

О.В. Луговой

РАНХиГС, Москва

А.В. Полбин

РАНХиГС, ИЭП имени Е.Т. Гайдара, Москва

## О распределении бремени сокращения выбросов парниковых газов между поколениями

**Аннотация.** Предлагается модификация динамической интегрированной модели климата и экономики (DICE) В. Нордхауса, в рамках которой в модель вводятся перекрывающиеся поколения и рассматривается рыночное равновесие с государством, проводящим оптимальную политику Рамсея для снижения выбросов парниковых газов. Данная концепция позволяет различать две нормы межвременных предпочтений: субъективную (присущую отдельным индивидам) и предпочтения государства. Таким образом, модель позволяет разделить анализ затрат и выгод в области снижения выбросов парниковых газов и анализ инвестиционных решений в физический капитал. С помощью методов численного имитационного анализа показано, что введение в модель поколений при прочих равных рационализирует большее и раннее сокращение выбросов, не оказывая значительного влияния на рыночные доходности капитала. Долгосрочный выигрыш от более решительных мер в борьбе с глобальным потеплением составляет приблизительно 1 °С.

**Ключевые слова:** дисконтирование, выбросы парниковых газов, глобальное потепление, перекрывающиеся поколения, интегрированные модели климата и экономики.

Классификация JEL: H23, H41, Q4, Q2, Q20, Q28.

### Введение

Проблема антропогенного воздействия на климат все больше беспокоит мировое сообщество. Стремительно растущее накопление парниковых газов (ПГ) в атмосфере может привести к катастрофическим и необратимым последствиям для климата на планете. Согласно докладам Межправительственной группы экспертов по изменению климата<sup>1</sup> (IPCC, 2013, 2014) в период 1880–2012 гг. произошел рост среднемировой температуры поверхности Земли и Мирового океана на 0,85 °С (с 90%-ным доверительным интервалом 0,65–1,06 °С). При этом концентрация в атмосфере основных парниковых газов (углекислого газа, метана и закиси азота) возросла до невиданных уровней, по крайней мере за последние 800 тысяч лет. Концентрация углекислого газа увеличилась на 40% по сравнению с доиндустриальной эпохой.

В докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2013, 2014) делается вывод, что с вероятностью свыше 95% более половины наблюдаемого увеличения среднемировой температуры с 1951 по 2010 г. было вызвано антропогенным увеличением концентрации парниковых газов, связанным в первую очередь со сжиганием ископаемого топлива, изменениями в землепользовании и вырубкой лесов. При этом антропогенное воздействие

<sup>1</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (<http://www.ipcc.ch/>).

на климат только возрастает. Какие-либо оценки будущего роста температуры и других аспектов изменения климата будут зависеть от сценариев выбросов парниковых газов. Рост температуры к концу XXI в. относительно средней температуры 1850–1900 гг. может составлять порядка 1,5–4 °С.

Несмотря на относительно низкое внимание к данной проблеме в России, все больше стран вводят системы регулирования выбросов парниковых газов, устанавливая квоты, биржевую торговлю разрешениями на выбросы либо облагая их налогами (см., например, (Kossoy et al., 2015)). В 2015 г. было разработано новое Парижское соглашение Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН), на котором страны декларировали долгосрочную цель ограничить выбросы на таком уровне, чтобы предотвратить увеличение температуры выше, чем 2 °С относительно доиндустриального уровня, а стремиться должны не превысить порог в 1,5 °С.

С экономической точки зрения анализ проблемы противодействия климатическим изменениям оказался нетривиальной задачей. Во-первых, точно не известны ни экономический ущерб от изменений климата, ни издержки сокращения выбросов парниковых газов. Во-вторых, задача является сверхдолгосрочной, т.е. выходит за рамки жизни одного человека. Если меры по противодействию климатическим изменениям должны быть определены и приняты сейчас, то видимые позитивные эффекты от этого проявятся лишь через 30–50 и более лет. Другими словами, затраты и выгоды от этих мер сильно разнесены во времени и приходится на разные поколения. Как правило, такие эффекты рассматриваются в интегрированных экономико-климатических моделях общего равновесия с горизонтом планирования 100 и более лет. В условиях столь большого горизонта планирования выводы об оптимальном сокращении выбросов парниковых газов становятся крайне чувствительны к ставке дисконтирования.

Целью настоящей работы является обсуждение проблемы выбора дисконта при анализе затрат и выгод от сокращения выбросов парниковых газов и распределения бремени от сокращения выбросов между отдельными поколениями в рамках интегрированных моделей климата и экономики. Примечательно, что наиболее активная дискуссия о выборе дисконта проводится в рамках моделей, упрощенно предполагающих наличие лишь одного, бесконечно живущего экономического агента (ИА). В данной работе предлагается модель с перекрывающимися поколениями (OLG), которая позволяет различать две ставки дисконтирования: для анализа затрат и выгод в области снижения выбросов парниковых газов и для анализа инвестиций в физический капитал. На основе предложенной модели с помощью методов численного имитационного анализа изучается влияние альтернативных мер экономической политики в области снижения выбросов парниковых газов.

Работа построена следующим образом. В разд. 1 приводится обзор дискуссии о дисконтировании в интегрированных моделях климата и экономики, а также их стандартная структура. В разд. 2 представлено описание интегрированной модели климата и экономики с перекрывающимися поколениями, в разд. 3 описывается калибровка параметров, в разд. 4 – результаты численного имитационного анализа. В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы.

### **1. Интегрированные модели климата и экономики: дискуссия о дисконте**

Растущее внимание к проблеме климатических изменений развило целую область в экономической литературе, в которой делаются попытки объединить климатический блок с экономической деятельностью человека. Широкое распространение получили так называемые динамические интегрированные модели климата и экономики, в которых ставится задача поиска оптимальной траектории снижения выбросов парниковых газов. Примерами таких моделей являются DICE (Nordhaus, 1992; 2008), RICE (Nordhaus, Yang, 1996), DICER (Ortiz et al., 2011), DSICE (Cai et al., 2012), MRICES (Wang et al., 2012), MERGE (Manne et al., 1995), PAGE (Plambeck et al., 1997), FUND (Tol, 2002) и др.

В данных моделях вводится связь между климатическими изменениями на планете и экономической деятельностью человека. Предполагается двустороннее влияние воздействия экономической деятельности человека на климат и климатических изменений на экономическую деятельность: производство товаров и услуг сопряжено с выбросами парниковых газов, которые влияют на климат с продолжительным лагом. Изменение климата, в свою очередь, оказывает воздействие на уровень производства и благосостояние экономических агентов. Под оптимальной траекторией ограничения выбросов подразумевается траектория, которая доставляет максимум некоторой функции общественного благосостояния за длительный период времени (100 лет и более).

Несмотря на существенную неопределенность относительно моделирования влияния выбросов парниковых газов на экологическую и экономическую системы, наиболее спорным элементом моделей данного класса оказался дисконт, в рамках которого сравниваются будущие выгоды с сегодняшними издержками. Наиболее ярким примером является дискуссия о дисконте В. Нордхауса и Н. Стерна (Nordhaus, 2007, 2008; Stern, 2007). Данные авторы в своих исследованиях используют схожие модели, но различные предпосылки. В обоих случаях рассматривалась задача центрального планирования в модифицированной модели роста мировой экономики (модель Рамсея (Ramsey, 1928)), в которой проводилась максимизация функции общественного благосостояния вида

$$W = \sum_{t=1}^{T_{max}} \frac{1}{(1+\rho)^t} (N_t V(c_t)), \quad V(x) = \begin{cases} \left( \frac{x^{1-\theta} - 1}{1-\theta} \right), & \text{если } \theta \in (0, 1) \cup (1, +\infty); \\ \ln x, & \text{если } \theta = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $N_t$  – численность населения,  $c_t$  – потребление на душу населения,  $\theta$  – эластичность предельной полезности потребления,  $\rho$  – социальная норма межвременных предпочтений,  $T_{max}$  – продолжительность отрезка времени, на котором производится оптимизация.

Разногласия в калибровке параметров эластичности предельной полезности потребления и социальной нормы межвременных предпочтений получили основной резонанс в литературе, так как эти два параметра в совокупности определяют дисконт, с которым проводится анализ затрат–выгод от снижения выбросов парниковых газов. Так, в стандартной модели Рамсея сбалансированного роста долгосрочная реальная доходность капитала  $r^*$  определяется выражением

$$r^* \approx \rho + \theta g^*, \quad (2)$$

где  $g^*$  – долгосрочный темп роста производительности труда.

Таким образом, существует множество комбинаций социальной нормы межвременных предпочтений и эластичности предельной полезности потребления, которые обеспечивают одно и то же значение реальной доходности (если темп роста производительности ненулевой). И выбор этих двух параметров является ключевым как с содержательной точки зрения, так и для конечного результата.

При калибровке этих параметров В. Нордхаус (Nordhaus, 2008) исходит из того, что модель должна воспроизводить наблюдаемую реальную рыночную доходность капитала и калибрует значения  $\theta = 2$  и  $\rho = 1,5\%$  в год. В такой постановке издержки климатической политики оцениваются при сложившихся рыночных условиях, что соответствует позитивному подходу в экономическом анализе. При данной калибровке оптимальная в рамках модели (Nordhaus, 2008) траектория выбросов демонстрирует относительно умеренные темпы снижения.

