

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ РОБАСТНЫХ СТРАТЕГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ  
ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОГО СНАБЖЕНИЯ  
ПРОДОВОЛЬСТВИЕМ, ЭНЕРГИЕЙ, ВОДОЙ  
НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЛОБИОМ**

**Аннотация.** Представлена разработка адекватных подходов к системному анализу геопространственных робастных решений для долгосрочного согласованного управления взаимосвязанными системами землепользования. Рассмотрена новая стохастическая Глобальная Модель Управления Биосферой (ГЛОБИОМ), позволяющая проанализировать безопасность снабжения продовольствием, энергией, водой с учетом взаимосвязей стран и возможности глобальной диверсификации системных рисков.

**Ключевые слова:** безопасность снабжения продовольствием, энергией, водой; ГЛОБИОМ; стохастическая оптимизация; робастные стратегические и оперативные решения; глобальная диверсификация системных рисков; меры рисков VaR и CVaR.

**ВВЕДЕНИЕ**

Зависимости в системах землепользования (СЗП) определяются сложными балансами между производством и спросом. Несоответствие этих балансов в одном регионе или стране может вызвать проявления системных рисков, подвергающих опасности СЗП в мире. Так, многочисленные исследования показывают, что интенсивное уничтожение лесных угодий в Малайзии, Индонезии, Африке обусловлено высокими квотами на биотопливо в Европейском Союзе [1]. В результате, для борьбы с последствиями разрабатываются и внедряются дорогостоящие проекты по сохранению и восстановлению окружающей среды и социально-экономических условий [2–4].

Преднамеренные или случайные изменения СЗП могут спровоцировать тяжелые последствия, подрывающие безопасность и стабильность производства, а также поставок продовольствия, энергии, воды (ПЭВБ). Внезапные изменения СЗП происходят, например, вследствие уменьшения площадей земель прямого назначения под сельскохозяйственные культуры ввиду рыночных политик, нестабильности цен, зависимости урожая от погодных условий, захвата пашен под биотопливные культуры, увеличения загрязнения почв и воды, чрезмерного потребления воды для орошения и т.д. [5].

Растущая взаимозависимость и уязвимость СЗП, а также необходимость обеспечения ПЭВБ являются важными проблемами, связанными с происходящими в мире глобальными изменениями, решение которых требует разработки новых методологических подходов [6]. В настоящей статье проведен анализ стохастической Глобальной Модели Управления Биосферой (ГЛОБИОМ) [7], которая является моделью частичного равновесия, предназначенной для долгосрочного планирования землепользования в условиях рисков с учетом взаимозависимости основных СЗП на глобальном, национальном и локальном уровнях, например на сетке  $50 \times 50$  км. Модель использует данные об урожайности сельскохозяйственных культур, которые зависят от погодных условий, что вызывает системные риски в СЗП.

Отметим, что традиционная детерминированная оптимизация приводит к противоречивым вырожденным решениям, специфическим для каждого отдельного сценария. Расчеты показывают, что практическое внедрение таких противоречивых решений увеличит уязвимость СЗП, приведет к резким колебаниям цен, а также может повлечь существенные расходы на исправление или адаптацию последствий, если произойдет отличный от выбранного сценарий. Вместо

традиционного сценарного анализа стохастическая ГЛОБИОМ предлагает долгосрочные робастные решения, обеспечивающие стабильность систем независимо от того, какой сценарий урожайности случится.

Наличие рисков обусловило необходимость создания зерновых хранилищ для бесперебойных поставок продуктов потребления и в результате для снижения цен на сельхозтовары. Организация хранилищ особенно актуальна в условиях системных рисков, когда производственные шоки могут коррелировать между торговыми партнерами или когда некоторые рынки изолированы либо скованы ограниченным регулированием, например, торговыми запретами, субсидиями, мандатами и т.д. Возможность хранения зерна также позволяет избежать дорогостоящих инвестиций, например, в системы орошения, которые востребованы лишь в редких случаях, поскольку при обширных засухах цена на воду может оказаться настолько высокой, что орошение становится невыгодным. Многие модели по отдельности анализируют оптимальные меры планирования СЗП, рассматривая только размещение производства [9, 10] или хранение товаров [11, 12]. Стохастическая ГЛОБИОМ позволяет проводить интегрированный анализ робастных стратегических (долгосрочных) решений о размещении и оперативных (краткосрочных) решений об объеме хранилищ.

#### **ВОЗНИКНОВЕНИЕ СИСТЕМНЫХ РИСКОВ В МОДЕЛЯХ С УЧЕТОМ ПЭВБ**

**Детерминированная ГЛОБИОМ [7].** Данная система является динамической многорегиональной моделью частичного равновесия, включающей такие основные сферы применения СЗП, как сельское и лесное хозяйство, производство и переработка биотоплив первого и второго поколений, животноводство. Нормы продовольственной безопасности и необходимость производства биотоплива приводят к соревнованию секторов за пользование ограниченными природными ресурсами, т.е. землей и водой. Производство сельхозпродукции должно покрывать потребности населения в продуктах питания, животноводства — в кормах, а также удовлетворять запросы по производству биотоплива. Лесные ресурсы предназначены для изготовления бревен, досок, бумаги, а также для получения биоэнергии, например, биомассы для отопления и производства электричества, для ферментации этанола, газификации для отопления и производства метанола и т.д. Древесную биомассу для биоэнергетики можно также изготавливать на лесоразработках с коротким сроком ротации.

