

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА УГЛЯ С УЧЕТОМ БЕЗОПАСНОСТИ СНАБЖЕНИЯ ЭНЕРГИЕЙ, ВОДОЙ И ПРОДОВОЛЬСТВИЕМ В КИТАЕ

Аннотация. Представлена разработка пространственной модели для планирования стабильного развития энергетической и сельскохозяйственной промышленности в условиях обострившейся конкуренции за ограниченные земельные и водные ресурсы. Численные эксперименты подтверждают значимость природных ресурсов, как факторов, определяющих безопасное снабжение энергией и продуктами питания, а также важность системного анализа взаимозависимости промышленности и ресурсов.

Ключевые слова: энергетическая, водная и продовольственная безопасность, интегрированный системный анализ, земельные ресурсы, Китай.

ВВЕДЕНИЕ

Основной составляющей энергетической безопасности Китая является добыча и потребление угля. Однако, значительно способствуя быстрому развитию экономики, масштабная добыча и переработка угля наносят вред окружающей среде и здоровью людей, а также негативно влияют на сельское хозяйство и водообеспечение: интенсивно используются природные ресурсы общего пользования — земля и вода. Обеспечение условий бесперебойного снабжения энергией, чистой водой (водоснабжение) и сельскохозяйственной продукцией является основополагающим фактором, обуславливающим стабильное экономическое развитие страны.

Исследование этих вопросов вызывает интерес и находится в центре внимания многих ученых и политиков. Предполагается, что вследствие прироста населения и ускоренной урбанизации использование воды и земли в Китае увеличится. В настоящее время в Китае добывают и потребляют угля приблизительно столько, сколько в остальных странах мира вместе взятых. В 2013 г. уголь являлся основной составляющей (66 %) производства электроэнергии. Прогнозируется, что к 2020 г. эта часть уменьшится до 63 % и к 2040 г. — до 55 % в результате принятия мер для энергосбережения и охраны окружающей среды. Однако, по оценкам Национального статистического бюро Китая, в течение предстоящих 25 лет валовое производство угля увеличится более чем на 50 %. (Детальнее с данными и многочисленными ссылками на источники информации можно ознакомиться в [1].)

НЕГАТИВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В КИТАЕ

Интенсивное использование угля в Китае привело к многочисленным проблемам, связанным с загрязнением окружающей среды и, как следствие, к ухудшению здоровья и благосостояния населения. Высокое содержание серы в большинстве типов дабываемого в стране угля является причиной выбросов в атмосферу серного диоксида (SO_2). Это не только осложняет респираторные и сердечные заболевания, но и загрязняет водоемы, а также способствует опустыниванию территорий под воздействием кислотных дождей. Кроме

эмиссий SO_2 , в 2012 г. произошло три четверти эмиссий CO_2 вследствие интенсивного потребления (сжигания) угля [2]. По этим показателям Китай опережает даже США.

Ухудшение качества атмосферы — не единственная проблема угольной промышленности. Добыча угля уменьшает и существенно ухудшает качество земельных ресурсов и нарушает водообеспечение. В Китае 95 % угля добывается подземным способом. По оценкам экспертов, добыча каждого миллиона тонн угля приводит к оседанию 20 га поверхности земли. В настоящее время в стране приблизительно миллион гектаров осевшей земли, причем 70 тыс. га оседает ежегодно в результате работы предприятий угледобывающей промышленности. В Китае разрабатывают угольные месторождения приблизительно на 40 % всех сельскохозяйственных территорий. Извлеченная из угольных разрезов горная порода постепенно погребает под собой сельскохозяйственные угодья и лес. Так, в стране почти 15 тыс. га погребено под угольными отвалами (терриконами). За год промышленность производит примерно 150–200 млн т отходов дополнительно. Таким образом, сельскохозяйственным территориям наносится значительный урон.

В результате открытого и подземного способов добычи угля, эксплуатации обогатительных фабрик образуется большое количество твердых отходов, которые впоследствии можно использовать для нивелирования поверхности, а также в качестве строительного или возвращаемого в шахту закладочного материала. В Китае проживает приблизительно 21 % населения планеты и всего 9 % территорий пригодны для сельскохозяйственной деятельности, поэтому принимаются меры, предотвращающие дальнейшую деградацию земли, которая неизбежно приведет к кризису сельского хозяйства, перебоям в поставках продовольствия и к повышению цен на него.

