

М. С. К р а с с

**МОДЕЛЬ СВЯЗЕЙ В СИСТЕМЕ ЭКОЛОГИЯ–  
ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА**

*На основе положений теории игр рассмотрено взаимоотношение человека с природой. Показано, что природа не является пассивным партнером, поскольку существует сильная обратная связь между ее состояниями и активностью человека. Масштабы деятельности человека часто приводят к необратимым изменениям в окружающей среде, и при нарушении природного равновесия человек вынужден искать новый набор своих стратегий. В общем случае рассматривать эти взаимоотношения только в рамках теории игр с нулевой суммой нельзя, а необходимо переходить также к моделям, использующим кооперативные игры. Предложена концептуальная схема сосуществования человека и природы как единой эколого-экономической системы.*

**E-mail: vurga@mail.ru**

**Ключевые слова:** теория игр, воздействие на природу, сосуществование, критерий, ассимиляционный потенциал, техногенные аномалии климата, множество Парето, риск, оптимальная стратегия, модель, равновесие.

**Взаимодействие природы и человека.** Масштабы воздействия человека на природу увеличиваются с нарастающей интенсивностью и к началу XXI века приняли планетарный масштаб. Это обуславливает появление необратимых изменений в окружающей среде и, в свою очередь, делает состояние эколого-экономических систем (ЭЭС) неустойчивым.

Отмечается, что в последние десятилетия скорость роста частоты аномальных явлений в окружающей среде увеличивается. За последние 15 лет количество опасных гидрометеорологических явлений в России утроилось, однако новых явлений не наблюдается — увеличиваются число и масштабы привычных. По мнению климатологов, имеет место не столько возникновение нового климата, сколько “разбалансировка” (изменения) прежнего. Несомненно, существует тесная взаимосвязь между изменениями климата и ростом интенсивности техногенного воздействия человека на окружающую среду [1].

Особо следует выделить техногенное давление на природу, оказываемое топливно-энергетическими отраслями [2]. Огромные комплексы, генерирующие электрическую и тепловую энергию, вместе с протяженными тепловыми коммуникациями ЖКХ отрицательно влияют на экологию. Отчуждаются значительные земельные площади, которые быстро становятся аккумуляторами загрязнений. Повышенный фон электромагнитного излучения на больших площадях оказывает негативное воздействие на здоровье и жизнедеятельность людей.

Техногенный нагрев атмосферы и охлаждающих водоемов (особенно от АЭС), а также испарение воды с гигантских зеркал водохранилищ равнинных ГЭС приводят к изменениям теплового режима на больших территориях и в атмосфере. Это можно трактовать как локальные техногенные изменения климата.

**Экономика техногенных аномалий климата.** В последнее время участились техногенные катастрофы, связанные с интенсивным загрязнением окружающей среды, обусловленным добычей и транспортом больших объемов углеводородного сырья (в частности, нефти). В работе [3] приведены физическая и математическая модели перестройки тепловых потоков на поверхности океана при изменении условий тепло- и массообмена как результата загрязнения нефтепродуктами. Там же дана физическая интерпретация результатов расчета изменения тепловых потоков с учетом изменения оптических свойств морской воды в энергоактивной зоне Гольфстрима [4, 5] и на поверхности океана в результате катастрофы на нефтедобывающей платформе компании BP в Мексиканском заливе летом 2010 г., полученных по этой модели.

По модельным расчетам и наблюдениям эта катастрофа имеет существенные пролонгированные последствия: глубокие слои Атлантического океана начали выхолаживаться, а Гольфстрим сейчас не только охлаждается, но и исчезает, что может вызвать глобальное изменение климата в северном полушарии [6]. Отклик масштабного разлива нефти Мексиканском заливе будет сказываться еще несколько лет — летние сезоны в Европе будут жаркими, тогда как из-за охлаждения Гольфстрима зимы в Западной Европе и Скандинавии станут более суровыми и даже с установлением ледового покрова в незамерзающих морях южного сектора Ледовитого океана (что и случилось в последнюю зиму 2010–2011 гг.), т.е. в Атлантике имеет место короткопериодная климатическая аномалия техногенного происхождения.

Комплекс разработанных моделей позволяет осуществлять оценку водно-теплового баланса на границе раздела вода–атмосфера при образовании загрязнения в приповерхностном слое водной акватории для различных климатических регионов [7]. Это, в свою очередь, позволяет: получить количественные и качественные выводы о степени влияния техногенных факторов загрязнения мирового океана и внутренних морей России на изменения тепловых потоков и водного баланса различных участков ее суши; провести анализ воздействия техногенных факторов на региональном уровне для оценки вероятности различных сценариев климатических аномалий. Эта расчетная информация может служить базой для прогнозов экономических последствий климатических аномалий, рисков их возникновения, а также масштабов возможных чрезвычайных ситуаций (ЧС).

Уже сейчас реально проведение количественных оценок и построение карт рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в Каспийском регионе, что особенно актуально в свете планируемого интенсивного международного освоения нефтяных месторождений на шельфе Каспия. На этой основе перспективна разработка стратегии принятия превентивных мер, способствующих минимизации рисков техногенных катастроф.

Здесь следует отметить, что и атомная энергетика оказалась далеко не безопасной, в том числе и в плане утилизации ее отходов. По расчетам французского статистика Д.П.-Лоти-Виада риски ЧС от нескольких сотен атомных энергоблоков на планете составляют порядка  $10^{-3}$  (вместо  $10^{-7}-10^{-8}$  по расчетам Росатома), поскольку нужно принимать во внимание также и риски отказа энергетических коммуникаций, подверженных воздействию природных факторов. Согласно этим оценкам, экономический ущерб от катастрофы на АЭС Фукусимы, обусловленной природными катаклизмами марта 2011 г., может превысить 260 млрд долл. [8]. Не случайно Германия намерена с 2020 года отказаться от эксплуатации АЭС. Аномалии климата техногенного происхождения понижают устойчивость ЭЭС и способствуют их “дрейфу” к точкам бифуркации (к потере природного равновесия), что можно рассматривать как предупреждение человеку от природы о его чрезмерно активном воздействии на окружающую среду.