Таким образом, сельское и лесное хозяйство, а также биоэнергетика имеют взаимозависимые и конфликтующие цели и ограничения, что приводит к системным рискам в ГЛОБИОМ аналогично приведенному далее примеру. Система ГЛОБИОМ изучает возможности оптимального применения и преобразований одного типа землепользования в другой с учетом ограничений на ресурсы, т.е. землю, воду, а также нормы использования окружающей среды, эмиссии парниковых газов и т.д. Условия функционирования СЗП ограничены заданными в явном виде ограничениями на безопасное снабжение продовольствием, биоэнергией, водой, а также эффективностью и потенциалами преобразований одного типа землепользования в другой. Основные параметры модели описаны в [7].

Детерминированную ГЛОБИОМ можно переформулировать в задачу линейного программирования (оптимизации). Целевая функция ГЛОБИОМ максимизирует общее благосостояние потребителей и производителей, удовлетворяя нормам продовольственного, энергетического и водного снабжения при ограничениях на ресурсы, а также при технологических и политических ограничениях. Цены и торговые потоки вычисляются для всех стран мира, которые для удобства представления агрегируются в 30 крупных регионов. Спрос на продукты подсчитывается эндогенно с учетом цен и соответствующих эластичностей спроса, в то время как производство (предложение) определяется детальными географически заданными функциями Леонтьева. Производство товаров осуществляется в трех основных секторах землепользования: сельское и лесное хозяйство, а также тер-

ритория, пригодная для краткосрочного изготовления древесины. Система ГЛОБИОМ использует результаты EPIC-модели (The Environmental Policy Integrated Model [13]) относительно урожайности 20 основных сельскохозяйственных культур, занимающих в соответствии с данными FAO [14] приблизительно 80% мировых пахотных земель.

Детерминированная ГЛОБИОМ не учитывает рисков. Модель предполагает среднюю урожайность, что равносильно исследованию только одного сценария возможного развития систем. Однако усреднение параметров может привести к некорректным решениям и экономическим потерям, связанным с их внедрением.

**Индукцированные системные риски.** Робастность решений обеспечивается, в первую очередь, двухэтапной структурой стохастической оптимизации [15], включающей, как и в приведенном далее примере, долгосрочные стратегические (упреждающие) решения первого этапа до поступления точной информации о случайных параметрах и оперативные (адаптивные) решения второго этапа, позволяющие корректировать решения первого этапа после получения информации о неопределенностях. Робастность также обеспечивается правильным учетом зависимостей между неопределенностями и решениями, адекватными множествами возможных решений и показателями функционирования систем, например, нормами продовольственной безопасности, снабжения водой и биоэнергией [16].

Рассмотрим пример стилизованного фрагмента ГЛОБИОМ (безопасность снабжения биотопливом). Покажем происхождение системных рисков на примере простой, на первый взгляд, модели двух производителей:  $i = 1, 2$ , кооперирующихся на рынке биотоплива, производимого из кукурузы и пшеницы с целью удовлетворить неэластичный спрос  $d$ . Во многих странах кукуруза широко используется для производства биоэтанола. Объясняется это относительно низкими затратами и высокой урожайностью культуры. В качестве альтернативы биоэтанол можно производить из пшеницы, например, когда в силу погодных условий урожай кукурузы ниже ожидаемого. Пусть  $x_i$  — уровень производства биоэтанола из  $i$ -й культуры, а  $c_i$  — соответствующие затраты. В случае недопроизводства можно закупить  $y$  единиц недостающего биотоплива по цене  $b$ . Модель предполагает кооперацию между производителями, при этом каждый из них способен изготовить  $d$  единиц необходимого продукта. Пусть наиболее эффективным является первый производитель:  $c_1 < c_2 < b$ , т.е. использующий кукурузу. При планировании без учета неопределенностей, с использованием средних показателей урожайности культур и при игнорировании возможных нестабильностей этих показателей можно сформулировать детерминированную модель как задачу минимизации общих затрат

$$c_1x_1 + c_2x_2 \tag{1}$$

при ограничениях на безопасность производства биотоплива

$$x_1 + x_2 + y \geq d, \quad x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0, \quad y \geq 0. \tag{2}$$

Оптимальное вырожденное решение  $x_1^* = d, x_2^* = 0, y^* = 0$  не обеспечивает диверсификации производителей, а предлагает сконцентрировать все производство биоэтанола в руках более эффективного производителя. Рассмотрим реальную ситуацию, предполагая изменчивость урожайности культур, например, вследствие погодных условий. Тогда (2) преобразуется в ограничение

$$a_1(\omega)x_1 + a_2(\omega)x_2 + y(\omega) \geq d(\omega) \tag{3}$$

для всех возможных сценариев (событий)  $\omega$ , где  $a_1(\omega), a_2(\omega)$  — случайные возмущения производства  $x_1, x_2$ , вызванные событиями  $\omega$ , например погодными условиями:  $0 \leq a_i(\omega) \leq 1, i = 1, 2$ . Решения о планировании объема производства и его распределении между производителями  $x_1, x_2$  принимаются на первом этапе до того, как обнаружатся возмущения  $a_1(\omega), a_2(\omega)$ . Если в сценарии  $\omega$  производство  $a_1(\omega)x_1 + a_2(\omega)x_2$  не покрывает спроса  $d(\omega)$ , недостающую продукцию  $y(\omega) = d(\omega) - a_1(\omega)x_1 - a_2(\omega)x_2$  необходимо закупить на

