

# Динамическое слияние глобальной модели землепользования и модели робастного разукрупнения для дезагрегации проекций изменения земельного покрова и землепользования, полученных глобальной моделью GLOBIOM

## Dynamic fusion of global land use planning model and a robust downscaling model for disaggregation of land use and land use change projections derived with GLOBIOM model

Татьяна Ермольева<sup>1\*</sup>, Юрий Ермольев<sup>1</sup>, Петр Хавлик<sup>1</sup>, Алина Монье<sup>1</sup>, Давид Леклер<sup>1</sup>,  
Стэфан Фритц<sup>1</sup>, Хуго Валин<sup>1</sup>, Михаил Оберштайнэр<sup>1</sup>,

Сергей Киризюк<sup>2</sup>, Елена Бородина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Интернациональный Институт Прикладного Системного Анализа,  
Дворцовая пл. 1, 2361, Лаксенбург, Австрия

<sup>2</sup> Институт Экономики и Прогнозирования, НАН Украины,  
ул. П.Мирного 26, Киев, 01011

### Annotation

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.

**UDC 519.21**

**Ключевые слова:** Глобальная модель планирования землепользования, модель робастного разукрупнения, динамическое слияние моделей, неопределенности, локальные проекции землепользования

**Key words:** Global land use model, robust downscaling, dynamic model fusion, uncertainties, local land use projections

## 1. Введение

Взаимозависимости между системами землепользования на национальном и глобальном уровнях обуславливает необходимость разработки новых подходов для интегрирования моделей землепользования разных масштабов. В этой статье, с целью проведения исследований и получения прогнозов на требуемом пространственном разрешении, мы предлагаем объединить две модели, а именно, проводить вычисления региональных проекций с помощью глобальной динамической модели частичного равновесия GLOBIOM (Global Biosphere Management Model, Havlik et al., 2011), а уменьшение размерности полученных результатов до необходимых пространственных разрешений производить с помощью динамической рекурсивной модели разукрупнения, использующей принцип кросс (перекрестной)-энтропии. Параметры предложенной модели разукрупнения зависят от параметров и результатов агрегированной модели GLOBIOM, что позволяет учитывать огромное разнообразие 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 (Ермольева et al., 2017) приводятся обоснования для разработки моделей робастного пространственного оценивания и разукрупнения данных, основанных на принципе кросс-энтропии. Главная 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 разделе 3 обсуждается динамический рекурсивный алгоритм основанный на принципе кросс-энтропии для разукрупнения результатов глобальной модели GLOBIOM. В главе 3 также подробно описываются данные, используемые как в модели разукрупнения так и в GLOBIOM. Предложенный подход

был использован в интернациональном институте Прикладного Системного Анализа (IIASA) и в институте Экономики и прогнозирования (НАН Украины) для изменения разрешения полученных с помощью GLOBIOM проекций землепользования, рассчитанных исходя из разных сценариев социально-экономических, технологических, демографических и климатических прогнозов развития (SSPs; Moss et al., 2010; O'Neil et al., 2012; van Vuuren et al., 2012). В главе 4 представлены результаты разукрупнения глобальных прогнозов для одного из сценариев (SSP2). Включение разных SSPs в модель GLOBIOM с последующим разукрупнением результатов предоставляет возможность исследования последствий разных глобальных (агрегированных) тенденций на локальные процессы, к примеру, снабжение водой и продовольствием, т.д. Различия локальных изменений землепользования для SSP2 и SSP3 были детально проанализированы в одном из районов бассейна реки Хэйхэ в Китае (Zhang et al., 2015). Показано, что предложенный подход может использоваться для планирования устойчивого землепользования на местах (Zhang et al., 2015). Принцип кросс-энтропии предполагает некоторое начальное (априорное распределение) производства на местах, т.е. праер. Практические исследования свидетельствуют, что априорное распределение может зависеть от различных случайных параметров, таких как, например, урожайность, цена, уровень эмиссий, т.д. Таким образом, вместо единственного праера, как это принято в традиционном подходе, может существовать допустимое множество праеров, и в этом случае задача разукрупнения состоит в том, чтобы получить локальные оценки используя информацию, заключенную во всех праерах, т.е. робастные оценки. Возможные подходы к робастному разукрупнению применялись для разукрупнения и гармонизации данных по Украине с целью дальнейшего использования в национальных моделях планирования землепользования и устойчивого сельскохозяйственного развития (раздел 4.2). Раздел 5 суммирует основные результаты, изложенные в статье.

## 2. Фрагмент модели изменения разрешения землепользования

Рассмотрим фрагмент общей модели разукрупнения, детально описанной в разделе 3. 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 пространственной точке  $j$ ,  $j = \overline{1, n}$ , может быть получена с помощью карт земного покрова, из статистических сборников, или как результаты глобальных моделей (GLOBIOM). Оценка пригодности земли, обсуждаемая в разделе 3, 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 пространственных точках  $j$ . Географически-детализированная информация о био-физической пригодности и потенциальной продуктивности земли в разрезе различных сельскохозяйственных культур может быть получена из исторических данных, а также с помощью био-физических моделей таких как, например, модель EPIC (Izaurre et al., 2006) или GAEZ (Fischer et al., 2002). Цель задачи разукрупнения состоит в определении такого уровня  $x_{ij}$  землепользования  $i$  в точке  $j$ , которое удовлетворяло бы основным балансовым уравнениям (1)-(2):

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

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

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 с производительностью  $y_{ij}$ . 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 определенными типами землепользования  $i$  в точке  $j$ . Таким образом,  $x_{ij} = a_j z_{ij}$ , и ограничения (1), (2) могут быть записаны следующим образом:

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

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

Эта модификация ограничений (1), (2) позволяет использовать принцип кросс-энтропии (и вероятностные доводы) 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 на основании дополнительного критерия. Ключевым аспектом в выборе такого критерия является то, что уже имеется так называемое априорное (желаемое) распределение  $z_{ij}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , которое вызывает минимальные негативные (или максимальные позитивные), в некотором смысле, последствия. Например, интуиция подсказывает, что априорное распределение может зависеть от рентабельности, чистой выручке или максимальной чистой приведенной стоимости деятельности в каждой точке пространства. Априорное распределение можно рассчитать используя доступные данные (карты) землепользования, карты климатических и био-физических условий в пространственных точках, или исходя из условий формирования спроса или систем хозяйствования. Например, априорное распределение

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

землепользования  $i$  в пространственной единице  $j$ , где  $P_i$  - цена продукции  $i$ -го типа землепользования,  $y_{ij}$  - урожайность  $i$ -го типа землепользования в пространственной единице  $j$ . В условиях отсутствия дополнительной информации, априорным может быть наименее информативное равномерное распределение (Wood et al., 2000), при этом проблема разукрупнения по-прежнему включает в себя ограничения на всех уровнях и из всех источников. Таким образом, задача разукрупнения будет подправлять априорное распределение с целью выполнения всех имеющихся ограничений, в данном случае (3)-(4). В разделе 3 обсуждаются возможные подходы для выбора априорных распределений. Если априорное распределение известно  $q_{ij} > 0$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , 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 (Kullback, 1959) 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  $q_{ij}$ , так что выполняются ограничения (3), (4).

### 3. Динамическое слияние глобальной и локальной моделей

В этом разделе обсуждается подход к слиянию глобальной модели GLOBIOM с локальной моделью разукрупнения типа (3)-(5), с целью получения локальных оценок изменений землепользования и земного покрова. GLOBIOM это глобальная рекурсивная динамическая модель частичного равновесия, интегрирующая сектора сельского хозяйства, биоэнергетики, и лесного хозяйства, разработанная с целью анализа политик устойчивого землепользования на глобальном и региональных уровнях, включая вопросы

конкуренции и преобразования типов землепользования, вызванные увеличением спроса на продовольствие, корма и биотопливо. GLOBIOM генерирует эндогенные прогнозы спроса в разрезе 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 способно анализировать огромное разнообразие локально-глобальных взаимозависимостей. Среди основных типов землепользования выделены пахотные земли под сельскохозяйственными культурами, пастбища, лесные угодья (управляемые и неуправляемые), быстро растущие лесные ресурсы (лесопосадки с коротким периодом ротации или короткосрочные леса SRF<sup>1</sup>), природные угодья. Изменения в структуре землепользования осуществляются в рамках доступных земельных ресурсов, а возможные сценарии преобразования землепользования из одного типа в другой ограничиваются базовыми правилами: пахотные земли могут быть трансформированы в пастбища или короткосрочные леса, пастбища – в пахотные земли или короткосрочные леса; неуправляемые лесные земли – в управляемые лесные угодья, природные (нетронутые) земли – в пахотные земли, короткосрочные леса или пастбища. При этом, оценка целесообразности (полезности) трансформации землепользования является дополнительным ограничивающим фактором.

### **3.1. Данные**

Обе модели (GLOBIOM и модель разукрупнения) используют одни и те же географически-детализированные гармонизированные базы данных (Skalsky' et al., 2008). Обе модели используют данные и моделируют процессы на уровне так называемых

---

<sup>1</sup> SRF – short rotated forest

симуляционных единиц (SimUs), которые не обязательно имеют геометрическую или географическую форму, сопоставимую с границами стран, системами землепользования, управления, климатическими данными, внутренними административными границами (муниципалитетов, районов и т.д.). Информация, используемая моделями включает следующее:

1. Модель GLOBIOM определена для 30 основных регионов, характеризующихся информацией относительно типов землепользования, урожайности и производства с.х. культур, цен, и др., в базовом 2000 году, полученных из международных и национальных источников (например, ФАО).
2. Прогнозы изменений землепользования в GLOBIOM подсчитываются до 2100 года, в частности, это касается трех основных типов землепользования: растениеводческой продукции, лесных ресурсов и производства древесины на землях, отведенных под короткосрочные леса. В частности, производство растениеводческой продукции рассчитывается для 30 основных культур. При этом, средняя урожайность с.х. культур для каждого региона получена из FAOSTAT, а потенциальная и средняя урожайность в SimUs, также как и их зависимость от погодно-климатических условий, сгенерированы на основании модели EPIC (Environmental Policy Integrated Climate Model; Izaurre et al., 2006).
3. Масштабирование размещения с.х. культур может основываться на доступных существующих картах посевных площадей (Monfreda et al., 2008). 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 с.х. производстве выделено четыре системы управления: высокоинтенсивная, низко затратная, ирригационная, и домохозяйства. Различия между системами отображены в модели дополнительными, характерными для систем, критериями, позволяющими оценить уровень производства той или иной системы в SimU в зависимости от доступных ресурсов, т.е. земли и воды, затрат на производство, продуктивности.
5. Первичная продуктивность лесных угодий определяется на региональном и SimUs уровнях. Оценка продуктивности осуществляется исходя из данных о среднем годовом приросте леса, максимальной доли вырубке 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 Kindermann (2008).
6. Спрос на биомассу для производства энергии рассчитывается в модели GLOBIOM в соответствии с методологией, описанной в (Havlik et al., 2011). 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. Расходы для заготовки сырья и переработки, а также коэффициенты превращения получены из разных источников (например, Leduc et al., 2008).



7. Спрос на биотопливо стимулирует увеличение площади плантаций под короткосрочным лесом. Их урожайность в SimUs определяется на основании исследований пригодности земельных ресурсов, проведенных в IASA (Havlik et al., 2011). 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), GLC2000, MODIS2000, GLOBCOVER2000, однако эти карты имеют существенные расхождения в таких типах землепользования, как пахотная земля, земля пригодная для пастбищ, резервная земля, заболоченные территории, и т.д.