В настоящее время становится все более актуальным вопрос о создании специальных страховых фондов по возмещению возможного ущерба от природных аномалий, существенно влияющих на глобальную экономику [9]. В стратегическое планирование следует включать также и прогноз аномалий техногенного происхождения, их последствий и рисков. Это приведет как к необходимости коррекции существующих экономических стратегий, так и к пересмотру ряда существующих стратегических прогнозов [10].

**Классическое игровое представление взаимоотношений человека с природой.** Во многих задачах принятия решений существенным элементом является неопределенность, не связанная с осознанным целенаправленным действием противной стороны и заключающаяся в недостаточной информированности лица, принимающего решение, об объективных условиях принятия решения. Эта неопределенность может быть обусловлена многими причинами, в том числе экологической обстановкой, стихийными бедствиями, техногенными катастрофами и др. Выбор решения в этом случае зависит от объективной действительности, называемой в математической модели “природой”; сама же математическая модель подобных ситуаций называется “игрой с природой” [11].

В этой игре человек (заинтересованная сторона) и природа называются игроками (назовем их соответственно игроками  $M$  и  $N$ ). Основные допущения классической теории игр человека с природой сводятся к следующему:

1. Природа  $N$  как второй участник игры не является ни противником, ни союзником человека  $M$  и принимает неопределенным образом то или иное свое состояние, не преследуя никакой цели и абсолютно безразлично к результату игры.

2. Человек  $M$  на состояния природы  $N$  не может оказывать никакого влияния.

Полагается, что мы оперируем в рамках теории игр с нулевой суммой, когда проигрыш одного игрока равен выигрышу другого, и в случае стохастической неопределенности в любой момент времени игрок  $N$  находится только в одном (но неизвестно, в каком) из  $n$  состояний  $N_1, N_2, \dots, N_n$ , т.е. состояния природы разделены во времени. Совокупность состояний природы  $S_N\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$  формируется либо на основе имеющегося опыта анализа этих состояний, либо в результате предположений и на основе интуиции экспертов. События  $N_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) случайны, несовместны и образуют полную группу. Поэтому вероятности  $q_1, q_2, \dots, q_n$  соответственно состояний  $N_1, N_2, \dots, N_n$  удовлетворяют условиям

$$q_j > 0, \quad j = 1, \dots, n; \quad \sum q_j = 1. \quad (1)$$

Здесь действует понятие выигрыша при чистой стратегии игрока  $M$ .

В случае, когда вероятности состояний природы неизвестны и нет никакой возможности получить о них какую-либо достоверную информацию, имеет место принятие решений игроком  $M$  в условиях (полной) неопределенности. Если же к известным состояниям природы игрок  $M$  относится лишь с некоторой степенью доверия, то говорят, что решения принимаются “в условиях полунеопределенности”.

Действия игрока  $M$ , состоящие в случайном выборе одной из своих стратегий, называются смешанной стратегией. Ее можно интерпретировать как дискретную случайную величину, значениями которой являются номера его чистых стратегий. Если множество  $S_M^C = (M_1, M_2, \dots, M_m)$  чистых стратегий игрока  $M$  известно, то его смешанную стратегию  $P$  можно отождествить с  $m$ -мерным вектором вероятностей выбора этих стратегий из  $S_M^C$ :

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_m), \quad p_i > 0, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad \sum p_i = 1. \quad (2)$$

Обозначим через  $S_M$  множество всех смешанных стратегий игрока  $M$ :

$$S_M = \{P = (p_1, p_2, \dots, p_m), \quad p_i > 0, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad \sum p_i = 1\}, \quad (3)$$

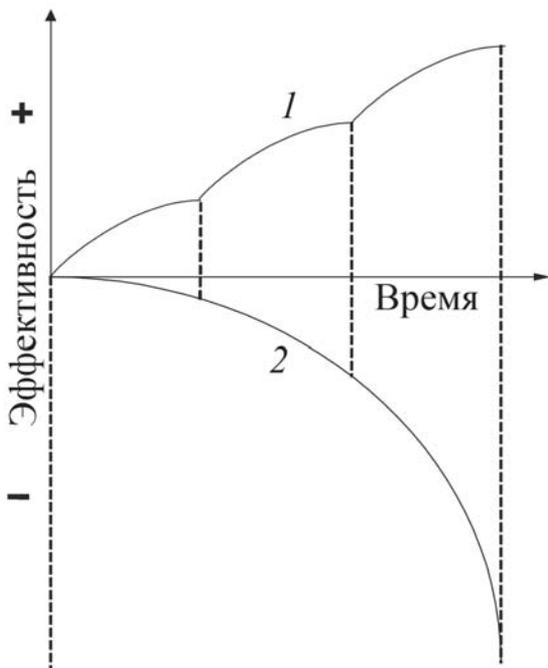
которое бесконечно и является подмножеством точек  $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$  в положительном ортанте  $m$ -мерного пространства  $R^m$ .

**Обратная связь человека с окружающей средой.** Сузим понятие природы, приведенное в предыдущем разделе, до рамок окружающей среды, что исключает из рассмотрения приложения технического характера, и ограничимся рассмотрением задач только с учетом экологии. Тогда положения 1 и 2 предыдущего раздела не всегда верны, так как состояния природы существенно зависят от интенсивности и масштабов техногенной активности игрока  $M$  (человека). Иными словами, природа (игрок  $N$ ) реагирует некоторым образом на действия человека и “небезразлична” к результатам игры. В определенной мере эта реакция является случайной; в ряде случаев она может быть описана разными моделями (детерминированными, стохастическими, экспертными, когнитивными).

Положение 2 о том, что человек  $M$  на состояния природы  $N$  не может оказывать влияния, верно лишь при относительно небольших масштабах техногенной активности человека, когда ассимиляционный потенциал окружающей среды может “справиться” с относительно небольшими отклонениями от состояния ее равновесия. В таком случае возможно применение игр с нулевой суммой.

Говоря о классификации игр человека с природой, следует отметить, что критерии оценки стратегий игроков существенно различны. Если у человека они базируются, в основном, на финансово-экономических показателях, то природные процессы реализуются

преимущественно по минимуму затраты энергии на поддержание равновесия. В этом плане негативные результаты воздействия человека на природу имеют накопительный характер (рис. 1). Отрицательная эффективность антропогенного воздействия на окружающую среду имеет “разгонный” характер (нижняя кривая); со временем она начинает значительно превосходить экономический эффект выигрыша от производственной деятельности (верхняя кривая). Набор возможных состояний природы и переходы из одного состояния в другое, как и “обрушение” равновесия природной среды, заранее не известны.