В Китае уже появились первые признаки рисков дефицита продуктов питания. Так, за последние три года существенно уменьшилось внутреннее производство зерна; импорт кукурузы, пшеницы и риса примерно удвоился. Рост цен на продукты питания снижает благосостояние малоимущих [3]. В некоторых восточных и северо-восточных провинциях страны, где невелики запасы воды, масштабная добыча угля привела к водному кризису. Последний обусловил социальную напряженность, вызванную нехваткой воды для нужд населения и сельского хозяйства.

Размещение угледобывающих комплексов в районах с ограниченным водоснабжением еще больше обостряет ситуацию. В Китае 53 % месторождений угля находится в районах с критически низкими показателями запасов воды, а 30 % — в районах с ограниченными водными ресурсами. Многочисленные пользователи, т.е. предприятия угольной промышленности, сельского хозяйства, машиностроения, а также население, конкурируют за доступ к водным ресурсам. Неэффективное управление водными ресурсами может усугубить проблемы окружающей среды, производства сельскохозяйственной продукции, особенно в районах с ограниченным водоснабжением. Нарушение природного распределения и несогласованное использование водных ресурсов обусловили негативную экологическую обстановку во многих районах Китая. Причиной дефицита воды является также воздействие климата, т.е. изменение режимов осадков, температурных аномалий и т.д. Ограничения на поставку воды могут стать причиной сбоев в производстве электроэнергии, как это произошло в Техасе в 2011 г., когда засуха привела к перегрузкам в сети снабжения электроэнергией и повсеместного ее отключения (black-out) удалось избежать только с помощью введения ограничений на использование воды для крупных сельхозфермеров.

Правительственные постановления. Правительство Китая признает необходимость принятия строгих мер для решения проблем, связанных с угольной промышленностью. Так, установлен строгий лимит на эмиссии газов. В конце 2013 г. Министерство водных ресурсов издало закон об использовании воды в угольной промышленности, в соответствии с которым осуществляется контроль и мониторинг за использованием воды на угольных электростанциях. В июле 2014 г. были поданы рекомендации для оценки экологической ситуации на угледобывающих месторождениях с требованиями специального рассмотрения и утверждения (одобрения) проектов по использованию воды на нововведенных шахтах и угледобывающих комплексах. В это же время Национальное агентство по энергетике приняло порядок введения в действие так называемых уголь–газ и нефте–газ проектов, в соответствии с которым их утверждение и практическая ратификация возможны только после детального анализа водных ресурсов в местах размещения данных объектов и оценки потребностей в воде сельского хозяйства, населения, машиностроительной промышленности. Новые проекты внедряются при условии, что они не конкурируют с другими видами экономической деятельности в сфере использования водных ресурсов. В начале 2014 г. принято постановление правительства о приоритетах развития сельскохозяйственных территорий с целью обеспечить достаточное экологически чистое внутреннее производство зерновых культур.

Принятые законы и рекомендации обяжут предприятия угольной промышленности переоснащаться и проводить модернизацию, в первую очередь, для обеспечения эффективного использования природных ресурсов в целях безопасного снабжения энергией, водой и продовольствием.

Исследуемая проблема. В настоящее время еще не определены подходы к согласованному и системному внедрению на практике принятых резолюций о необходимости улучшения планирования распределения природных, в частности, водных ресурсов. Прежде всего это касается развития добычи угля (и соответственно производства электроэнергии и других конечных продуктов) наряду с обеспечением производства продуктов питания, а также поддержки качества и количества воды, достаточных для использования другими потребителями.

Общезвестно, что объекты угольной промышленности представляют определенную угрозу для окружающей среды ввиду выбросов в атмосферу вредных веществ [4, 5]. Однако недостаточно внимания уделяется проблемам использования природных ресурсов — деградации земли и запасов воды. Воздействия предприятий угольной промышленности на ресурсы земли и резервы воды рассмотрены в [6, 7]. Некоторые исследователи пытаются анализировать влияние производства биоэнергии на стабильность развития водоснабжающего, сельскохозяйственного и энергетического секторов и лишь немногие из них рассматривают природные ресурсы как факторы, ограничивающие развитие угольной промышленности [8]. С помощью ряда предлагаемых моделей можно исследовать только локальные процессы без учета национальных и международных политик и тенденций. В то же время агрегированные модели не способны учитывать локальных особенностей.