### 3.2. Алгоритм кросс-энтропии для разукрупнения прогнозов изменений землепользования, полученных из GLOBIOM

GLOBIOM подсчитывает сценарии изменений землепользований для основных регионов и стран в период с 2000 по 2100, с десятилетним шагом (интервалом) моделирования. Эти агрегированные оценки необходимо разукрупнить до уровня SimUs. Допустим,  $A_{ir}^t$  обозначает региональный (национальный) уровень землепользования типа  $i$  в регионе  $r$  в период времени  $t$ , а  $\Delta A_{ijr}^t$  - 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  $A_{ir}^t$  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, усиановленными ограничениями на эмиссии парниковых газов в других регионах. Площадь землепользования  $A_{ir}^t$   $i$ -го типа в регионе  $r$  в период времени  $t$  вычисляются следующим 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 типа  $i$  в  $j$ , а  $\sum_j \Delta A_{jir}^t$  - из типа  $j$  в  $i$ , для всех типов землепользования  $j \neq i$ ,  $j = \overline{1, n}$ .

Ограничение (6) определяется исходя из доступных земельных ресурсов  $L_r$  в регионе  $r$ :

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

На уровне SimUs оценки площади  $A_{ilr}^t$  разных типов землепользования  $i$  в регионе  $r$  для базового года (2000) доступны из карт землепользования GLC-2000. Задача разукрупнения  $\Delta A_{ijr}^t$  состоит в том, что необходимо найти  $z_{ijlr}^t$ ,  $\sum_l z_{ijlr}^t = 1$ , определяющие изменение площади  $\Delta A_{ijr}^t$  из  $i$ -го типа землепользования в  $j$ -й, в регионе  $r$ , и пространственной точке (ячейке) SimUs  $l$ ,  $l = \overline{1:m}$ , for all  $i, j = \overline{1:n}$ ,  $r = \overline{1:R}$ ,  $t = \overline{1:T}$ . Рекурсивное уравнение (7) для вычисления площади землепользования отражает динамику землепользования  $i$ -го типа в SimU  $l$  региона  $r$  в период времени  $t > 1$ :

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

где  $A_{ilr}^t$  обозначает 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  $\Delta A_{ijr}^t$ , 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), представленной в разделе 2. Таким образом, необходимо найти  $z_{ijlr}^t$ , 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  $q_{ijlr}^t > 0$ ,  $\sum_l q_{ijlr}^t = 1$ , некоторое априорное распределение  $z_{ijlr}^t$ .

где  $y_{jlr}^t$  - продуктивность (урожайность) типа землепользования  $j$  в SimU  $l$  в момент времени  $t$ ,  $P_{jr}^t$  - цена продукции, произведенной при землепользовании типа  $j$  в  $t$  и регионе  $r$ ,  $A_{jlr}^{t-1}$  - общая площадь землепользования типа  $j$  в SimU  $l$  в период времени  $t-1$ , рассчитанный GLOBIOM.

#### 4. Численные эксперименты

Задача минимизации функции типа кросс-энтропии (12) при ограничениях (9)-(11) и праерах (13)-(21) применялась для разукрупнения агрегированных проекций изменения землепользования, полученных с помощью GLOBIOM для 30 основных агрегированных регионов мира, в период с 2000 по 2100, с временным шагом 10 лет. Результаты разукрупнения для пастбищ и пахотных земель приведены на Рисунке 1. В результате разукрупнения мы не стремимся воспроизвести реальное землепользование на местах (в гридах), да это и не возможно поскольку реальные типы землепользования на местах не всегда соответствуют оптимальным критериям. Так, земля может быть распределена между активностями не самым оптимальным образом. В то время как модель разукрупнения предоставляет возможность исследования сбалансированного устойчивого размещения землепользований на местах (в гридах) в соответствии с условиями пригодности (ф-р) и всевозможными ограничениями (9)-(11). Можно также ввести

дополнительные ограничения на использование воды, загрязнение земли и воздуха, и т.д. Помимо этого, разукрупнение позволяет получить дополнительную информацию о подходящих типах землепользования на уровне на котором статистические данные отсутствуют. Для последующего анализа, значения в гридах можно агрегировать, к примеру, до уровня страны, районных уровней, или до уровня бассейна реки, и т.д., как это обсуждается в приведенных ниже практических исследованиях (Zhang et al., 2015). Для разукрупнения результатов GLOBIOM, вычисление априорных распределений производится следующим образом. Например, параметр, определяющий начальную вероятность переустройства пахотной земли в земли запаса, обратно пропорционален рентабельности сельскохозяйственных земель в регионе  $r$ , во время  $t$ , и 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  $l$ , регионе  $r$ , в период  $t-1$ . Значения  $A_{slr}^{t-1}$  и  $P_{jr}^t$  подсчитываются с помощью GLOBIOM, т.е. параметр существенно зависит от решений модели. Из-за конкуренции за землю, преобразование одного типа землепользования в другой зависит от относительной рентабельности (полезности) видов деятельности (типов землепользования). Например, параметр, определяющий преобразование пахотной земли в территорию, отведенную под короткосрочные лесопосадки, зависит от пригодности земли для выращивания короткосрочного леса и обратнопропорционален прибыли от производства сельскохозяйственной продукции

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

где  $y_{Plt,l,r}^t A_{Plt,l,r}^{t-1}$  определяет уровень производства древесины в SimU  $l$ , регионе  $r$ , в момент времени  $t$ . Показатель, определяющий так называемую доступность рынка (или интенсивность спроса)  $\varphi_{lr}^t$  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 траспортировки из пункта  $l$  (регион  $r$ , время  $t$ ) до ближайшего рынка сбыта. Из (24) следует, что использование земли под выращивание короткосрочного леса выгодно там, где относительная рентабельность производства сельскохозяйственных культур ниже, а производительность (пригодность) земли для выращивания леса выше. Изменение типа землепользования из пастбищ или сенокосных угодий в тип, пригодный для производства короткосрочного леса, имеет место там, где выше рентабельность от производства леса и ниже – от активностей, связанных с использованием пастбищ:

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

где  $y_{Grass,l,r}^t A_{Grass,l,r}^{t-1}$  определяет производительность пастбищ. Резервная (земля запаса или невозделанная ранее) земля может быть использована, например для производства леса, в зависимости от пригодности этой земли для соответствующей активности, т.е.