**Рис. 1.** Эффективность экономической деятельности человека (1) и реакции природы (2) [1]

Рамки классической теории игр, когда выигрыш человека полагается равным проигрышу природы, не отвечают требованиям системного подхода концепции устойчивого развития, основным принципом которой является гармоничное сосуществование человека с природой в единой ЭЭС [12], и нарушение этого равновесия обычно приводит к ухудшению условий жизнедеятельности социума. Следовательно, основные положения теории игр человека и природы с учетом соблюдения экологических норм нужно сформулировать в другом виде:

1. Человек (игрок  $M$ ) оказывает влияние на природу  $N$  и воздействует на ее состояние в определенной мере и часто непредвиденно, т.е. человек участвует в формировании стратегий природы.

2. Природа  $N$ , являясь вторым участником игры, в определенной мере реагирует на результаты игры — при одних и тех же стратегиях игрока  $M$  ее повторные стратегии могут быть различными.

3. Выигрыши игрока  $M$  могут соответствовать проигрышам игрока  $N$ .

4. Проигрыши природы (игрока  $N$ ) обычно обуславливают (с некоторым лагом) последующие проигрыши человека (игрока  $M$ ).

Таким образом, существует сильная отрицательная обратная связь между множеством стратегий игрока  $M$  и множеством стратегий игрока  $N$ . Природа здесь уже не является абсолютно пассивным игроком. Из сформулированных выше положений естественным образом вытекают следующие концептуальные утверждения:

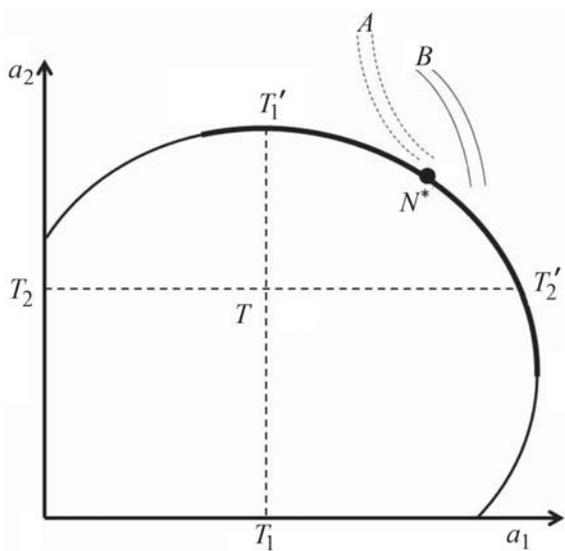
а) наиболее эффективными игры человека с природой могут быть только при взаимно координированных действиях, когда обе стороны выигрывают и проигрывают одновременно, и поскольку их действия не могут быть полностью противоположными, то это игры с ненулевой суммой;

б) выигрыши и проигрыши сторон являются отложенными (обладают некоторыми временными лагами);

в) состояния природы существенно зависят от характера и масштабов антропогенного давления на нее (стратегий человека);

г) оптимальная стратегия обоих игроков должна иметь характер компромиссного оптимума.

Игры с ненулевой суммой могут быть как кооперативными (в сообществе), так и некооперативными (принятие решений независимо друг от друга). Во втором случае важным моментом является определение точек равновесия игры. Понятие равновесия шире понятия оптимизации и включает последнее в качестве частного случая. В общем случае пара стратегий  $x_{opt}$  и  $y_{opt}$  для игроков 1 и 2 является точкой равновесия по Нэшу, если обоим игрокам невыгодно отклоняться от своих



**Рис. 2.** Итоги кооперативной игры [13]

могут соответствовать разные значения выигрышей у игроков.

В случае кооперативной игры с двумя игроками предполагается, что игроки не могут воздействовать друг на друга до тех пор, пока не придут к некоторому соглашению. Тогда итоги игры представимы на плоскости общих выигрышей  $a_1$  и  $a_2$  в виде множества  $S$  (рис. 2), где  $T_1$  и  $T_2$  — значения выигрышей, которые могут получить соответственно игроки 1 и 2 без кооперации с партнером. В предположении о том, что множество  $S$  является выпуклым, замкнутым и ограниченным сверху, оптимальные решения находятся на правой верхней его границе. На ней выделяется участок  $T_1'T_2'$  — множество Парето-оптимальных решений  $\tilde{N}$ , на котором увеличение выигрыша одного игрока возможно только за счет уменьшения выигрыша его партнера; оно называется переговорным множеством. Игрокам не имеет смысла вести переговоры относительно решений вне множества  $\tilde{N}$ , поскольку положение одного из них может быть либо улучшено без ущерба для партнера, либо он может достичь лучшего выигрыша в одиночку.

На переговорном множестве  $\tilde{N}$  выделяется точка  $N^*$ , соответствующая равновесию по Нэшу. В ней достигается максимум произведения

$$\max[(a_1 - T_1)(a_2 - T_2)] = [a_1 - T_1(N^*)][a_2 - T_2(N^*)], \quad (5)$$

в котором сомножители представляют собой превышения выигрышей каждого из игроков над платежами, которые могут быть получены игроками без кооперации. Равновесие по Нэшу соответствует компромиссному оптимуму стратегий обоих игроков.