С помощью описанной далее модели можно проводить исследования для угледобывающих шахт или для общин и городов, имеющих угледобывающую промышленность. Выбор модели во многом определяется наличием данных. В настоящей статье исследования проводятся для крупных городов в префектурах провинции Шаньси. Модель можно расширить до стохастической динамической версии, позволяющей учитывать данные, полученные из более агрегированных глобальных моделей [9], о спросе и потреблении угля, а также о сельскохозяй-

ственных продуктах. В этом случае модель позволяет проводить пространственный анализ стабильности развития экономики согласно национальным и региональным планам развития энергетики, водоснабжения и обеспечения продовольствием, а также данным о развитии этих отраслей, полученным из агрегированных глобальных моделей типа стохастических MESSAGE [10] и GLOBIOM [11, 12].

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Предлагаемая модель имеет весьма общий характер и ее можно применять при интегрированном моделировании различных взаимозависимых систем при наличии ограниченных ресурсов, например для развития биоэнергетики с учетом ее влияния на производство продовольствия, водоснабжение, землепользование, рынок и окружающую среду.

Необходимость развития системной модели. В Китае осознают важность проблемы согласованного размещения водозависимых предприятий и контроля за их эффективным водоснабжением. Необходимость управления рисками, связанными с нехваткой воды и неэффективным водоснабжением, сформулирована в плане Министерства водных ресурсов Китая. Так, предлагается открывать новые и расширять старые угледобывающие предприятия с учетом индекса наличия воды. Планирование и принятие мер для угледобывающей промышленности, направленных на устойчивое долгосрочное использование природных ресурсов, требует системного анализа, позволяющего исключить возможность множественных негативных последствий, связанных с выполнением несогласованных решений. Далее сформулирована основная версия модели, которую можно расширить или преобразовать с учетом конкретных ситуаций. (Возможности учета неопределенностей, рисков и других нелинейных индикаторов и зависимостей в настоящей статье не рассматриваются.)

В предлагаемой модели предприятия угольной промышленности подразделяются согласно трем основным группам процессов: добыча, переработка и конверсия (превращение) в конечный вид энергии или продукта. Лицо, принимающее решение, минимизирует затраты, связанные со всеми процессами, включая затраты на транспортировку. Перевозки угля из мест добычи в места переработки и окончательной конверсии осуществляются по железной дороге, грузовыми судами, автомобилями и т.д. Сжиженный уголь транспортируют по трубопроводам. Ограничения на безопасное снабжение энергией, водой, продовольствием обуславливают внедрение новых и модернизацию старых технологий добычи, переработки и конверсии угля. Выбор технологий зависит от их эффективности, величины спроса на уголь, а также от локальных условий, характеризующихся наличием воды и земли. Например, на богатых месторождениях угля отсутствие воды препятствует внедрению такой обогащающей технологии, как влажная промывка. В этом случае модель может предложить компромисс, например сухую очистку (промывку), транспортировку угля в другое место обработки, где воды больше, и технологию без использования промывки. Для учета этих компромиссов предложенная в статье модель осуществляет пространственное моделирование.

Функция цели и ограничение безопасности. Модель учитывает множество технологий добычи, переработки, конверсии угля, как уже повсеместно используемых, так и находящихся на стадии испытания и разработки. В частности, предусмотрены и старые, и новые технологии, позволяющие снизить выбросы вредных веществ в атмосферу, а также технологии улавливания и хранения углерода (CO₂). Кроме того, модель включает параметры планирования размещения и уровня производства сельскохозяйственной продукции.

Примем следующие обозначения: t — процесс конверсии угля в конечный продукт, например электрическую энергию, кокс, тепло, газификацию и ликвидацию; k — сельскохозяйственные культуры (пшеница, кукуруза, соя и т.д.); j и m — пункты производства в исследуемом районе; x_{ijmt} — количество угля (в тоннах) типа i , добытого в пункте j , транспортированного в пункт m и конвертированного по технологии t ; y_{kjm} — количество (в тоннах) сельскохозяйственной культуры типа k , произведенной в пункте j и экспортированной в пункт m . В модели предполагается возможность экспорта и импорта за пределы заданного района. Цель оптимального планирования состоит в выборе объема добычи угля типа i , технологий конверсии t и сельскохозяйственной продукции типа k в пункте j с учетом минимизации общих затрат на производство, переработку, транспортировку и конверсию с удовлетворением спроса на конечный продукт в соответствии с ограничениями на выбросы газов, а также с учетом использования воды и земли:

$$\min_{x,y} \sum_{i,j,k,m,t} [c_{ij}^{CP} x_{ijmt} + c_{ijm}^{CT} x_{ijmt} + c_{ijt}^{CC} x_{ijmt} + c_{kj}^{AP} y_{kjm} + c_{kjl}^{AT} y_{kjm}],$$

