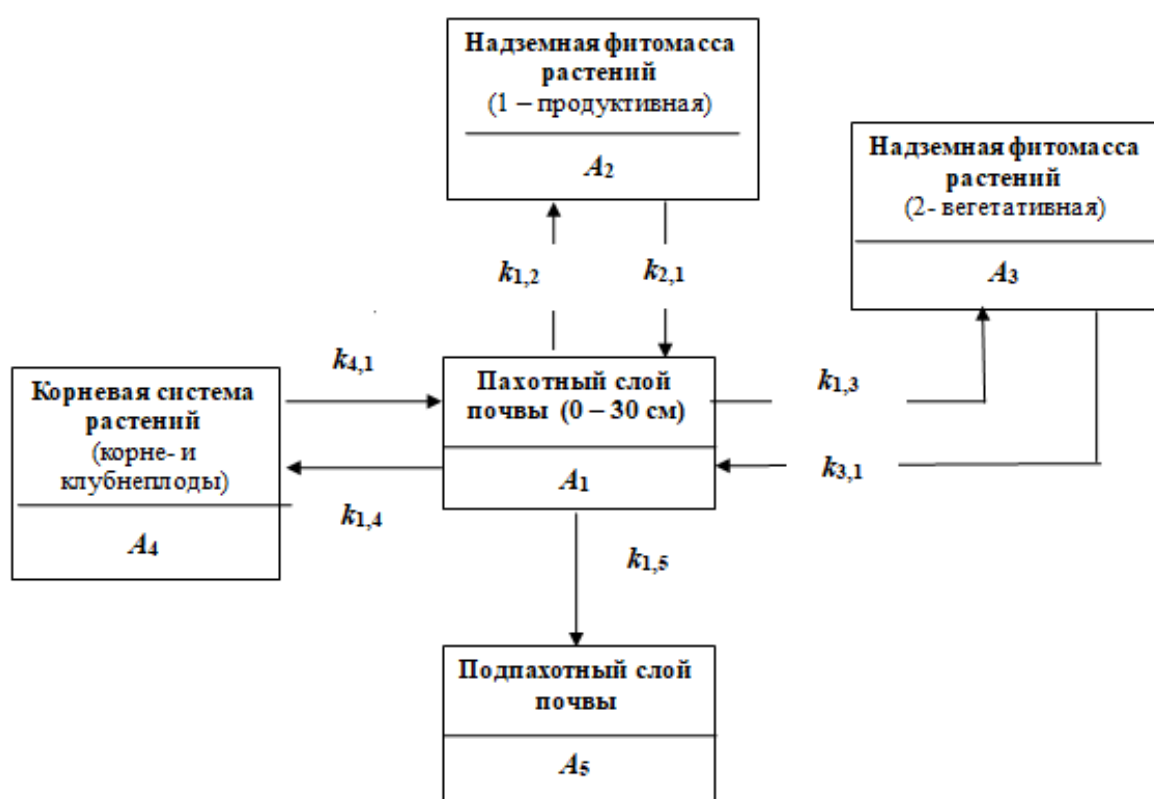


Рис. 2. Концептуальная модель миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственное растение»

Константы k_{ij} (1/с) связаны с переносом химического элемента между компартментами системы вследствие следующих процессов: $k_{1,2}$ и $k_{1,3}$ – поступления за счет корневого усвоения (транзитный перенос); $k_{2,1}$ и $k_{3,1}$ – транзитного переноса из надземной фитомассы растений с продуктами ассимиляции в почву, $k_{1,4}$ – поступления в корневую систему растений, $k_{4,1}$ – формальная константа переноса, обеспечивающая пропорциональность содержания элемента в компартментах 1 и 4, $k_{1,5}$ – сток за пределы корнеобитаемого слоя почвы (рис. 2).

В общем виде динамика обмена химических элементов между отдельными компартментами исследуемой системы «почва – сельскохозяйственное растение» (рис. 2) может быть описана системой дифференциальных уравнений I порядка:

$$\frac{dA_i}{dt} = A_i^0 + \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot A_n - \sum_{j=1}^m k_{ji} \cdot A_m, \quad (1)$$

где A_i, A_m, A_n – содержание химического элемента в компартментах системы, мг на 1 м² поверхности почвы; A_i^0 – поступление химического элемента извне, мг/с; k_{ij} – константы переноса химического элемента из компартмента i в компартменту j , характеризующие перенос химического элемента в соответствующие компартменты из почвы 1/с; k_{ji} – константы переноса химического элемента из компартмента j в компартменту i , характеризующие перенос химического вещества в почву из соответствующих компартмент, 1/с.

Система дифференциальных уравнений I порядка, описывающая миграцию исследуемого химического элемента между отдельными компартментами системы (рис. 2), имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dA_1}{dt} = k_{21} \cdot A_2 + k_{31} \cdot A_3 + k_{41} \cdot A_4 - (k_{12} + k_{13} + k_{14} + k_{15}) \cdot A_1 \\ \frac{dA_2}{dt} = k_{12} \cdot A_1 - k_{21} \cdot A_2 \\ \frac{dA_3}{dt} = k_{13} \cdot A_1 - k_{31} \cdot A_3 \\ \frac{dA_4}{dt} = k_{14} \cdot A_1 - k_{41} \cdot A_4 \\ \frac{dA_5}{dt} = k_{15} \cdot A_1 \end{array} \right. \quad (2)$$

Первое уравнение определяет динамику содержания химического элемента в пахотном слое почвы (0–30 см), а пятое уравнение – в подпахотном слое почвы. Второе и третье уравнение характеризуют интенсивность изменения содержания элемента в надземной продуктивной (1) и вегетативной (2) фитомассе растений, соответственно. Четвертое уравнение описывает изменение содержания элемента в корневой системе (корне- и клубнеплоды) растений. Положительные члены уравнения определяют собой интенсивность входящего потока элемента в компартменту системы, отрицательные – исходящий поток из данной компартменты.

Для решения системы дифференциальных уравнений использовался метод конечных разностей:

$$\frac{dA_1}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A_1}{\Delta t} \approx \frac{A_{1,t+\Delta t} - A_{1,t}}{\Delta t} \Big|_{npu\Delta t=1} = A_{1,t+1} - A_{1,t} \quad (3)$$