Отметим здесь аналогию с классическим портфельным анализом, когда инвестору приходится выбирать разумный компромисс между величиной ожидаемой доходности портфеля и его риском. Склонность

стратегий в одиночку, т.е. выигрыши  $a_1$  и  $a_2$  игроков удовлетворяют условиям [13]

$$\begin{aligned} a_1(x, y_{opt}) &\leq a_1(x_{opt}, y_{opt}), \\ a_2(x_{opt}, y) &\leq a_2(x_{opt}, y_{opt}) \end{aligned} \quad (4)$$

для любых стратегий  $x$  и  $y$ . В теории игр доказано, что для любой конечной некооперативной игры с ненулевой суммой существует по крайней мере одна равновесная пара смешанных стратегий. В общем случае равновесие может быть не единственным, причем каждому из них

инвестора к риску определяется формой линий безразличия его функции полезности. В случае игр человека с природой также можно говорить о склонности человека к уменьшению выигрыша природы с целью увеличения своего выигрыша; тем самым человек увеличивает риск потери природного равновесия. Будем ассоциировать игрока 1 с природой ( $N$ ), а игрока 2 — с человеком ( $M$ ). На рис. 2 показаны линии безразличия для игрока 2, не склонного к риску (кривые  $A$ , выпуклые вниз), и для игрока 2, склонного к риску (кривые  $B$ , выпуклые вверх). Точка касания линии безразличия с линией Парето-оптимального множества определяет оптимальную стратегию игрока 2. Чем больше выигрыш человека, тем больше отложенный риск этого выигрыша, и это обстоятельство следует учитывать при планировании наших взаимоотношений с природой. Интенсивность техногенного влияния на природу должна быть сведена к минимуму, тогда риски потерь природного равновесия как в региональном так и в глобальном масштабах будут также минимальными. Отсюда следует, что постоянное снижение энергоемкости и ресурсопотребления технологий является актуальной проблемой для человечества, поскольку только этот фактор позволяет эффективно поддерживать ассимиляционный потенциал природы на приемлемом уровне и тем самым обеспечивать жизнедеятельность нашей цивилизации.

Современная экономика хронически страдает “экологической неполноценностью”, унаследованной еще с давних времен. В качестве иллюстрации можно привести исследование группы экспертов Мэрилендского университета. По выделенным 16 биологическим макросистемам (морским и на суше) оценивалось 17 категорий функций и услуг природы (регулирование климата, газового состава атмосферы, водных ресурсов, образование почвы, ассимиляция отходов, рекреация и др). Расчеты показали, что стоимость этих услуг природы почти вдвое превышает глобальный ВВП. Таким образом, основная часть стоимости функций экосистем находится вне рынка [14]. С точки зрения экологической недооцененности природы стоимость выигрышей человека ныне заметно ниже, нежели стоимость услуг природы, недополученных в результате ущерба, нанесенного ей. Выигрыш природы здесь можно трактовать как минимальный ее проигрыш, ведущий к максимально возможному сохранению ее ассимиляционного потенциала (минимаксный подход).

Реальные цены природных ресурсов могут стать эффективными рычагами в рыночной экономике. Более того, учет этих реальных цен позволит обоснованно определять экономическую эффективность альтернатив развития и инвестиционных проектов по хозяйственному освоению территорий. При надлежащем учете экологического фактора

эффективность ресурсосбережения значительно снижает техногенное давление человека на природу, что убедительно показано на примере экономического роста развитых стран за последние два десятилетия.

**Концепция сосуществования.** С учетом изложенных выше положений сформулируем основные принципы методологии прогнозов взаимодействия человека и окружающей среды в рамках теории игр.

1. До сего времени человек активно действует по отношению к окружающей среде по принципам игры с нулевой суммой, когда выигрыш человека равен проигрышу природы (особенно это проявляется в России).

2. Сформулированные в предыдущем разделе принципы сосуществования человека и природы соответствуют строгому экологическому законодательству стран с развитой экономикой. Модель такого состояния вполне укладывается в рамки некооперативных игр с ненулевой суммой (пока еще принятие решения игроками осуществляется во многом независимо друг от друга, т.е. человек сейчас не особо озабочен сохранением ассимиляционного потенциала природы).

3. В передовых странах в настоящее время наблюдается переход к более жестким экологическим требованиям, что эквивалентно переходу от некооперативных игр человека с природой к кооперативным играм. В этом случае природа рассматривается как полноправный партнер, на стратегии которого оказывает существенное влияние деятельность (набор стратегий) человека. Набор стратегий природы при отсутствии нарушения равновесия приближенно известен, и в этом случае их можно принять как совокупность исходных состояний  $S_{N0}\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$  с условием (1).

Сейчас при наличии мониторингов и баз данных окружающей среды можно осуществлять расчеты техноемкостей территорий и регионов с тем, чтобы использовать эту информацию уже на оценочном уровне; соответствующая методика подробно изложена в работе [15].

Пусть  $U$  — суммарная природоемкость производственного комплекса территории (суммарный объем ресурсов, изымаемых у природы за некоторый период времени в результате производственной деятельности на территории),  $T_e$  — экологическая (предельная) техноемкость, тогда их отношение — кратность превышения экологической техноемкости

$$K_e = U/T_e \quad (6)$$

— характеризует экологическую обстановку территории. Приняты следующие рамки качественной оценки обстановки по безразмерной величине  $K_e$ :  $K_e < 0,3$  — обстановка благополучная;  $1 < K_e < 2$  — обстановка критическая;  $K_e > 10$  — обстановка крайне опасная.

После нарушения равновесия в ЭЭС набор стратегий игрока  $N$  (природы), вообще говоря, может измениться, причем изменения связаны с масштабами и амплитудой этого нарушения в прямой зависимости. Новый набор стратегий природы  $S_{Nd}\{N_{1d}, N_{2d}, \dots, N_{kd}\}$ , описываемый как

$$S_{Nd} = \{Q = (q_{1d}, q_{2d}, \dots, q_{kd}), \quad q_{id} > 0, \\ i = 1, 2, \dots, k; \quad \sum q_{id} = 1\}, \quad (7)$$

может уже существенно отличаться от прежнего набора как по числу стратегий ( $k \neq n$ ), так и по их свойствам. Природа не является пассивным партнером, как это полагается в классической теории игр; при возрастании техногенного давления она “вынуждена выбирать” такие оптимальные для себя стратегии, которые реализуются в виде аномалий, затрудняющих технологическую активность и жизнедеятельность человека.