где c_{ij}^{CP} — затраты на производство единицы угля типа i в пункте j ; c_{ijm}^{CT} — транспортные затраты на перевозку единицы угля типа i из пункта j в пункт m ; c_{ijt}^{CC} — затраты на конверсию единицы угля типа i по технологии t в пункте j ; c_{kj}^{AP} — затраты на производство единицы сельхозпродукта k в пункте j ; c_{kjm}^{AT} — транспортные расходы на перевозку единицы сельхозпродукта k из пункта j в пункт m .

Ранее отмечалось, что территорию над подземными угольными разработками можно частично использовать под сельскохозяйственные нужды, как это часто происходит в Китае, где количество земли, пригодной для земледелия, весьма ограничено. На основании исследования [13] можно предсказать скорость оседания земли на угольных месторождениях различных типов. В частности, скорость оседания зависит от плотности пород на месторождении, а также от способа добычи. Например, если после извлечения породы отработанный материал складывается обратно в выработанное пространство, процесс оседания почвы существенно замедляется. Существуют и другие возможности ликвидации огромных угольных терриконов; появляются проекты по ликвидации отвалов, предусматривающие извлечение из терриконов стратегически важных материалов, например алюминия, германия, скандия, галлия, иттрия и даже циркония. Технологии переработки отвалов также представлены в модели. Оседание почв в результате работы предприятий угледобывающей промышленности можно предотвратить в рамках программ по рекультивации нарушенных земель, в частности, возвращения части земель в сельскохозяйственное пользование.

В рассматриваемой модели земля подразделяется на три типа: сельскохозяйственная, осевшая и земля под отвалами (терриконами). Введем ограничение на то, что количество этой земли не может превышать количества имеющейся земли в пункте j :

$$\sum_{k,m} l_{kj} y_{kjm} + \sum_{i,m,t} x_{ijmt} (1-r_{ij}) \Delta l_j l_{ij} + g \sum_{i,m,t} x_{ijmt} \leq L_j,$$

где l_{kj} — количество земли, необходимой для производства единицы сельхозпродукта k в пункте j ; l_{ij} — площадь земли, оседающей в результате добычи единицы угля типа i в пункте j ; Δl_j — часть сельскохозяйственной земли, на

которой добывается уголь в пункте j ; r_{ij} — скорость восстановления (рекультивации) земли, нарушенной в результате добычи угля i в пункте j ; g — площадь, занятая отвалами от производства угля i в пункте j [1]. Конечно, необходимо отличать l_{kj} от l_{ij} , например, можно ввести переменную l_{ij}^P , но для упрощения изложения будем различать эти параметры с помощью индексов i и k .

В модели предполагается, что рассматриваемый район планирует обеспечить себя продуктами питания местного производства в количестве, установленном нормами питания для человека, т.е. район планирует обеспечить собственную продовольственную безопасность. Для этого в модель введено ограничение, определяющее требуемый уровень производства сельхозпродукта k в пункте j :

$$\sum_j y_{kjm} \geq D_{km}^A,$$

где D_{km}^A — спрос на сельхозпродукт k в пункте m . В модели предполагается возможность экспорта и импорта с учетом соответствующих затрат на транспортировку. Спрос D_{km}^A можно определить, используя мнения экспертов относительно рекомендованного количества калорий в дневном рационе человека с учетом веса, роста, пола, типа активности, климата и других параметров, предложенных Всемирной организацией здравоохранения (World Health Organization, WHO).