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

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:

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

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

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

Пастбища и сенокосные угодия могут расширяться в зависимости от доходов и целесообразности этих активностей:

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

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

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

где  $y_{l,r,Forest}^t A_{l,r,Forest}^{t-1}$  определяет производительность лесных хозяйств, а  $P_{l,r,Forest}^t$  - цена произведенного лесного материала. И наконец, территории лесных хозяйств могут быть

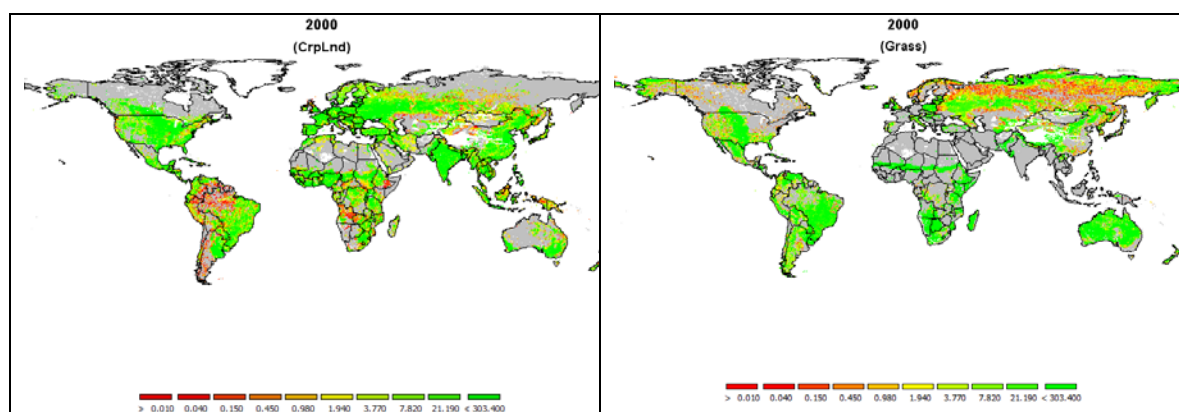
заняты под пастбища в случае, если рентабельность от пастбищ и связанных с ними скотоводческими активностями будет выше, чем рентабельность лесных хозяйств:

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

#### 4.1. Исследование устойчивого развития землепользования и управления водными ресурсами в бассейне реки Хайхе, Китай

Объединение GLOBIOM и модели разукрупнения позволяет анализ всевозможных глобально-локальных взаимодействий и тенденций включая те, что определяются социально-экономическими, технологическими, и демографическими сценариями и тенденциями развития просуммированными в SSPs сценариях (Moss et al., 2010; Fricko et al., 2016). Метод разукрупнения, предложенный в этой статье, применялся в ряде региональных исследований. Разукрупненные оценки показали хорошее согласие с наблюдаемыми данными и процессами на местах. Например, в бассейне реки Хэйхэ (Chen et al., 2005; Zhang et al., 2015), проекции изменений землепользования были подсчитаны GLOBIOMом для различных сценариев SSP (рисунок 1) и разукрупнены до 1 км грида, покрывающего изучаемый район. Исследования проводились с целью 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 землепользований использовались в модели SWAT (Neitsch et al., 2002) для изучения возможных негативных тенденций землепользования, таких как чрезмерное использование водных ресурсов, загрязнение воды в результате интенсивного сельского хозяйствования, и т.д. Разукрупненные оценки были получены для пахотной земли, земли под пастбищами, земли для выращивания короткосрочного

леса, резервной земли, а также отведенной под лесные хозяйства. На основании полученных результатов была подсчитана так называемая Каппа статистика, которая подтвердила, что разукрупненные оценки соответствуют реальным изменениям землепользования в бассейне реки. Каппа статистика обычно используется для оценки точности параметров в геодезии, картографии, исследованиях на основании результатов дистанционного зондирования (Foody, 2002), для проверки результатов географически-детализованных моделей. Величину коэффициента можно считать показателем точности (корректности) оценки, полученной с помощью модели. В работе (Zhang et al., 2015) каппа статистика использовалась для сравнения результатов модели разукрупнения ((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 что, алгоритм разукрупнения получает реалистичные оценки локального тренда развития землепользования. Более низкого качества, оценка каппы для пастбищных земель была получена как следствие плохих (неполных и ошибочных) данных, присутствующих в карте землепользования GLC2000, используемой в GLOBIOM.