В условиях появления повторной совокупности стратегий природы человек зачастую должен приспособливаться к новым возможностям окружающей среды и искать новые стратегии в своей деятельности, т.е. менять активную позицию ведущего игрока на пассивную. Теперь уже игрок  $M$  вынужден обновлять наборы своих стратегий, возможно, как по количеству, так и по свойствам:

$$S_{Md} = \{P = (p_{1d}, p_{2d}, \dots, p_{sd}), \quad p_{id} > 0, \\ i = 1, 2, \dots, s; \quad \sum p_{id} = 1\}. \quad (8)$$

Смена состояний природы может неоднократно повторяться, это будет происходить при превышении возможностей ее ассимиляционного потенциала (рис. 3). Не исключено, что с течением времени все стратегии человека могут стать сугубо проигрышными. На таких территориях условия жизнедеятельности людей крайне затруднительны и затратны для экономики страны. Так, в настоящее время 17 регионов России объявлены зонами экологического бедствия; они появились как результат масштабного техногенного давления при превышении рамок ассимиляционного потенциала природы. Для этих зон природа уже сформировала свои множества стратегий, причем все они мало приемлемы для существования человека и государство вынуждено тратить значительные средства на хотя бы частичное восстановление былого потенциала окружающей среды. Иными словами, ныне все стратегии человека там являются вынужденными.

Можно стать и на другую точку зрения: природа меняет свое состояние равновесия под воздействием человека и “вынуждена” перейти к новой совокупности стратегий. Однако здесь нет зеркальности при



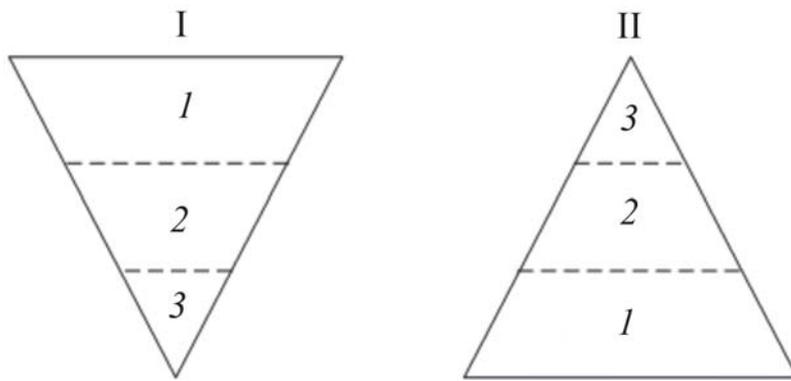
Рис. 3. Схема взаимодействия человека и природы

смене пассивности и активности игроков, так как человеку рано или поздно придется подстраиваться под новые наборы стратегий природы (менять среду обитания, вкладывать средства в обустройство и улучшение качества окружающей среды и пр.). В этой игре природа начинает играть уже предопределяющую роль в выборе человеком своих стратегий (назовем их допустимыми), что и отражено в названии данной работы.

**Устойчивые состояния ЭЭС и целевые функции экономики.** Главным в проблеме устойчивости ЭЭС является вопрос о сохранении ее равновесия, которое, в свою очередь, зависит от состояния окружающей среды. Накопление отклонений от состояния равновесия может привести к экологическим бедствиям, что обязательно скажется на условиях жизнедеятельности человека и приведет к чувствительным потерям для экономики страны. Сегодня необходима новая концепция оптимизации активности человека, в рамках которой исследования, построения и целевые функции (критерии) теории игр будут увязаны с “интересами” и возможностями природы.

Устойчивость трех подсистем (экологической, экономической и социальной), составляющих социо-эколого-экономическую систему, не одинакова. Наибольшей устойчивостью обладает экологическая подсистема, наименьшей — экономическая. Когда в качестве приоритета развития выбирается экономическая подсистема, вся система приходит в неустойчивое состояние. И только в случае экологических приоритетов развития и подчинения экономических целей социальным интересам система находится в состоянии устойчивости, т.е. устойчивого развития. Схематически это соображение показано на рис. 4.

Известно, что целевые функции экономики можно разбить на три класса [16]: долгосрочные (1), среднесрочные (2) и краткосрочные (3).



**Рис. 4. Состояния ЭЭС — неустойчивое (I) и устойчивое (II):**

*1* — экология; *2* — социальная сфера; *3* — экономика

Зачастую целевые функции противоречивы, что является следствием неопределенности экономической политики на разных временных масштабах, особенно в долгосрочном периоде. Именно среднесрочные и долгосрочные целевые функции являются основой формирования экономической стратегии страны и представляют собой “фон”, на котором реализуются краткосрочные цели, не противоречащие ему. Если направляющий экономический “фон” отсутствует, то совокупность краткосрочных целей образует хаотическое множество противоречивых целевых установок, реализация которых неизбежно приводит к внутрисистемным противоречиям. Тогда эти противоречия и антагонизмы регулируются внутрисистемными столкновениями, что, в свою очередь, приводит к росту неустойчивости системы и может иметь своим итогом ее коллапс (кризисная обстановка и даже череда кризисов). В этом плане рис. 4 полностью соответствует экономической интерпретации соотношения целевых функций. Преобладание краткосрочных целей в экономике всегда обуславливает неблагоприятную экологическую обстановку в ЭЭС. Устойчивая экономика реализуется лишь при наличии базы главенствующих долгосрочных целей (1), реализующихся в экономической стратегии и экологическом равновесии.

**Допустимые стратегии и технологии.** Можно утверждать, что любые технологии являются гомоморфизмом и реализациями наборов стратегий человека. Следовательно, допустимые технологии соответствуют допустимым стратегиям на данном временном интервале.

При устойчивом развитии ЭЭС наличие экологических ограничений влечет за собой требования ограничения множества стратегий человека; в свою очередь, это означает появление технологических ограничений в его деятельности. Покажем это на примере известных балансовых моделей экономической динамики [17].

Рассмотрим технологию с загрязнениями (отходами). Пусть имеется *s* видов загрязнения от данного производства, которые заданы матрицей интенсивностей загрязнений

$$C_p = \|c_{ij}\|, \quad i = 1, 2, \dots, s, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

где  $c_{ij} \geq 0$  — количество  $i$ -го загрязнения, продуцируемое при выпуске единицы  $j$ -го продукта. Тогда вектор загрязнений  $\bar{z}$  определяется формулой

$$\bar{z}^T = C_p \bar{x}^T \quad (10)$$

где  $\bar{x}$  — вектор-строка выпуска. В соответствии с приведенной в [17] формализацией, вектор продуктов  $\bar{y}$  в момент времени  $t$  расходуется на производство двух векторов в момент времени  $t + 1$  — вектора выпуска  $\bar{x}$  и вектора загрязнений  $\bar{z}$ , причем эти векторы принадлежат положительным ортантам евклидовых пространств размерностей соответственно  $n(t)$ ,  $n(t + 1)$  и  $s(t + 1)$ :

$$\bar{y} \in E_+^{n(t)}, \quad \bar{x} \in E_+^{n(t+1)}, \quad \bar{z} \in E_+^{s(t+1)}. \quad (11)$$