Описанная модель использует эндогенно заданный спрос на конечные продукты переработки угля, например на электричество, тепло, кокс, газ и т.п. В общем случае модель предполагает и такие источники энергии, как природный газ, нефть, сланцевый газ. Однако в настоящей работе для простоты обозначений рассмотрен только уголь. Спрос на уголь и на продукты сельского хозяйства на национальном и региональном уровнях можно подсчитывать с помощью более агрегированных моделей. Эффективность процессов конверсии угля в конечный продукт зависит от технологий. Ограничения на спрос на конечный продукт задаются следующим образом:

$$\sum_{m,t} \alpha_{ijt}^d x_{ijmt} \geq D_j^d,$$

где α_{jt}^d — эффективность конверсии угля типа i в пункте j по технологии t в конечный продукт типа d , а D_j^d — спрос на конечный продукт типа d .

Эффективное распределение водных ресурсов между отраслями, конкурирующими за доступную воду, играет ключевую роль. Водные ресурсы, пригодные для повсеместного потребления, ограничены, поэтому модель использует нормы потребления воды для каждого пользователя, в частности угледобывающих и сельскохозяйственных секторов. Далее с помощью численных экспериментов показано, как незначительное изменение этих норм может повлиять не только на выбор угольных технологий, но и на всю структуру размещения предприятий угольной и сельскохозяйственной промышленности. В модели введено следующее ограничение на общий объем воды, отведенной на нужды этих предприятий в пункте j , т.е. на добычу, переработку и конверсию угля, а также на орошение культур в пункте j :

$$\sum_{i,m,t} w_{ij}^P x_{imlt} + \sum_{i,m,t} w_{ij}^d x_{ijmt} + \sum_{k,m} w_{kj}^c y_{kmj} \leq W_j,$$

где w_{ij}^P — количество воды, необходимое для добычи единицы угля i в пункте j ; w_{ij}^d — количество воды, необходимое для конверсии единицы угля i в конечный продукт d в пункте j ; w_{km}^c — количество воды, требуемое для орошения единицы сельхозкультуры k в пункте j ; W_j — общее количество воды для нужд угольной и сельскохозяйственной промышленности в пункте j .

Ограничения на эмиссии газов SO_2 и CO_2 в процессе добычи, переработки и конверсии угля являются определяющими при выборе чистых угольных технологий. В модели предусмотрены технологии, снижающие эмиссии SO_2 и CO_2 , но только за счет дополнительного использования воды, объемы которой и без того ограничены. Большая часть SO_2 — продукт горения угля, а угольные электростанции являются основными источниками эмиссий SO_2 в Китае. Для того чтобы удовлетворять требуемым стандартам чистоты воздуха, необходимо новые и уже действующие электростанции оснащать системами очистки дымового газа от остатков серы (Flue Gas Desulfurization, FGD). Существует широкий выбор FGD, среди которых преобладают (80% FGD в мире) системы, использующие влажную среду (wet scrubbing). Однако такие системы потребляют большее количество воды, что увеличивает и без того высокий расход воды на угольных электростанциях. В модели установлено ограничение на эмиссию SO_2 от конверсии угля i в пункте j :

$$\sum_{i,m,t} e_{ijt}^{\text{SO}_2,d} x_{ijmt} \leq E_j^{\text{SO}_2,C},$$

где $e_{ijt}^{\text{SO}_2,d}$ — количество эмиссий SO_2 в процессе добычи единицы угля i в пункте j по технологии t .

Угольные электростанции являются также крупными источниками эмиссий CO_2 и существенно способствуют повышению концентрации этого газа в атмосфере. Чтобы снизить уровень эмиссий CO_2 , в Китае придется уменьшить потребление угля и наряду с вводом в действие угольных электростанций внедрять технологии для секвестра углерода (carbon capture and storage (CCS) technologies). Использование этих технологий будет зависеть от жесткости мер, направленных на выполнение задач по сдерживанию изменений климата, и может оказать существенное влияние на развитие и изменение структуры всего энергетического комплекса. В ближайшем будущем Китай предполагает внедрять первые коммерческие установки CCS. Однако это приведет к увеличению потребления воды [14] и, следовательно, к еще более критической ситуации в ее распределении и использовании. В предлагаемой в настоящей статье модели принято ограничение на эмиссии CO_2 в пункте j :

$$\sum_{i,m,t} e_{ijt}^{\text{CO}_2,d} x_{ijmt} \leq E_j^{\text{CO}_2,C},$$

где $e_{ijt}^{\text{CO}_2,d}$ — уровень эмиссий CO_2 в процессе потребления единицы угля i в пункте j по технологии t .