рынке на втором этапе планирования. Модель двухэтапного планирования стратегических (предупреждающих)  $x_1, x_2$  и оперативных (адаптивных)  $y(\omega)$  решений критически важна для долгосрочного устойчивого обеспечения ПЭВБ. Эти решения удовлетворяют ограничениям безопасности (3) во всех сценариях  $\omega$ . С учетом рисков модель (1), (2) формулируется как задача стохастического программирования (оптимизации): минимизировать затраты

$$c_1x_1 + c_2x_2 + bEy(\omega) \quad (4)$$

при ограничениях на безопасность производства во всех сценариях  $\omega$ . В этом примере оперативные решения второго этапа можно найти аналитически как  $y(x, \omega) = \max \{0, d(\omega) - a_1(\omega)x_1 - x_2\}$ . Управление безопасностью осуществляется стратегическими решениями  $x_1$  и  $x_2$  минимаксной задачи стохастической оптимизации: минимизировать

$$F(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + bE \max \{0, d(\omega) - a_1(\omega)x_1 - a_2(\omega)x_2\}, \quad (5)$$

где  $E \max \{0, d(\omega) - a_1(\omega)x_1 - a_2(\omega)x_2\}$  определяет ожидаемую величину непокрытого спроса и характеризует системную уязвимость производства при  $x_1, x_2$ . Чтобы показать, что робастные решения  $x_1^*, x_2^*$  удовлетворяют квантильным ограничениям, индуцированным зависимостями между неопределенностями  $a_1(\omega), a_2(\omega)$ , решениями  $x = (x_1, x_2)$ , требованиями безопасности (3) и функциями затрат, предположим, что только первый более эффективный производитель (из кукурузы) подвержен рискам, т.е.  $a_2 = 1$ . Однако хотя и менее эффективный, второй производитель (из пшеницы) будет играть ключевую роль в осуществлении бесперебойных поставок продукта на рынок. Предположим, что функция  $F(x)$  имеет непрерывные производные, т.е. функция распределений  $a_1(\omega)$  имеет непрерывные плотности. Это предположение позволяет избежать более трудоемких рассуждений негладкой стохастической оптимизации [17, 18]. Отметим, что оптимальные положительные решения  $x_1^* > 0, x_2^* > 0$  существуют в случае, когда  $F_{x_1}(0,0) = c_1 - bEa_1, F_{x_2}(0,0) = c_2 - b$  отрицательны. Однако менее эффективный производитель биотоплива должен участвовать в производственном процессе независимо ни от чего, поскольку всегда выполняется  $c_2 - b < 0$ . Эффективному производителю невыгодно участвовать в производстве, когда  $c_1 - bEa_1 > 0$ , т.е. в этом случае весь спрос удовлетворяется только вторым производителем  $c_2 > c_1$ . Оба производителя активны, лишь когда  $c_1 - bEa_1 < 0$ . Из рассуждений следует, что менее эффективный производитель стабилизирует поставки на рынок. Часть поставок этого производителя на рынок можно определить следующим образом. Используя условие оптимальности  $F_{x_2} = 0$  для стохастических минимаксных задач, оптимальный уровень производства второго (не подверженного рискам) производителя можно определить вероятностным ограничением [17–19], характеризующим критический квантиль уровня безопасности

$$P(d(\omega) \geq a_1(\omega)x_1^* + x_2^*) = c_2 / b. \quad (6)$$

Таким образом, часть производства второго производителя определяется функцией распределения вероятностей случайного параметра  $a_1$ , описывающей возмущения первого эффективного производителя. Хотя второй производитель и не подвержен рискам в явном виде, его индуцированные риски задаются формулой (6) посредством системных зависимостей, определяемых всей структурой модели, спроса  $d(\omega)$ , возмущения  $a_1(\omega)$ , затрат  $c_2, b$  и ограничения на уровень безопасности (3). Эти риски могут регулироваться системными параметрами на локальном ( $c_1, c_2$ ) и глобальном ( $b, d$ ) уровнях. В инженерных и финансовых приложениях, а также в страховом бизнесе ограничения (6) известны как вероятностные, задающие уровень безопасности бизнеса, так называемые Value-at-Risk (VaR) ограничения, имеющие также прямое отношение к мерам рисков типа Условная Value-at-Risk (CVaR) [20].

**Общая модель.** Сформулируем аналогичную (3), (4) стохастическую модель двухэтапного стохастического программирования. Цель стохастической ГЛОБИОМ заключается в системном исследовании согласованных робастных решений с учетом глобальной диверсификации распределения земли между СЗП, размещения и уровня производства, торговых потоков, объемов хранения продуктов. Эти решения должны обеспечивать робастность балансов между производством и спросом при неопределенной урожайности.

В стохастической ГЛОБИОМ изменчивость урожайности вызывает системные зависимые риски не только потребителей и производителей в отдельно взятом регионе, они также влияют на другие регионы через национальные и международные рынки, приводят к нестабильности торговли и цен. Аналогично модели (3), (4) стохастическая ГЛОБИОМ включает решения двух типов: принимающиеся до обнаружения неопределенностей (обозначим их вектором  $x$  и назовем долгосрочными стратегическими решениями первого этапа) и принимающиеся после получения информации о неопределенных параметрах (обозначим их вектором  $y(\omega)$  и назовем оперативными решениями второго этапа). Эти решения включают объем торговых потоков между странами, а также решения о запасах. Таким образом, в условиях неопределенностей стратегические решения первого этапа можно откорректировать оперативными решениями второго этапа (после получения дополнительной информации).

