



Т.Ю. ЕРМОЛЬЕВА, Ю.М. ЕРМОЛЬЕВ, П. ХАВЛИК, А. МОНЬЕ, Д. ЛЕКЛЕР, С. ФРИТЦ,
Х. ВАЛИН, М. ОБЕРШТАЙНЭР, С.В. КИРИЗЮК, Е.Н. БОРОДИНА

УДК 519.21

ДИНАМИЧЕСКОЕ СЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ И ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ С УЧЕТОМ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОЕКЦИЙ GLOBIOM И ЛОКАЛЬНЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И РЕСУРСНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ¹

Аннотация. В целях проведения исследований и получения прогнозов на требуемом пространственном разрешении объединены две модели — вычисление глобальных и региональных проекций осуществляется с помощью глобальной динамической модели частичного равновесия GLOBIOM (Global Biosphere Management Model), а уменьшение размерности полученных результатов до необходимых пространственных разрешений проводится с помощью динамической рекурсивной модели разукрупнения, использующей принцип кросс-энтропии. Предложенный подход позволяет учесть данные, имеющиеся на разных разрешениях и из разных источников. В практических исследованиях, проведенных в Китае и Украине, предложенный подход позволил получить локальные прогнозы развития и изменения землепользования, соответствующие реальным тенденциям и ожиданиям. Разукрупненные данные и проекции использовались в национальных моделях планирования устойчивого землепользования и сельскохозяйственного развития.

Ключевые слова: глобальная модель планирования землепользования, модель робастного разукрупнения, динамическое слияние моделей, неопределенности, локальные проекции землепользования.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимозависимости между системами землепользования на национальном и глобальном уровнях обуславливают необходимость разработки новых подходов для интегрирования моделей землепользования разных масштабов. В настоящей статье в целях проведения исследований и получения прогнозов на требуемом пространственном разрешении предлагаем объединить две модели, а именно выполнить вычисления региональных проекций с помощью глобальной динамической модели частичного равновесия GLOBIOM [1], а уменьшение размерности полученных результатов до необходимых пространственных разрешений провести с помощью динамической рекурсивной модели разукрупнения, использующей принцип кросс-энтропии (перекрестной энтропии). Параметры

¹ Исследования проводятся в рамках проектов ECONADAPT (603906), TRANSMANGO (613532), SIGMA (603719) и AGRICISTRAD (612755) EU FP7, а также научного проекта по разработке новаторских методологий и приложений, исследующих робастные решения для долгосрочного согласованного планирования безопасного снабжения продовольствием, энергией, водой, проводимого совместно Международным институтом прикладного системного анализа (Лаксенбург, Австрия) и Национальной академией наук Украины.

© Т.Ю. Ермольева, Ю.М. Ермольев, П. Хавлик, А. Монье, Д. Леклер, С. Фритц, Х. Валин, М. Оберштайнэр, С.В. Киризюк, Е.Н. Бородина

предложенной модели разукрупнения зависят от параметров и результатов агрегированной модели GLOBIOM, что позволяет учитывать множество различных факторов, влияющих на изменение землепользования, а также тенденций демографического и экономического развития, соответствующую информацию о принятых политических мерах, проблемы продовольственной, водной, энергетической безопасности. В статье [2] приводятся обоснования для разработки моделей робастного пространственного оценивания и разукрупнения данных, основанных на принципе кросс-энтропии. Цель задачи разукрупнения состоит в получении правдоподобных оценок на локальном уровне, исходя из глобальных тенденций, используя все доступные данные, наблюдаемые и ненаблюдаемые переменные, зависимости между переменными, заключения экспертов, а также результаты других моделей. В разд. 1 рассмотрен фрагмент общей модели разукрупнения, проиллюстрированный на примере разукрупнения агрегированных данных о пахотных землях. В разд. 2 обсуждается динамический рекурсивный алгоритм, основанный на принципе кросс-энтропии для разукрупнения результатов глобальной модели GLOBIOM. Кроме того, подробно описываются данные, используемые как в модели разукрупнения, так и в модели GLOBIOM. Предложенный подход был использован в Международном институте прикладного системного анализа (IIASA, Австрия) и в Институте экономики и прогнозирования НАН Украины для изменения разрешения полученных с помощью GLOBIOM проекций землепользования, рассчитанных на основании сценариев социально-экономических, технологических, демографических и климатических прогнозов развития (SSPs) [3]. Включение разных SSPs в модель GLOBIOM с последующим разукрупнением результатов предоставляет возможность исследования последствий разных глобальных (агрегированных) тенденций на локальные процессы, например снабжение водой и продовольствием. Различия локальных изменений землепользования для SSP2 и SSP3 были детально проанализированы в одном из районов бассейна реки Хэйхэ в Китае [4]. Показано, что предложенный подход может использоваться для планирования устойчивого землепользования на местах [4]. Принцип кросс-энтропии предполагает некоторое начальное (априорное) распределение производства на местах, т.е. праер. Практические исследования свидетельствуют, что априорное распределение может зависеть от случайных параметров, таких, например, как, урожайность, цена, уровень эмиссий и т.д. Таким образом, вместо единственного праера, как это принято в традиционном подходе, может существовать допустимое множество праеров. В этом случае задача разукрупнения состоит в получении локальных оценок с использованием информации, заключенной во всех праерах, т.е. робастных оценок. Возможные подходы к робастному разукрупнению применялись для разукрупнения и гармонизации данных по Украине в целях дальнейшего использования в национальных моделях планирования землепользования и устойчивого сельскохозяйственного развития. В заключении настоящей статьи суммируются основные результаты, изложенные в работе.