Производство угля в пункте j ограничено допустимым уровнем (нормой) производства угля за год, установленным органом государственного регулирования. В соответствии с принятыми в Китае законами шахтам запрещено добывать уголь сверх этих норм, т.е.

$$\sum_{i,m,t} x_{ijmt} \leq C_j^c,$$

где C_j^c — предельная норма производства угля в пункте j .

В процессе добычи угля захватываются пустые породы, что негативно сказывается на его потребительском качестве. При сжигании необогащенного угля, например в тепловых электростанциях, резко повышается выход шлаков, которые необходимо утилизировать. Поэтому для обогащения угля часто используются установки его промывки (washing coal), с помощью которых не только удаляются пустые породы, но и происходит сортировка угля по типам, что зачастую уменьшает транспортные расходы. В Китае количество обогащенного угля невелико — меньше, чем в США или Австралии. Однако в 12-м пятилетнем плане к 2015 г. предусмотрено увеличить часть обогащенного угля до 65 %. Ограничение на применение новых технологий обогащения угля в пункте j имеет вид

$$\sum_{m,t} x_{ojmt} \geq a \sum_{i,m,t} x_{ijmt},$$

где a — часть обогащаемого угля, а индекс o — необогащенный уголь.

СЦЕНАРНЫЙ АНАЛИЗ

Предагаемая модель имеет пространственный характер. Ее можно применять в исследованиях на различных уровнях разрешения. Для описанных исследований выбрана провинция Шаньси — одна из шести провинций наряду с Внутренней Монголией, Шеньси, Гансу, Нинся и Хебей, в которых планируется разместить 60 % новых электрогенерирующих мощностей. Однако эти провинции располагают только 5 % запасов воды страны. В Шаньси имеется высокий потенциал для развития угольной промышленности. Здесь находятся богатейшие месторождения, оцененные в 91 млрд т, что составляет приблизительно 40 % всех запасов угля Китая.

Вследствие нехватки воды (в частности, частых засух и отсутствия орошаемых систем) сельскохозяйственное производство в Шаньси никогда не отличалось стабильностью и надежностью. Орошаемые угодья занимают всего 29 % всех сельхозземель этой провинции. На остальных территориях урожайность существенно зависит от погодных условий, в частности от уровня осадков. В то же время площадь земли, осевшей в результате добычи угля, а также территории, занятые отходами угольного производства, увеличились до 68 тыс. га, из которых 40 % ранее были заняты под сельскохозяйственные угодья. Эта цифра с каждым годом увеличивается на 5 тыс. га.

Принятые постановления по сохранению природных ресурсов обяжут промышленников искать компромисс между увеличением прибылей от добычи угля и необходимостью удовлетворять установленным нормам и ограничениям на использование природных ресурсов. Как показывает приведенный далее сценарный анализ, эта ситуация может только обостриться с ростом спроса и потребления продуктов угольной промышленности.

Модель использует данные за 2011 г. [1], а также данные из Статистического сборника провинции Шаньси за 2012 г. о производстве и потреблении угля и сельскохозяйственной продукции и данные о потреблении воды, полученные из различных научных исследований, в частности отчетов Департамента энергетики США, отчетов Ассоциации угольной индустрии Китая и т.д.

Численные эксперименты. Основная цель экспериментов — системный анализ возможности (сценария) развития угольной и сельскохозяйственной промышленности при существующих ограничениях на природные ресурсы. В частности, учитывая критическую зависимость обоих секторов от водных ресурсов, модель показывает, как несущественные колебания в водоснабжении могут влиять

на структуру технологий угольной промышленности и на размещение сельскохозяйственного производства, что мотивирует дальнейшие исследования по анализу робастных технологических портфелей. Сценарии потребления воды определены для 11 основных городов в префектурах провинции Шаньси.

Рассмотрим четыре основных сценария потребления воды, определяемые нормами ее распределения для угольной и сельскохозяйственной промышленности:

- 1) поставки воды такие же, как в 2011 г., и в сумме составляют 42 % доступного запаса воды в Шаньси;
- 2) увеличение поставок воды на 5 % по сравнению со сценарием 1;
- 3) сокращение поставок воды на 5 % по сравнению со сценарием 1;
- 4) средний (42.33 %) уровень поставки воды.