Динамика в стохастической модели ГЛОБИОМ аналогична общей идее, описанной в [7]. В каждом интервале времени  $t = 0, 1, 2, \dots, T$  социальное планирование (social planner) стремится улучшить ожидаемое общее благосостояние стран, задаваемое функцией благосостояния  $f(x, y(\omega), t, \omega)$ , т.е. математическое ожидание  $E f$  или некоторый квантиль, например медиану, если  $f$  имеет отличный от нормального закон распределения. В каждом интервале времени  $t$  находится робастное решение, определяемое парой:  $x = x(t)$ ,  $y(\omega) = y(x, \omega)$ ; подсчитываются параметры, включая ресурсы полученных новых СЗП, новый спрос, запасы, торговые потоки и т.д.; определяется новое робастное решение для  $t + 1$ . Анализ подобного типа рекуррентного процесса требует особого внимания и в настоящей статье не приведен. В общем виде он представлен как процесс нестационарной стохастической оптимизации [17, 21]. Далее рассмотрим только его основной этап — максимизацию функции благосостояния в произвольном интервале времени, после чего процедура максимизации повторяется для следующего интервала времени, соответственно изменяется структура данных систем. В этом случае максимизация может продолжаться не до полной сходимости, т.е. при каждом  $t$  в некотором смысле происходит преследование «убегающей цели». Такие процессы не рассмотрены в настоящей статье.

Стохастическая ГЛОБИОМ формулируется как двухэтапная задача стохастического программирования [15, 17, 22]: максимизировать по  $(x, y(\omega))$  функцию цели  $E_{\omega} f(x, y(\omega), \omega) = \int f(x, y(\omega), \omega) P(d\omega)$  при ограничениях  $g_i(x, y(\omega), \omega) \leq 0$ ,  $i = \overline{1, m}$ , где целевая функция  $F(x) = E_{\omega} f(x, y, \omega)$  представляет собой ожидаемое общее благосостояние (или чистые доходы), функции  $g_i(x, y(\omega), \omega)$  определяют различные показатели функционирования систем, а  $\omega$  задает сценарии неопределенностей. Функции  $f$  и  $g_i$  детально описаны в [7].

**Замечание** (дискретное множество сценариев). В практических численных приложениях приведенная далее модель часто формулируется с использованием конечного набора явно или неявно заданных сценариев  $\omega^s$ ,  $s = 1, \dots, S$ : максимизировать

$$\sum_{s=1}^S p_s f(x, y^s, \omega^s) \quad (7)$$

при ограничениях

$$g_i(x, y^s, \omega^s) \leq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad s = \overline{1, S}, \quad (8)$$

где  $\omega^1, \omega^2, \dots, \omega^S$  — сценарии (реализации) случайного вектора  $\omega$ , полученные в результате наблюдений или с помощью так называемого генератора сценариев, например, сценарии урожайности при различных климатических параметрах можно получить с помощью EPIC-модели, а  $y^s$  обозначает зависящие от сценариев решения второго этапа  $y(\omega^s)$ . При отсутствии какой-либо информации вероятности  $p_s, s=1, S$ , можно положить равномерно распределенными  $p_s=1/S$  или заданными любым допустимым множеством, например,  $p_1 \leq p_2, p_2 + p_5 \geq p_3$  и т.д.

**Критерии безопасности.** Модель (7), (8) предполагает, что в допустимом множестве существуют стратегические и оперативные решения  $(x, y(\omega))$ , удовлетворяющие ограничениям (8) при всех сценариях  $s$ . Экстремальные события могут воздействовать на большие территории и влиять на структуру систем, т.е. на функции  $f$  и  $g$ , определяющие допустимость, эффективность и робастность решений. Например, засуха влияет на урожайность и ограничивает торговые потоки. Внезапное повышение цен или запреты на торговлю приводят к необходимости организовать дополнительные кредиты, страхование или предусмотреть хранилища для запасов зерна впрок. Таким образом, ограничения модели (7), (8) выполняются при всех допустимых решениях  $(x, y^s, s=1, \dots, S)$  только с некоторой заданной вероятностью. Отсутствие безопасности характеризуется вспомогательными переменными  $z_{is} \geq 0$ , удовлетворяющими неравенствам

$$g_i(x, y^s, \omega^s) \leq z_{is}, \quad (9)$$

где  $z_{is}$  интерпретируются как дополнительные решения (запасы, кредиты, страховки и др.), повышающие безопасность в экстренных ситуациях. Решения  $z_{is}$  можно также рассматривать как индикаторы небезопасности (ненадежности).

Рассмотрим максимизацию функции

$$\sum_{s=1}^S p_s f(x, y^s, \omega^s) - \sum_{s=1}^S p_s (\pi_s, z_s), \quad (10)$$

где  $\pi_s = (\pi_{1s}, \dots, \pi_{ms}) \geq 0, z_s = (z_{1s}, \dots, z_{ms}), s=1, \dots, S$ , являются так называемыми весами, штрафами, страховыми платежами, ценой кредита и т.п.,  $(\cdot, \cdot)$  обозначает скалярное произведение векторов. Множество всех  $x, y^s, s=1, \dots, S$ , удовлетворяющих уравнениям (9) при  $z_s=0, s=1, \dots, S$ , можно назвать множеством безопасности. Если множество оптимальных решений  $x^*, y_s^*, z_s^*, s=1, \dots, S$ , модели (9), (10) содержит отличные от нуля  $z_s^* \neq 0$ , то условия (9) выполняются лишь для некоторых сценариев. Критерий (10) обеспечивает компромисс между социальным благосостоянием и выполнением всех требований безопасности. Большие веса  $\pi_s$  устанавливают более строгие требования безопасности.