1. ФРАГМЕНТ МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

Рассмотрим фрагмент общей модели разукрупнения, подробно описанной в разд. 2. Проиллюстрируем ее на примере разукрупнения агрегированных данных о пахотных землях. Используемая в модели информация может быть обобщена следующим образом. Оценка площади пахотной земли a_j в точке пространства j , $j=1, n$, может быть получена с помощью карт земного покрова, из статистических сборников или глобальных моделей (GLOBIOM). Оцен-

ка пригодности земли, обсуждаемая в разд. 2, характеризует потенциально достижимый уровень продуктивности y_{ij} определенного типа землепользования i , $i = \overline{1, m}$, например пахотных земель, пастбищ, лесных хозяйств и т.д., в разных точках j . Географически детализированная информация о биофизической пригодности и потенциальной продуктивности земли относительно различных сельскохозяйственных культур может быть получена, исходя из исторических данных, а также с помощью биофизических моделей таких, например, как модель EPIC [5] или GAEZ [6]. Цель задачи разукрупнения состоит в определении такого уровня x_{ij} землепользования i в точке j , который удовлетворял бы основным балансовым уравнениям

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = a_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m y_{ij} x_{ij} \leq d_i \quad i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где переменная x_{ij} и параметры a_j , y_{ij} , d_i имеют положительные значения. Уравнение (1) устанавливает ограничение на совокупное землепользование в точке j , тогда как уравнение (2) накладывает ограничение на количество произведенной продукции d_i при землепользовании i согласно уровню производительности y_{ij} . Данные или проекции спроса d_i , например на производство зерновых или древесины, доступны из официальной статистики или могут быть подсчитаны с помощью агрегированных моделей, подобных GLOBIOM. Можно ввести новые переменные z_{ij} , характеризующие распределение площадей ($0 \leq z_{ij} \leq 1$) под определенные типы землепользования i в точке j . Таким образом, $x_{ij} = a_j z_{ij}$, и ограничения (1), (2) могут быть записаны следующим образом:

$$\sum_{i=1}^m z_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} z_{ij} \leq d_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad a_{ij} = a_i y_{ij}. \quad (4)$$

Эта модификация ограничений (1), (2) позволяет использовать принцип кросс-энтропии (и вероятностные методы) для определения оптимального решения z_{ij} . В общем случае может существовать множество решений z_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, удовлетворяющих уравнениям (3), (4) (например, когда система (3), (4) недоопределена). В этом случае необходимо из множества решений выбрать одно, исходя из дополнительного критерия. Ключевым аспектом в выборе такого критерия является наличие уже имеющегося так называемого априорного (желаемого) распределения z_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, которое вызывает минимально негативные (или максимально позитивные) в некотором смысле последствия. Например, интуиция подсказывает, что априорное распределение может зависеть от рентабельности, чистой выручки или максимальной чистой приведенной стоимости деятельности в каждой точке пространства. Априорное распределение можно рассчитать, используя доступные данные (карты) землепользования, карты климатических и биофизических условий в точках пространства либо исходя из условий формирования спроса или систем хозяйствования. Так, априорное распределение

$$q_{ij} = \frac{\alpha_{ij} P_i y_{ij}}{\sum_i \alpha_{ij} P_i y_{ij}}, \sum_j q_{ij} = 1, \text{ может служить начальной оценкой площади земле-}$$

пользования i в пространственной единице j , где P_i — цена продукции i -го типа землепользования, y_{ij} — урожайность i -го типа землепользования в точке j . В условиях отсутствия дополнительной информации априорным может быть наименее информативное равномерное распределение, при этом проблемой разукрупнения по-прежнему остается ограничение на всех уровнях и из всех источников. Таким образом, задача разукрупнения будет корректировать априорное распределение в целях выполнения всех имеющихся ограничений, в данном случае (3), (4). В разд. 2 обсуждаются возможные подходы для выбора априорных распределений. Если априорное распределение $q_{ij} > 0$, $i = 1, m$, $j = 1, n$, известно, тогда оценки z_{ij} кросс-энтропии определяются посредством минимизации функции кросс-энтропии:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{ij} \ln \frac{z_{ij}}{q_{ij}} \quad (5)$$

с учетом (3), (4). Функция (5) определяет расстояние Кульбака–Ляйблера [7] между распределениями z_{ij} и q_{ij} , т.е. распределение z_{ij} , полученное в результате решения задачи минимизации кросс-энтропии, будет ближайшим к априорному распределению q_{ij} , при этом выполняются ограничения (3), (4).

2. ДИНАМИЧЕСКОЕ СЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ И ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ

1. Модель GLOBIOM. Рассмотрим подход к слиянию глобальной модели GLOBIOM с локальной моделью разукрупнения типа (3)–(5) в целях получения локальных оценок изменений землепользования и земного покрова. GLOBIOM — это глобальная рекурсивная динамическая модель частичного равновесия, интегрирующая секторы сельского хозяйства, биоэнергетики и лесного хозяйства, разработанная в целях анализа политик устойчивого землепользования на глобальном и региональных уровнях, включая вопросы конкуренции и преобразования типов землепользования, вызванные увеличением спроса на продовольствие, корм и биотопливо. Модель GLOBIOM генерирует эндогенные прогнозы спроса относительно различных типов землепользования в пределах доступных земельных ресурсов в зависимости от их производительности, спроса и цен на соответствующую продукцию, учитывая потенциал экспортно–импортных потоков. В результате GLOBIOM проектирует спрос на земельные и водные ресурсы и соответствующие изменения по регионам и типам землепользования. Таким образом, слияние GLOBIOM и модели разукрупнения дает возможность анализировать огромное разнообразие локально–глобальных взаимозависимостей. Среди основных типов землепользования выделены пахотные земли под сельскохозяйственные культуры, пастбища, лесные угодья (управляемые и неуправляемые), лесопосадки с коротким периодом восстановления или быстрорастущие леса (short rotated forest, SRF), природные угодья. Изменения в структуре землепользования осуществляются в рамках доступных земельных ресурсов, а возможные сценарии замены одного типа землепользования другим ограничиваются базовыми правилами: пахотные земли могут быть преобразованы в пастбища или быстрорастущие леса, пастбища — в пахотные земли или быстрорастущие леса; неуправляемые лесные земли — в управляемые лесные угодья; природные (не используемые ранее) земли — в пахотные земли, быстрорастущие леса или пастбища.

При этом оценка целесообразности трансформации землепользования является дополнительным ограничивающим фактором.