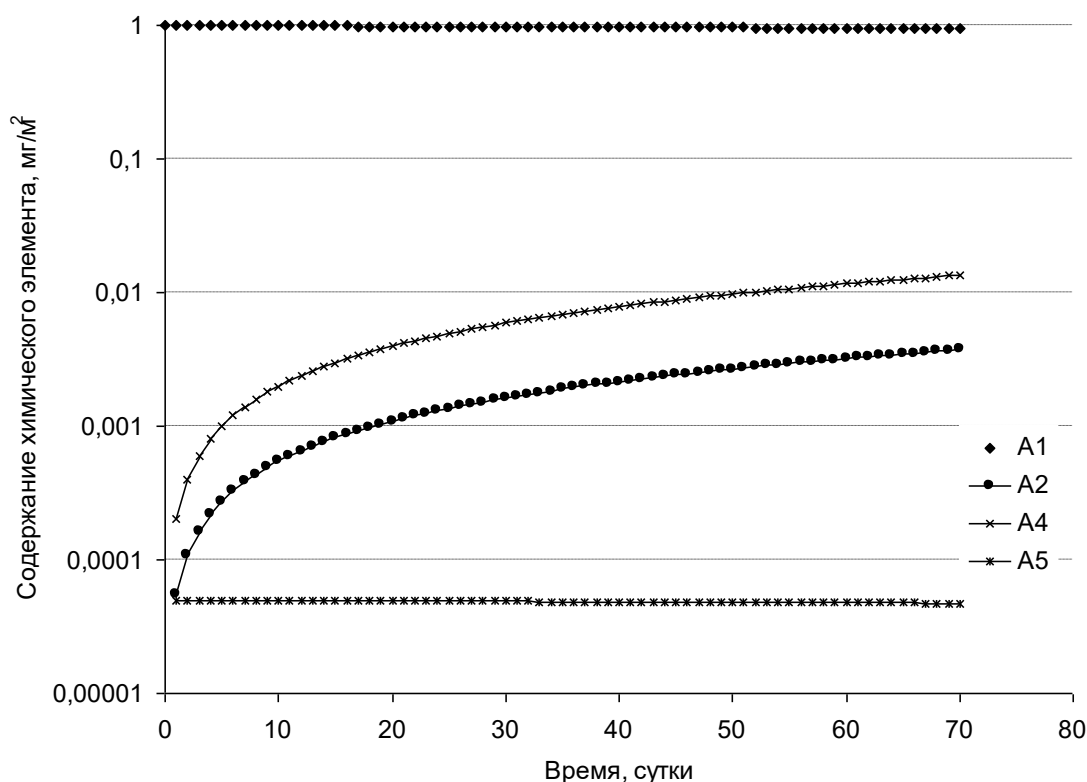
После подстановки конечно-разностного аналога (3) в первое уравнение (2) и соответствующих преобразований система конечно-разностных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} A_{1,t+1} = k_{21} \cdot A_{2,t} + k_{31} \cdot A_{3,t} + k_{41} \cdot A_{4,t} + A_{1,t} \cdot (1 - k_{12} - k_{13} - k_{14} - k_{15}) \\ A_{2,t+1} = k_{12} \cdot A_{1,t} + (1 - k_{21}) \cdot A_{2,t} \\ A_{3,t+1} = k_{13} \cdot A_{1,t} + (1 - k_{31}) \cdot A_{3,t} \\ A_{4,t+1} = k_{14} \cdot A_{1,t} + (1 - k_{41}) \cdot A_{4,t} \\ A_{5,t+1} = k_{15} \cdot A_{1,t} \end{cases} \quad (4)$$

Для расчета параметров модели миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственные растения» применены литературные данные о константах переноса химических элементов (Гусев, Беляев, 1991) и средние значения величин коэффициентов накопления Zn, Cu, Pb, Cd в наиболее распространенных сельскохозяйственных культурах (Свидетельство о государственной регистрации..., 2016). Уточнение констант переноса для каждого вида сельскохозяйственной культуры и типа почвы могут быть выполнены путем решения системы линейных уравнений при известных величинах содержания ТМ в соответствующих компартментах системы.

Расчет концентрации ТМ в хозяйственно ценных частях растений выполняется путем деления содержания химического элемента в соответствующей компартменте (мг/м²) на величину ее массы (кг/м²), соотношенной к единице площади поверхности почвы.

Пример результатов расчета содержания Zn в моделируемой системе «почва – сельскохозяйственное растение» для капусты, произрастающей на дерново-подзолистой почве (П^Д), приведен на рис. 3.



A_1 – пахотный слой почвы, A_2 – надземная (продуктивная) фитомасса растений, A_4 – корневая система растений, A_5 – подпахотный слой почвы

Рис. 3. Содержание Zn в компартментах исследуемой системы на примере капусты, произрастающей на дерново-подзолистой почве, 1/сут

4. Заключение

Для описания процессов, происходящих, в частности, в агроэкосистемах, применяют статистические модели, балансовые, вероятностные модели. Выполнен обзор проблем, возникающих при математическом моделировании процессов функционирования и организации природных экосистем, отражены различные подходы к классификации экологических моделей. Показано, что математическое моделирование, основным инструментом которого выступает системный анализ, позволяет адекватно описывать как отдельные процессы системы, так и взаимодействие процессов на основе установленных закономерностей поведения реальной системы. Это определяет перспективу использования рассмотренных моделей для изучения и предсказания сложных агроэкосистем.

Применение методов системного анализа позволило провести анализ и выделить отдельные взаимосвязанные двусторонними причинно-следственными связями компоненты системы «почва – сельскохозяйственные растения», существенные по отношению к цели исследований. Показано, что по происхождению анализируемая система искусственная, по специфике составляющих компонентов – материальная, по характеру взаимодействия со средой представляет собой открытую систему, последовательность событий в которой не детерминирована и носит вероятностный характер.

На основе результатов системного анализа, принятых подходов и допущений разработана концептуальная модель миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственные растения», с выделением основных блоков (компартмент): пахотный слой почвы (0–30 см), надземная фитомасса растений, корневая система растений (корне- и клубнеплоды), подпахотный слой почвы. Математическое описание динамики миграции химических элементов между отдельными компартментами исследуемой системы «почва – сельскохозяйственное растение» представлено системой линейных дифференциальных уравнений I порядка. Процессы миграции между компартментами определяются константами переноса химического элемента, основанными на литературных данных и средних значениях величин коэффициентов накопления Zn, Cu, Pb, Cd в наиболее распространенных сельскохозяйственных культурах.

Представленная модель миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственное растение» позволяет оценить содержание тяжелых металлов в имеющих хозяйственную ценность частях сельскохозяйственных растений с учетом почвенно-экологических условий. Она может быть использована в системах поддержки принятия решений при возделывании сельскохозяйственных культур на почвах, загрязненных ТМ.

Литература

Алексахин, Корнеев (ред.), 1992 – Сельскохозяйственная радиоэкология. Под ред. Р.М. Алексахина и Н.А. Корнеева. М.: Экология, 400 с.

Баденко и др., 2015 – Баденко В.Л., Гарманов В.В., Иванов Д.А., Савченко А.Н., Топаж А.Г. (2015). Перспективы использования динамических моделей агроэкосистем в задачах средне- и долгосрочного планирования сельскохозяйственного производства и землеустройства // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук, № 1–2, С. 72–76.

Богатырев, Рыжова, 1994 – Богатырев Л.Г., Рыжова И.М. (1994). Биологический круговорот и его роль в почвообразовании. М.: Изд-во МГУ, 80 с.

Бондаренко и др., 1982 – Бондаренко Н.Ф., Жуковский Е.Е., Мушкин И.Г. (1982). Моделирование продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат, 142 с.

Бровкин, 1988 – Бровкин В.А. (1988). Моделирование агроэкосистем, модель почвенного плодородия. М.: Изд-во: Вычислительный центр АН СССР, 36 с.

Гусев, Беляев, 1991 – Гусев Н.Г., Беляев В.А. (1991). Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник. М.: Энергоатомиздат, 256 с.

Джефферс, 1981 – Джефферс Дж. (1981). Введение в системный анализ: применение в экологии. М.: Мир, 256 с.

Дмитриев, 1991 – Дмитриев А.А. (1991). Алгоритм прогноза по известному спектру частот // Вопросы агроэкологического прогнозирования. Науч.-техн. бюл. Н.:РАСХН. Сиб. отд-е. СибНИИЗХим, вып. 5, С. 33–37.

Дмитриев, 1995 – Дмитриев Е.А. (1995). Математическая статистика в почвоведении.

М.: Изд-во МГУ, 320 с.

Иванова, 1989 – *Иванова Т.М.* (1989). Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей. М.: Агропромиздат, 235 с.

Икконен, Толстогузов, 1996 – *Икконен Е.Н., Толстогузов О.Н.* (1996). Диффузия углекислого газа в торфяной почве верхового болота // *Почвоведение*, № 7, С. 868–872.

Карпачевский (ред.), 1987 – Сельскохозяйственные экосистемы. Под ред. Л.О. Карпачевского, пер. с англ. А.С. Каменского, Ю.А. Смирнова, Э.Е. Хавкина. М.: Агропромиздат, 223 с.

Касимов, Герасимова (ред.), 2002 – Геохимия ландшафтов и география почв. Под ред. Касимова Н.С. и Герасимовой М.И. (2002). Смоленск: Ойкумена, 465 с.

Кошелева, 2002 – *Кошелева Н.Е.* (2002). Моделирование биохимических циклов тяжелых металлов в агроландшафтах на основе балансового подхода. Геохимия ландшафтов и география почв. Смоленск: Ойкумена, С. 389–405

Кошелева, 2004 – *Кошелева Н.Е.* (2004). Математическое моделирование ландшафтно-геохимических процессов. География, общество, окружающая среда. М.: Изд. Дом Городец, С. 528–545.