Ограничения на безопасность часто задаются с помощью вероятностных ограничений, аналогичных хорошо известным в инженерных приложениях ограничениям надежности или в страховом бизнесе — ограничениям на вероятность банкротства

$$P\{\omega: g_i(x, y(\omega), \omega) - g_i^* \geq 0\} \leq \gamma_i, \quad (11)$$

где  $g_i^*, \gamma_i$  задают желаемый уровень безопасности, например нормы питания, потребления энергии, водоснабжения, нормы окружающей среды. Эти ограничения описываются невыпуклыми и, возможно, разрывными функциями, требующими развития специальных методов оптимизации даже в случае линейных по  $(x, y(\omega))$  функций  $g_i$ . Поэтому вероятностные ограничения (11) часто заменяются (например, см. [23]) следующими функциями риска:

$$E \min\{0, g_i(x, y(\omega), \omega) - g_i^*\}, \quad (12)$$

характеризующими нехватку мощностей производства (дефициты). В этом

случае вектор  $z_s = (z_{1s}, \dots, z_{ms})$  определяется как  $z_{is} = \min \{0, g_i(x, y^s, \omega^s) - g_i^*\}$ , а задача (9), (10) переформулируется как максимизация негладкой функции

$$\sum_{s=1}^S p_s f(x, y^s, \omega^s) - \sum_{i=1}^m \sum_{s=1}^S p_s \pi_{is} \min \{0, g_i(x, y^s, \omega^s) - g_i^*\} \quad (13)$$

или эквивалентно как максимизация

$$\sum_{s=1}^S p_s f(x, y^s, \omega^s) - \sum_{i=1}^m \sum_{s=1}^S p_s \pi_{is} z_{is} \quad (14)$$

при ограничениях

$$z_{is} \geq g_i(x, y^s, \omega^s) - g_i^*, \quad z_{is} \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad s = \overline{1, S}. \quad (15)$$

В частности, в [23] показано, что решения этой задачи аппроксимируют решения задачи с вероятностными ограничениями на безопасность (11). Для практических приложений важно, что такой подход преобразует задачу стохастической оптимизации с разрывными ограничениями (11) в линейную задачу (14), (15). Еще один важный подход использует меры рисков типа Условная VaR (Value-at-Risk) или CVaR, где значения  $g_i^*$  определяются эндогенно квантилем  $g_i$ .

**Условная Value-at-Risk.** Квантильные критерии играют критическую роль в задачах управления катастрофическими рисками, поскольку применение таких показателей, как среднее, дисперсия, корреляция, а также методов наименьших квадратов не обеспечивают робастности решений при отсутствии нормальных распределений. Приведем некоторые важные определения, характеризующие квантильные функции рисков. Для случайной величины  $v$  ее функция распределения вероятностей определяется как  $H(h) = \text{Pr}[v \leq h]$ . Квантиль  $\beta$  функции распределения  $v$  — это минимальное значение  $h = q_\beta$ , удовлетворяющее неравенству  $H(h) \geq \beta$ . Например, медиана нормально распределенной случайной величины  $v$  есть квантиль при  $\beta = 1/2$  и равна ее среднему значению. Условная VaR, обозначаемая как CVaR, — это среднее значение  $\bar{v}_\beta$  случайной величины  $v$  при условии, что  $v \geq q_\beta$ , т.е. находящееся в хвосте распределения. В общем случае дискретных распределений  $p_1, \dots, p_S$  величина  $\bar{v}_\beta$  определяется как оптимальное значение

$$\bar{v}_\beta = \min_u \left\{ \frac{1}{\beta} \sum_{s=1}^S v_s u_s : \sum_{s=1}^S u_s = \beta, \quad 0 \leq u_s \leq p_s, \quad s = \overline{1, S} \right\}. \quad (16)$$

Поскольку индикаторы безопасности  $v_s = (\pi_s, z_s)$  зависят от решений  $x, y, z$ , чтобы в (16) избежать переумножения  $x, y, z, u$ , для подсчета  $\bar{v}_\beta$  целесообразно перейти [24] к двойственной задаче:

$$\begin{aligned} \bar{v}_\beta &= \max_{\delta, \varphi} \left\{ \delta - \frac{1}{\beta} \sum_{s=1}^S p_s \varphi_s : v_s \geq \delta - \varphi_s, \quad \varphi_s \geq 0, \quad s = \overline{1, S} \right\} = \\ &= \max_{\delta} \left[ \delta - \frac{1}{\beta} E \max \{0, \delta - v_s\} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Используя функцию (13), стохастическую ГЛОБИОМ (14), (15) можно переформулировать как задачу максимизации

$$\sum_{s=1}^S p_s f(x, y^s, \omega^s) - \left( \delta - \frac{1}{\beta} \sum_{s=1}^S p_s \varphi_s \right) \quad (18)$$

при ограничениях

$$(\pi_s, z_s) \geq \delta - \varphi_s, \quad (19)$$

$$g(x, y^s, \omega^s) \leq z_s, \quad (20)$$

которая требует введения новых переменных  $z_s, \delta, \varphi_s$ , где векторы  $z_s$  определяют допустимые управления дефицитами, а переменные  $\delta, \varphi_s$  задают необходимый уровень квантилей.

#### ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Рассмотрим некоторые приложения стохастической ГЛОБИОМ, позволяющей провести системный анализ взаимного влияния стран на их продовольственную, энергетическую и водную безопасность. В модели предполагается, что урожайность сельскохозяйственных культур может быть случайной, заранее непредсказуемой величиной, т.е. неизвестной до принятия стратегических решений. Статистика колебаний урожайности была проанализирована по данным ФАО об урожайности основных культур в период с 1960 по 2012 годы. На рис. 1 приведены показатели урожайности пшеницы для основных стран-производителей. Погодные условия по-разному влияют на урожайность в различных странах. Например, Франция и Китай характеризуются более высоким уровнем и меньшими колебаниями урожайности. В России, Украине, Казахстане — урожайность ниже, а колебания выше.

Недавнее повышение цен и рост их нестабильности на международных рынках вызваны несогласованными политиками планирования СЗП, игнорирующими сложные системные зависимости и риски. Так, например, вследствие колебаний урожайности кукурузы и повышенного спроса на эту культуру как на основной источник биотоплива за последние несколько лет цена на кукурузу возросла почти вдвое, что обусловило рост цен на такие сельскохозяйственные культуры, как соя и пшеница, а это в свою очередь вызвало рост цен на бобовые и мясо. Чтобы увеличить производство кукурузы для биотоплива, многие страны расширяют пахотные площади или забирают землю, отведенную для других культур, под дополнительные посевы кукурузы [25].

Стохастическая ГЛОБИОМ (14), (15) позволяет исследовать робастные решения, способствующие безопасному снабжению продуктами питания, биотопливом, удовлетворению норм использования окружающей среды и водных ресурсов. Решения стохастической ГЛОБИОМ обеспечивают стабильность СЗП и ПЭВБ с помощью правильной диверсификации производства и торговли между всеми странами (регионами) мира и производственными системами. В стохастической ГЛОБИОМ распределение земли между секторами землепользования является долгосрочным стратегическим решением. Сельскохозяйственная земля подразделяется на угодья различной интенсивности хозяйствования, например мелкие и крупные фермерские хозяйства, орошаемые земли и т.п. Решения о торговле и хранении продукции являются оперативными и предназначены для коррекции стратегических решений в случае каждого наблюдаемого сценария.

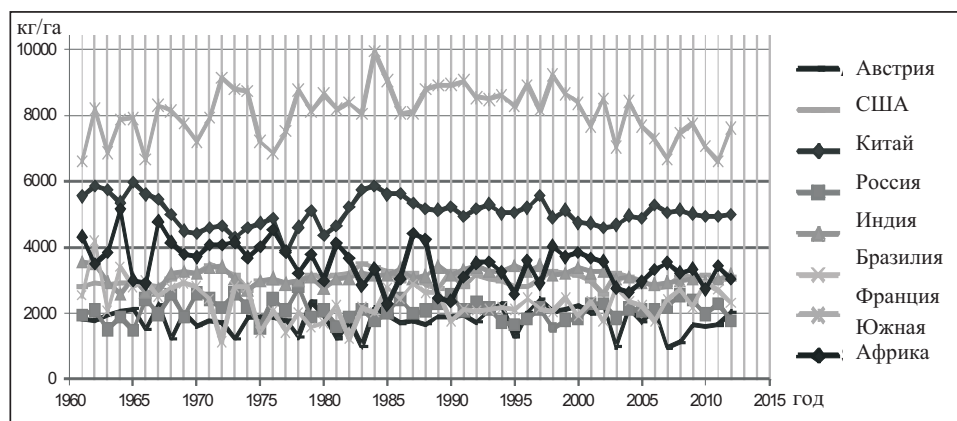


Рис. 1. Динамика урожайности пшеницы для основных стран-производителей (1960–2012 гг.)



Ограничения на ПЭВБ приводят к компромиссу между желанием производителей (стран, регионов) максимизировать доходы и стремлением уменьшить воздействие рисков, которые могут подорвать безопасность. Однако управление ограничениями (15) только с помощью решений о распределении земли между СЗП и о торговле может оказаться слишком дорогостоящим вследствие таких стратегических решений, как, например, преобразование одного типа землепользования в другой, увеличение площадей орошаемых земель. Проведенные эксперименты показывают, что в случае редких событий — обширных засух, целесообразно организовать зернохранилища, позволяющие избежать инвестиций в дорогостоящие стратегические проекты, которые к тому же могут оказаться необратимыми (пример Аральского моря). Правильно рассчитанная комбинация стратегических решений о распределении земли и оперативных решений о торговле и заблаговременном хранении уменьшает экономические потери, связанные с перераспределением и компенсацией рисков, и позволяет удовлетворить потребности безопасности при более низких ценах. Это подтверждают следующие решения ГЛОБИОМ:

1) решения о распределении земли между СЗП и о торговле, оптимальные и удовлетворяющие ограничениям безопасности (15) в случае сценария средней урожайности;

2) множество решений о распределении земли между СЗП и о торговле, каждое из которых оптимально и удовлетворяет ограничениям безопасности (15) в случае соответствующего сценария урожайности;

3) робастные решения о распределении земли между СЗП и о торговле, удовлетворяющие ограничениям безопасности (15) для всех возможных сценариев урожайности;

4) робастные решения о распределении земли между СЗП, торговле и хранении, удовлетворяющие ограничениям безопасности (15) для всех возможных сценариев урожайности.