2. Данные, детализированные в модели. Модель GLOBIOM и модель разукрупнения используют одни и те же географически детализированные базы данных [8]. Обе модели используют данные и моделируют процессы на уровне так называемых симуляционных единиц (SimUs), которые не обязательно имеют геометрическую или географическую форму, сопоставимую с границами стран, системами землепользования, управления, климатическими данными, внутренними административными границами населенных пунктов, районов и т.д. Используемые модели включают следующую информацию.

1. Модель GLOBIOM использована в базовом 2000 г. для 30 основных регионов, для которых доступна информация относительно типов землепользования, урожайности, производства сельскохозяйственных культур, цен и др., полученная из международных и национальных источников (например, ФАО).

2. Прогнозы изменений землепользования в модели GLOBIOM подсчитываются до 2100 г., в частности это касается трех основных типов землепользования: растениеводческой продукции, лесных ресурсов и производства древесины на землях, отведенных под быстрорастущие леса. Так, производство растениеводческой продукции рассчитывается для 30 основных культур. При этом средняя урожайность сельскохозяйственных культур для каждого региона получена из FAOSTAT, а потенциальная и средняя урожайность на уровнях SimUs, как и зависимость их от погодно-климатических условий, сгенерированы на основании модели EPIC (Environmental Policy Integrated Climate Model) [5].

3. Масштабирование размещения сельскохозяйственных культур может основываться на доступных существующих картах посевных площадей [9]. Локальные данные могут быть получены непосредственно в результате наблюдений на местах и включать экспертные оценки.

4. Информация о системах управления землепользованием получена из различных источников, включая национальные отчеты, статистические данные, экспертные оценки. Так, например, в сельскохозяйственном производстве выделено четыре системы управления: высокоинтенсивная, низкозатратная, ирригационная и система управления домохозяйством. Различия между системами отображены в модели дополнительными, характерными для систем критериями, позволяющими оценить уровень производства определенной системы в SimU в зависимости от доступных ресурсов (земля, вода, затраты на производство, продуктивность).

5. Первичная продуктивность лесных угодий определяется на региональном и SimUs уровнях. Оценка продуктивности определяется, исходя из данных о среднем годовом приросте леса, максимальной доли вырубki в среднем годовом приросте, а также стоимости выращивания. Среднегодовой прирост подсчитывается на основании данных о запасах биомассы, представленных в Глобальной оценке лесных ресурсов (ФАО, 2006), и разукрупненных до уровня SimU с использованием метода, описанного в [10].

6. Спрос на биомассу для производства энергии рассчитывается в модели GLOBIOM в соответствии с методологией, описанной в [1]. Первичная продукция лесных ресурсов может быть преобразована в биомассу несколькими способами: комбинированное производство тепла и электроэнергии, ферментации этанола, тепла, электроэнергии и газа, а также газификации для производства метанола и тепла. Информация о расходах для заготовки и переработки сырья, а также коэффициенты преобразования получены из разных источников, например [11].

7. Спрос на биотопливо стимулирует увеличение площади плантаций под насаждение быстрорастущим лесом. Их урожайность на уровне SimUs определяется на основании исследований пригодности земельных ресурсов, проведенных в IIASA [1].

Под совокупными расходами на единицу площади подразумеваются расходы на посадку лесных насаждений и заготовку сырья.

8. Общая площадь земельных ресурсов и землепользования в SimUs получена из базы данных земельного покрова GLC-2000. Существует несколько карт земельного покрова (землепользования): GLC-2000, MODIS-2000, GLOBCOVER-2000, однако эти карты имеют существенные расхождения в таких типах землепользования, как пахотная земля, земля, пригодная для пастбищ, резервная земля, заболоченные территории и т.д.

3. Алгоритм кросс-энтропии для разукрупнения прогнозов изменений землепользования, полученных из GLOBIOM. Модель GLOBIOM рассчитывает сценарии изменения землепользований для основных регионов и стран в период с 2000 по 2100 годы с десятилетним шагом (интервалом) моделирования. Эти агрегированные оценки необходимо разукрупнить до уровней SimUs. Пусть A_{ir}^t — региональный (национальный) уровень землепользования i -го типа в регионе r в период времени t , а ΔA_{ijr}^t — площадь, переведенная из i -го типа землепользования в j -й тип, $i, j = \overline{1, n}, r = \overline{1, R}, t = \overline{1, T}, R = 30$. Оценки площади A_{ir}^t вычисляются с помощью GLOBIOM и зависят от уровня спроса, цен и экспортно-импортных потоков между регионами, т.е. изменения землепользования в конкретном регионе могут быть спровоцированными увеличением спроса, нормами потребления биотоплива, установленными ограничениями на выбросы парниковых газов в других регионах. Площадь землепользования A_{ir}^t i -го типа в регионе r в период времени t вычисляется рекурсивным уравнением:

$$A_{ir}^t = A_{ir}^{t-1} + \sum_j \Delta A_{ijr}^t - \sum_j \Delta A_{jir}^t,$$

где $\sum_j \Delta A_{ijr}^t$ — совокупная площадь изменения землепользования из i -го типа в j -й, а $\sum_j \Delta A_{jir}^t$ — из типа j в i , для всех типов землепользования $j \neq i, j = \overline{1, n}$.