Таким образом, с учетом загрязнений технологический процесс в некоторой модели  $M$  характеризуется тройкой векторов  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ , т.е. технологическое множество  $Z_t$  может быть записано в форме

$$Z_t = \{\bar{r} : \bar{r} = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})\} \subset E_+^{n(t)+n(t+1)+s(t+1)}. \quad (12)$$

Модель  $M$  описывает состояния ЭЭС при воздействии на нее техногенного давления  $\bar{z}$ . В качестве управления технологическим процессом может служить комплекс ограничений на “выпуск” загрязнений  $\bar{z}$ . Будем использовать в виде такого ограничения вектор экологических нормативов  $\bar{z}^*$  размерности  $s(t + 1)$  — допустимых или предельных — по всем видам загрязнений, продуцируемых вектором исходных продуктов  $\bar{y}$ :

$$\bar{z} \leq \bar{z}^*, \quad \bar{z}^* \in E_+^{s(t+1)}. \quad (13)$$

Здесь вектор  $\bar{z}^*$  ограничений загрязнений полагается априори заданным. В этом случае технологическое множество в модели “затраты продукта–выпуск продукции и выпуск загрязнений” по аналогии с формализмом “затраты–выпуск”, развитым в работе [17], задается в виде связи состояний модели  $M$  в моменты времени  $t$  и  $t + 1$  как

$$Z_t^* = \{\bar{r} : \bar{r} = (\bar{x}', \bar{y}', \bar{z}, \bar{z}^*)\} \subset E_+^{n(t)+n(t+1)+s(t+1)}, \quad (14)$$

где вектор  $(\bar{x}', \bar{y}')$  определяет технологический процесс, удовлетворяющий ограничению на объем продуцируемых загрязнений (13).

Введение экологических норм и ограничений приводит в моделях технологических процессов к существенному ограничению объема выпуска продукции, и технологическое множество (14) заведомо отличается от технологического множества  $Z_t$  модели без экологических ограничений. Следовательно, проекция технологического множества (14), на положительный ортант  $E_+^{n(t)+n(t+1)+s(t+1)}$  входит в технологический конус  $Z_t$ :

$$\text{Proj}(Z_t^*) = \{\bar{j} : \bar{j} = (\bar{x}', \bar{y}')\} \subset Z_t. \quad (15)$$

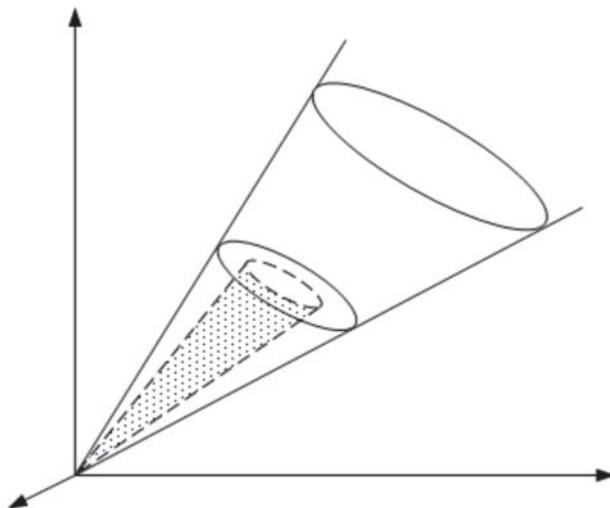


Рис. 5. Сужение конуса технологий

Экологические ограничения (13) придают множеству (15) существенные отличия по сравнению с технологическим конусом  $Z_t$ . Они означают появление внутренних поверхностей, которые отсекают от конуса  $Z_t$  некоторую часть его "бокового объема" и "подрезают" его сверху (рис. 5); в силу этого, технологическое множество (15) уже не обладает свойством линейности. Чем "грязнее" технология (большие компоненты вектора  $\bar{z}$ ) и чем больше компоненты вектора  $\bar{z}^*$  ограничений на загрязнения, тем больше сужение области допустимых технологий (14) и, значит, меньше допустимый объем выпуска продукта.

Ограничение (13) является достаточно жестким; при затратных и "грязных" технологиях оно может настолько снизить объем выпуска, что данный производственный процесс станет экономически нецелесообразным. В этом случае продолжение осуществления технологического процесса (продолжение реализации некоторого набора стратегий человека) с нарушением ограничения (13) неминуемо приведет к опасности нарушения природного равновесия со всеми последствиями для обитания человека на данной территории, о чем уже говорилось ранее. Отсталые технологии ныне выталкиваются из развитых стран путем принятия там жесткого экологического законодательства, причем его нормы перманентно ужесточаются. Только такие стратегии, по мнению М. Портера [18], высказанному более 20 лет назад, приведут к достижению наибольших успехов в экономике.

**Устойчивое развитие.** Устойчивое развитие предполагает разграничение понятий рост и развитие. Целью развития экономической системы является ее количественный рост в течение длительного времени: увеличение объема товаров и услуг за счет увеличения количества используемых природных ресурсов. В отличие от процесса роста, процесс развития предполагает качественное преобразование системы

и повышение эффективности производства при постоянном и даже уменьшающемся количестве используемых ресурсов.

Естественным образом возникает вопрос о мерах по обеспечению устойчивого развития. Здесь появляется концепция критического природного капитала как необходимых для жизни природных благ, которые невозможно заменить искусственным путем. К ним относятся: ландшафты, редкие виды флоры и фауны, озоновый слой в верхней части земной атмосферы, глобальный климат и т.д. Этот критический природный капитал  $N^*$  необходимо сохранять при любых сценариях экономического развития. Остальная часть природного капитала может быть заменена искусственным путем — имеются в виду возобновляемые и некоторая часть не возобновляемых природных ресурсов (например, природные энергоресурсы могут быть заменены на солнечную энергию, одного процента которой вполне хватило бы на обеспечение всей современной потребности человечества).