Кошелева, 2009 – *Кошелева Н.Е.* (2009). Опыт моделирования циклов тяжелых металлов в агроландшафтах // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Т. 11, № 1(7), С. 1494–1500.

Краснощеков, Петров, 1983 – *Краснощеков П.С., Петров А.А.* (1983). Принципы построения моделей. М.: Изд-во МГУ, 264 с.

Кремер, Морозов, 1988 – *Кремер А.М., Морозов А.И.* (1988). Математическое моделирование процесса самоорганизации неоднородностей почвенного покрова // *Бюлл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*, № 47, С. 67–68.

Литвак, 1990 – *Литвак Ш.И.* (1990). Системный подход к агрохимическим исследованиям. М.: Агропромиздат, 220 с.

Ляпунов, Багриновская, 1975 – *Ляпунов А.А., Багриновская Г.П.* (1975). О методологических вопросах математической биологии. М.: Математическое моделирование в биологии, С. 5–19.

Марчук, 1982 – *Марчук Г.И.* (1982). Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 320 с.

Москвин, 2011 – *Москвин В.В.* (2011). Типизация моделей агроэкосистем // *Вестник ВГУ*, № 1, С.85–90.

Нейлор, 1975 – *Нейлор Т.* (1975). Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем. М.: Мир, 502 с.

Новожилов и др., 1999 – *Новожилов К.В., Семенова Н.Н., Петрова Т.М.* (1999). Имитационное моделирование и экотоксикологические параметры в системе оценок опасности пестицидов // *Защита растений*, № 12, С. 8–15.

Новосельцев (ред), 2006 – Теоретические основы системного анализа. Под ред. В.И. Новосельцева. М.: Майор, 592 с.

Образцов, 1990 – *Образцов А.С.* (1990). Системный метод: применение в земледелии. М.: Агропромиздат, 303 с.

Пачепский, 1992 – *Пачепский Я.А.* (1992). Математические модели физико-химических процессов в почвах. М.: Наука, 120 с.

Полуэктов и др., 2002 – *Полуэктов Р.А., Опарина И.В., Семенова Н.Н., Терлеев В.В.* (2002). Моделирование почвенных процессов в агроэкосистемах. СПбГУ: Издательство СПбГУ, 2002, 148 с.

Полуэктов и др., 2012 – *Полуэктов Р.А., Топаж А.Г., Якушев В.П., Медведев С.А.* (2012). Использование динамической модели агроэкосистемы для оценки влияния климатических изменений на продуктивность посевов (теория и реализация) // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*, №2, С. 7–12.

Полуэктов, 1991 – *Полуэктов Р.А.* (1991). Динамические модели агроэкосистемы. Л.: Гидрометеиздат, 312 с.

Проخورова, Фрид, 1993 – *Проخورова З. А., Фрид А.С.* (1993). Изучение и моделирование плодородия почв на базе длительного полевого опыта. М.: Наука, 189 с.

Робертс, 1986 – *Робертс Ф.С.* (1986). Дискретные математические модели с

приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. Пер. с англ. А.М. Раппопорта, С.И. Травкина, под ред. А.И. Теймана. М.: Наука, 496 с.

Романов, 1993 – Романов, Г.Н. (1993). Ликвидация последствий радиационных аварий. Справочное руководство. М.: ИздАТ, 336 с.

Рыжова, 1987 – Рыжова И.М. (1987). Математическое моделирование почвенных процессов. М.: Изд-во МГУ, 86 с.

Свидетельство о государственной регистрации..., 2016 – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016621301, 22 сентября 2016 г. «Систематизация результатов исследований по миграции тяжелых металлов ТМ в системе почва – сельскохозяйственные растения».

Семенова, 2007 – Семенова Н.Н. (2007). Мониторинг пестицидов в почве агробиоценозов с использованием имитационных моделей разных классов // *Защита растений*, № 2, С. 14–17.

Сурмин, 2003 – Сурмин Ю.П. (2003). Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие. К.: МАУП, 368 с.

Уланова, Забелин, 1990 – Уланова Е.С., Забелин В.Н. (1990). Методы корреляционного и регрессионного анализа в агрометеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 206 с.

Фельдман, 1999 – Фельдман О.В. (1999). Поточные модели агроэкосистем // *Матем. моделирование*, 11:10., С. 31–48.

Фесенко и др., 1994 – Фесенко С.В., Яцало Б.И., Спиридонов С.И. (1994). Применение математических моделей в радиоэкологии // *Вестник РАСХН*, № 4, С. 29–31.

Франс, Торнли, 1987 – Франс Дж., Торнли Дж. (1987). Математические модели в сельском хозяйстве. Пер. с англ. А.С. Каменского; под ред. Ф.И. Ерешко. М.: Агропромиздат, 400 с.

Фрид, 1987 – Фрид А.С. (1987). Информационные модели плодородия почв // *Вестник с-х науки*, № 9, С. 8–12.

Пеннинг де Фриз, Ван Лаар (ред.), 1986 – Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур. Под ред. Пеннинга де Фриза, Ф.В.Т. и Ван Лаара Н.Н.. Л.: Гидрометеоиздат, 320 с.

Шеннон, (1978) – Шеннон Р. (1978). Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 418 с.

Хомяков, 1994 – Хомяков Д.М. (1994). Моделирование влияния абиотических факторов на агроэкосистемы для целей экологических экспертиз и управления продуктивностью земледелия. «Тяжелые металлы и радионуклиды в агроэкосистемах». Материалы научно-практической конференции. М.: «Агроэколас», С. 286–288.

Amuti et al., 2018 – Tureniguli Amuti, Geping Luo, Gang Yin, Qi Hu, E. A. Walter-Shea (2018). Validation of a Process-Based Agro-Ecosystem Model (Agro-IBIS) for Maize in Xinjiang, Northwest China // *Agronomy*, 2018, 8, 29. DOI: 10.3390/agronomy8030029

Antle et al., 2017 – John M Antle, Bruno Basso, Richard T Conant, H Charles J Godfray, James W Jones, Mario Herrero, Richard E Howitt, Brian A Keating, Rafael Munoz-Carpena, Cynthia Rosenzweig, Pablo Tittonell, Tim R Wheeler (2017). Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: Design and improvement // *Agricultural Systems*, 155 (2017): 255–268. DOI: 10.1016/j.agsy.2016.10.002

Batukaev et al., 2015 – Batukaev A.A, Endovitsky A.P., Andreev A.G., Minkina T.M., Kalinichenko V.P., Burachevskaya M.V., Dikaev Z.S., Mandzhieva S.S., Sushkova S.N. (2015). Thermodynamic Model of Calcium Carbonate System of Soil Solution // *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 2016, 11 (2): 82.92. DOI: 10.3844/ajabssp.2016.82.92

Bellocchi et al., 2015 – Gianni Bellocchi, Mike Rivington, Keith Matthews, Marco Acutis (2015). Deliberative processes for comprehensive evaluation of agroecological models. A review // *Agronomy for Sustainable Development*, Vol.35, Is. 2, pp.589–605

Bergez et al., 2013 – Jacques-Eric Bergez, Patrick Chabrier, Christian Gary, Marie-Helene Jeuffroy, David Makowski, et al. (2013). An open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agro-ecosystems // *Environmental Modelling and Software*, Elsevier, 2013, 39, pp. 39–49. DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.03.011

Boulangeat et al., 2014 – Boulangeat Isabelle, Damien Georges, Thuiller Wilfried (2014). A spatially and temporally explicit integrated model for predicting vegetation structure and

diversity at regional scale // *Glob Change Bioogyl*, 2014, 20 (7):2368–2378. DOI: 10.1111/gcb.12466

Bourhis et al., 2017 – Yoann Bourhis, Sylvain Poggi, Youcef Mamméri, Ronan Le Cointe, Anne-Marie Cortesero, Nicolas Parisey (2017). Foraging as the landscape grip for population dynamics – A mechanistic model applied to crop protection // *Ecological Modelling*, Vol. 354, pp. 26–36. DOI:10.1016/j.ecolmod.2017.030.005

Cammarano et al., 2017 – Cammarano, D., Rivington, M., Matthews, K.; Miller, D., Bellocchi, G. (2017). Implications of climate model biases and downscaling on crop model simulated climate change impacts. // *J. Agron.* 2017, 88, pp. 63–75

Campbell, Paustian, 2015 – Eleanor E Campbell, Keith Paustian (2015). Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review // *Environmental Research Letter*, 10 (2015) 123004. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/123004

Chuine, Régnière, 2017 – Isabelle Chuine, Jacques Régnière. (2017). Process based models of phenology for plants and animals // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Vol. 48:159–182.