Однако данный подход к калибровке противоречит теории классического утилитаризма (Arrow et al., 1996; Broome, 1992; Cline, 1992; Howarth, 2004; Ramsey, 1928), в соответствии с которой дисконтирование благосостояния будущих поколений является несправедливым с этической точки зрения. Насколько может быть обоснованным придавать различный вес к благосостоянию отдельных поколений только потому, что они живут в разное время?

Точки зрения классического утилитаризма и, соответственно, нормативному подходу в экономическом анализе придерживался Н. Стерн (Stern, 2007), который калибровал параметры эластичности и социальной нормы межвременных предпочтений на критично низком уровне  $\theta = 1, \rho = 0,1\%$ . В итоге, Н. Стерн (Stern, 2007) приходит к выводам, что выбросы должны снижаться незамедлительно и резко.

Авторы работ (Nordhaus, 2007; Wietzman, 2007) считают, что такие результаты вызваны тем, что в случае калибровки модели Стерна (Stern, 2007) она не отражает наблюдаемых реальных доходностей капитала. В (Nordhaus, 2007) демонстрируется, что если даже рассматривать утилитаризм с социальной нормой межвременных предпочтений  $\rho = 0,1\%$ , необходимо поднять значение параметра эластичности предельной полезности до 3, чтобы обеспечить согласованность модели с рыночной реальной доходностью. И в данном случае выводы об оптимальном снижении выбросов остаются умеренными. П. Дасгупта (Dasgupta, 2007) также отмечает, что калибровка Стерна приводит к невообразимо высокой доле сбережений в ВВП, что не соответствует реальности. В свою очередь, в работе (Dietz, Stern, 2008) считается, что наблюдаемые доходности капитала могут содержать в себе множество искажений рынка и содержат мало информации о ставках дисконтирования для сверхдолгосрочных проектов.

Некоторым компромиссом, сближающим два подхода к калибровке моделей, мог бы стать изменяющийся во времени дисконт. На сегодняшний день многие экономисты разделяют точку зрения, что ставка дисконтирования должна снижаться во времени (Argow et al., 2012). Это может быть обосновано неопределенностью будущих ставок дисконтирования (Weitzman, 1998, 2001) и будущего экономического роста (Gollier, 2002; Weitzman, 2010). На реализацию роста, в свою очередь, влияет неопределенность ущерба от изменения климата. Все это приводит к использованию в настоящий момент снижающихся во времени скорректированных на риск ставок дисконтирования будущих инвестиционных проектов.

Другим доводом в пользу убывающего во времени дисконта, в частности гиперболического дисконтирования, является предположение о том, что живущие в определенный момент времени поколения ценят в меньшей мере полезность своих детей и внуков по сравнению с собственной, что приводит к положительной норме межвременных предпочтений на временном горизонте отдельных поколений, но не сильно различают между собой благосостояния следующих одним за другим поколений в далеком будущем (подробнее см., например, (Karp, 2005)). Следует отметить, что при убывающем во времени дисконте может возникнуть проблема динамической несостоятельности, для решения которой в работах (Karp, 2005; Fujii, Karp, 2008; Karp, Tsur, 2011) при изучении проблемы снижения загрязнений окружающей среды анализируются решения в контексте многошаговых игр.

В работе Янга (Yang, 2003) в русле дискуссии о выборе дисконта при анализе политики снижения выбросов парников газов предлагается подход двойственного дисконтирования в интегрированных моделях климата и экономики, в рамках которого для анализа инвестиционных решений в физический капитал и для анализа снижения выбросов парниковых газов используются различные

ставки дисконтирования. Для формализации предлагаемого подхода рассматривается постановка задачи, в которой бесконечно живущее домохозяйство максимизирует дисконтированный поток полезностей от стандартных потребительских благ и благ окружающей среды, при этом для последних используется более низкая норма межвременных предпочтений. З. Янг (Yang, 2003) демонстрирует применимость подхода в Региональной модели климата и экономики (Nordhaus, Yang, 1996).

Идея двойственного дисконтирования широко используется в задачах устойчивого развития, управления природными ресурсами. Так, в (Sjølief et al., 2013) используется двойственное дисконтирование при решении проблемы вырубki лесов; в (Borissov, Shakhnov, 2011) анализируются траектории устойчивого развития в модели загрязнения окружающей среды; в (Howard, 2013) приводятся экспериментальные подтверждения, основанные на опросах студентов, тому, что индивиды используют более низкую норму межвременных предпочтений при временном дисконтировании полезности социальных благ по сравнению с дисконтированием полезности благ, приносящих личную пользу.

Р. Тол (Tol, 2004) отмечает, что двойственное дисконтирование может объясняться тем, что по мере роста доходов у экономических агентов может возрасти предельная готовность платить за благо окружающей среды, т.е. относительная ценность данного блага по сравнению с потребительскими благами будет возрастать по мере роста доходов. Данная идея также обсуждалась в работах (Hore et al., 1993; Hasselmann et al., 1997).

В работах (Weikard, Zhu, 2005; Hoel, Sterner, 2007) показывается, что более высокий темп роста объема стандартного потребительского блага по сравнению с темпами роста объема блага окружающей среды, в частности его деградации, при условии ограниченной взаимозаменяемости данных двух благ будет приводить к возрастающей цене блага окружающей среды и предельной готовности платить за него, что, в свою очередь, будет обуславливать более низкие ставки дисконтирования для благ окружающей среды. В работе (Sterner, Persson, 2008) демонстрируется, что с помощью данных предпосылок возможно рационализировать более радикальные выводы о снижении выбросов парниковых газов Т. Стерна (Stern, 2007), не прибегая к нулевой норме межвременных предпочтений. К. Голлиер (Gollier, 2010) показывает, что высокая неопределенность динамики блага окружающей среды может приводить к еще более низкой ставке дисконта для данного блага.

Вышеописанные работы опирались на класс моделей с бесконечно живущим агентом. На наш взгляд, концепция двойственного дисконтирования естественным образом возникает в модели с перекрывающимися поколениями. В данной работе предлагается модель

рыночной экономики OLG, которая является расширением модели DICE Нордхауса (Nordhaus, 2008). В модель вводятся семь поколений домохозяйств, совершенно конкурентные фирмы и государство. При этом рассматривается задача оптимальной политики Рамсея (Ramsey, 1927), в которой государство устанавливает траекторию инструмента политики (контролируемую долю снижения выбросов), максимизируя функцию общественного благосостояния в условиях рационального поведения экономических агентов. Явное описание в модели поколений позволяет напрямую анализировать аспекты экономико-климатической политики, затрагивающей благосостояния живущих в разное время индивидов.

Возвращаясь к дискуссии В. Нордхауса и Н. Стерна (Nordhaus, 2007; Stern, 2007; Dietz, Stern, 2008), по нашему мнению, остается непонятным, почему постановка задачи центрального планирования в модели ПЛА должна воспроизводить наблюдаемые доходности капитала, и насколько мы вправе манипулировать показателями социальной нормы межвременных предпочтений и предельной полезности потребления. Равновесное значение процента в рыночной экономике может отличаться от предельного продукта капитала за вычетом амортизации в задаче центрального планирования. Так, в базовой модели с перекрывающимися поколениями Даймонда (Diamond, 1965) и Самуэльсона (Samuelson, 1958) в отличие от модели роста Рамсея (Ramsey, 1928) равновесия в рыночной экономике и в задаче центрального планирования неэквивалентны, при этом значения равновесных доходностей капитала могут быть различными.

Манипулирование параметром социальной нормы межвременных предпочтений в модели ПЛА, аргументируемое В. Нордхаусом (Nordhaus, 2007), также является весьма сомнительным при изучении вопросов, затрагивающих различные поколения (см., например, (Solow, 1986)). Из того что отдельные индивиды дисконтируют свою будущую полезность, никаким образом не следует, что государство должно использовать положительный дисконт при имплементации политики, затрагивающей разные поколения.

Рассматриваемая в настоящей работе постановка задачи фактически позволяет различать две ставки дисконтирования для проведения анализа затрат–выгод. Первая ставка определяется в рамках рыночного взаимодействия между фирмами и домохозяйствами и применяется для анализа инвестиционных решений в физический капитал. Вторая ставка определяется из задачи государства и применяется для анализа оптимального снижения выбросов парниковых газов.

В качестве функции общественного благосостояния мы используем спецификацию, при которой государство ценит благосостояние всех поколений, ныне живущих и будущих, эквивалентно. Как показано в работе (Quiggin, 2012), при стандартных аксиомах общественного выбора (оптимальности по Парето, транзитивности и неза-



висимости) в модели с перекрывающимися поколениями единственным упорядочиванием, при котором поколения, живущие в каждый отдельный момент времени, ценятся одинаково, является спецификация общественного благосостояния с равными весами для благосостояния всех поколений, ныне живущих и будущих. Дж. Квиггин (Quiggin, 2012) акцентирует внимание на том, что при обсуждении вопросов оптимального снижения выбросов парниковых газов дискуссия о социальной норме дисконта основывается на различии между ныне живущими и будущими поколениями. Но использование положительного дисконта в функции общественного благосостояния для полезностей будущих поколений также приводит к дискриминации ныне живущих молодых поколений по сравнению с пожилыми поколениями.

Принципы дисконтирования, обсуждаемые в данной работе, согласуются с исследованиями, в которых также анализировалась проблема снижения выбросов парниковых газов и истощения природных ресурсов в контексте моделей с перекрывающимися поколениями. В работах (Burton, 1993; Marini, Scaramozzino, 1995; Schneider et al., 2012; Endress et al., 2014) при рассмотрении постановки задачи центрального планирования показано, что определяющую роль в скорости истощения природного ресурса (а также в динамике агрегированного потребления, реального процента) играет социальная норма межвременных предпочтений. Субъективная же норма межвременных предпочтений определяет распределение благосостояния в течение жизненного цикла отдельного поколения.