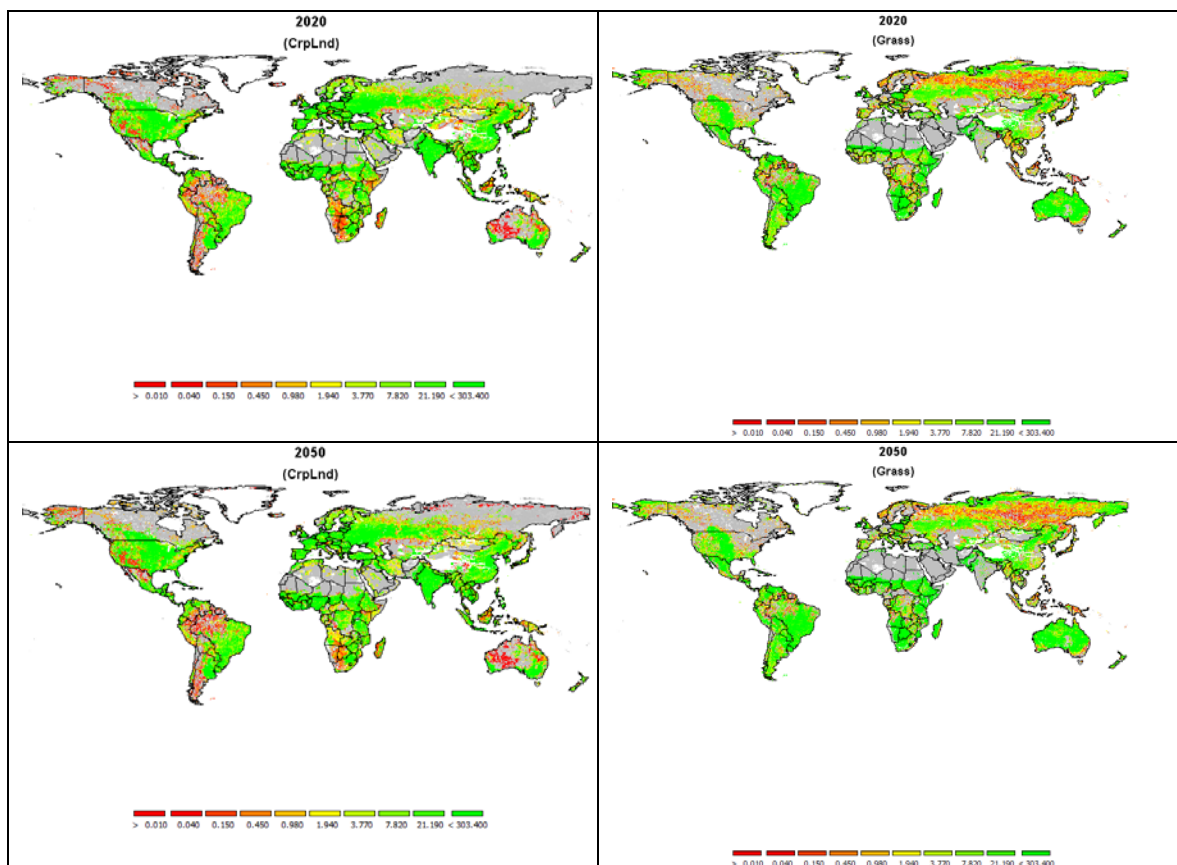


Рисунок 1: Динамика изменений пахотной и пастбищной земель, 2010 – 2100, в 1000 га.

#### 4.2. Применение метода робастного разукрупнения для исследования географически-детализованных тенденций развития сельского хозяйства на Украине

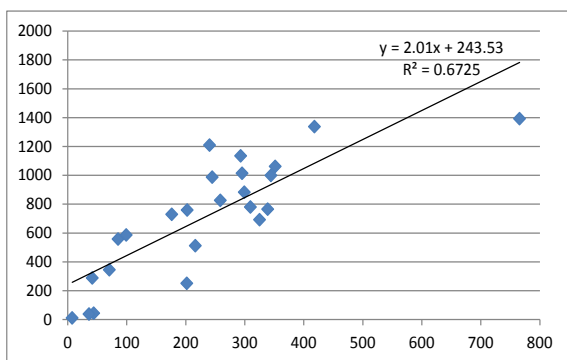
Исследования в Китае показали, что качество разукрупненных оценок в большой степени зависит от показателей, включенных в праер. Так, например, плохое качество карт землепользования может привести к ошибкам оценок. И хотя информация о некоторых показателях может быть со временем дополнена, многие показатели, например такие как уровень осадков или температурные режимы, определяющие урожайность на местах, всегда будут, по своей природе, характеризоваться неопределенностью (случайными). В общем случае можно считать, что праер зависит от случайных факторов, которые не могут быть известны наверняка. Поэтому, вместо одного праера, мы предполагаем, что

существует множество праеров. К примеру, возьмем три имеющиеся карты землепользования GLC2000, MODIS2000, и GLOBCOVER2000, которые часто используются в моделях землепользования. Три 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 разукрупнения приведена в (Ермольева et al., 2017). Результаты робастного разукрупнения иллюстрируются на примере исследований устойчивого размещения сельскохозяйственного производства на Украине. Разукрупнение данных и проекций производилось с целью дальнейшего использования в национальных моделях (см. Zagorodny et al., 2014; Golodnikov et al., 2013; Borodina et al., 2011; Ermolieva et al., 2015).

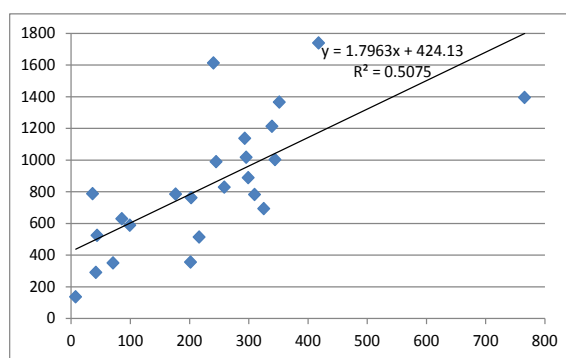
В общем, региональные проекции землепользования, подсчитанные GLOBIOM, находятся в хорошей согласованности с данными по Украине. Имеющиеся расхождения можно объяснить тем, что многочисленные сельскохозяйственные реформы в период с 1999 по 2010 внесли существенные изменения в формы и качество земельного хозяйствования, существовавшего до 1999 года (см. Zagorodny et al., 2014; Borodina et al., 2011; Golodnikov et al., 2013; Курузжук, et al., 2011), которые GLOBIOM не может учесть во всей полноте.