Исходя из доступных земельных ресурсов L_r в регионе r определяется следующее ограничение:

$$\sum_{i=1}^m \left(A_{ir}^{t-1} + \sum_j \Delta A_{ijr}^t - \sum_j \Delta A_{jir}^t \right) \leq L_r. \quad (6)$$

На уровне SimUs оценки площади A_{ilr}^t разных типов i землепользования в регионе r для базового 2000 года доступны из карт землепользования GLC-2000. Задача разукрупнения ΔA_{ijr}^t заключается в необходимости найти z_{ijlr}^t , $\sum_l z_{ijlr}^t = 1$, определяющие изменение площади землепользования ΔA_{ijr}^t i -го типа на j -й в регионе r и точке (ячейке) пространства SimUs $l, l = \overline{1, m}$, для всех $i, j = \overline{1, n}, r = \overline{1, R}, t = \overline{1, T}$. Для вычисления площади землепользования динамику землепользования i -го типа в SimU l региона r в период времени $t > 1$ отражает следующее рекурсивное уравнение:

$$A_{ilr}^t = A_{ilr}^{t-1} + \sum_j z_{ijlr}^t \Delta A_{ijr}^t - \sum_j z_{jilr}^t \Delta A_{jir}^t, \quad (7)$$

где A_{ilr}^t — площадь землепользования i -го типа в SimU l региона r в период времени t ; $z_{ijlr}^t \Delta A_{ijr}^t$ — доля совокупного изменения землепользования ΔA_{ijr}^t , преобразованного из i -го типа в j -й тип для всех $j \neq i$ в SimU l региона r в период t . На уровне SimUs ограниченность доступных ресурсов L_{lr} обуславливает ограничения на преобразования землепользований

$$\sum_{i=1}^m A_{ilr}^t \leq L_{lr}. \quad (8)$$

Чтобы оценить неизвестные z_{ijlr}^t , сформулируем задачу, аналогичную задаче (3)–(5), представленную в разд. 1. Таким образом, необходимо найти неизвестные z_{ijlr}^t , которые являются решениями системы уравнений

$$\sum_l z_{ijlr}^t = 1, \quad z_{ijlr}^t \geq 0, \quad (9)$$

$$A_{ilr}^t = A_{ilr}^{t-1} + \sum_l z_{ijlr}^t \Delta A_{ijr}^t - \sum_l z_{jilr}^t \Delta A_{jir}^t, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m A_{ilr}^t \leq L_{rl} \quad (11)$$

и минимизируют функцию кросс-энтропии:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^m (z_{ijlr}^t \ln (z_{ijlr}^t / q_{ijlr}^t)), \quad (12)$$

где $q_{ijlr}^t > 0$, $\sum_l q_{ijlr}^t = 1$, является некоторым априорным распределением z_{ijlr}^t , A_{jlr}^{t-1} — общая площадь землепользования типа j в SimU l в период времени $t-1$, рассчитанный с помощью GLOBIOM.

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

1. Возможные априорные распределения. Задача минимизации функции типа кросс-энтропии (12) при ограничениях (9)–(11) применялась для разукрупнения агрегированных проекций изменения землепользования, полученных с помощью GLOBIOM для 30 основных агрегированных регионов мира в период с 2000 по 2100 годы с временным шагом 10 лет. В результате разукрупнения мы не стремимся воспроизвести реальное землепользование на местах (в гридах), да это и невозможно, поскольку реальные типы землепользования на местах не всегда соответствуют оптимальным критериям. Так, земля может быть распределена между землепользователями не оптимальным образом. В то время модель разукрупнения предоставляет возможность исследования сбалансированного устойчивого размещения землепользований на местах (в гридах) в соответствии с условиями пригодности и всевозможными ограничениями (9)–(11). Можно также ввести дополнительные ограничения на использование воды, загрязнение земли, воздуха и т.д. Кроме того, разукрупнение позволяет получить дополнительную информацию о подходящих типах землепользования на таком уровне, где статистические данные отсутствуют. Для последующего анализа значения в гридах можно агрегировать, например,

до уровня страны, региональных уровней или до уровня бассейна реки и т.д., как это обсуждается в приведенных ниже практических исследованиях [4]. Для разукрупнения результатов модели GLOBIOM вычисление априорных распределений проводится следующим образом. Например, праер, определяющий начальную вероятность переустройства пахотной земли в земли запаса, обратно пропорционален рентабельности сельскохозяйственных земель в регионе r во время t и в SimU l , т.е. менее рентабельная земля будет трансформирована в первую очередь:

$$q_{l,r,CropL_NaturL}^t = \frac{(\Pi_{lr}^t)^{-1}}{\sum_l (\Pi_{lr}^t)^{-1}}, \quad (13)$$

где $\Pi_{lr}^t = \sum_s P_{jr}^t y_{slr}^t A_{slr}^{t-1}$ определяет общую стоимость продукции сельскохозяйственных культур $s=1, 2, \dots$ в SimU l региона r в период $t-1$. Значения A_{jlr}^{t-1} и P_{jr}^t подсчитываются с помощью GLOBIOM, т.е. праер существенно зависит от решений модели. Ввиду конкуренции за землю преобразование одного типа землепользования в другой зависит от относительной рентабельности (полезности) видов деятельности (типов землепользования). Например, праер, определяющий преобразование пахотной земли в территорию, отведенную под быстрорастущие лесопосадки, зависит от пригодности земли для выращивания быстрорастущего леса и обратно пропорционально зависит от прибыли производства сельскохозяйственной продукции:

$$q_{l,r,CropL_Plt}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1} (\Pi_{lr}^t)^{-1}}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1} (\Pi_{lr}^t)^{-1})}, \quad (14)$$

где $y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1}$ определяет уровень производства древесины в SimU l региона r в момент времени t . Показатель, определяющий так называемую доступность рынка (или интенсивность спроса) φ_{lr}^t зависит от нормированного времени транспортировки (или стоимости) следующим образом:

$$\varphi_{lr}^t = \frac{T_{lr}^t - T_{\min r}^t}{T_{\max r}^t - T_{\min r}^t},$$

где T_{lr}^t — время транспортировки из пункта l (регион r , время t) до ближайшего рынка сбыта. Из (14) следует, что использование земли SRF выгодно там, где относительная рентабельность производства сельскохозяйственных культур ниже, а производительность (пригодность) земли для выращивания леса выше. Преобразование типа землепользования из пастбищ или сенокосных угодий в SRF имеет место там, где выше рентабельность от производства леса и ниже от использования пастбищ:

$$q_{l,r,GrassL_Plt}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1} (y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1})^{-1}}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1} (y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1})^{-1})}, \quad (15)$$

где $y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1}$ определяет производительность пастбищ. Резервная земля (земля запаса или не возделанная ранее) может быть использована, например,