Это обусловлено тем, что задача центрального планирования в модели OLG разбивается на две подзадачи. Первая соответствует оптимальному распределению агрегированного потребления во времени, как и в стандартной модели Рамсея. Вторая соответствует распределению агрегированного потребления между отдельными поколениями в каждый момент времени. Данное свойство изначально было показано в работе (Calvo, Obstfeld, 1988) при анализе оптимальной фискальной политики в модели с перекрывающимися поколениями. Таким образом, для случаев разделения индивидуальных и социальных дисконтов далее рассматривается спецификация модели с рыночной экономикой.

Как отмечалось выше, общество может ценить частные и общественные блага по-разному. По нашему мнению, решение задачи в рыночной экономике, когда государство не затрагивает сложившихся экономических отношений на рынке капитала, а только корректирует экстерналии, связанные с наличием выбросов парниковых газов, дисконтируя затраты и выгоды от предотвращения глобального потепления с меньшим по сравнению с рыночным дисконтом, может вполне являться результатом коллективного выбора. Вопрос о конкретной величине данного социального дисконта, конечно, остается откры-



тым. Решение же задачи центрального планирования с использованием меньшего дисконта по сравнению с рыночным привело бы также к значительному перераспределению частных капитальных ресурсов в пользу будущих поколений и значительному снижению потребления нынеживущих поколений.

Работ, в которых анализировались различные аспекты проблемы глобального потепления и загрязнения окружающей среды в контексте моделей с перекрывающимися поколениями, достаточно много (например, (Howarth, Norgaard, 1992; Howarth, 1996; Howarth, 1998; Bovenberg, Heijdra, 1998; Gerlagh, Zwaan, 2001; Heijdra et al., 2006; Karp, Rezaei, 2014)). И из-за ограничений на объем статьи привести всеобъемлющий обзор существующих работ не представляется возможным.

В настоящей работе мы ставим целью рассмотреть постановку задачи двойственного дисконтирования в расширенной модели с перекрывающимися поколениями для климата и экономики DICE (Nordhaus, 2008). В предыдущих работах концепция двойственного дисконтирования рассматривалась либо в моделях ИА, либо в неявной форме в очень упрощенных моделях OLG с двумя поколениями и логарифмической функцией полезности (Howarth, 1998). Использование оригинальной модели Нордхауса в качестве отправной точки позволит максимально близко остаться в рамках аппарата их дискуссии со Стерном о выборе дисконта и оптимальной траектории выбросов (Nordhaus, 2007; Stern, 2007; Dietz, Stern, 2008).

## **2. Интегрированная модель климата и экономики с перекрывающимися поколениями**

В данной части работы описывается модель с перекрывающимися поколениями мировой экономики, в рамках которой в дальнейшем анализируются альтернативные меры экономической политики в области снижения выбросов парниковых газов. Предложенная модель является модификацией модели центрального планирования с бесконечно живущим экономическим агентом DICE (Nordhaus, 2008), в которой решается задача максимизация общественного благосостояния при экономических и экологических динамических ограничениях. Во-первых, мы вводим в модель семь перекрывающихся поколений. Аналогичная структура поколений рассматривалась в работе (Fougère et al., 2007). Во-вторых, мы разделяем задачи максимизации общественного благосостояния, решаемой общественным планировщиком, от задачи индивидов в межвременном выборе потребления и инвестиций, что позволяет сформулировать рыночное равновесие в более явном виде. В-третьих, при анализе оптимальной политики снижения выбросов парниковых газов мы используем подход Ф. Рамсея (Ramsey, 1927) к формализации задачи оптимальной политики в рыночной экономике.

## 2.1. Рыночная экономика

**Домохозяйства.** В модели предполагается, что каждый взрослый человек живет 7 периодов по 10 лет и заканчивает трудовую деятельность после 5 периодов. В каждый момент времени самое старое поколение умирает и новое поколение входит в рабочую силу. Это означает, что в каждый момент времени живут семь поколений. Трудовая жизнь начинается в 15 лет, младшие индивиды считаются полностью зависимыми от своих родителей, для которых они не являются дополнительным бременем, а их полезность не учитывается в функции благосостояния.

Все индивиды имеют совершенное предвидение, полностью выходят из рабочей силы в возрасте 64 лет и умирают в 84 года. В модели не рассматривается пенсионная система. Домохозяйства делают сбережения за первые 5 периодов, чтобы обеспечить себе потребление в старости. Задача индивида, который начинает трудовую деятельность, заключается в максимизации межвременной функции полезности при бюджетном ограничении. Предполагается, что функция полезности  $U$  является сепарабельной (т.е. полезность в каждый момент времени зависит только от потребления в этот момент) с постоянной эластичностью межвременного замещения и имеет вид

$$U_t = \sum_{g=1}^7 \left( \frac{1}{1+\tilde{\rho}} \right)^{g-1} V(C_{g,t+g-1}), \quad V(x) = \begin{cases} \left( \frac{x^{1-\theta} - 1}{1-\theta} \right), & \text{если } \theta \in (0,1) \cup (1,+\infty); \\ \ln x, & \text{если } \theta = 1, \end{cases} \quad (3)$$

где  $C_{g,t}$  – потребление индивидом, который принадлежит к возрастной группе  $g$  в момент времени  $t$ ;  $\tilde{\rho}$  – субъективная норма межвременных предпочтений индивида;  $\theta$  – эластичность предельной полезности потребления, или обратная величина к межвременной эластичности замещения.

Динамические бюджетные ограничения записываются следующим образом:

$$C_{t,g} + lend_{t+1,g+1} = W_{t,g} + (1+r_t)lend_{t,g}, \quad (4)$$

где  $lend_{t,g}$  – активы индивида на начало периода  $t$ , принадлежащего к возрастной группе  $g$ ,  $W_{t,g}$  – доходы труда за период  $t$ ,  $r_t$  – реальная доходность капитала. Индексы при переменной активов  $lend_{t+1,g+1}$  в левой части уравнения отражают, что в следующем периоде индивид принадлежит уже другой возрастной группе  $g+1$ .

Трудовые доходы индивида зависят от продуктивности его труда  $EP_g$ , связанной с его возрастом, которая определяется как квадратичная функция от возрастной группы

$$EP_g = \begin{cases} \gamma + \lambda g - \psi g^2, & 1 \leq g \leq 5; \\ 0, & g > 5. \end{cases} \quad (5)$$

Значения параметров данной функции выбираются таким образом, чтобы обеспечить максимум продуктивности в период между серединой жизни и выходом на пенсию. Каждый индивид наделен

количеством  $Lab_0$  единиц труда, которое не зависит от его возраста. Количество же эффективного труда определяется как произведение  $Lab_0$  на производительность в данном возрасте:

$$Lab_g = EP_g Lab_0. \quad (6)$$

Единицы же эффективного труда уже не различаются в экономике, относительно того каким экономическим агентам они принадлежат, и по каждой единице эффективного труда платится единая ставка заработной платы  $w_t$ . Таким образом, трудовые доходы индивида в возрасте  $g$  в момент времени  $t$  определяются по формуле

$$W_{t,g} = w_t Lab_g. \quad (7)$$

Общее количество эффективного труда  $L_t$  в экономике в момент времени  $t$  является суммой предлагаемых эффективных единиц труда всеми индивидами, живущими в данном периоде

$$L_t = \sum_{g=1}^7 Lab_g Pop_{t,g}, \quad (8)$$

где  $Pop_{t,g}$  – численность населения возрастной группы  $g$  в момент времени  $t$ .

В модели предполагаются совершенные финансовые рынки и отсутствие ограничений на заимствования; экономические агенты воспринимают процентные ставки и заработные платы как заданные. Условия оптимальности максимизации полезности при бюджетных ограничениях приводят к уравнениям Эйлера, связывающим потребление индивида в момент времени  $t$  с потреблением в момент  $t+1$ :

$$C_{g+1,t+1} / C_{g,t} = ((1+r_{t+1}) / (1+\tilde{\rho}))^{1/\theta}. \quad (9)$$

**Производство.** Производственный блок основан на модели Нордхауса (Nordhaus, 2008). Предполагается, что производственная функция репрезентативной фирмы, которая действует на рынке совершенной конкуренции, является функцией Кобба–Дугласа с постоянной отдачей от масштаба

$$Q_t = \Omega_t A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma}, \quad (10)$$

где  $Q_t$  – совокупный мировой выпуск,  $K_t$  – объем используемого капитала,  $L_t$  – затраты эффективного труда,  $A_t$  – нейтральный по Хиксу технологический прогресс,  $\gamma$  – коэффициент эластичности объема выпуска по капиталу,  $\Omega_t$  – функция ущерба от изменения климата.

Нестандартным элементом в производственной функции является наличие ущерба от изменения климата. В модели Нордхауса (Nordhaus, 2008) функция ущерба строится на основе оценок потерь от потепления в наиболее чувствительных к повышению температуры секторах экономики, таких как сельское хозяйство, издержек от повышения уровня Мирового океана, неблагоприятного воздействия на здоровье, от нерыночных убытков и оценок потенциальных затрат от катастрофических событий. Предполагается следующий вид функции ущерба:

$$\Omega_t = \left( 1 + \pi_1 T_t^{AT} + \pi_2 (T_t^{AT})^2 \right)^{-1}, \quad (11)$$

где  $T_t^{AT}$  – среднемировая температура атмосферы,  $\pi_1, \pi_2$  – параметры.