C Rowe et al., 2015 – Edwin C. Rowe, G. W. Wieger Wamelink, Simon M. Smart, Adam Butler, Peter A. Henrys, Han F. van Dobben, Gert Jan Reinds, Chris D. Evans, Johannes Kros, Wim de Vries (2015). Field Survey Based Models for Exploring Nitrogen and Acidity Effects on Plant Species Diversity and Assessing Long-Term Critical Loads. In book: Critical Loads and Dynamic Risk Assessments. Nitrogen, Acidity and Metals in Terrestrial and Aquatic Ecosystems., Chapter: 11, Publisher: Springer, pp.297–326.

Demková et al., 2017 – Lenka Demková, Július Árvay, Lenka Bobuľská, Ján Tomáš, Radovan Stanovič, Tomáš Lošák, et al. (2017). Accumulation and environmental risk assessment of heavy metals in soil and plants of four different ecosystems in a former polymetallic ores mining and smelting area (Slovakia) // *Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 52(5), pp. 479–490.

Donatelli et al., 2017 – M. Donatelli, R.D. Magarey, S. Bregaglio, L. Willocquet, J.P.M. Whish, S. Savary (2017). Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems // *Agricultural Systems*, Vol. 155, pp. 213–224. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.019.

Dube et al., 2001 – Dube A., Zbytniewski R., Kowalkowski T., Cukrowska E, Buszewski B. (2001). Adsorption and Migration of Heavy Metals in Soil Polish // *Journal of Environmental Studies*, Vol. (10), No.1, pp. 1–10.

Duru et al., 2015 – Michel Duru, Olivier Therond, Guillaume Martin, Roger Martin-Clouaire, Marie-Angéline Magne, Eric Justes, Etienne-Pascal Journet, Jean-Noël Aubertot, Serge Savary, Jacques-Eric Bergez, Jean Pierre Sarthou (2015). How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review // *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 35, Is. 4, pp. 1259–1281.

Ehrhardt et al., 2017 – Ehrhardt, F., Soussana, J.-F., Bellocchi, G., Grace, P., McAuliffe, R.,; Recous, S., Sándor, R., Smith, P.,; Snow, V., de Antoni Migliorati, M.; et al. (2017). Assessing uncertainties in crop and pasture ensemble model simulations of productivity and N₂O emissions // *Glob. Chang. Biol.* 2017, 24, pp. 603–616.

Endovitsky et al., 2015 – Endovitsky Anatoly P., Andreev Angrey G., Minkina Tatyana M., Kalinichenko Valery P. (2015). Ion's Association in Soil Solution among the Drivers of Biogeosystem Dynamics // *Biogeosystem Technique*, 2015, Vol.(5), Is. 3, pp. 267–285. DOI: 10.13187/bgt.2015.5.267

Endovitsky et al., 2015 – Endovitsky Anatoly P., Minkina Tatyana M., Kalinichenko Valery P. (2015). Carbonate Calcium Equilibrium in Soil Solution as a Driver of Heavy Metals Mobility // *International Journal of Environmental Problems*, 2015, Vol. (2), Is. 2, pp. 136–153. DOI: 10.13187/ijep.2015.2.136.

Field, et al., 2016 – John L. Field, Ernie Marx, Mark Easter, Paul R. Adler, Keith Paustian (2016). Ecosystem model parameterization and adaptation for sustainable cellulosic biofuel landscape design // *GCB Bioenergy*, 2016, 8, 1106–1123, DOI: 10.1111/gcbb.12316.

Franklin et al., 2014 – Janet Franklin, Helen M. Regan, Alexandra D. Syphard (2014). Linking spatially explicit species distribution and population models to plan for the persistence of plant species under global change for the persistence of plant species under global change // *Environmental Conservation*, 2014, 41 (2): 97–109. DOI:10.1017/S0376892913000453

Guala et al., 2010. – Guala S.D., Vega F.A., Covelo E.F. (2010). The dynamics of heavy metals in plant–soil interactions // *Ecological Modelling*, 221(8): pp. 1148–1152. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.01.003.

Guala et al., 2013. – Guala S.D., Vega F.A., Covelo E.F. (2013). Modeling the plant–soil interaction in presence of heavy metal pollution and acidity variations // *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 185, Is. 1, pp 73–80.

Guillem et al., 2015 – Guillem, E.E.; Murray-Rust, D.; Robinson, D.T.; Barnes, A.; Rounsevell, M.D.A. (2015). Modelling farmer decision-making to anticipate tradeoffs between provisioning ecosystem services and biodiversity // *Agric. Syst.* 2015,137, pp. 12–23.

Hardin, Twine, 2015 – Keit J. Hardin, Tracy E. Twine (2015). Effects of Dynamic Crop Growth on the Simulated Precipitation Response to Irrigation // *Earth Interactions*, Vol. 19 (2015), No. 14. DOI: 10.1175/EI-D-15-0030.1

Holzämper, 2017 – Annelie Holzämper (2017). Adapting Agricultural Production Systems to Climate Change – What’s the Use of Models? // *Agriculture*, 7, 86. DOI:10.3390/agriculture7100086

Hou et al., 2014 – Qingye Hou, Zhongfang Yang, Junfeng Ji, Tao Yu, Guoguang Chen, Juan Li, Xueqi Xia, Ming Zhang, Xuyin Yuan (2014). Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River delta, China // *Journal of Geochemical Exploration*, 139, pp. 68–84.

Hu et al., (2018) – Wenyong Hu, Hui Feng Wang, Lurui Dong, Biao Huang, Ole K. Borggaard, Hans Christian Bruun Hansen, Yue He, Peter E. Holm (2018). Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach // *Environmental Pollution*, Vol. 237, pp. 650–661. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.02.070

Janssen et al., 2017 – S. Janssen, C.H.Porter, A.D.Moore, I.N. Athanasiadis, I.Foster, J.W.Jones, J.M.Antle (2017). Towards a new generation of agricultural system models, data, and knowledge products: building an open web-based approach to agricultural data, system modeling and decision support // *Agric. Syst.* 155, 2017, pp. 200–212.

Jones et al., 2017 – Jones, J.W.; Antle, J.M.; Basso, B.; Boote, K.J.; Conant, R.T.; Foster, I.; Godfray, H.C.J.; Herrero, M.; Howitt, R.E.; Janssen, S.; et al. (2017)/ Brief history of agricultural systems modelling // *Agric. Syst.* 2017, 155, pp. 240–254.

Laflen, Jane, 1991 – Laflen J.M., Jane L.J. (1991). Foster G.R. WEPP: a New Generation in Erosion Prediction Technology // *J. of Soil and Water Conservation*, Vol. 46, pp. 34–38.

Lázaro et al., 2017 – Elena Lázaro, Carmen Armero, Luis Rubio (2017). Bayesian correlated models for assessing the prevalence of viruses in organic and non-organic agroecosystems // *SORT* 41 (1), pp. 93–116. DOI:10.2436/20.8080.02.52.

Lurgi et al., 2015 – Miguel Lurgi, Barry W. Brook, Frédéric Saltré, Damien A. Fordham (2015). Modelling range dynamics under global change: which framework and why? // *Methods in Ecology and Evolution*, 2015, 6, 247–256. DOI: 10.1111/2041-210X.12315.