под производство леса в зависимости от пригодности этой земли для соответствующего вида деятельности, т.е.

$$q_{l,r,OthL_Plt}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1}}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1})}. \quad (16)$$

Пастбища могут быть заняты под производство сельскохозяйственных культур, если производительность сельского хозяйства на этих территориях достаточно высока и эти земли расположены неподалеку от рынков сбыта:

$$q_{l,r,GrassL_CropL}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} \Pi_{l,r}^t (y_{l,r,Grass}^t A_{l,r,Grass}^{t-1})^{-1}}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} \Pi_{l,r}^t (y_{l,r,Grass}^t A_{l,r,Grass}^{t-1})^{-1})}, \quad (17)$$

где $y_{l,r,Grass}^t$ определяет производительность пастбищ, $A_{l,r,Grass}^{t-1}$ — общая площадь пастбищ в SimU l региона r в момент $t-1$. Резервную землю (не возделанную ранее) можно преобразовать в пахотные земли в соответствии с оценкой рентабельности этой земли:

$$q_{l,r,OthL_CropL}^t = \frac{(\varphi_{lr}^t)^{-1} \Pi_{l,r}^t}{\sum_l ((\varphi_{lr}^t)^{-1} \Pi_{l,r}^t)}. \quad (18)$$

Пастбища и сенокосные угодья могут расширяться в зависимости от доходов и целесообразности этих видов деятельности:

$$q_{l,r,GrassL_OthL}^t = \frac{y_{l,r,Grass}^t A_{l,r,Grass}^{t-1}}{\sum_l y_{l,r,Grass}^t A_{l,r,Grass}^{t-1}}. \quad (19)$$

Преобразование лесных территорий в пахотные земли в большой степени определяется стоимостью продукции, произведенной лесными сельскими хозяйствами на местах:

$$q_{l,r,ForestL_CropL}^t = \frac{(y_{l,r,Forest}^t A_{l,r,Forest}^{t-1} P_{l,r,Forest}^t)^{-1} \Pi_{l,r}^t}{\sum_l ((y_{l,r,Forest}^t A_{l,r,Forest}^{t-1} P_{l,r,Forest}^t)^{-1} \Pi_{l,r}^t)}, \quad (20)$$

где $y_{l,r,Forest}^t A_{l,r,Forest}^{t-1}$ определяет производительность лесных хозяйств, $P_{l,r,Forest}^t$ — цена произведенной лесной продукции. И наконец, территории лесных хозяйств могут быть заняты под пастбища в случае, если рентабельность от пастбищ и соответственно разведение скота будет выше, чем рентабельность лесных хозяйств:

$$q_{l,r,ForestL_GrassL}^t = \frac{(y_{l,r,Forest}^t A_{l,r,Forest}^{t-1} P_{l,r,Forest}^t)^{-1} y_{l,r,Grass}^t A_{l,r,Grass}^{t-1}}{\sum_l ((y_{l,r,Forest}^t A_{l,r,Forest}^{t-1} P_{l,r,Forest}^t)^{-1} y_{l,r,Grass}^t A_{l,r,Grass}^{t-1})}. \quad (21)$$

2. Исследование устойчивого развития землепользования и управления водными ресурсами в бассейне реки Хэйхэ (Китай). Объединение модели GLOBIOM и модели разукрупнения позволяет проанализировать всевозможные глобально-локальные взаимодействия и тенденции, включая те, которые определяются социально-экономическими, технологическими и демографическими сце-

нариями и тенденциями развития, просуммированными в сценариях SSPs [3, 12]. Метод разукрупнения, предложенный в настоящей статье, применялся в ряде региональных исследований. Разукрупненные оценки показали хорошее соответствие с наблюдаемыми данными и процессами на местах. Например, в бассейне реки Хэйхэ [13, 4] проекции изменений землепользования были подсчитаны с помощью GLOBIOM для различных сценариев SSP и разукрупнены до 1 км грида, покрывающего изучаемый район. Исследования проводились в целях изучения возможных локальных последствий быстрой интенсификации сельского хозяйства, вызванного национальными и глобальными социально-экономическими, демографическими, климатическими сценариями SSP, стимулирующими, в частности, ускоренный способ обработки почвы и внесение большого количества удобрений. Разукрупненные до 1 км оценки типов землепользования использовались в модели SWAT [14] для изучения возможных негативных тенденций землепользования, таких как чрезмерное использование водных ресурсов, загрязнение воды сельскохозяйственными отходами и т.д. Разукрупненные оценки были получены для пахотной земли, земли для выращивания SRF, резервной земли, а также земли, отведенной под пастбища или лесные хозяйства. На основании полученных результатов был подсчитан коэффициент так называемой каппа-статистики, который подтвердил соответствие разукрупненных оценок реальным изменениям землепользования в бассейне реки. Коэффициент каппа-статистики обычно используется для оценки точности параметров в геодезии, картографии, исследованиях на основании результатов дистанционного зондирования [15] для проверки результатов географически детализованных моделей. Величину коэффициента можно считать показателем точности (корректности) оценки, полученной с помощью модели. В работе [4] коэффициент каппа-статистики использовался для сравнения результатов модели разукрупнения (см. (8)–(12) при праерах (13)–(21)) и данных из карт землепользования, предоставленных исследовательской группой Heihe Data Research Group. Так, оценки каппы 0.62 и 0.55 соответственно для пахотной земли и неиспользуемой земли свидетельствуют о том, что алгоритм разукрупнения получает реальные оценки локального тренда развития землепользования. Наиболее низкий показатель оценки каппы получен для пастбищных земель как следствие плохих (неполных и ошибочных) данных, присутствующих в карте землепользования GLC-2000, используемой в GLOBIOM.