Таким образом, при увеличении среднемировой температуры атмосферы происходит снижение одного из множителей в производственной функции и, соответственно, наблюдается ущерб для производства товаров и услуг.

Производственная деятельность связана с выбросами углерода  $E_t^{Ind}$ , влияющими с продолжительным лагом на повышение среднемировой температуры. Рост температуры, в свою очередь, приводит к потерям в совокупном выпуске. Для краткости изложения мы не будем останавливаться на детальном описании климатического блока и представлять характеризующие его уравнения. Подробное описание представлено в работе (Nordhaus, 2008). Выбросы углерода прямо пропорциональны выпуску

$$E_t^{Ind} = \sigma_t(1 - \mu_t)A_tK_t^\gamma L_t^{1-\gamma}, \quad (12)$$

где  $\sigma_t$  – технологический параметр, в котором отражается трендовый характер снижения соотношения выбросов парниковых газов к выпуску. В модели предполагается, что этот тренд является экзогенной переменной. Параметр  $\mu_t \in [0, 1]$  – контролируемая доля снижения выбросов государством.

При контроле выбросов углерода возникают затраты на сокращение загрязнений  $TC_t$ , которые прямо пропорциональны совокупному выпуску и степенной функции от контролируемой доли снижения

$$TC_t = Q_t\theta_{1,t}\mu_t^{\theta_2}, \quad (13)$$

где  $\theta_2$  – параметр степени контролируемой доли снижения выбросов,  $\theta_{1,t}$  – технологический параметр, который отражает понижение издержек снижения выбросов с течением времени.

Модель DICE описывает экономику централизованного планирования. Мы же рассматриваем децентрализованную экономику, в которой государство устанавливает долю снижения выбросов  $\mu_t$ , исходя из максимизации функции общественного благосостояния. Предполагается, что репрезентативная фирма воспринимает долю снижения выбросов как экзогенную переменную и затраты на сокращение загрязнений  $TC_t$  ложатся полностью на фирму. Таким образом, чистый выпуск, который идет на потребление и инвестиции, определяется по формуле

$$Y_t^{net} = Q_t - TC_t = (1 - \theta_{1,t}\mu_t^{\theta_2})Q_t = (1 - \theta_{1,t}\mu_t^{\theta_2})\Omega_t A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma}. \quad (14)$$

Фактически, множитель  $(1 - \theta_{1,t}\mu_t^{\theta_2})\Omega_t A_t$  – это совокупная факторная производительность, которая при данной постановке задачи является заданной извне для фирмы. Задача максимизации прибыли в предположении совершенной конкуренции приводит к следующему спросу на факторы производства:

$$w_t L_t = (1 - \gamma)Y_t^{net}, \quad (15)$$

$$R_t^k K_t = \gamma Y_t^{net}, \quad (16)$$

где  $R_t^k$  – рентная цена единицы капитала.

**Накопление капитала.** Динамика капитала описывается стандартным уравнением

$$K_{t+1} = (1 - \delta)K_t + I_t, \quad (17)$$

где  $\delta$  – норма амортизации,  $I_t$  – инвестиции. Реальная доходность капитала определяется как рентная цена единицы капитала за вычетом амортизации

$$r_t = R_t^k - \delta. \quad (18)$$

Таким образом, реальные инвестиции в текущем периоде находятся из условия равенства предельного продукта капитала в следующем периоде за вычетом нормы амортизации реальному проценту.

**Государство.** Рассматривается задача оптимальной политики Рамсея (Ramsey, 1927), в которой государство устанавливает траекторию инструмента политики (контролируемую долю снижения выбросов), максимизируя функцию общественного благосостояния в условиях рационального поведения экономических агентов и динамических ограничений модели. Предполагается следующая последовательность событий. В начале первого периода государство, зная, какие решения примут экономические агенты, задает траекторию контролируемой доли снижения выбросов, которая будет доставлять максимум функции общественного благосостояния. Далее, экономические агенты учитывают данное ограничение и решают свои оптимизационные задачи. Другие возможные инструменты политики, такие как налоги на факторы производства и на выбросы, в модели не рассматриваются.

В настоящей работе функция общественного благосостояния строится в предположении, что государство заботится о благосостоянии живущих на данный момент поколениях (7 поколений) и  $(T_{max} - 1)$  поколениях, которые рождаются в будущем. При этом государство дисконтирует благосостояние будущих поколений с социальной нормой межвременных предпочтений  $R$ :

$$W = \sum_{t=-5}^{T_{max}} \frac{1}{(1+R)^t} U_t Pop_{t,g=1} = \sum_{t=-5}^{T_{max}} \frac{1}{(1+R)^t} Pop_{t,g=1} \left[ \sum_{g=1}^7 (1/(1+\rho))^{g-1} V(C_{g,t+g-1}) \right]. \quad (19)$$

Такую спецификацию функции общественного благосостояния можно найти, к примеру, в базовом учебнике по макроэкономике (Blanchard, Fischer, 1993). Первые 6 членов суммы ( $t = -5, \dots, 0$ ) соответствуют поколениям, родившимся в прошлом. Если государство заботится меньше о будущих поколениях, то  $R > 0$ . Если оно ценит все поколения одинаково, то  $R = 0$ .

Отдельным вопросом является постановка задачи общественного планировщика на конечном или бесконечном промежутке времени. Если рассматривать бесконечный отрезок, то при использовании социальной нормы межвременных предпочтений  $R = 0$  сумма в выражении (19) уже не будет сходиться. Для обеспечения сходимости нужно выбирать любое положительное значение данного параметра.

Нордхаус (Nordhaus, 2008) также ставил задачу оптимизации на конечном отрезке времени. Одним из полученных им результатов является то, что начиная с некоторого момента времени доля снижения выбросов  $\mu_t$  становится равной единице, т.е. выбросы парниковых газов полностью останавливаются. Это связано с тем, что основной компромисс по снижению выбросов существует между людьми, живущими в ближайшем будущем и в среднесрочном периоде. В достаточно отдаленном будущем в модели предполагается, что появятся новые дешевые технологии, которые смогут заменить все ископаемые виды топлива.

Таким образом, мы предполагаем, что государство максимизирует функцию общественного благосостояния на конечном, но достаточно большом отрезке времени. Анализ на чувствительность по горизонту планирования свидетельствует в пользу достаточно высокой стабильности результатов при увеличении отрезка времени.

Равновесия на рынках. Условие равновесия на рынке товаров соответствует равенству агрегированного спроса на товары для потребления и инвестиций предложению чистого выпуска; на рынке труда – равенству агрегированного предложения эффективного труда со стороны домохозяйств спросу на эффективный труд со стороны фирмы; на рынке активов – равенству спроса на капитал со стороны фирмы сумме активов по всем домохозяйствам.

## 2.2. Задача центрального планирования

В задаче центрального планирования предполагается, что государство максимизирует функцию общественного благосостояния (19) при климатических и экономических ограничениях. Здесь не рассматриваются рынки и условия оптимальности в качестве ограничений задачи центрального планировщика. Государство принимает решение по всем эндогенным переменным, включая как контролируемую долю снижения выбросов парниковых газов, так и потребление отдельных поколений и инвестиции.

## 3. Калибровка модели

Модель DICE состоит из нескольких блоков и параметров. Мы обсуждаем калибровку той части модели, которая изменяется за счет ввода перекрывающихся поколений. К ним относятся параметризация демографии населения, параметры предпочтений и производительности труда индивидов. Остальные параметры остаются оригинальными.

Спецификация динамики изменения численности самого молодого поколения и спецификация начальных условий по численности ныне живущих полностью описывает динамику численности населения. Мы провели дезагрегацию совокупной численности населения в модели Нордхауса (Nordhaus, 2008) по отдельным поколениям. Была введена предположка, что численность населения первой

возрастной группы в каждый момент времени растет с тем же темпом, что и в модели DICE. Далее решалась задача нахождения численности населения каждой когорты в начальный момент времени при равенстве общей численности популяции в модели OLG и модели DICE в течение первых 7 периодов. Данная схема калибровки обеспечивает необходимую согласованность динамики общей численности населения модели с перекрывающимися поколениями и DICE, разница не превышает сотой доли процента на всем промежутке времени.

Профиль продуктивности индивида в зависимости от возраста  $EP_g$  качественно не влияет на результаты предложенной модели. Для калибровки профиля мы используем параметризацию работы (Fougère et al., 2007):

$$EP_g = \begin{cases} 1 + 0,25g - 0,0285g^2, & 1 \leq g \leq 5; \\ 0, & g > 5. \end{cases} \quad (20)$$

Параметр  $Lab_0$  для наибольшей согласованности с моделью DICE калибровался при условии равенства общего объема эффективного труда и численности населения в начальный момент времени.

В настоящей работе мы следуем подходу классического утилитаризма и калибруем значение социальной нормы межвременных предпочтений  $R$  равным 0. Отдельным и весьма спорным является вопрос о выборе параметров для функции полезности индивида. В базовом сценарии мы задали значение для эластичности предельной полезности потребления  $\theta$  равной 2, как и в модели DICE. Коэффициент субъективной нормы межвременных предпочтений  $\tilde{r}$  калибровался равным значению 2,5% в год при условии, что траектория реальной доходности капитала в модели рыночной экономики с перекрывающимися поколениями отражала схожую динамику реальной доходности с моделью DICE. Данная динамика доходностей, согласно (Nordhaus, 2008), согласуется с наблюдаемыми доходностями капитала и их проекциями в будущее.