Для Украины, проекции землепользования на национальном уровне были разукрупнены до уровня SimUs, а затем вновь агрегированы до уровня районов и областей Украины. Полученные значения были сравнены с имеющейся районной и областной статистикой по типам землепользования. Для разукрупнения использовались три альтернативные карты землепользования (GLC2000, MODIS2000, и GLOBCOVER2000) и на основании каждой из карт подсчитывались праеры по формулам, аналогичным (13)-(21). На рисунке 2 показаны корреляционные зависимости между статистическими и разукрупненными (а затем агрегированными) данными на уровне районов. Наибольший коэффициент

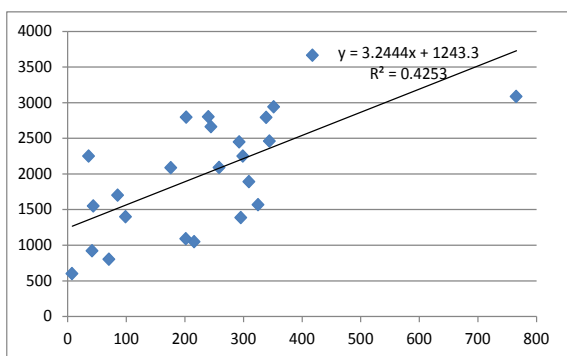
корреляции соответствует робастной процедуре, когда разукрупнение производилось с учетом всех трех карт и соответствующих праеров. Так, процедура робастного разукрупнения получает наиболее согласованные со статистикой результаты, характеризующиеся наибольшим коэффициентом корреляции, рисунок 3.а.



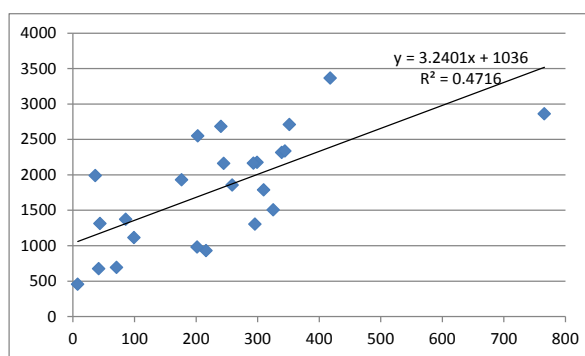
а. Робастное разукрупнение



б. Разукрупнение с праером основанным на GLC2000



с. Разукрупнение с праером основанным на MODIS2000



д. Разукрупнение с праером основанным на GLOBCOVER2000

Рисунок 2. Корреляция между статистическими данными и результатами, полученными в результате разукрупнения и последующей агрегации до районного уровня. Разукрупнение проводилось с использованием процедуры (9)-(11) и праеров типа (13)-(21), на основании GLC2000 (б), MODIS2000 (с), GLOBCOVER2000 (д), а также с использованием робастной процедуры разукрупнения (раздел ...), учитывающей все праеры одновременно (а).

## 5. Заключительные заметки

В статье предложен метод слияния двух моделей: а) модели GLOBIOM, позволяющей проводить анализ агрегированных изменений в системах землепользования, а также факторов, способствующих этим изменениям, таких как, социально-экономические,

технологические, экологические, демографические тенденциями, заложенные в SSPs; б) динамической модели разукрупнения, основанной на принципе кросс-энтропии, с помощью которой возможно проводить дезагрегацию результатов, полученных из GLOBIOM, до уровня приемлемого разрешения, в частности, пространственных единиц или ячеек, с целью 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 в части как используемых данных, так и политических мер, влияющих на системы землепользования, в частности, касающихся продовольственной, энергетической безопасности.

На конкретных примерах слияния предлагаемых моделей показана важность такой интеграции моделей для анализа глобально-локальных зависимостей, моделирования и гармонизации данных. В частности, этот подход был применен для региона в бассейне реки Хэйхэ в Китае для анализа трансформаций площадей под пахотными землями, пастбищами и неиспользованными землями, вызванных увеличением спроса в стране, главным образом, за пределами исследуемого региона. Ожидается, 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 1-километровых ячейках (см. Zhang et al., 2015). Проекция 1-километровых ячеек, полученных из GLOBIOM, были использованы в модели SWAT для анализа сценариев устойчивого использования водных ресурсов в регионе. На этом примере подтверждено, что подход обеспечивает удовлетворяющие значения 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 как, например, урожайность, количество того или иного типа земли, и т.д., как это обсуждается в главе 4 на примере исследований устойчивого развития и размещения землепользования на Украине. Так, вместо единственного праера, как это принято в традиционном принципе кросс-энтропии, может существовать множество праеров. Задача разукрупнения в этом случае состоит в том, как найти робастные локальные оценки, которые учитывают все праеры. В (Ермольева et al., 2017) предложен метод робастного разукрупнения с учетом множества возможных априорных параметров. Использование данного подхода проиллюстрировано на примере разукрупнения данных по сельскохозяйственным землям на Украине. Результаты подтверждают, что робастный метод дает более достоверные оценки когда начальное распределение задано не единственным образом или характеризуется, по своей природе, случайностями. На Украине основные неопределенности присущи неточности глобальных карт землепользования и производительности сельскохозяйственных культур. Подход робастного разукрупнения использовался для получения комбинированных баз данных сельскохозяйственных земель с географической привязкой к пространственным единицам SimUs используя все имеющиеся карты и базы данных по Украине.