3. Применение метода робастного разукрупнения для исследования географически детализованных тенденций развития сельского хозяйства в Украине. Исследования в Китае показали, что качество разукрупненных оценок в большой степени зависит от показателей, включенных в праер. Так, например, плохое качество карт землепользования может привести к неправильным оценкам. И хотя информация о некоторых показателях может быть со временем дополнена, многие показатели, например уровень осадков или температурные режимы, определяющие урожайность на местах, всегда будут по своей природе характеризоваться неопределенностью. В общем случае можно считать, что праер зависит от случайных факторов, которые не могут быть известны наверняка. Поэтому предполагаем, что существует не один праер, а множество. Возьмем, например, три имеющиеся карты землепользования: GLC-2000, MODIS-2000 и GLOBCOVER-2000, которые часто используются в моделях землепользования. Эти карты имеют существенные расхождения в данных о количестве пахотной земли и территорий, отведенных под пастбища. Задача состоит в том, чтобы разукрупнить агрегированные данные и проекции так, чтобы результат был максимально согласован со всеми возможными праерами. Методология робастного

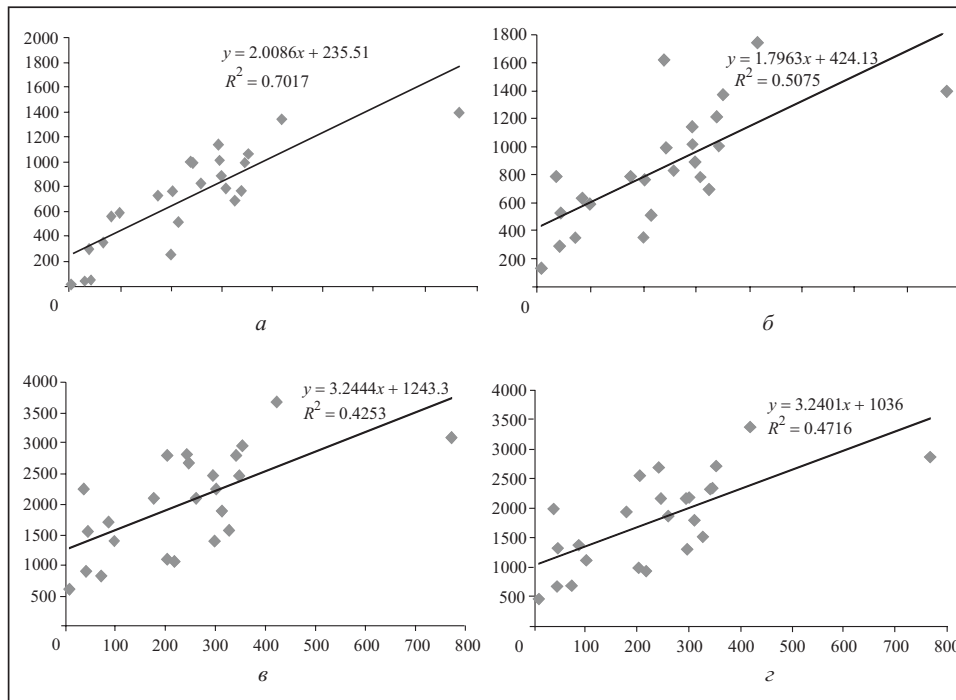


Рис. 1. Корреляционные зависимости между статистическими и разукрупненными (а затем агрегированными) данными: а — с использованием робастного разукрупнения с учетом всех праеров одновременно, б — разукрупнение с праером, основанным на GLC-2000, в — с праером, основанным на MODIS-2000, г — с праером, основанным на GLOBCOVER-2000

разукрупнения приведена в [2]. Результаты робастного разукрупнения иллюстрируются на примере исследований устойчивого размещения сельскохозяйственного производства в Украине. Разукрупнение данных и проекций проводилось в целях дальнейшего использования в национальных моделях (см. [16–19]). Региональные проекции землепользования, подсчитанные GLOBIOM, согласуются с данными по Украине. Имеющиеся расхождения можно объяснить тем, что многочисленные сельскохозяйственные реформы в период с 1999 по 2010 годы внесли существенные изменения в формы и качество земельного хозяйствования, существовавшего до 1999 г. [16–18], которые методом GLOBIOM нельзя учесть в полной мере. Для Украины проекции землепользования на национальном уровне были разукрупнены до уровня SimUs, а затем вновь агрегированы до уровня районов и областей Украины. Полученные значения сравнивались с имеющимися статистическими данными на уровне районов и областей по типам землепользования. Для разукрупнения использовались три альтернативные карты землепользования: GLC-2000, MODIS-2000 и GLOBCOVER-2000, и на основании каждой из них подсчитывались праеры по формулам, аналогичным (13)–(21). На рис. 1 показаны графики корреляционных зависимостей между статистическими и разукрупненными (а затем агрегированными) данными на уровне районов. Разукрупнение проводилось с использованием процедуры (9)–(11) и праеров типа (13)–(21). Наибольший коэффициент корреляции соответствует робастной процедуре, когда разукрупнение проводилось с учетом всех трех карт и соответствующих праеров. Так, процедура робастного разукрупнения получает наиболее согласованные со статистикой результаты, характеризующиеся наибольшим коэффициентом корреляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен метод слияния двух моделей: GLOBIOM и динамической модели. Модель GLOBIOM позволяет проводить анализ агрегированных изменений в системах землепользования, а также учитывать факторы, способствующие этим изменениям, такие как социально-экономические, технологические, экологические, демографические тенденции, заложенные в SSPs. Динамическая модель разукрупнения основана на принципе кросс-энтропии. С ее помощью возможно проводить дезагрегацию результатов, полученных из GLOBIOM, до уровня приемлемого разрешения, в частности единиц пространства или ячеек, в целях дальнейших обоснований глобально-локальных зависимостей и локальных изменений, спровоцированных глобальными процессами. Априорные показатели в предложенной динамической модели дезагрегации зависят от параметров и решений модели GLOBIOM, что обеспечивает согласованность двух моделей как относительно используемых данных, так и политических мер, влияющих на системы землепользования, в частности касающихся продовольственной и энергетической безопасности.