Аналогично оригинальной модели DICE модель реализована в программном пакете GAMS<sup>2</sup>, и оптимизация проводилась на временном отрезке 60 периодов (600 лет).

#### 4. Результаты

В продолжение дискуссии об оптимальном снижении выбросов парниковых газов между В. Нордхаусом и Н. Стерном (Nordhaus, 2008; Stern, 2007, Dietz, Stern, 2008) мы сравниваем результаты модели с перекрывающимися поколениями с численными симуляциями DICE и сценарий Stern. Под симуляцией DICE будем понимать результаты модели центрального планирования с бесконечно живущим экономическим агентом DICE при базовой калибровке (Nordhaus, 2008). Под симуляцией Stern мы будем понимать результаты модели DICE, используя значения социальной нормы межвременных предпочтений  $r$ , равной 0,1%, и эластичности предельной полезности потребления  $\theta$ ,

<sup>2</sup> GAMS – General Algebraic Modeling System (<http://www.gams.com/>; <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/DICE2007.htm>).



равной 1. Симуляции OLG\_Decentralized и OLG\_Command будут обозначать результаты задачи рыночной экономики и задачи центрального планирования в модели с перекрывающимися поколениями соответственно.

На рис. 1–3 представлена динамика ключевых переменных для 4 рассматриваемых моделей. Как показано на графиках, модель рыночной экономики с перекрывающимися поколениями способна одновременно обеспечить динамику реальной доходности, которая соответствует наблюдаемым доходностям и их реалистичным проекциям в будущее (рис. 2), и рационализировать более категоричное снижение выбросов парниковых газов (рис. 1).

В рыночной модели OLG суммарный объем выбросов в первые сто лет остается приблизительно на начальном уровне, а далее постепенно снижается (рис. 1). В модели DICE объем выбросов непрерывно увеличивается в течение XXI в. и достигает значения, в 1,5 раза превышающего текущий объем выбросов парниковых газов. И выбросы полностью сокращаются только к началу XXII в. Результат модели Stern говорит о том, что выбросы нужно сокращать немедленно и резко.

Такое различие в выбросах парниковых газов приводит к существенным расхождениям в динамике среднемировой температуры атмосферы, что отображено на рис. 3. Во всех случаях она неизбежно

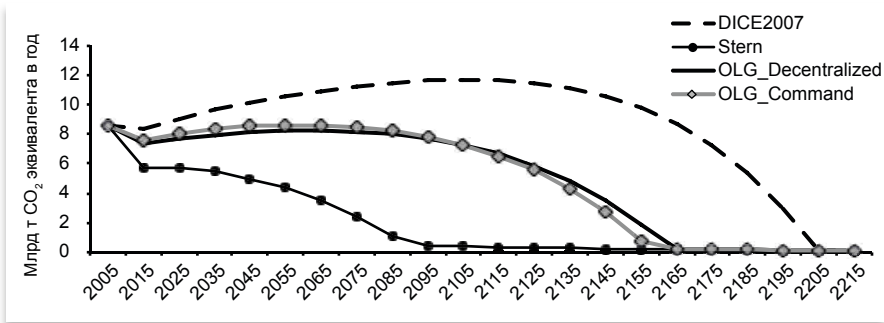


Рис. 1

*Глобальные выбросы парниковых газов*

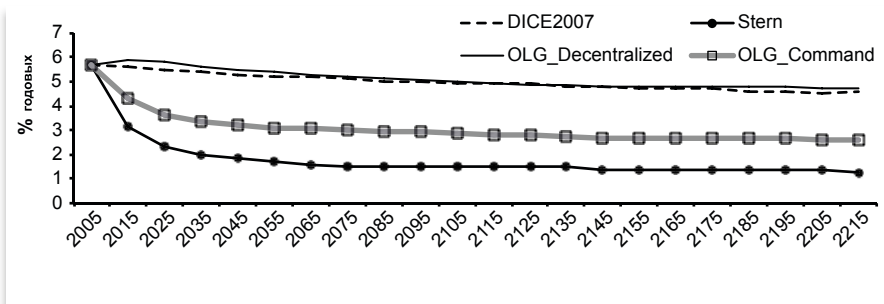


Рис. 2

*Реальная доходность капитала*

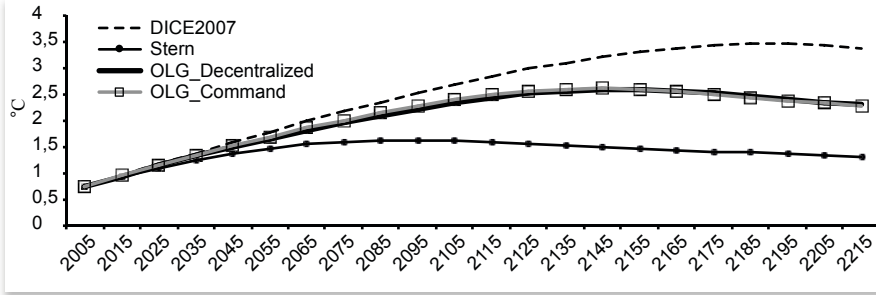


Рис. 3

*Среднемировая температура атмосферы*

растет в первое время, что вызвано уже накопленной высокой концентрацией парниковых газов. В моделях Stern, OLG\_Decentralized и DICE она стабилизируется во втором столетии, приблизительно, на уровне 1,5, 2,5 и 3,5 °C соответственно. Таким образом, цена проведения политики модели DICE по сравнению с OLG\_Decentralized составляет, приблизительно, 1 °C среднемировой температуры атмосферы.

Что касается задачи центрального планирования в модели с перекрывающимися поколениями, она демонстрирует схожие результаты с рыночной экономикой относительно переменных, связанных с выбросами парниковых газов. Реальная доходность капитала в задаче центрального планирования показывает резкую нисходящую динамику в первое время и стабилизируется в диапазоне 2,6–3% в долгосрочной перспективе.

Таким образом, с точки зрения центрального планировщика, текущий уровень накопленного капитала находится на неоптимально низком уровне. И с течением времени происходит значительное увеличение капитала, что, в свою очередь, приводит к падению предельного продукта капитала и, соответственно, реальной доходности. В моделях DICE и рыночной модели с перекрывающимися поколениями капиталоемкость ВВП остается в течение всего времени, приблизительно, на уровне в 2,5<sup>3</sup>. В модели центрального планирования OLG капиталоемкость достигает значения 3, а в имитации с параметрами функции предпочтений Stern (Stern, 2007) достигает уровня в 3,5. Данное увеличение капиталоемкости ВВП непосредственно соответствует снижению доли потребления в ВВП и приводит к увеличению доли сбережений в ВВП, что и послужило основной критикой результатов Н. Стерна (Stern, 2007). П. Дасгупта (Dasgupta, 2007) считает, что калибровка модели Стерна приводит к невообразимо высокой доле сбережений в ВВП, которая не соответствует реальности.

Чем же обусловлено сходство выводов относительно выбросов парниковых газов и задач центрального планирования и рыночной экономики в модели с перекрывающимися поколениями и различие выводов относительно других макроэкономических показателей?

<sup>3</sup> Данные графики высылаются по запросу.

Данное различие связано с тем, что в задаче рыночной экономики фактически существует два дисконта для анализа затрат–выгод. Один определяется в результате взаимодействия на рынке капитала домохозяйств и фирм и применяется для анализа инвестиционных решений в сфере накопления физического капитала. Второй, более низкий дисконт, вытекает из политики государства по отношению к снижению выбросов парниковых газов. В задаче же центрального планирования в модели с перекрывающимися поколениями используется один и тот же низкий дисконт как для анализа выбросов парниковых газов, так и для инвестиций в основной капитал. Что и приводит к более низкой реальной доходности капитала.

Таким образом, модель рыночной экономики позволяет разделить решения в области инвестиций и климата и проводить справедливую по отношению к будущим поколениям политику снижения выбросов парниковых газов, особо не повлияв при этом на динамику сбережений и накопление капитала.

Стоит также отметить, что модель с перекрывающимися поколениями является естественным инструментом для анализа бенефициаров от проведения той или иной политики. В качестве примера рассмотрим, какие поколения выигрывают, а какие проигрывают от проведения более радикальной политики снижения выбросов парниковых газов в модели рыночной экономики OLG по сравнению с базовым сценарием снижения выбросов в модели DICE. На рис. 4 представлена эквивалентная вариация потребления, показывающая, какое процентное изменение в потреблении для отдельного домохозяйства в течение всего его жизненного цикла эквивалентно для него влиянию более агрессивной политики снижения выбросов в сценарии OLG\_Decimalized по сравнению с DICE. Горизонтальная ось координат соответствует периоду рождения индивида.