Стохастическая ГЛОБИОМ вычисляет цены на товары эндогенным образом. Затраты, связанные с хранением товаров, заданы параметрами  $\pi_s$  в (14). Численные расчеты показывают, что определенные согласно п. 4 робастные объемы хранилищ уменьшают непостоянство рыночных цен, позволяют стабилизировать поставки и выполнение ограничений на безопасность по ценам, ниже, чем в случае п. 3. Детерминированные решения в случаях пп. 1 и 2 не позволяют долгосрочного стратегического планирования, потому что модель находит решения, зависящие от сценариев случайных величин. Эти решения не учитывают возможности дополнительных оперативных затрат на коррекцию стратегических решений, если реализуется другой сценарий. Таким образом, решения пп. 1 и 2 не учитывают возможных балансов и компромиссов между стратегическими и оперативными решениями. Внедрение таких несогласованных решений создает угрозу системных рисков, повышает уязвимость систем, приводит к нестабильности и увеличению цен, способствует несоответствию балансов спроса и предложения. Подходы пп. 3 и 4 находят решения, робастные относительно всех сценариев неопределенностей, таким образом, системы остаются устойчивыми к различным рискам, что приводит к низким ценам на товары.

Стохастическую ГЛОБИОМ можно использовать для изучения и устранения недостатков в СЗП. Например, рассмотрим производство риса в Японии, где одна из самых высоких цен на эту культуру. Это объясняется ограниченным производством и высоким спросом. В Японии закупки риса ограничены из соображений самодостаточности и продовольственной безопасности. При отсутствии запасов и импорта любое событие, уменьшающее урожайность риса, автоматически приводит к увеличению цены. Например, в 2003 г. урожай риса был очень низким. Так называемый индекс товара для риса составлял приблизительно 90 единиц ([http://www.canon-igs.org/en/column/macroeconomics/20131001\\_2136.html](http://www.canon-igs.org/en/column/macroeconomics/20131001_2136.html)). В результате, цены на продукт поднялись на 30% по сравнению с 2002 г., что воспроизводится стохастической ГЛОБИОМ.

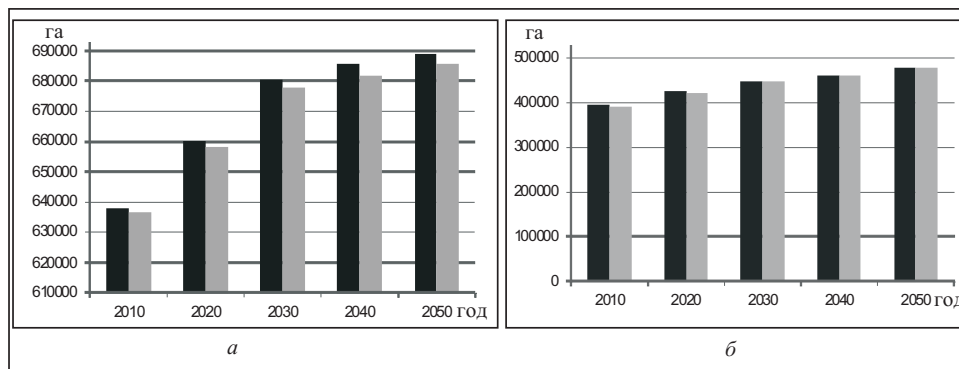


Рис. 2. График изменения площадей земли, отведенной под орошение (а) и интенсивные хозяйства (б)

Аналогичные выводы можно сделать для всех стран с недиверсифицированным производством. Например, в Украине интенсивное производство рапса и других культур для биотоплива привело к концентрации сельскохозяйственных угодий под рапс (масличные культуры), отсутствию земель для внутреннего производства продуктов питания, достаточного для обеспечения продовольственной безопасности. Расчеты показывают, что в неблагоприятные годы, особенно когда многие регионы имеют низкую урожайность, такая специализация на производстве нескольких культур приводит к резкому повышению цен на все продукты питания, т.е. отсутствию продовольственной безопасности. Для сценариев неблагоприятных погодных условий и низкой урожайности целесообразно предусмотреть зернохранилища. Правильно рассчитанные объемы заготовленных впрок товаров помогут уровнять балансы типа производство–спрос. Так, количество хранилищ, предусмотренное согласно п. 4, сокращает возможные перебои с поставками товаров и их потреблением, а также снижает цены на импортируемые продукты. Отметим, что переход от п. 3 к п. 4 снижает цены только в критических странах и регионах. Наличие хранилища зерна может помочь избежать дорогих инвестиций, например, в оросительные системы.

На рис. 2 приведен график изменения площадей земли, отведенных под орошаемое земледелие и интенсивное хозяйство, в соответствии с п. 3 (черный цвет) и п. 4 (серый цвет) в период с 2010 по 2050 год. Возможность создания запасов в случае п. 4 освобождает 3545 тыс. га орошаемых земель в мире по сравнению со случаем п. 3. Этого можно достичь, организовав относительно небольшие хранилища. Расчеты также показывают распределение вероятностей запасов зерна с учетом возможных колебаний урожайности. В отличие от статистических данных о зерновых запасах стохастическая ГЛОБИОМ подсчитывает робастные резервы, которые позволяют избежать резкого подъема цен, как это было в Японии. Наличие хранилищ в случае п. 4 способствует также уменьшению перепроизводства, необходимого для обеспечения продовольственной безопасности в случае п. 3.

Отметим, что рапс и подсолнечник являются важным сырьем для производства биотоплив. Принятие высоких показателей производства биотоплив вместе с другими ограничениями на безопасность увеличивают цены не только на рапс и подсолнечник, а и на товары, используемые непосредственно для потребления. Уменьшив объем необходимого производства биотоплив, например до размера хранилищ, можно снизить цены на все сельскохозяйственные товары. Робастное планирование в соответствии с пп. 3 и 4 при дополнительных ограничениях на безопасность требует намного больше земли, чем в случае п. 1. Однако количество земли остается в рамках, определяемых сценарным анализом п. 2. Затраты, связанные с робастными решениями в случаях пп. 3 и 4, в явном виде учитывающих риски, существенно меньше затрат, взятых из расчетов в случаях пп. 1 и 2 при решении стохастической ГЛОБИОМ.