На конкретных примерах слияния предлагаемых моделей показана важность такой интеграции моделей для анализа глобально-локальных зависимостей, моделирования и гармонизации данных. Этот подход был применен для региона в бассейне реки Хэйхэ (Китай) для анализа устойчивого распределения площадей под пахотными землями, пастбищами и неиспользованными землями, вызванного увеличением спроса в стране, главным образом за пределами исследуемого региона. Предполагается, что изменения землепользования приведут к увеличению экстенсивного потребления водных ресурсов для ирригации в сельском хозяйстве в исследуемом регионе. Результаты исследований были проверены с помощью каппа-коэффициентов, подтверждающих их соответствие локальным данным и тенденциям при разрешениях в однокилометровых ячейках [4]. Проекция однокилометровых ячеек, полученных с помощью GLOBIOM, были использованы в модели SWAT для анализа сценариев устойчивого использования водных ресурсов в регионе. Пример подтверждает, что подход обеспечивает удовлетворяющие результаты для создания баз данных землепользования с высоким пространственным разрешением. Предложенный подход позволяет идентифицировать отсутствующие или неправильные данные в глобальных и локальных базах данных.

Исследования в Китае показали, что качество разукрупненных оценок в большой степени зависит от показателей, включенных в праер. Часто праер зависит от случайных величин, таких, например, как урожайность, типы землепользования и т.д. Так, вместо одного праера, как это традиционно принято в кросс-энтропии, может существовать множество праеров. Задача разукрупнения в этом случае состоит в том, как найти робастные локальные оценки, которые учитывают все праеры. В [2] предложен метод робастного разукрупнения с учетом множества возможных априорных параметров. Использование данного подхода проиллюстрировано на примере разукрупнения данных по сельскохозяйственным землям в Украине. Результаты подтверждают, что робастный метод дает более достоверные оценки, когда начальное распределение задано не единственным образом или характеризуется по своей природе случайностями. Для Украины основные неопределенности возникают ввиду неточности глобальных карт землепользования и данных по производительности сельскохозяйственных культур. Подход робастного разукрупнения использовался для получения комбинированных баз данных сельскохозяйственных земель с географической привязкой к пространственным единицам SimUs с применением всех имеющихся карт и баз данных по Украине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Havlík P., Schneider U., Schmid E., Büttcher H., Fritz S., Skalsky R., Aoki K., De Cara S., Kindermann G., Kraxner F., Leduc S., McCallum I., Mosnier A., Sauer T., Obersteiner M. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy Policy*. 2011. Vol. 39. P. 5690–5702.
2. Ермольев Ю.М., Ермольева Т.Ю., Хавлик П., Монье А., Леклер Д., Фритц С., Оберштайнэр М., Кириэук С.В., Бородина Е.Н. Методы робастного разукрепления данных и проекций при неопределенностях: исследования изменений земельного покрова и землепользования. *Кибернетика и системный анализ*. 2017. Т. 53, № 1. С. 31–41.
3. Moss R., Edmonds J., Hibbard K., Manning M., Rose S., van Vuuren D., Carter T., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G., Mitchell J., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S., Stouffer R., Thomson A., Weyant J., Wilbanks T. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 2010. Vol. 463. P. 747–756.
4. Zhang X., Ermolieva T., Balkovic J., Mosnier A., Kraxner F., Liu J. Recursive cross-entropy model for spatially explicit future land uses: a case study of the Heihe river basin. *J. of Physics and Chemistry of the Earth*. 2015. Vol. 89. P. 56–64.
5. Izaurrealde R.C., Williams J.R., McGill W.B., Rosenberg N.J., Jakas M.C.Q. Simulating soil C dynamics with EPIC: model description and testing against long-term data. *Ecological Modeling*. 2006. Vol. 192. P. 362–384.
6. Fischer G., van Velthuisen H.T., Shah M.M., Nachtergaele F.O. Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: Methodology and results. Research Report RR-02-02. 2002. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
7. Kullback J. Information theory and statistics. New York: John Wiley and Sons, 1959. 396 p.
8. Skalský R., Tarasovičová Z., Balkovič J., Schmid E., Fuchs M., Moltchanova E., Kindermann G., Scholtz P. Geo-bene global database for bio-physical modeling v.1.0. Concepts, methodologies and data. Technical Report, IIASA, Laxenburg, 2008. URL: <http://www.geo-bene.eu/?q=node/1734S> (accessed 13.03.09).
9. Monfreda C., Ramankutty N., Foley J. Farming the planet: Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*. 2008. Vol. 22. DOI:10.1029/2007GB002947.
10. Kindermann G.E., McCallum I., Frit S., Obersteiner M. A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. *Silva Fennica*. 2008. Vol. 42. P. 387–396.
11. Leduc S., Schwab D., Dotzauer E., Schmid E., Obersteiner M. Optimal location of wood gasification plants for methanol production with heat recovery. *International Journal of Energy Research*. 2008. Vol. 32. P. 1080–1091.
12. Fricko O., Havlik P., Rogelj J., Klimont Z., Gusti M., Johnson N., Kolp P., Strubegger M., Valin H., Amann M., Ermolieva T., Forsell N., Herrero M., Heyes C., Kindermann G., Krey V., McCallum D., Obersteiner M., Pachauri S., Rao S., Schmid E., Schöpp W., Riahi K. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*. 2016. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004.
13. Chen Y., Zhang D., Sun Y., Liu X., Wang N., Savenije H.H.G. Water demand management: a case study of the Heihe River Basin in China. *Phys. Chem. Earth*. 2005. Pt. A/B/C 30. P. 408–419.
14. Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., King K.W. Soil water assessment tool theoretical documentation. 2002. URL: <http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2000theory.pdf>.
15. Foody G.M. Status of land cover accuracy assessment. *Remote Sens. Environ.* 2002. Vol. 80. P. 185–201.
16. Zagorodny A.G., Ermoliev Y.M., Bogdanov V.L. Integrated management, security and robustness. Published by Committee for systems analysis and Presidium of national academy of sciences, Ukraine — National Member Organization of the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Kyiv, 2014.
17. Golodnikov A.N., Ermoliev Y.M., Ermolieva T.Y., Knopov P.S., Pepelyaev V.A. Integrated modeling of food security management in Ukraine. Models for structural optimization of agricultural production under risk. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2013. Vol. 49, N 2. P. 217–228.