Как следует из графика, при рассмотрении классического утилитаризма в модели рыночной экономики OLG по сравнению с DICE

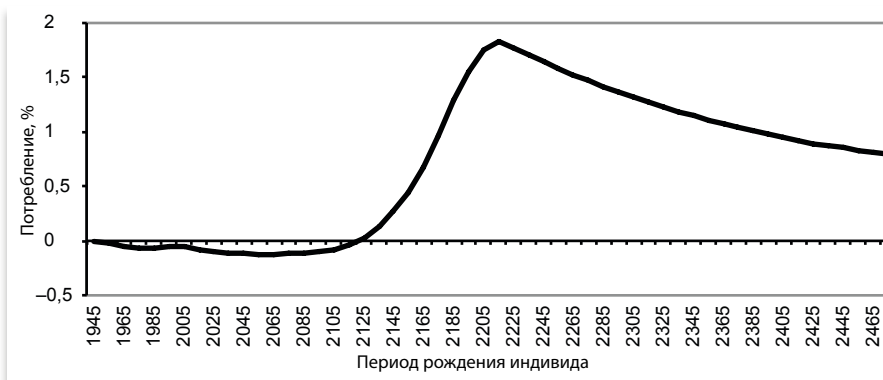


Рис. 4

*Эквивалентная вариация потребления от более агрессивной политики снижения выбросов в сценарии OLG\_Decimalized по сравнению с DICE*

большее бремя на себя должны взять ныне живущие поколения и те, что родятся до 2125 г. Для последующих поколений выгоды от сокращения ущерба от потепления климата превосходят издержки по сокращению выбросов парниковых газов. Пик выигрыша приблизительно в 2% потребления приходится на поколения, которые родятся в конце XXII в. Далее выигрыш с течением времени постепенно снижается, но тем не менее долгое время остается экономически значимой величиной и в конце XXV в. составляет приблизительно 1% потребления. Таким образом, положительный эффект от сокращения выбросов оказывается долгосрочным<sup>4</sup>, так как переход нынеживущих поколений на чистые технологии обеспечивает будущие поколения устойчиво более высоким уровнем качества окружающей среды, более низким уровнем концентрации парниковых газов в атмосфере и, соответственно, меньшим ущербом.

Используемая параметризация функции полезности с  $\theta > 1$  учитывает, что для будущих поколений, которые, как ожидается, будут более богатыми из-за технологического прогресса, некоторый прирост в потреблении является менее ценным, чем тот же процентный прирост в потреблении для нынеживущих поколений. Анализ затрат-выгод от сокращения выбросов проводится исходя из одинаковой ценности для государства полезности индивидов от потребления. Таким образом, потери для нынеживущих поколений и поколений, которые родятся в текущем столетии, от более агрессивной политики в модели OLG по сравнению с DICE оказываются не такими большими и составляют менее 0,1% в терминах эквивалентной вариации потребления.

Полученные результаты свидетельствуют о несостоятельности предпосылки о бесконечно живущем агенте, когда рассматривается политика со сверхдолгосрочными эффектами, и результаты предпринимаемой (или не предпринимаемой) в настоящее время политики окажут свое воздействие в отдаленном будущем. Дисконтирование благосостояния будущих поколений в модели DICE Нордхауса приводит к смещению в пользу текущих поколений, дисконтируя ущерб будущих. В предложенной теоретической конструкции распределение бремени (и выгод) от проводимой политики происходит равномерно, исходя из полезности ныне живущих и будущих поколений, которые в рамках утилитаристского подхода считаются равными.

### Заключение

Вопрос о спецификации дисконтирующего фактора в интегрированных моделях климата и экономики с бесконечно живущим агентом является критическим для определения оптимальной в смысле монетизируемых выгод и затрат климатической политики. Сторонники утилитаризма аргументируют, что высокий дисконт на сверхдолгосрочных задачах приводит к игнорированию интересов будущих поколений. Сторонники позитивного подхода (в рамках

<sup>4</sup> В модели DICE воспроизведен цикл углерода, с его поглощением природными системами, в том числе океанами, однако нормализация концентрации возможна лишь при восстановлении баланса между эмиссией и абсорбцией.

модели ПЛА) утверждают, что низкий дисконт переоценивает выгоды от снижения выбросов парниковых газов по сравнению с реальными затратами. По мнению авторов данной работы, дискуссия о выборе дисконта зашла в тупик в результате чрезмерно жесткой предпосылки о единственном бесконечно живущем агенте и может быть разрешена простым изменением спецификации модели, которая оказалась слишком простой и нереалистичной для сверхдолгосрочных проблем выбора оптимальной политики.

В настоящей работе предлагается расширение модели DICE центрального планирования с бесконечно живущим экономическим агентом до модели рыночной экономики с перекрывающимися поколениями. Модель с перекрывающимися поколениями является естественной концепцией, которая позволяет придавать одинаковый вес в благосостоянии различных поколений и одновременно учитывать высокую субъективную норму межвременных предпочтений отдельных индивидов, что дает возможность воспроизводить реальные процентные ставки, близкие к действительности, без манипуляций с параметрами предпочтений индивидов. Данный подход позволяет разделить решения в области инвестиций и климата и проводить более справедливую по отношению к будущим поколениям политику снижения выбросов парниковых газов, при этом удовлетворяя требованиям сторонников позитивного подхода, проводя калибровку к наблюдаемой норме доходности капитала.

Результаты проведенного численного имитационного анализа дают усредненные значения оптимальной траектории выбросов, аргументируемых Н. Стерном и В. Нордхаусом. Выбросы должны стабилизироваться и начать снижаться ранее относительно оценок В. Нордхауса, но не так радикально, как у Н. Стерна. Таким образом, в отличие от оригинальной модели DICE оптимальный максимальный рост средней температуры снижается до 2,6 °C (что, примерно, на 1 °C ниже пика увеличения температуры в модели DICE), не оказывая при этом значительного влияния на рыночные доходности капитала, что являлось основным аргументом в дискуссии В. Нордхауса и Н. Стерна.

Отметим, что модель DICE является изящной, но в то же время очень простой теоретической структурой, чтобы учитывать все нюансы, которые следует принимать во внимание при разработке экономической политики по противодействию климатическим изменениям и определению оптимальной траектории выбросов. Она не учитывает весь набор технологических опций для снижения выбросов, переключения на возобновляемые источники энергии, доступность которых постоянно растет, а снижение издержек превышает многие ожидания. Однако такие теоретические конструкции чрезвычайно полезны с точки зрения научной дискуссии, более глубокого понимания, рационализации проблемы и вариантов ее решения. Много неопределенностей остается и в калибровке параметров модели (чув-

ствительность климата к накоплению парниковых газов, функция ущерба от глобального потепления, затрат на сокращение выбросов, параметры экономического роста и демографии), поэтому предпосылка о совершенном предвидении экономическими агентами является весьма сильной, и оптимизацию, по-видимому, следует проводить в условиях неопределенности.

Другой важный аспект рассмотрения проблемы – координация политики снижения выбросов между отдельными регионами и государствами. В данной работе авторы ограничиваются обсуждением дисконтирования благосостояния различных поколений, послабляя лишь две предпосылки оригинальной модели DICE – спецификацию модели с бесконечно живущим домохозяйством и постановку задачи центрального планирования. Остальные предпосылки не обсуждаются намеренно, чтобы остаться как можно ближе к изначальной модели. И, как показывают результаты, ослабление лишь этих двух предпосылок оказывает значительное влияние на выводы об оптимальном снижении выбросов парниковых газов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Arrow K.J., Cropper M.L., Gollier C., Groom B., Heal G.M., Newell R.G., Nordhaus W.D., Pindyck R.S., Pizer W.A., Portney P.R., Sterner T., Tol R.S.J., Weitzman M.L.** (2012). How Should Benefits and Costs Be Discounted in an Intergenerational Context? // *Resources for the Future Discussion Paper*. No. 12.
- Arrow K.J., Cline W.R., Maler K.G., Munasinghe M., Squitieri R., Stiglitz J.E.** (1996). *Intertemporal Equity, Discounting, and Economic Efficiency*. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press. P. 125–144.
- Blanchard O.J., Fischer S.** (1993). *Lectures on Macroeconomics*. Cambridge: The MIT Press.
- Borissov K., Shakhnov K.** (2011). Sustainable Growth in a Model with Dual-Rate Discounting // *Economic Modelling*. Vol. 28(4). P. 2071–2074.
- Bovenberg A., Heijdra B.J.** (1998). Environmental Tax Policy and Intergenerational Distribution // *Journal of Public Economics*. Vol. (1). P. 1–24.
- Broome J.** (1992). *Counting the Cost of Global Warming*. Cambridge: White Horse Press.
- Burton P.S.** (1993). Intertemporal Preferences and Intergenerational Equity Considerations in Optimal Resource Harvesting // *Journal of Environmental Economics and Management*. Vol. 24(2). P. 119–132.
- Cai Y., Judd K.L., Lontzek T.S.** (2012). DSICE: A Dynamic Stochastic Integrated Model of Climate and Economy. The Center for Robust Decision Making on Climate and Energy Policy Working Paper Series, WP 12-02.
- Calvo A.G., Obstfeld M.** (1988). Optimal Time-Consistent Fiscal Policy with Finite Lifetimes // *Econometrica*. Vol. 56. P. 411–432.
- Cline W.R.** (1992). *The Economics of Global Warming*. Washington: Institute for International Economics.