Medvedev et al., 2015 – Medvedev S., Topaj A., Badenko V., Terleev V. (2015) Medium-term analysis of agroecosystem sustainability under different land use practices by means of dynamic crop simulation // *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Vol. 448, pp. 252–261.

Naskova, 2017 – Naskova Paulina (2017). Mathematical model for evaluation of the content of heavy metals in soil by indirect plant signatures // *New Knowledge Journal of Science*, Vol. 6, No 3, pp. 149–160.

Okamoto et al., 2018 – Kenichi W. Okamoto Priyanga Amarasekare Samantha Price (2018). A framework for highthroughput ecoevolutionary simulations integrating multilocus forwardtime population genetics and community ecology // *Methods in Ecology and Evolution*, 2018, 9, 525–534. DOI: 10.1111/2041-210X.12889

Ozturk et al., 2017 – Ozturk, I.; Sharif, B.; Baby, S.; Jabloun, M.; Olesen, J.E. (2017). The long-Term effect of climate change on productivity of winter wheat in Denmark: A scenario analysis using three crop models // *J. Agric. Sci.* 2017, 55, pp. 733–750.

Poluektov, Topaj, 2001 – Poluektov R. A., Topaj A. G. (2001). Crop modeling: Nostalgia about present or reminiscence about future // *Agronomy Journal*, 93, pp. 653–659.

- Porporato et al., 2015 – A. Porporato, X. Feng, S. Manzoni, Y. Mau, A. J. Parolari, G. Vico (2015). Ecohydrological modeling in agroecosystems: Examples and challenges // *Ecohydrological Modeling in Agroecosystems*, 2015, pp. 5081–5099. DOI: 10.1002/2015WR017289
- Renz et al., 2018 – J. P. Renzi, G. R. Chantre, Renovables de la Zona Semiárida, M. A. Cantamutto (2018). Vicia villosa ssp. villosa Roth field emergence model in a semiarid agroecosystem // *Grass and Forage Science*, 73(1), pp. 146–158. DOI: /10.1111/gfs.12295
- Sándor et al., 2017 – R.Sándor, C.Picon-Cochard R.Martin, F.Louault, K.Klumpp, D.Borras, G.Bellocchi. (2017). Plant acclimation to temperature: Developments in the Pasture Simulation model // *Field Crops Research*. DOI:10.1016/j.fcr.2017.05.030.
- Snell et al., 2014 – R.S. Snell, A. Huth, E.M.S. Nabel, G. Bocedi, M.J. Travis, D. Gravel, H. Bugmann, A.G. Gutiérrez, T. Hickler, S.I. Higgins, B. Reineking, M. Schertjanoi, N. Zurbriggen and H. Lischke (2014). Using dynamic vegetation models to simulate plant range shifts // *Ecography*, 2014, 37:1184–1197. DOI: 10.1011/ecog.00580.
- Sun et al., 2016 – Sun, S.; Delgado, M.S.; Sesmero, J.P. (2016). Dynamic adjustment in agricultural practices to economic incentives aiming to decrease fertilizer application // *J. Environ. Manag.* 2016, 177, pp. 192–201.
- Tan et al., 2016 – Tan, J.; Cui, Y.; Luo, Y. (2016). Global sensitivity analysis of outputs over rice-growth process in ORYZA model // *Environ. Model. Softw.* 2016, 83, pp. 36–46.
- Thierry et al., 2017 – Hugo Thierry Aude Vialatte, Jean-Philippe Choisis, Benoit Gaudou, Hazel Parry, Claude Monteil (2017). Simulating spatially-explicit crop dynamics of agricultural landscapes: The ATLAS simulator // *Ecological Informatics*, Vol. 40, pp. 62–80. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2017.05.006
- Tipping et al., 2012 – E. Tipping, E.C. Rowe, C.D. Evans, R.T.E. Mills, B.A. Emmett, J.S. Chaplow, and J.R. Hall (2012). N14C: A plant–soil nitrogen and carbon cycling model to simulate terrestrial ecosystem responses to atmospheric nitrogen deposition // *Ecological Model*, 247, pp. 11–26. DOI:10.1016/j. ecolmodel.2012.08.002
- Van Oijen et al., 2018 – Marcel van Oijen, Gianni Bellocchi, Mats Höglind (2018). Effects of Climate Change on Grassland Biodiversity and Productivity: The Need for a Diversity of Models // *Agronomy* 2018, 8, 14; DOI:10.3390/agronomy8020014
- Winter et al., 2017 – Jonathan M. Winter, Charles Young, Vishal K. Mehta, Cynthia Rosenzweig (2017). Integrating water supply constraints into irrigated agricultural simulations of California // *Environmental Modelling and Software*. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.06.048
- Yu et al., 2014 – Yu C., Li C., Xin, Q., Chen H., Zhang, J., Zhang F., Li X., Clinton N., Huang X., Yue Y., et al (2014). Dynamic assessment of the impact of drought on agricultural yield and scale-dependent return periods over large geographic regions // *Environ. Model. Softw.* 2014, 62, pp. 454–464.

References

- Aleksakhin, Korneev (Ed.), 1992 – Agricultural radioecology. Ed. Aleksakhina R.M. and Korneeva N.A. M.: Ecology, 400 p.
- Badenko et al., 2015 – Badenko V.L., Garmanov V.V., Ivanov D.A., Savchenko A.N., Topazh A.G. (2015). Prospects for the use of dynamic models of agroecosystems in the problems of medium and long-term planning of agricultural production and land management. *Reports of the Russian academy of Agricultural Sciences*, No. 1–2, pp. 72–76.
- Bogatyrev, Ryzhova, 1994 – Bogatyrev L.G., Ryzhova I.M. (1994). Biological circulation and its role in soil formation. M.: Izd-vo of MGU, 80 p.
- Bondarenko et al., 1982 – Bondarenko N.F., Zhukovskiy E.E., Mushkin I.G. (1982). Modeling the productivity of agroecosystems. L.: Gidrometeoizdat, 142 p.
- Brovkin, 1988 – Brovkin V.A. (1988). Modeling of agroecosystems, soil fertility model. M.: Izd-vo: Computer center AN USSR, 36 p.
- Gusev, Belyaev, 1991 – Gusev N.G., Belyaev V.A. (1991). Radioactive emissions in the biosphere: a reference book. M.: Energoatomizdat, 256 p.
- Dzheffers, 1981 – Dzheffers Dzh. (1981). Introduction to the analysis of the systems: application is in ecology. M.: the World, 256 p.
- Dmitriev, 1995 – Dmitriev E.A. (1995). Mathematical statistics in soil science. M.: Izd-vo of MGU, 320 p.