18. Borodina O., Borodina E., Ermolieva T., Ermoliev Y., Fischer G., Makowski M., and van Velthuisen H.T. Sustainable agriculture, food security, and socio-economic risks in Ukraine. Y. Ermoliev, M. Makovski, K. Marti (Eds.). Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. P. 169–185 p.
19. Ermoliev Y., Ermolieva T., Havlík P., Mosnier A., Leclere D., Obersteiner M., Kostyuchenko Y., Estimating local-global dependencies of land use systems by downscaling from GLOBIOM model. Published by Committee for Systems Analysis and Presidium of National Academy of Sciences (Ukraine), National Member Organization of the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Kyiv. 2014. P. 228–240.

Надійшла до редакції 19.07.2016

**Т.Ю. Ермольєва, Ю.М. Ермольєв, П. Хавлик, А. Моньє, Д. Леклер,
С. Фрітц, Х. Валін, М. Оберштайнер, С.В. Киричук, О.М. Бородіна**

**ДИНАМІЧНЕ ЗЛИТТЯ ГЛОБАЛЬНОЇ І ЛОКАЛЬНОЇ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СТАЛОГО
ПЛАНУВАННЯ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ГЛОБАЛЬНИХ ПРОЕКЦІЙ
GLOBIOM І ЛОКАЛЬНИХ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ РЕСУРСНИХ ОБМЕЖЕНЬ**

Анотація. З метою проведення досліджень і отримання прогнозів на необхідній просторовій одиниці запропоновано об'єднати дві моделі — обчислення глобальних і регіональних проекцій здійснюють за допомогою глобальної динамічної моделі часткової рівноваги GLOBIOM (Global Biosphere Management Model), а зменшення розмірності отриманих результатів до необхідної просторової одиниці отримують за допомогою динамічної рекурсивної моделі розукрупнення, що використовує принцип крос-ентропії. Запропонований підхід дозволяє врахувати наявні на різних просторових одиницях і з різних джерел дані. У практичних дослідженнях, проведених у Китаї та Україні, запропонований підхід дозволив отримати локальні прогнози розвитку і зміни землекористування, що відповідають реальним тенденціям і очікуванням. Розукрупнені дані і проекції використано в національних моделях планування сталого землекористування та сільськогосподарського розвитку.

Ключові слова: глобальна модель планування землекористування, модель робастного розукрупнення, динамічне злиття моделей, невизначеності, локальні проекції землекористування.

**T.Y. Ermolieva, Y.M. Ermoliev, P. Havlík, A. Mosnier, D. Leclere, S. Fritz,
H. Valin, M. Obersteiner, S.V. Kyryzyuk, O.M. Borodina**

**DYNAMIC LINKAGE OF GLOBAL AND LOCAL MODELS FOR SUSTAINABLE LAND USE
PLANNING ACCOUNTING FOR GLOBAL PROJECTIONS FROM GLOBIOM AND LOCAL
FEASIBILITY AND RESOURCE CONSTRAINTS**

Abstract. In this paper, in order to conduct research at required spatial resolution, we propose a model fusion involving interlinked calculations of regional projections by a global dynamic model GLOBIOM (Global Biosphere Management Model) and a robust dynamic downscaling model, based on cross-entropy principle, for deriving spatially resolved projections. The proposed procedure allows incorporating data from satellite images, statistics, expert opinions, as well as data from global land use models. In numerous case studies in China and Ukraine, the approach allowed to estimate local land use and land use change projections corresponding to real trends and expectations. The disaggregated data and projections were used in national models for planning sustainable land use and agricultural development.

Keywords: global land use model, robust downscaling, dynamic model fusion, uncertainties, local land use projections.

Ермольева Татьяна Юрьевна,

PhD, научный сотрудник Программы по услугам и управлению экосистемами Международного института прикладного системного анализа, Лаксенбург, Австрия, e-mail: ermol@iiasa.ac.at.

Ермольев Юрий Михайлович,

академик НАН Украины, профессор; ведущий научный сотрудник Программы прогрессивных методов системного анализа Международного института прикладного системного анализа, Лаксенбург, Австрия, e-mail: ermoliev@iiasa.ac.at.

Хавлик Петр,

PhD, научный сотрудник Программы по услугам и управлению экосистемами Международного института прикладного системного анализа, Лаксенбург, Австрия, e-mail: havlik.petr@gmail.com.

Монье Алина,

PhD, научный сотрудник Программы по услугам и управлению экосистемами Международного института прикладного системного анализа, Лаксенбург, Австрия, e-mail: mosnier@iiasa.ac.at.

Леклер Давид,

PhD, научный сотрудник Программы по услугам и управлению экосистемами Международного института прикладного системного анализа, Лаксенбург, Австрия, e-mail: leclere@iiasa.ac.at.

Фритц Стэфан,

PhD, ведущий научный сотрудник Программы по услугам и управлению экосистемами Международного института прикладного системного анализа, Лаксенбург, Австрия, e-mail: fritz@iiasa.ac.at.

Валин Хуго,

PhD, ведущий научный сотрудник Программы по услугам и управлению экосистемами, Международного института прикладного системного анализа, Лаксенбург, Австрия, e-mail: valin@iiasa.ac.at.

Оберштайнэр Михаил,

PhD, директор Программы по услугам и управлению экосистемами Международного института прикладного системного анализа, Лаксенбург, Австрия, e-mail: oberstei@iiasa.ac.at.

Киризиук Сергей Викторович,

кандидат экон. наук, старший научный сотрудник Института экономики и прогнозирования НАН Украины, Киев, e-mail: kuryzyuk.ief@gmail.com.

Бородина Елена Николаевна,

доктор экон. наук, чл.-кор. НАН Украины, профессор, заведующая отделом Института экономики и прогнозирования НАН Украины, Киев, e-mail: olena.borodina@gmail.com.