- Dasgupta P.** (2007). Commentary: the Stern Review's Economics of Climate Change. // *National Institute Economic Review*. No. 199. P. 4–7.
- Diamond P.A.** (1965). National Debt in a Neoclassical Growth Model // *American Economic Review*. Vol. 55. P. 1126–1150.
- Dietz S., Stern N.** (2008). Why Economic Analysis Supports Strong Action on Climate Change: a Response to the Stern Review's Critics // *Review of Environmental Economics and Policy*. Vol. 2(1). P. 94–113.
- Endress L.H., Pongkijvorasin S., Roumasset J., Wada C.A.** (2014). Intergenerational Equity with Individual Impatience in a Model of Optimal and Sustainable Growth // *Resource and Energy Economics*. Vol. 36(2). P. 620–635.
- Fougère M., Mercenier J., Mérette M.** (2007). A Sectoral and Occupational Analysis of Population Ageing in Canada Using a Dynamic CGE Overlapping Generations Model // *Economic Modeling*. Vol. 24(4). P. 690–711.
- Fujii T., Karp L.** (2008). Numerical Analysis of Non-Constant Pure Rate of Time Preference: a Model of Climate Policy // *Journal of Environmental Economics and Management*. Vol. 56(1). P. 83–101.
- Gerlagh R., Zwaan B.C.C. van der** (2001). The Effects of Ageing and an Environmental Trust Fund in an Overlapping Generations Model on Carbon Emission Reductions // *Ecological Economics*. Vol. 36(2). P. 311–326.
- Gollier C.** (2002). Discounting an Uncertain Future // *Journal of Public Economics*. Vol. 85(2). P. 149–166.
- Gollier C.** (2010). Ecological Discounting // *Journal of Economic Theory*. Vol. 145(2). P. 812–829.
- Hasselmann K., Hasselmann S., Giering R., Ocana V., Storch H.V.** (1997). Sensitivity Study of Optimal CO<sub>2</sub> Emission Paths Using a Simplified Structural Integrated Assessment Model (SIAM) // *Climatic Change*. Vol. 37(2). P. 345–386.
- Heijdra B.J., Kooiman J.P., Ligthart J.E.** (2006). Environmental Quality, the Macroeconomy, and Intergenerational Distribution // *Resource and Energy Economics*. Vol. 28(1). P. 74–104.
- Hoel M., Sterner T.** (2007). Discounting and Relative Prices // *Climatic Change*. Vol. 84(3–4). P. 265–280.
- Hope C., Anderson J., Wenman P.** (1993). Policy Analysis of the Greenhouse Effect: an Application of the PAGE Model // *Energy Policy*. Vol. 21(3) P. 327–338.
- Howard G.** (2013). Discounting for Personal and Social Payments: Patience for Others, Impatience for Ourselves // *Journal of Environmental Economics and Management*. Vol. 66(3). P. 583–597.
- Howarth R.B.** (1996). Climate Change and Overlapping Generations // *Contemporary Economic Policy*. Vol. 14(4). P. 100–111.
- Howarth R.B.** (1998). An Overlapping Generations Model of Climate-Economy Interactions // *The Scandinavian Journal of Economics*. Vol. 100(3). P. 575–591.
- Howarth R.B.** (2004). Against High Discount Rates. Rensselaer Working Papers in Economics, WP 0404.
- Howarth R.B., Norgaard R. B.** (1992). Environmental Valuation under Sustainable Development // *The American Economic Review*. Vol. 82(2). P. 473–477.



- IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: “*Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*”. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- IPCC (2014). Summary for Policymakers. In: “*Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*”. Geneva: IPCC.
- Karp L.** (2005). Global Warming and Hyperbolic Discounting // *Journal of Public Economics*. Vol. 89(2). P. 261–282.
- Karp L., Rezaei A.** (2014). The Political Economy of Environmental Policy with Overlapping Generations // *International Economy Review*. Vol. 55(3). P. 711–733.
- Karp L., Tsur Y.** (2011). Time Perspective and Climate Change Policy // *Journal of Environmental Economics and Management*. Vol. 62(1). P. 1–14.
- Kossoy A., Peszko G., Oppermann K., Prytz N., Klein N., Blok K., Lam L., Wong L., Borkent B.** (2015). State and Trends of Carbon Pricing. Washington: World Bank.
- Manne A., Mendelsohn R., Richels R.** (1995). MERGE: a Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies // *Energy Policy*. Vol. 23(1). P. 17–34.
- Marini G., Scaramozzino P.** (1995). Overlapping Generations and Environmental control // *Journal of Environmental Economics and Management*. Vol. 29(1). P. 64–77.
- Nordhaus W.D.** (1992). Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the “DICE” model // *American Economic Review*. Vol. 83(2) P. 313–317.
- Nordhaus W.D.** (2007). A Review of the “Stern Review on the Economics of Climate Change” // *Journal of Economic Literature*. Vol. 45(3). P. 686–702.
- Nordhaus W.D.** (2008). A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://nordhaus.econ.yale.edu/Balance\\_2nd\\_proofs.pdf](http://nordhaus.econ.yale.edu/Balance_2nd_proofs.pdf), свободный. Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: май 2016 г.).
- Nordhaus W.D., Yang Z.** (1996). A Regional Dynamic General Equilibrium Model of Alternative Climate Change Strategies // *American Economic Review*. Vol. 86(4). 741–765.
- Ortiz R.A., Golub A., Lugovoy O., Markandya A., Wang J.** (2011). DICER: A Tool for Analyzing Climate Policies // *Energy Economics*. Vol. 33. P. 41–49.
- Plambeck E.L., Hope C., Anderson J.** (1997). The PAGE95 Model: Integrating the Science and Economics of Global Warming // *Energy Economics*. Vol. 19. P. 77–101.
- Quiggin J.** (2012). Equity between Overlapping Generations // *Journal of Public Economic Theory*. Vol. 14(2). P. 273–283.
- Ramsey F.P.** (1927). A Contribution to the Theory of Taxation // *Economic Journal*. Vol. 37(145). P.47–61.
- Ramsey F.P.** (1928). A Mathematical Theory of Saving // *Economic Journal*. Vol. 38(152). P. 543–559.

- Samuelson P.A.** (1958). An Exact Consumption-Loan Model of Interest with or Without the Social Contrivance of Money // *Journal of Political Economy*. Vol. 66(6). P. 467–482.
- Schneider M.T., Traeger C.P., Winkler R.** (2012). Trading off Generations: Equity, Discounting, and Climate Change // *European Economic Review*. Vol. 56(8). P. 1621–1644.
- Sjølie H.K., Latta G.S., Solberg B.** (2013). Dual Discounting in Climate Change Mitigation in the Forest Sector // *Journal of Forest Economics*. Vol. 19(4). P. 416–431.
- Solow R.M.** (1986). On the Intergenerational Allocation of Natural Resources // *The Scandinavian Journal of Economics*. Vol. 88(1). P. 141–149.
- Stern N.** (2007). *The Economics of Climate Change: the Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Stern T., Persson U.M.** (2008). An Even Sterner Review: Introducing Relative Prices into the Discounting Debate // *Review of Environmental Economics and Policy*. Vol. 2(1). P. 61–76.
- Tol R.S.J.** (2002). Welfare Specification and Optimal Control of Climate Change: an Application of FUND // *Energy Economics*. Vol. 24(4). P. 367–376.
- Tol R.S.J.** (2004). On Dual-Rate Discounting // *Economic Modelling*. Vol. 21(1). P. 95–98.
- Wang Z., Wu J., Zhu Q., Wang L., Gong Y., Li H.** (2012). MRICES: A New Model for Emissions Mitigation Strategy Assessment and Its Application // *Journal of Geographical Sciences*. Vol. 22(6). P. 1131–1148.
- Weikard H.P., Zhu X.** (2005). Discounting and Environmental Quality: When Should Dual Rates Be Used? // *Economic Modelling*. Vol. 22(5). P. 868–878.
- Weitzman M.L.** (1998). Why the Far-Distant Future Should Be Discounted At Its Lowest Possible Rate // *Journal of Environmental Economics and Management*. Vol. 36(3). P. 201–208.
- Weitzman M.L.** (2001). Gamma Discounting // *American Economic Review*. Vol. 91(1). P. 260–271.
- Weitzman M.L.** (2010). Risk-Adjusted Gamma Discounting // *Journal of Environmental Economics and Management*. Vol. 60(1). P. 1–13.
- Wietzman M.L.** (2007). A Review of the “Stern Review on the Economics of Climate Change” // *Journal of Economic Literature*. Vol. 45(3). P. 703–724.
- Yang Z.** (2003). Dual-Rate Discounting in Dynamic Economic-Environmental Modeling // *Economic Modelling*. Vol. 20(5). P. 941–957.