### **Благодарность**

Исследования проводятся в рамках ECONADAPT (603906), TRANSMANGO (613532), AGRICISTRATE (612755), SIGMA (603719) EU FP7, 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. Авторы статьи выражают благодарность редколлегии журнала Кибернетики и Системного Анализа за подготовку статьи для опубликования. Особую благодарность выражаем редактору Валерие Борисовне Беловой.

## 6. Список литературы

Borodina, O., Borodina, E., Ermolieva, T., Ermoliev, Y., Fischer, G., Makowski, M., van Velthuizen. Food security and socio-economic risks of agricultural production intensification in Ukraine: a model-based policy decision support. In: Marti, K., Ermoliev, Y., Makowski, M. (Eds.), *Coping with Uncertainty: Robust Solutions*. Springer Verlag, Berlin, 2011.

Chen, Y., Zhang, D., Sun, Y., Liu, X., Wang, N., Savenije, H. H. G., 2005. Water demand management: a case study of the Heihe River Basin in China. *Phys. Chem. Earth, Pt. A/B/C* 30, 408-419.

Ermoliev Y., Ermolieva, T., Havlík, P., Mosnier, A., Leclere, D., Obersteiner, M., Kostyuchenko, Y., 2014. 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). ISBN 978-966-02-7376-4, Kyiv, pp. 228-240.

Fischer, G., van Velthuizen, H.T., Shah, M.M., and Nachtergaele F.O., 2002. *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*. Research Report RR-02-02. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Foody, G. M., 2002. Status of land cover accuracy assessment. *Remote Sens. Environ.* 80, 185-201.

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., McCollum, D., Obersteiner, M., Pachauri, S., Rao, S., Schmid, E., Schöpp, W. and Riahi, K. (2016) The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*. (In Press)

Golan, A., Judge, G., Miller, D., 1996. *Maximum entropy econometrics: robust estimation with limited data*. Series in Financial Economics and Quantitative Analysis, John Wiley and Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex, England.

Golodnikov, A.N., Ermoliev, Y.M., Ermolieva, T.Y., Knopov, P.S. and Pepelyaev, V.A., 2013. Integrated modeling of food security management in Ukraine. Models for structural optimization of agricultural production under risk. *Cybernetics and Systems Analysis*, 49 (2). pp. 217-228.

Havlík, P., Schneider, U., Schmid, E., Böttcher, H., Fritz, S., Skalsky, R., Aoki, K., De Cara, S., Kindermann, G., Kraxner, F., Leduc, S., McCallum, I., Mosnier, A., Sauer, T., Obersteiner, M., 2011. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy policy*, 39: 5690–5702.

Izaurrealde, R.C., Williams, J.R., McGill, W.B., Rosenberg, N.J., Jakas, M.C.Q., 2006. Simulating soil C dynamics with EPIC: model description and testing against long-term data. *Ecological modeling*, 192: 362–384.

Karlqvist, A., Lundqvist, L., Snickars, F., Weibull, J. 1978. *Studies in Regional Science and Urban Economics: Spatial Interaction Theory and Planning Models*, Vol. 3, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York.

Kindermann, G.E., McCallum, I., Fritz, S., Obersteiner, M., 2008. A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. *Silva Fennica* 42, 387–396.

Kullback, J., 1959. *Information theory and statistics*. John Wiley and Sons, New York. New York.

Leduc, S., Schwab, D., Dotzauer, E., Schmid, E., Obersteiner, M., 2008. Optimal location of wood gasification plants for methanol production with heat recovery. *International Journal of energy research*, 32: 1080–1091.

Monfreda, C., Ramankutty, N., Foley, J., 2008. Farming the planet: Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22, doi:10.1029/2007GB002947.

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., and Wilbanks, T., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., King, K.W., 2002. Soil Water Assessment Tool Theoretical Documentation. <http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2000theory.pdf>.

Skalsky', R., Tarasovic'ova', Z., Balkovic', J., Schmid, E., Fuchs, M., Moltchanova, E., Kindermann, G. and Scholtz, P., 2008. Geo-bene global database for bio-physical modeling v. 1.0. Concepts, methodologies and data. Technical Report, IIASA, Laxenburg. Available from: [/http://www.geo-bene.eu/?q=node/1734S](http://www.geo-bene.eu/?q=node/1734S) (accessed 13.03.09).

Zagorodny, A.G., Ermoliev, Y.M., Bogdanov, V.L.), 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). ISBN 978-966-02-7376-4, Kyiv, 2014.

Zhang, X., Ermolieva, T., Balkovic, J., Mosnier, A., Kraxner, F., Liu, J., 2015. 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*, accepted for publication.

### **Аннотация**

В этой статье, с целью проведения исследований и получения прогнозов на требуемом пространственном разрешении, мы предлагаем объединить 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 производится с помощью динамической рекурсивной модели разукрупнения, использующей принцип кросс (перекрестной)-энтропии. Предложенный подход позволяет учесть имеющиеся на разных разрешениях и из разных источников данные, например, полученные с помощью спутниковых изображений, из статистических сборников, в виде экспертных оценок, а также данных и результатов глобальных моделей землепользования. В многочисленных практических исследованиях, проведенных в Китае, в 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.

### **Annotation**

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.



## List of authors

Dr. Tatiana Ermolieva\* [ermol@iiasa.ac.at](mailto:ermol@iiasa.ac.at), Research Scholar, Ecosystems Services and Management Program at International Institute for Applied Systems Analysis, 2361, Schlossplatz, 1, Laxenburg, Austria

Prof. Dr. Yuri Ermoliev [ermoliev@iiasa.ac.at](mailto:ermoliev@iiasa.ac.at), Academician of National Academy of Sciences of Ukraine and Institute Scholar at the International Institute for Applied Systems Analysis, Advanced Systems Analysis Program, 2361, Schlossplatz, 1, Laxenburg, Austria.