Устойчивое развитие может быть дополнено ограничением на исчерпание во времени величины  $N^*$ . Для неубывающей во времени  $t$  производственной функции, аргументами которой являются агрегированные переменные капитала  $K$ , труда  $L$  и природного ресурса  $N$ ,

$$F_t(K, L, N) \leq F_{t+1}(K, L, N) \quad (16)$$

необходимо соблюдение условия неубывания во времени величины  $N^*$

$$N_t^* \leq N_{t+1}^*, \quad (17)$$

а также условие частичной замены природного капитала  $N$  на искусственный  $N_s$  (или невозобновляемого ресурса на возобновляемый ресурс)

$$N_t = N_t^* + N_s^*. \quad (18)$$

Перевод ЭЭС в состояние устойчивого развития характеризуется доминирующим учетом экологических ограничений, лимитирующих значение агрегированной нагрузки на экологическую подсистему, и постепенным редуцированием антропогенного воздействия до уровня, предельно допустимого, при котором риски катастрофических и критических явлений будут минимальными. Так, в случае кооперативной игры стратегии человека, отвечающие линиям безразличия  $A$  на рис. 2, являются более предпочтительными. Система ограничений (16)–(18) представляет собой основной критерий устойчивого развития.

Концептуальная схема сосуществования человека с природой, в основе которой лежит критерий устойчивого развития, представлена на рис. 6. Такая схема может быть конкретизирована как на глобальном уровне, так и на региональном (тогда в качестве критерия оптимальности может быть принята характеристика (6)).

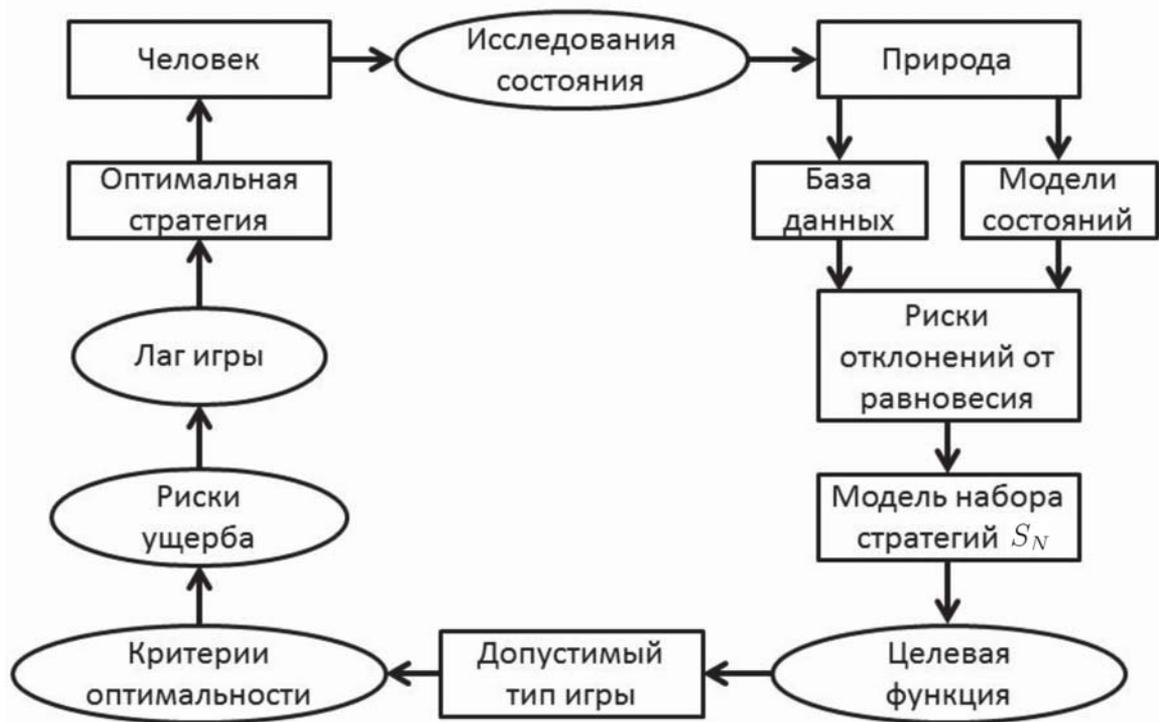


Рис. 6. Схема сосуществования человека и природы

Схема представляет собой замкнутый цикл повторяющихся во времени этапов; она предусматривает исследования состояний природы (как настоящих, так и возможных) с формированием базы данных и созданием совокупности моделей этих состояний.

Обязательным этапом является расчет рисков отклонений от состояния равновесия; далее определяется модельный набор вероятных стратегий природы  $S_N$ , по которому подбирается целевая функция. Следующий этап состоит в определении допустимого типа игры — от игр с нулевой суммой до кооперативных игр; по выбранному типу игры выбирается критерий оптимальности. Далее необходимо определить риски ущерба, нанесенного природе (ее проигрыши). После этого нужно найти приемлемый лаг игры: он не может быть бесконечным ввиду опасности накопления негативных последствий деятельности человека. С учетом показателей рисков ущерба определяется оптимальная стратегия человека на выбранном лаге игры. Наконец, после реализации этой оптимальной стратегии необходимо на следующем временном шаге опять реализовать все этапы цикла. В приведенной схеме критерий устойчивого развития (16)—(18) целесообразно учитывать в блоке “Целевая функция”.

**Иерархия моделей.** В приведенной выше схеме предусматривается использование моделей. Укажем в самом общем виде типы современных моделей, которые могут составлять иерархии, необходимые для прогнозирования состояний природы, а также для определения допустимых стратегий человека. Это модели следующих классов:

- модели парных игр: игры с нулевой суммой и игры с ненулевой суммой;
- критерии оптимальности игр;
- модели техногенных причин аномалий климата;
- экспертные модели;
- оптимизационные модели ЭЭС;
- балансовые модели ЭЭС (типа модифицированных моделей Леонтьева—Форда);
- модели статистических связей между параметрами (переменными моделями ЭЭС);
- глобальные системно-динамические модели ЭЭС с управлением;
- модели установления интервалов устойчивости ЭЭС и определения критических сочетаний параметров, приводящих к резким нестационарным переходам их состояний (точки бифуркации);
- комплекс вспомогательных моделей обработки, агрегирования и наглядного представления информации (информационные технологии OLAP);
- комплекс систем поддержки и принятия решений (СППР).