- Dmitriev, 1991 – Dmitriev A.A. (1991). Algorithm of the forecast for the known frequency spectrum. Issues of agroecological forecasting. Nauch.-tech. byul. N.: RASKHN. Sib. otd-e. SibNIIKhim, Vol. 5, pp. 33–37.
- Ivanova, 1989 – Ivanova T.M. (1989). Forecasting the effectiveness of fertilizers using mathematical models. M.: Agropromizdat, 235 p.
- Ikkonen, Tolstoguzov, 1996 – Ikkonen E.N., Tolstoguzov O.N. (1996). Diffusion of carbon dioxide in peaty soil of a bog. *Soil Science*, No. 7, pp. 868–872.
- Karpachevskiy (Ed.), 1987 – Agricultural ecosystems. Ed. L.O. Karpachevskogo, translation from english Kamenskogo A.S., Smirnova Yu.A., Khavkina E.E.. M.: Agropromizdat, 223 p.
- Kasimov, Gerasimova (Ed.), 2002 – Geochemistry of landscapes and geography of soils. Ed.. Kasimova N.S. and Gerasimovoy M.I. Smolensk: Oykumena, 2002, 465 p.
- Kosheleva, 2002 – Kosheleva N.E. (2002). Simulation of biochemical cycles of heavy metals in agrolandscapes based on the balance approach. Smolensk: Oykumena, pp. 389–405.
- Kosheleva, 2004 – Kosheleva N.E. (2004). Mathematical modeling of landscape-geochemical processes. Geography, society, environment. M.: Publ. House Gorodec, pp. 528–545.
- Kosheleva, 2009 – Kosheleva N. E. (2009). Experience in modeling the cycles of heavy metals in agrolandscapes. *News of the Samara scientific center of the Russian academy of sciences* Vol. 11, No 1(7), pp. 1494–1500.
- Krasnoschekov, Petrov, 1983 – Krasnoschekov P.S., Petrov A.A. (1993). Principles of construction of models. M.: Izd-vo of MGU, 264 p.
- Kremer, Frosts, 1988 – Kremer A.M., Morozov A.I. (1988). Mathematical modeling of the process of self-organization of soil cover heterogeneities. *Byull. Soils. int. named after Dokuchaev*, No 47, pp. 67–68.
- Litvak, 1990 – Litvak Sh.I. (1990). System approach to agrochemical research. M.: Agropromizdat, 220 p.
- Lyapunov, Bagrinovskaya, 1975 – Lyapunov a.a., Bagrinovskaya g.p. (1975). On the methodological issues of mathematical biology. M.: Mathematical modeling in biology, pp. 5–19.
- Marchuk, 1982 – Marchuk G.I. (1982). Mathematical modeling in the environmental problem. M.: Science, Home edition of physical and mathematical literature, 320 p.
- Moskvin, 2011 – Moskvin V.V. (2011). Typification of agroecosystem models. *Bulletin of BGU*, No. 1, pp. 85–90.
- Neylor, 1975 – Neylor T. (1975) Machine simulation experiments with models of economic systems. M.: World, 502 p.
- Novozhilov et al., 1999 – Novozhilov K.V., Semenova N.N., Petrova T.M. (1999). Simulation modeling and ecotoxicological parameters in the system of estimates of danger of pesticides. *Defence of plants*, No. 12, pp. 8–15.
- Novosel'cev (Ed.), 2006 – The theoretical basis of system analysis. Ed. Novosel'ceva V.A.. M.: Major, 592 p.
- Obrazcov, 1990 – Obrazcov A.S. (1990). System method: application in agriculture. M.: Agropromizdat, 303 p.
- Pachepskiy, 1992 – Pachepskiy Ja.A. (1992). Mathematical models of physical and chemical processes in soils. M. Science, 120 p.
- Poluektov, Topaj, 2001 – Poluektov R. A., Topaj A. G. (2001). Crop modeling: Nostalgia about present or reminiscence about future. *Agronomy Journal*, 93, pp. 653–659.
- Poluektov et al., 2002 – Poluektov P. A., Oparina I.V., Semenova N.N., Terleev V.V. (2002). Modeling of soil processes in agroecosystems. SPbGU: Publishing house SPbGU, 148 p.
- Poluektov et al., 2012 – Poluektov P. A., Topazh A.G., Yakushev V. P., Medvedev P.A. (2012). Use of dynamic model of agroekosistemy for the estimation of influence of climatic changes on the productivity of sowing (theory and realization). *Announcer of the Russian academy of agricultural sciences*. No. 2. pp. 7–12.
- Poluektov, 1991 – Poluektov R.A. (1991). Dynamic models of agroekosistemy. L.: Gidrometeoizdat, 312 p.
- Prokhorova, Frid, 1993 – Prokhorova Z. A., Frid A.S. (1993). Study and modeling of soil fertility based on long field experience. M.: Science, 189 p.
- Roberts, 1986 – Roberts F.S. (1986). Discrete mathematical models with applications to social, biological and ecological problems. Translation from English by Rappoport A.M., Travkin

S.I., Ed. Teyman A.I. M.: Science, 496 p.

[Romanov, 1993](#) – *Romanov, G.N.* (1993). Elimination of the consequences of radiation accidents. Reference Guide. M.: Izdat, 336 p.

[Ryzhova, 1987](#) – *Ryzhova A.M.* (1987). Mathematical modeling of soil processes. M.: Izd-vo of MGU, 86 p.

[Certificate of state registration..., 2016](#) – Certificate of state registration of the database No. 2016621301, September 22, 2016 «Systematization of research results on the migration of heavy metals in the soil system – agricultural plants».

[Semenova, 2007](#) – *Semenova N.N.* (2007). Monitoring of pesticides in soil of agrobiocenozov with the use of simulation models of different classes. *Protection of plants*, No. 2, pp. 14–17.

[Surmin, 2003](#) – *Surmin Y.P.* (2003). Theory of systems and systems analysis: Studies. manual. K.: MAUP, 368 p.

[Ulanova, Zabelin, 1990](#) – *Ulanova E.S., Zabelin V.N.* (1990). Methods of correlation and regression analysis in agrometeorology. L.: Gidrometeoizdat, 206 p.

[Fel'dman, 1999](#) – *Fel'dman O.V.* (1999). Flow models of agroecosystems. *Matem. design*, 11:10, pp. 31–48.

[Fesenko et al., 1994](#) – *Fesenko S.V., Yacalo b.I., Sipiridonov S.I.* (1994). Application of mathematical models in radioekologii. *Herald of RASHN*, No. 4, pp. 29–31.

[Frans, Tornli, 1987](#) – *Frans Dzh., Tornli Dzh.* (1987). Mathematical models in agriculture. Translation from english Kamenskogo A.S.; Ed. Ereshko F.I.. M.: Agropromizdat, 400 p.

[Frid, 1987](#) – *Frid A.S.* (1987). Informative models of fertility of soils, *Announcer of s-kh science*, No. 9, .pp. 8–12.

[Fris, Van Laar \(Ed.\), 1986](#) – Modeling growth and productivity of agricultural crops. Ed. Penninga de Frisa, F.W.T., Van Laara H.H.. L.: Gidrometeoizdat, 320 p.

[Shannon, 1978](#) – *Shannon P.* (1978). Simulation of systems – art and science. M.: World, 418 p.

[Khomyakov, 1994](#) – *Khomyakov D.M.* (1994). Modeling of the influence of abiotic factors on agroecosystems for the purposes of environmental assessments and management of agricultural productivity. «Heavy metals and radionuclides in agroecosystems». Materials of the scientific-practical conference. M.:«Agroekolas», pp. 286–288.

[Amuti et al., 2018](#) – *Tureniguli Amuti, Geping Luo, Gang Yin, Qi Hu, E. A. Walter-Shea* (2018). Validation of a Process-Based Agro-Ecosystem Model (Agro-IBIS) for Maize in Xinjiang, Northwest China. *Agronomy*, 8, 29, DOI:10.3390/agronomy8030029

[Antle et al., 2017](#) – *John M Antle, Bruno Basso, Richard T Conant, H Charles J Godfray, James W Jones, Mario Herrero, Richard E Howitt, Brian A Keating, Rafael Munoz-Carpena, Cynthia Rosenzweig, Pablo Tittone, Tim R Wheeler* (2017). Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: Design and improvement. *Agricultural Systems*, 155: 255–268. DOI: 10.1016/j.agry.2016.10.002

[Batukaev et al., 2015](#) – *Batukaev A.A, Endovitsky A.P., Andreev A.G., Minkina T.M., Kalinichenko V.P., Burachevskaya M.V., Dikaev Z.S., Mandzhieva S.S., Sushkova S.N.* (2015). Thermodynamic Model of Calcium Carbonate System of Soil Solution, *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 11 (2): 82.92. DOI: 10.3844/ajabssp.2016.82.92.

[Bellocchi et al., 2015](#) – *Gianni Bellocchi, Mike Rivington, Keith Matthews, Marco Acutis* (2015). Deliberative processes for comprehensive evaluation of agroecological models (review), *Agronomy for Sustainable Development*, Vol.35, Is. 2, pp. 589–605.