Приведенные сценарии вполне реалистичны и могут возникнуть вследствие естественных колебаний запасов воды, вызванных погодными условиями, уровнями торговли или производства в других водозависимых секторах, например тяжелой промышленности. Небольшие колебания объемов воды, доступной для пользования, происходят регулярно. В настоящей статье не рассматривается случай, когда они могут быть катастрофическими, например вследствие сильной засухи или обильных осадков. Предположим, что возможны не только сбои в обеспечении водой, но и незначительные изменения спроса (или установленных норм) на производство угля и сельскохозяйственные товары, например в пределах $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$ уровня производства угля и сельхозпродуктов в 2011 г. соответственно. Эти предположения также реалистичны, поскольку уровень спроса и производства может колебаться в зависимости от цен на товары, погодных условий, импорта и экспорта. (Детали исследования возможных причин нестабильности некоторых параметров модели в данной статье не рассматриваются.)

С помощью модели исследованы четыре описанных сценария водоснабжения в комбинации с 10 сценариями различного уровня производства угля и сельскохозяйственной продукции, всего 400 сценариев [1]. Результаты сценария 1 достаточно пессимистичны. Модель показывает, что даже незначительное увеличение добычи угля (на 10%) может привести к сокращению производства сельхозпродуктов. Отметим, что при соблюдении норм добычи угля небольшое увеличение выпуска сельскохозяйственной продукции вынуждает предприятия угольной промышленности внедрять водосберегающие технологии.

Сценарий 2 предполагает незначительное увеличение добычи угля. Однако увеличение производства сельскохозяйственной продукции затруднено не только ввиду существенных ограничений на воду, а также вследствие ограниченных земельных ресурсов, т.е. невозможности расширения посевных площадей. Аналогично другим сценариям увеличение добычи угля приведет к уменьшению сельхозземель и почти к полному упадку сельского хозяйства, в частности мелких крестьянских угодий, и следовательно, к продовольственной зависимости провинции от импорта.

Согласно сценарию 3 уменьшение поставок воды может произойти вследствие внезапного увеличения ее потребления в других секторах, например гидроэнергетике или тяжелой промышленности. Расчеты показывают, что при незначительном уменьшении количества доступной воды предприятия угольной промышленности не смогут достичь уровня производства 2011 г. и увеличить его на 5 %, даже если будут использовать воду, предназначенную для орошения.

Сценарий 4 соответствует традиционному анализу. Он использует усредненные показатели случайных параметров, в рассматриваемом случае — поставки воды. Сценарий показывает, что использование средних показателей может при-

вести к ошибочным выводам. В реальных ситуациях средние показатели можно наблюдать с вероятностью 0.

Сравнение различных сценариев показывает, что результаты зависят даже от незначительных изменений исходных параметров, и значит, такой анализ альтернатив не дает робастных выводов о стабильности развития взаимозависимых систем, в частности технологий угольной промышленности и сельскохозяйственной деятельности. Из двойственной модели легко показать, что зависимость решений от сценария обуславливает высокие цены на воду и производимую продукцию. Внедрение зависимых от сценария решений детерминированной модели может привести к большим потерям, если произойдет неожиданный сценарий.

Отметим, что зависящие от сценария решения детерминированной задачи не учитывают затрат на коррекцию этого решения в случае, если произойдет другой сценарий, т.е. детерминированный анализ сценариев не способен предложить долгосрочных робастных решений в сочетании с зависимыми от наблюдаемого сценария адаптивными решениями. Разработка робастных стратегий требует в явном виде учета неопределенностей. Несмотря на это, сценарный анализ позволяет исследовать ресурсные ограничения, препятствующие стабильному развитию угольной и сельскохозяйственной промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уголь является основной составляющей, обеспечивающей энергетическую безопасность Китая. Производство и потребление угля способствуют быстрому росту экономики страны, однако также оказывают негативное влияние на сельское хозяйство и водообеспечение, поскольку интенсивно используются природные ресурсы общего пользования — земля и вода. Обеспечение условий бесперебойного снабжения энергией, чистой водой (водоснабжение), производства сельскохозяйственной продукции является основополагающим фактором, обуславливающим устойчивое экономическое развитие страны. Согласно правительственным постановлениям и распоряжениям профильных министерств необходимо осмысленное системное планирование переоснащения и развития угольной промышленности с учетом жизненно важных ограничений на природные ресурсы в рамках установленных норм на чистоту окружающей среды. В данной статье предложена базисная пространственная детерминированная модель для системного анализа взаимозависимостей ключевых секторов экономики — угольной промышленности, энергетики, сельского хозяйства, водоснабжения. Численные эксперименты (сценарный анализ) свидетельствуют о необходимости дальнейшего развития модели для поиска робастных долгосрочных решений с учетом неопределенностей погодных колебаний, спроса, цен, технологий, международной торговли и инвестиций. При этом актуально развитие соответствующих подходов стохастической оптимизации [15, 16].