Указанная совокупность моделей должна носить характер открытой системы с возможностью присоединения к ней вспомогательных блоков — например, моделей природных процессов. Анализ прогнозной информации, полученной посредством использования этой иерархии, должен являться основой для принятия решений, в том числе и тех, которые определяют цели в стратегическом плане и стратегическое планирование.

**Выводы (что в перспективе?).** Все страны по уровню их национальных экономик и, соответственно, по стратегиям, можно разделить на две большие группы. К первой из них следует отнести государства с развитой экономикой. Прежде всего это страны ЕС; выбор их стратегий близок к схеме рис. 6. В экологическом законодательстве они последовательно переходят на жесткое регулирование — соблюдение условия (13) с перманентным уменьшением компонент вектора критических значений загрязнений  $\bar{z}^*$  (здесь приоритет принадлежит Новой Зеландии). Это обуславливает быструю динамику развития новых технологий с низким ресурсо- и энергопотреблением, а также активный поиск альтернативных и экологичных технологий генерации энергии с невысокими уровнями риска. В ближайшем будущем появятся мощные источники генерации энергии путем утилизации солнечного излучения, а также следует ожидать значительного увеличения доли использования возобновляемых природных энергоресурсов и когенерации энергии.

Вторая группа стран (развивающиеся и с низким уровнем развития экономики) реализует другие целевые функции и иные экономические стратегии: достижение, главным образом, краткосрочных экономических целей даже посредством использования затратных и устаревших технологий (сюда же можно включить и ряд ресурсодобывающих ТНК) с весьма высокими рисками ЧС.

Разрыв между этими группами стран будет перманентно увеличиваться вследствие существенного различия их стратегий, что, в свою очередь, приведет к появлению новых экономических и экологических барьеров между ними и, следовательно, к новым формам глобального противостояния. Предстоит череда учащающихся локальных экологических и социальных катастроф, чреватых большими рисками глобальных природных изменений техногенного происхождения (таких как в Чернобыле, Мексиканском заливе и Фукусиме).

Это будет отрицательно влиять на качество жизни и продуцировать нестабильность экономики во всех странах.

Основные усилия мирового сообщества нужно сосредоточить на разработке согласованной глобальной эколого-экономической стратегии, причем ее долгосрочным приоритетам должны соответствовать стратегии всех национальных экономик. Однако существующий миропорядок не способствует этому: подавляющее большинство стран примитивно реализует сугубо свои экономические краткосрочные цели. Приходится лишь надеяться на перспективу международной кооперации. А пока что сохраняется тенденция роста техногенного давления на природу в масштабах, угрожающих человечеству.

*Автор признателен профессору Финансового университета при Правительстве РФ Л.Г. Лабскеру, профессору Университета “Париж-8” П. Булоню и профессору Университета “Париж-6” Д.П.-Лоти-Виаду за полезные обсуждения аспектов работы.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К р а с с М. С. Моделирование эколого-экономических систем. – М.: ИНФРА-М, 2010. – 272 с.
2. К р а с с М. С. Электроэнергетика инновационной экономики России / Эффективное государственное управление в условиях инновационной экономики; Под ред. С.Н. Сильвестрова. – М.: Финуниверситет при Правительстве РФ, 2012.
3. К р а с с М. С., М е р з л и к и н В. Г., С и д о р о в О. В. Моделирование техногенных причин короткопериодных аномалий климата // Вестник Томского гос. ун-та. Сер. Науки о Земле, 2011. № 349, с. 193–199; № 350, с. 200–203.
4. М о н и н А. С. Климат как проблема физики // УФН. – 2000. – Т. 70, № 4. – С. 419–445.
5. N O A A (National Oceanic Atmospheric Administration) / ESRL (Earth System Research Laboratory. Physical Science Division), <http://blog.agu.org/geospace/2010/08/25/blocked-up-weather/>

6. Z a n g a r i G. Risk of global climate change by BP oil spill. National Laboratories (LNF) National Institute of Nuclear Physics (INFN). Italy. (2010). <http://www.associazionegeofisica.it/oilspill.pdf/>
7. К р а с с М. С., М е р з л и к и н В. Г. Техногенные аномалии климата и стратегическое планирование // Экономические стратегии. – 2011, № 4. – С. 6–17.
8. L o t i - V i a u d - D. P., B o u l o n g n e P. Mathématique et assurance, quelques outils pour établir un tarif en assurance non-vie (в печати).
9. П о р ф и р ь е в Б. Н. Экономика климатических изменений. – М.: АНК ИЛ, 2008. – 168 с.
10. Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияние на отрасли экономики России. – М., Федеральная служба по гидрометеорологии и контролю окружающей среды (Росгидромет), 2006.
11. Л а б с к е р Л. Г. Теория критериев оптимальности и экономические решения. – М.: КНОРУС, 2008. – 744 с.
12. У р с у л А. Д., Д е м и д о в Ф. Д. Устойчивое социоприродное развитие. – М.: РАГС, 2006.
13. К р а с с М.С., Ч у п р ы н о в Б. П. Математические методы и модели для магистрантов экономики. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 496 с.
14. Б о б ы л е в С. Н., Х о д ж а е в А. Ш. Экономика природопользования. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 501 с.
15. А к и м о в а Т. А., Х а с к и н В. В. Экология. Человек–экономика–биота–среда. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. – 494 с.
16. К р а с с М. С. Концепция исследования современных проблем экономики // Экономические науки. – 2010. – № 5(66). – С. 246–260.
17. К р а с с И. А. Математические модели экономической динамики. – М.: Сов. радио, 1976. – 280 с.
18. P o r t e r, M i c h a e l. The competitive advantages of nations. New York, 1990.

Статья поступила в редакцию 28.09.2011



Максим Семенович Красс родился в 1940 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1965 г. Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры “Математическое моделирование экономических процессов” ФГОБУ ВПО “Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации”. Автор 160 научных и учебно-методических работ в области математических моделей природных процессов и экономики.

M.S. Krass (b. 1940) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1965. D. Sc. (Phys.-Math.), professor of “Mathematical Modeling of Economical Processes” department of the Financial University under the Government of the Russian Federation. Author of 160 publications and textbooks in the field of mathematical models of natural processes and of economy.