[Bergez et al., 2013](#) – *Jacques-Eric Bergez, Patrick Chabrier, Christian Gary, Marie-Helene Jeuffroy, David Makowski, et al.* (2013). An open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agro-ecosystems *Environmental Modelling and Software*, Elsevier, 39, pp. 39–49. DOI:10.1016/j.envsoft.2012.03.011.

[Boulangeat et al., 2014](#) – *Boulangeat Isabelle, Damien Georges, Thuiller Wilfried* (2014). A spatially and temporally explicit integrated model for predicting vegetation structure and diversity at regional scale, *Glob Change Bioogyl*, 20 (7): 2368–2378. DOI: 10.1111/gcb.12466

[Bourhis et al., 2017](#) – *Yoann Bourhis, Sylvain Poggi, Youcef Mammeri, Ronan Le Cointe, Anne-Marie Cortesero, Nicolas Parisey* (2017). Foraging as the landscape grip for population dynamics – A mechanistic model applied to crop protection. *Ecological Modelling*, Vol. 354, pp. 26–36. DOI: 10.1016/j.ecolmod.2017.03.005

[Cammarano et al., 2017](#) – *Cammarano, D., Rivington, M., Matthews, K., Miller, D.,*

Bellocchi, G. (2017). Implications of climate model biases and downscaling on crop model simulated climate change impacts. *J. Agron.*, 88, pp. 63–75.

Campbell, Paustian, 2015 – Eleanor E Campbell, Keith Paustian (2015). Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review, *Environmental Research Letter*, 10, 123004. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/123004

Chuine, Régnière, 2017 – Isabelle Chuine, Jacques Régnière. (2017). Process based models of phenology for plants and animals, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Vol. 48: 159–182.

C Rowe et al., 2015 – Edwin C. Rowe, G. W. Wieger Wamelink, Simon M. Smart, Adam Butler, Peter A. Henrys, Han F. van Dobben, Gert Jan Reinds, Chris D. Evans, Johannes Kros, Wim de Vries (2015). Field Survey Based Models for Exploring Nitrogen and Acidity Effects on Plant Species Diversity and Assessing Long-Term Critical Loads. In book: *Critical Loads and Dynamic Risk Assessments. Nitrogen, Acidity and Metals in Terrestrial and Aquatic Ecosystems*, Chapter: 11, Publisher: Springer, pp. 297–326.

Demková et al., 2017 – Lenka Demková, Július Árvay, Lenka Bobuľská, Ján Tomáš, Radovan Stanovič, Tomáš Lošák (2017). Accumulation and environmental risk assessment of heavy metals in soil and plants of four different ecosystems in a former polymetallic ores mining and smelting area (Slovakia), *Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 52(5), pp. 479–490.

Donatelli et al., 2017 – M. Donatelli, R.D. Magarey, S. Bregaglio, L. Willocquet, J.P.M. Whish, S. Savary (2017). Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agricultural Systems*, Vol. 155, pp. 213–224. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.019.

Dube et al., 2001 – Dube A., Zbytniewski R., Kowalkowski T., Cukrowska E, Buszewski B. (2001). Adsorption and Migration of Heavy Metals in Soil Polish. *Journal of Environmental Studies*, Vol. (10), No.1, pp. 1–10.

Duru et al., 2015 – Michel Duru, Olivier Therond, Guillaume Martin, Roger Martin-Clouaire, Marie-Angéline Magne, Eric Justes, Etienne-Pascal Journet, Jean-Noël Aubertot, Serge Savary, Jacques-Eric Bergez, Jean Pierre Sarthou (2015). How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 35, Is. 4, pp. 1259–1281.

Ehrhardt et al., 2017 – Ehrhardt, F., Soussana, J.-F., Bellocchi, G., Grace, P., McAuliffe, R., Recous, S., Sándor, R., Smith, P.,; Snow, V., de Antoni Migliorati, M.; et al. (2017). Assessing uncertainties in crop and pasture ensemble model simulations of productivity and N₂O emissions, *Glob. Chang. Biol.*, 24, pp. 603–616.

Endovitsky et al., 2015 – Endovitsky Anatoly P., Andreev Angrey G., Minkina Taniana M., Kalinichenko Valery P. (2015). Ion's Association in Soil Solution among the Drivers of Biogeosystem Dynamics. *Biogeosystem Technique*, Vol.(5), Is. 3, pp. 267–285. DOI: 10.13187/bgt.2015.5.267

Endovitsky et al., 2015 – Endovitsky Anatoly P., Minkina Tatyana M., Kalinitchenko Valery P. (2015). Carbonate Calcium Equilibrium in Soil Solution as a Driver of Heavy Metals Mobility. *International Journal of Environmental Problems*, Vol. (2), Is. 2, pp. 136–153. DOI: 10.13187/ijep.2015.2.136

Field, et al., 2016 – John L. Field, Ernie Marx, Mark Easter, Paul R. Adler, Keith Paustian (2016). Ecosystem model parameterization and adaptation for sustainable cellulosic biofuel landscape design. *GCB Bioenergy*, 8, 1106–1123, DOI: 10.1111/gcbb.12316.

Franklin et al., 2014 – Janet Franklin, Helen M. Regan, Alexandra D. Syphard (2014). Linking spatially explicit species distribution and population models to plan for the persistence of plant species under global change for the persistence of plant species under global change. *Environmental Conservation*, 41 (2): 97–109. DOI: 10.1017/S0376892913000453

Guala et al., 2010. – Guala S.D., Vega F.A., Covelo E.F. (2010). The dynamics of heavy metals in plant–soil interactions, *Ecological Modelling*, 221(8): pp. 1148–1152. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.01.003

Guala et al., 2013. – Guala S.D., Vega F.A., Covelo E.F. (2013). Modeling the plant–soil interaction in presence of heavy metal pollution and acidity variations, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 185, Is. 1, pp. 73–80.

Guillem et al., 2015 – Guillem, E.E., Murray-Rust, D., Robinson, D.T., Barnes, A.,

Rounsevell, M.D.A. (2015). Modelling farmer decision-making to anticipate tradeoffs between provisioning ecosystem services and biodiversity, *Agric. Syst.*, 137, pp. 12–23.

Hardin, Twine, 2015 – Keit J. Hardin, Tracy E. Twine (2015). Effects of Dynamic Crop Growth on the Simulated Precipitation Response to Irrigation, *Earth Interactions*, Vol. 19, No. 14. DOI: 10.1175/EI-D-15-0030.1

Holzschläger, 2017 – Annelie Holzschläger (2017). Adapting Agricultural Production Systems to Climate Change – What's the Use of Models? *Agriculture*, 7, 86. DOI: 10.3390/agriculture7100086

Hou et al., 2014 – Qingye Hou, Zhongfang Yang, Junfeng Ji, Tao Yu, Guoguang Chen, Juan Li, Xueqi Xia, Ming Zhang, Xuyin Yuan (2014). Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River delta, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 139, pp. 68–84.

Hu et al., (2018) – Wenyu Hu, Hui Feng Wang, Lurui Dong, Biao Huang, Ole K. Borggaard, Hans Christian Bruun Hansen, Yue He, Peter E. Holm (2018). Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach. *Environmental Pollution*, Vol. 237, pp. 650–661. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.02.070

Janssen et al., 2017 – S. Janssen, C.H. Porter, A.D. Moore, I.N. Athanasiadis, I. Foster, J.W. Jones, J.M. Antle (2017). Towards a new generation of agricultural system models, data, and knowledge products: building an open web-based approach to agricultural data, system modeling and decision support. *Agric. Syst.*, 155, pp. 200–212.

Jones et al., 2017 – Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., et al. (2017). Brief history of agricultural systems modelling. *Agric. Syst.*, 155, pp. 240–254.

Laflen, Jane, 1991 – Laflen J.M., Jane L.J. (1991). Foster G.R. WEPP: a New Generation in Erosion Prediction Technology. *J. of Soil and Water Conservation*, Vol. 46, pp. 34–38.

Lázaro et al., 2017 – Elena Lázaro, Carmen Armero, Luis Rubio (2017). Bayesian correlated models for assessing the prevalence of viruses in organic and non-organic agroecosystems. *SORT* 41 (1), pp. 93–116. DOI: 10.2436/20.8080.02.52.