Работа над созданием модели проводится в рамках проектов The Humanities and Social Sciences Research Program of Ministry of Education of the People's Republic of China, №12YJA63016, The National Science Foundation of China (NSFC), Project №70941035, 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. Gao J., Xu H., Cai G.Y., Ermoliev Y., Ermolieva T., Kryazhinskiy A., Rovenskaya E. Regional coal production: case study of Shanxi region, China. — 2015.
2. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2013. Trends in global CO₂ emissions: 2013 Report. — Hague: PBL Publishers, 2013.
3. Fan M., Shen J., Yuan L., Jiang R., Chen X., Davies W.J., Zhang F. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China // *Journal of Experimental Botany*. — 2011. — N 1. — P. 248.
4. Zhang J.J., Smith K.R. Household air pollution from coal and biomass fuels in China: measurements, health impacts, and interventions // *Environmental Health Perspectives*. — 2007. — **115**, N 6. — P. 848.
5. van Dijk P., Zhang J., Jun W., Kuenzer C., Wolf K.H. Assessment of the contribution of in-situ combustion of coal to greenhouse gas emission; based on a comparison of Chinese mining information to previous remote sensing estimates // *International Journal of Coal Geology*. — 2011. — **86**, N 1. — P. 108–119.
6. Niu S., Gao L., Zhao J. Distribution and risk assessment of heavy metals in the Xinzhuangzi reclamation soil from the huainan coal mining area, China // *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. — 2015. — **21**, N 4. — P. 500–512.
7. Sun W., Wu Q., Dong D., Jiao J. Avoiding coal–water conflicts during the development of China’s large coal-producing regions // *Mine Water and the Environment*. — 2012. — **31**, N 1. — P. 74–78.
8. Pan L.Y., Liu P., Ma L.W., Li Z. A supply chain based assessment of water issues in the coal industry in China // *Energy Policy*. — 2012. — **48**. — P. 93–102.
9. Zagorodny A.G., Ermoliev Y.M., Bogdanov V.L. Integrated management, security and robustness // Published by Committee for systems analysis and Presidium of National academy of sciences, Ukraine. — Kyiv, 2014. — P. 336.
10. Gritsevsky A., Nakicenovic N. Modeling uncertainty of induced technological change / A. Grrubler, N. Nakicenovic, W.D. Nordhaus (Eds.) / *Technological change and the environment, resources for the future and International Institute for Applied Systems Analysis* // Published by Resources for the Future. Washington, USA. — 2002.
11. Havlik P., Schneider U.A., Schmid E., Boettcher H., Fritz S., Skalsky R., Aoki K., de Cara S., Kindermann G., Kraxner F., Leduc S., McCallum I., Mosnier A., Sauer T., Obersteiner M. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets // *Energy Policy*. — 2011. — **39**. — P. 5690–5702.
12. Ermolieva T., Ermoliev Y., Havlik P., Mosnier A., Leclere D., Khabarov N., Kraxner F., Obersteiner M. Systems analysis of robust strategic decisions for planning secure food, energy, water provision based on stochastic GLOBIOM // *Cybernetics and Systems Analysis*. — 2015. — **51**, N 1. — P. 144–154.
13. Xu H., Liu B., Fang Z. New grey prediction model and its application in forecasting land subsidence in coal mine // *Natural Hazards*. — 2014. — **71**, N 2. — P. 1181–1194.
14. Zhai H., Rubina E.S. Carbon capture effects on water use at pulverized coal power plants // *Energy Procedia*. — 2011. — **4**. — P. 2238–2244.
15. Numerical techniques for stochastic optimization / Y. Ermoliev, R.J-B. Wets (Eds) // *Springer Series in Computational Mathematics*. — Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1988.
16. Ермольев Ю.М. Метод стохастического программирования. — М.: Наука, 1976. — 340 с.

Поступила 24.12.2014