Работа над созданием стохастической модели ГЛОБИОМ проводится в рамках ЕС-проектов ECONADAPT и AGRICISTRADe, 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.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fitzherbert E.B., Struebig M.J., Morel A., Danielsen F., Bruhl C.A., Donald, P.F., and Phalan B. How will oil palm expansion affect biodiversity? // *Trends in Ecology & Evolution*. — 2008. — **23**. — P. 538–545.
2. Butler R., Koh L. P., & Ghazoul J. REDD in the red: palm oil could undermine carbon payment schemes // *Conservation Letters*. — 2009. — **2**, N 2. — P. 67–73. doi:10.1111/j.1755-263X.2009.00047.x.
3. Koh L. P., Levang P., Ghazoul J. Designer landscapes for sustainable biofuels // *Trends in Ecology & Evolution*. — 2009. — **24**, N 8. — P. 431–448. doi:10.1016/j.tree.2009.03.012.
4. Wicke B., Sikkema R., Dornburg V., Faaij A. Exploring land use changes and the role of palm oil production in Indonesia and Malaysia // *Land Use Policy*. — 2011. — **28**, N 1. — P. 193–206. doi:10.1016/j.landusepol.2010.06.001.
5. Zagorodny A.G., Yermoliev Y.M. Integrated modeling of food, energy and water security for sustainable social, economic and environmental developments. — Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine, 2013. — 355 p.
6. Ermoliev Y., von Winterfeldt D. Systemic risk and security management / Y. Ermoliev, M. Makowski, K. Marti (Eds.), *Managing Safety of Heterogeneous Systems // Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. — Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 2012, — P. 19–49.
7. Havlik P., Schneider U.A., Schmid E., Boettcher H., Fritz S., Skalsky R., Aoki K., de Cara S., Kraxner G., Leduc S., McCallum I., Mosnier A., Sauer T., and Obersteiner M. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets // *Energ. Policy*. — 2011. — **39**. — P. 5690–5702.
8. Ermoliev Y., Hordijk L. Global changes: Facets of robust decisions / K. Marti., Y. Ermoliev, M. Makowski, G. Pflug (Eds.) // *Coping with Uncertainty: Modeling and Policy Iss.* — Berlin: Springer-Verlag, 2003.
9. Veldkamp A., Fresco L.O. CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological modelling*. — 1996. — **91**. — P. 231–248.
10. Verburg P.H., Chen Y.Q., Veldkamp A. Spatial explorations of land-use change and grain production in China // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. — 2000. — **82**. — P. 333–354.
11. Gustafson R.L. Implications of recent research on optimal storage rules // *J. Farm Econ*. — 1958. — **38**. — P. 290–300.
12. Deaton A., Laroque G. Competitive storage and commodity price dynamics // *J. Polit. Econ*. — 1996. — **104**, N 5. — P. 896–923.
13. Liu J., Williams J.R., Zehnder A.J.B., Yang H. GEPIC — modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale // *Agric. Syst.* — 2007. — **94**. — P. 478–493. doi:10.1016/j.agsy.2006.11.019
14. FAO, 2009. The state of food insecurity in the World. Rome.
15. Ermoliev Y., Wets R.J.-B. Numerical techniques for stochastic optimization. — Heidelberg: Springer-Verlag, 1988.
16. Borodina O., Borodina E., Ermolieva T., Ermoliev Y., Fischer G., Makowski M., van Velthuis H. Sustainable agriculture, food security, and socio-economic risks in Ukraine / Y. Ermoliev, M. Makowski, K. Marti (Eds.), *Managing safety of heterogeneous systems // Lecture Notes in Economics and Math. Syst.* — Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. — P. 169–185.
17. Ермольев Ю. М. Методы стохастического программирования. — М.: Наука, 1976. — 240 с.
18. Ermoliev, Y., Leonardi G. Some proposals for stochastic facility location models // *Math. Modelling*. — 1982. — **3**, № 5. — P. 407–420.
19. Ермольев Ю. М., Ястремский А. И. Стохастические модели и методы в экономическом планировании. — М.: Наука, 1979. — 256 с.
20. Rockafellar R. T., Uryasev S. Optimization of conditional value-at-risk // *J. Risk*. — 2000. — **2**. — P. 21–41.
21. Ermoliev Y. Two-stage stochastic programming: Quasigradient method / P.M. Pardalos (Ed.), *Encyclopedia of Optimization*. — New York: Springer Verlag, 2009. — P. 3955–3959.
22. Birge J. R., Louveaux F. Introduction to stochastic programming. — Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.
23. Ermoliev Y.M., Ermolieva T.Y., MacDonald G.J., Norikin V.I. Stochastic optimization of insurance portfolios for managing exposure to catastrophic risks // *Ann. Oper. Res.* — 2000. — **99**. — P. 207–225.
24. Koenker R., Bassett G. Regression quantiles // *Econometrica*. — 1978. — **46**. — P. 33–50.
25. Notes to editors: Against the Grain: Land grabbing for biofuels must stop (available at <http://www.grain.org/article/entries/4653-land-grabbing-for-biofuels-must-stop>).

Поступила 17.09.2014