Lurgi et al., 2015 – Miguel Lurgi, Barry W. Brook, Frédéric Saltré, Damien A. Fordham (2015). Modelling range dynamics under global change: which framework and why? *Methods in Ecology and Evolution*, 6, 247–256. DOI: 10.1111/2041-210X.12315

Medvedev et al., 2015 – Medvedev S., Topaj A., Badenko V., Terleev V. (2015) Medium-term analysis of agroecosystem sustainability under different land use practices by means of dynamic crop simulation. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Vol. 448, pp. 252–261.

Naskova, 2017 – Naskova Pavlina (2017). Mathematical model for evaluation of the content of heavy metals in soil by indirect plant signatures. *New Knowledge Journal of Science*, Vol. 6, No. 3, pp. 149–160.

Okamoto et al., 2018 – Kenichi W. Okamoto Priyanga Amarasekare Samantha Price (2018). A framework for highthroughput ecoevolutionary simulations integrating multilocus forwardtime population genetics and community ecology. *Methods in Ecology and Evolution*, 9, 525–534. DOI: 10.1111/2041-210X.12889

Ozturk et al., 2017 – Ozturk, I., Sharif, B., Baby, S., Jabloun, M., Olesen, J.E. (2017). The long-Term effect of climate change on productivity of winter wheat in Denmark: A scenario analysis using three crop models. *J. Agric. Sci.*, 55, pp. 733–750.

Poluektov, Topaj, 2001 – Poluektov R. A., Topaj A. G. (2001). Crop modeling: Nostalgia about present or reminiscence about future. *Agronomy Journal*, 93, pp. 653–659.

Porporato et al., 2015 – A. Porporato, X. Feng, S. Manzoni, Y. Mau, A. J. Parolari, G. Vico (2015). Ecohydrological modeling in agroecosystems: Examples and challenges, *Ecohydrological Modeling in Agroecosystems*, pp. 5081–5099. DOI: 10.1002/2015WR017289

Renz et al., 2018 – J. P. Renzi, G. R. Chantre, Renovables de la Zona Semiárida, M. A. Cantamutto (2018). Vicia villosa ssp. villosa Roth field emergence model in a semiarid agroecosystem, *Grass and Forage Science*, 73(1), pp. 146–158. DOI: /10.1111/gfs.12295

[Sándor et al., 2017](#) – R. Sándor, C. Picon-Cochard R. Martin, F. Louault, K. Klumpp, D. Borrás, G. Bellocchi (2017). Plant acclimation to temperature: Developments in the Pasture Simulation model. *Field Crops Research*. DOI:10.1016/j.fcr.2017.05.030.

[Snell et al., 2014](#) – R.S. Snell, A. Huth, E.M.S. Nabel, G. Bocedi, M.J. Travis, D. Gravel, H. Bugmann, A.G. Gutiérrez, T. Hickler, S.I. Higgins, B. Reineking, M. Schertjanoi, N. Zurbriggen and H. Lischke (2014). Using dynamic vegetation models to simulate plant range shifts. *Ecography*, 37: 1184–1197. DOI: 10.1011/ecog.00580

[Sun et al., 2016](#) – Sun, S., Delgado, M.S., Sesmero, J.P. (2016). Dynamic adjustment in agricultural practices to economic incentives aiming to decrease fertilizer application. *J. Environ. Manag.*, 177, pp. 192–201.

[Tan et al., 2016](#) – Tan, J., Cui, Y., Luo, Y. (2016). Global sensitivity analysis of outputs over rice-growth process in ORYZA model. *Environ. Model. Softw.*, 83, pp. 36–46.

[Thierry et al., 2017](#) – Hugo Thierry, Aude Vialatte, Jean-Philippe Choisis, Benoit Gaudou, Hazel Parry, Claude Monteil (2017). Simulating spatially-explicit crop dynamics of agricultural landscapes: The ATLAS simulator. *Ecological Informatics*, Vol. 40, pp. 62–80. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2017.05.006

[Tipping et al., 2012](#) – E. Tipping, E.C. Rowe, C.D. Evans, R.T.E. Mills, B.A. Emmett, J.S. Chaplow, J.R. Hall (2012). N14C: A plant–soil nitrogen and carbon cycling model to simulate terrestrial ecosystem responses to atmospheric nitrogen deposition. *Ecological Model*, 247, pp. 11–26. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.08.002

[Van Oijen et al., 2018](#) – Marcel van Oijen, Gianni Bellocchi, Mats Höglind (2018). Effects of Climate Change on Grassland Biodiversity and Productivity: The Need for a Diversity of Models. *Agronomy*, 8, 14. DOI: 10.3390/agronomy8020014

[Winter et al., 2017](#) – Jonathan M. Winter, Charles Young, Vishal K. Mehta, Cynthia Rosenzweig (2017). Integrating water supply constraints into irrigated agricultural simulations of California, *Environmental Modelling and Software*. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.06.048

[Yu et al., 2014](#) – Yu C., Li C., Xin Q., Chen H., Zhang J., Zhang, F., Li, X., Clinton N., Huang X., Yue Y. et al (2014). Dynamic assessment of the impact of drought on agricultural yield and scale-dependent return periods over large geographic regions. *Environ. Model. Softw*, 62, pp. 454–464.

Концептуальная и математическая постановка процесса миграции тяжелых металлов в системе «почва – сельскохозяйственное растение»

Татьяна Витальевна Переволоцкая ^{a, *}, Вячеслав Сергеевич Анисимов ^a

^a Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Российская Федерация

Аннотация. Выполнен обзор проблем, возникающих при математическом моделировании процессов функционирования и организации природных экосистем, отражены различные подходы к классификации экологических моделей. Показано, что математическое моделирование, основным инструментом которого выступает системный анализ, позволяет адекватно описывать как отдельные процессы системы, так и взаимодействие процессов на основе установленных закономерностей поведения реальной системы.

С применением системного анализа выделены и проанализированы отдельные взаимосвязанные двусторонними причинно-следственными связями компоненты системы «почва – сельскохозяйственное растение». Показано, что по происхождению исследуемая система искусственная, по специфике составляющих компонентов – материальная. По характеру взаимодействия со средой представляет собой открытую систему, последовательность событий в которой, не детерминирована и носит вероятностный

* Корреспондирующий автор

Адрес электронной почты: forest_rad@mail.ru (Т.В. Переволоцкая)

характер. При разработке концептуальной модели миграции тяжелых металлов в системе «почва – сельскохозяйственное растение» принят ряд допущений: основным механизмом поступления тяжелых металлов в сельскохозяйственные культуры является корневой; процесс переноса химического элемента между компонентами системы может происходить в прямом и в обратном направлениях; в процессах миграции между компонентами экосистем может происходить транзитный перенос тяжелых металлов; внекорневое поступление тяжелых металлов учтено, опосредовано, в константах переноса от почвы к наземной фитомассе сельскохозяйственных культур; предполагается выделение исследуемого химического элемента из частей растений в почву. Принятым ограничением при разработке концептуальной модели процесса миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственное растение» является формализация исходной информации до количественно измеряемых показателей. На основе результатов системного анализа, принятых подходов и допущений разработана концептуальная модель миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственные растения», с выделением основных блоков (компармент): пахотный слой почвы (0–30 см), наземная фитомасса растений, корневая система растений (корне- и клубнеплоды), подпахотный слой почвы. Математическое описание динамики миграции химических элементов между отдельными компарментами исследуемой системы «почва – сельскохозяйственное растение» представлено системой линейных дифференциальных уравнений I порядка. Процессы миграции между компарментами определяются константами переноса химического элемента, основанными на литературных данных и средних значениях величин коэффициентов накопления Zn, Cu, Pb, Cd в наиболее распространенных сельскохозяйственных культурах

Ключевые слова: тяжелые металлы, элементы, коэффициент накопления, концептуальная модель, алгоритм, фактор.