Dr. Petr Havlík [havlik.petr@gmail.com](mailto:havlik.petr@gmail.com), Research Scholar, Ecosystems Services and Management Program at International Institute for Applied Systems Analysis, 2361, Schlossplatz, 1, Laxenburg, Austria

Dr. Alina Mosnier [mosnier@iiasa.ac.at](mailto:mosnier@iiasa.ac.at), Research Scholar, Ecosystems Services and Management Program at International Institute for Applied Systems Analysis, 2361, Schlossplatz, 1, Laxenburg, Austria

Dr. David Leclere [leclere@iiasa.ac.at](mailto:leclere@iiasa.ac.at), Research Scholar, Ecosystems Services and Management Program at International Institute for Applied Systems Analysis, 2361, Schlossplatz, 1, Laxenburg, Austria

Dr. Steffen Fritz [fritz@iiasa.ac.at](mailto:fritz@iiasa.ac.at), Senior Research Scholar, Ecosystems Services and Management Program at International Institute for Applied Systems Analysis, 2361, Schlossplatz, 1, Laxenburg, Austria

Dr. Hugo Valin [valin@iiasa.ac.at](mailto:valin@iiasa.ac.at), Senior Research Scholar, Ecosystems Services and Management Program at International Institute for Applied Systems Analysis, 2361, Schlossplatz, 1, Laxenburg, Austria

Dr. Michael Obersteiner [oberstei@iiasa.ac.at](mailto:oberstei@iiasa.ac.at), Program Director, Ecosystems Services and Management Program at International Institute for Applied Systems Analysis, 2361, Schlossplatz, 1, Laxenburg, Austria

PhD Kyryzyuk Sergiy, [kyryzyuk.ief@gmail.com](mailto:kyryzyuk.ief@gmail.com), senior researcher, Department for economics and policy of agrarian transformations, Institute for Economics and Forecasting, NAS of Ukraine, Panasa Myrnogo Str., 26, Kyiv, Ukraine, 01011

Prof. Dr. Elena Borodina, [olena.borodina@gmail.com](mailto:olena.borodina@gmail.com), corresponding member of NAS of Ukraine, Head of Department for economics and policy of agrarian transformations, Institute for Economics and Forecasting, NAS of Ukraine, Panasa Myrnogo Str., 26, Kyiv, Ukraine, 01011

\* *Corresponding author:* Tatiana Ermolieva, [ermol@iiasa.ac.at](mailto:ermol@iiasa.ac.at)

## Список авторов

PhD Татьяна Ермольева\* [ermol@iiasa.ac.at](mailto:ermol@iiasa.ac.at), Научный Сотрудник Программы по Услугам и Управлению Экосистемами, Международного Института Прикладного Системного Анализа, 2361, Дворцовая пл. 1, Лаксенбург, Австрия

Проф. Др. Юрий М. Ермольев [ermoliev@iiasa.ac.at](mailto:ermoliev@iiasa.ac.at), Академик Национальной Академии Наук Украины и Ведущий Научный Сотрудник Международного Института Прикладного Системного Анализа, Программы Прогрессивных Методов Системного Анализа, 2361, Дворцовая пл. 1, Лаксенбург, Австрия

PhD Петр Хавлик [havlik.petr@gmail.com](mailto:havlik.petr@gmail.com), Научный Сотрудник Программы по Услугам и Управлению Экосистемами, Международного Института Прикладного Системного Анализа, 2361, Дворцовая пл. 1, Лаксенбург, Австрия

PhD Алина Монье [mosnier@iiasa.ac.at](mailto:mosnier@iiasa.ac.at), Научный Сотрудник Программы по Услугам и Управлению Экосистемами, Международного Института Прикладного Системного Анализа, 2361, Дворцовая пл. 1, Лаксенбург, Австрия

PhD Давид Леклер [leclere@iiasa.ac.at](mailto:leclere@iiasa.ac.at), Научный Сотрудник Программы по Услугам и Управлению Экосистемами, Международного Института Прикладного Системного Анализа, 2361, Дворцовая пл. 1, Лаксенбург, Австрия

PhD Стэфан Фритц [fritz@iiasa.ac.at](mailto:fritz@iiasa.ac.at), Ведущий Научный Сотрудник Программы по Услугам и Управлению Экосистемами, Международного Института Прикладного Системного Анализа, 2361, Дворцовая пл. 1, Лаксенбург, Австрия

PhD Хуго Валин [valin@iiasa.ac.at](mailto:valin@iiasa.ac.at), Ведущий Научный Сотрудник Программы по Услугам и Управлению Экосистемами, Международного Института Прикладного Системного Анализа, 2361, Дворцовая пл. 1, Лаксенбург, Австрия

PhD Михаил Оберштайнэр [oberstei@iiasa.ac.at](mailto:oberstei@iiasa.ac.at), Директор Программы по Услугам и Управлению Экосистемами, Международного Института Прикладного Системного Анализа, 2361, Дворцовая пл. 1, Лаксенбург, Австрия

PhD Сергей Киризюк, [kyryzyuk.ief@gmail.com](mailto:kyryzyuk.ief@gmail.com), канд. эк. наук, старший научный сотрудник, отдел экономики и политики аграрных преобразований, Институт экономики и прогнозирования НАН Украины, ул. Панаса Мирного, 26, г. Киев, Украина, 01011

Проф. Елена Бородина, [olena.borodina@gmail.com](mailto:olena.borodina@gmail.com), д-р экон. наук, член-корр. НАН Украины, заведующая отделом экономики и политики аграрных преобразований, Институт экономики и прогнозирования НАН Украины, ул. Панаса Мирного, 26, г. Киев, Украина, 01011

Ответственный автор: *Татьяна Ермольева*, [ermol@iiasa.ac.at](mailto:ermol@iiasa.ac.at)