Поступила в редакцию 12 марта 2014 года

#### REFERENCES (with English translation or transliteration)

- Arrow K.J., Cline W.R., Maler K.G., Munasinghe M., Squitieri R., Stiglitz J.E.** (1996). *Intertemporal Equity, Discounting, and Economic Efficiency*. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press, 125–144.
- Arrow K.J., Cropper M.L., Gollier C., Groom B., Heal G.M., Newell R.G., Nordhaus W.D., Pindyck R.S., Pizer W.A., Portney P.R., Sterner T., Tol R.S.J.,**

- Weitzman M.L.** (2012). How Should Benefits and Costs Be Discounted in an Intergenerational Context? *Resources for the Future Discussion Paper* 12.
- Blanchard O.J., Fischer S.** (1993). Lectures on Macroeconomics. Cambridge: The MIT Press.
- Borissov K., Shakhnov K.** (2011). Sustainable Growth in a Model with Dual-Rate Discounting. *Economic Modelling* 28(4), 2071–2074.
- Bovenberg A., Heijdra B.J.** (1998). Environmental Tax Policy and Intergenerational Distribution. *Journal of Public Economics* 1, 1–24.
- Broome J.** (1992). Counting the Cost of Global warming. Cambridge: White Horse Press.
- Burton P.S.** (1993). Intertemporal Preferences and Intergenerational Equity Considerations in Optimal Resource Harvesting. *Journal of Environmental Economics and Management* 24(2), 119–132.
- Cai Y., Judd K.L., Lontzek T.S.** (2012). DSICE: A Dynamic Stochastic Integrated Model of Climate and Economy. The Center for Robust Decision Making on Climate and Energy Policy Working Paper Series, WP 12-02.
- Calvo A.G., Obstfeld M.** (1988). Optimal Time-Consistent Fiscal Policy with Finite Lifetimes. *Econometrica* 56, 411–432.
- Cline W.R.** (1992). The Economics of Global Warming. Washington: Institute for International Economics.
- Dasgupta P.** (2007). Commentary: the Stern Review's Economics of Climate Change. *National Institute Economic Review* 199, 4–7.
- Diamond P.A.** (1965). National Debt in a Neoclassical Growth Model. *American Economic Review* 55, 1126–1150.
- Dietz S., Stern N.** (2008). Why Economic Analysis Supports Strong Action on Climate Change: a Response to the Stern Review's Critics. *Review of Environmental Economics and Policy* 2(1), 94–113.
- Endress L.H., Pongkijvorasin S., Roumasset J., Wada C.A.** (2014). Intergenerational Equity with Individual Impatience in a Model of Optimal and Sustainable Growth. *Resource and Energy Economics* 36(2), 620–635.
- Fougère M., Mercenier J., Mérette M.** (2007). A Sectoral and Occupational Analysis of Population Ageing in Canada Using a Dynamic CGE Overlapping Generations Model. *Economic Modeling* 24(4), 690–711.
- Fujii T., Karp L.** (2008). Numerical Analysis of Non-Constant Pure Rate of Time Preference: a Model of Climate Policy. *Journal of Environmental Economics and Management* 56(1), 83–101.
- Gerlagh R., Zwaan B.C.C. van der** (2001). The Effects of Ageing and an Environmental Trust Fund in an Overlapping Generations Model on Carbon Emission Reductions. *Ecological Economics* 36(2), 311–326.
- Gollier C.** (2002). Discounting an Uncertain Future. *Journal of Public Economics* 85(2), 149–166.
- Gollier C.** (2010). Ecological Discounting. *Journal of Economic Theory* 145(2), 812–829.
- Hasselmann K., Hasselmann S., Giering R., Ocana V., Storch H.V.** (1997). Sensitivity Study of Optimal CO<sub>2</sub> Emission Paths Using a Simplified Structural Integrated Assessment Model (SIAM). *Climatic Change* 37(2), 345–386.

- Heijdra B.J., Kooiman J.P., Ligthart J.E.** (2006). Environmental Quality, the Macroeconomy, and Intergenerational Distribution. *Resource and Energy Economics* 28(1), 74–104.
- Hoel M., Sterner T.** (2007). Discounting and Relative Prices. *Climatic Change* 84(3–4), 265–280.
- Hope C., Anderson J., Wenman P.** (1993). Policy Analysis of the Greenhouse Effect: an Application of the PAGE Model. *Energy Policy* 21(3), 327–338.
- Howard G.** (2013). Discounting for Personal and Social Payments: Patience for Others, Impatience for Ourselves. *Journal of Environmental Economics and Management* 66(3), 583–597.
- Howarth R.B.** (1996). Climate Change and Overlapping Generations. *Contemporary Economic Policy* 14(4), 100–111.
- Howarth R.B.** (1998). An Overlapping Generations Model of Climate-Economy Interactions. *The Scandinavian Journal of Economics* 100(3), 575–591.
- Howarth R.B.** (2004). Against High Discount Rates. Rensselaer Working Papers in Economics, WP 0404.
- Howarth R.B., Norgaard R.B.** (1992). Environmental Valuation under Sustainable Development. *The American Economic Review* 82(2), 473–477.
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: “*Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*”. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- IPCC (2014). Summary for Policymakers. In: “*Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*”. Geneva: IPCC.
- Karp L.** (2005). Global Warming and Hyperbolic Discounting. *Journal of Public Economics* 89(2), 261–282.
- Karp L., Rezai A.** (2014). The Political Economy of Environmental Policy with Overlapping Generations. *International Economy Review* 55(3), 711–733.
- Karp L., Tsur Y.** (2011). Time Perspective and Climate Change Policy. *Journal of Environmental Economics and Management* 62(1), 1–14.
- Kossov A., Peszko G., Oppermann K., Prytz N., Klein N., Blok K., Lam L., Wong L., Borkent B.** (2015). State and Trends of Carbon Pricing. Washington: World Bank.
- Manne A., Mendelsohn R., Richels R.** (1995). MERGE: a Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies. *Energy Policy* 23(1), 17–34.
- Marini G., Scaramozzino P.** (1995). Overlapping Generations and Environmental control. *Journal of Environmental Economics and Management* 29(1), 64–77.
- Nordhaus W.D.** (1992). Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the “DICE” model. *American Economic Review* 83(2), 313–317.
- Nordhaus W.D.** (2007). A Review of the “Stern Review on the Economics of Climate Change”. *Journal of Economic Literature* 45(3), 686–702.
- Nordhaus W.D.** (2008). A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies. Available at: [http://nordhaus.econ.yale.edu/Balance\\_2nd\\_proofs.pdf](http://nordhaus.econ.yale.edu/Balance_2nd_proofs.pdf) (accessed: July 2016).

- Nordhaus W.D., Yang Z.** (1996). A Regional Dynamic General Equilibrium Model of Alternative Climate Change Strategies. *American Economic Review* 86(4), 741–765.
- Ortiz R.A., Golub A., Lugovoy O., Markandya A., Wang J.** (2011). DICER: A Tool for Analyzing Climate Policies. *Energy Economics* 33, 41–49.
- Plambeck E.L., Hope C., Anderson J.** (1997). The PAGE95 Model: Integrating the Science and Economics of Global Warming. *Energy Economics* 19, 77–101.
- Quiggin J.** (2012). Equity between Overlapping Generations. *Journal of Public Economic Theory* 14(2), 273–283.
- Ramsey F.P.** (1927). A Contribution to the Theory of Taxation. *Economic Journal* 37(145), 47–61.
- Ramsey F.P.** (1928). A mathematical Theory of Saving. *Economic Journal* 38(152), 543–559.
- Samuelson P.A.** (1958). An Exact Consumption-Loan Model of Interest with or Without the Social Contrivance of Money. *Journal of Political Economy* 66(6), 467–482.
- Schneider M.T., Traeger C.P., Winkler R.** (2012). Trading off Generations: Equity, Discounting, and Climate Change. *European Economic Review* 56(8), 1621–1644.
- Sjolie H.K., Latta G.S., Solberg B.** (2013). Dual Discounting in Climate Change Mitigation in the Forest Sector. *Journal of Forest Economics* 19(4), 416–431.
- Solow R.M.** (1986). On the Intergenerational Allocation of Natural Resources. *The Scandinavian Journal of Economics* 88(1), 141–149.
- Stern N.** (2007). *The Economics of Climate Change: the Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sterner T., Persson U.M.** (2008). An Even Sterner Review: Introducing Relative Prices into the Discounting Debate. *Review of Environmental Economics and Policy* 2(1), 61–76.
- Tol R.S.J.** (2002). Welfare Specification and Optimal Control of Climate Change: an Application of FUND. *Energy Economics* 24(4), 367–376.
- Tol R.S.J.** (2004). On Dual-Rate Discounting. *Economic Modelling* 21(1), 95–98.
- Wang Z., Wu J., Zhu Q., Wang L., Gong Y., Li H.** (2012). MRICES: A New Model for Emissions Mitigation Strategy Assessment and Its Application. *Journal of Geographical Sciences* 22(6), 1131–1148.
- Weikard H.P., Zhu X.** (2005). Discounting and Environmental Quality: When Should Dual Rates Be Used? *Economic Modelling* 22(5), 868–878.
- Weitzman M.L.** (1998). Why the Far-Distant Future Should Be Discounted At Its Lowest Possible Rate. *Journal of Environmental Economics and Management* 36(3), 201–208.
- Weitzman M.L.** (2001). Gamma Discounting. *American Economic Review* 91(1), 260–271.
- Weitzman M.L.** (2010). Risk-Adjusted Gamma Discounting. *Journal of Environmental Economics and Management* 60(1), 1–13.
- Wietzman M.L.** (2007). A Review of the “Stern Review on the Economics of Climate Change”. *Journal of Economic Literature* 45(3), 703–724.

Yang Z. (2003). Dual-Rate Discounting in Dynamic Economic-Environmental Modeling. *Economic Modelling* 20(5), 941–957.

Received 12 March 2014

O.V. Lugovoy

Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia

A.V. Polbin

Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration; Gaidar Institute for Economic Policy, Moscow, Russia

## On Intergenerational Distribution of the Burden of Greenhouse Gas Emissions

**Abstract.** In this paper we propose an extension to the Dynamic Integrated model of Climate and Economy (DICE) by William Nordhaus, where we introduce overlapping generations (OLG) in the original model, and consider competitive equilibrium with the government, which follows Ramsey optimal policy on greenhouse gases (GHG) emissions reduction. In this framework it is possible to distinguish between subjective discount rate of individuals and social discount rate of the government. Thus the model provides two discount rates in the OLG model: the social discount rate under which cost-benefits analysis of climate projects are evaluated and the market discount rate for investments in physical capital. Using numerical simulations methods we show that the introduction of overlapping generations in the model could streamline more and early GHG emissions reduction, without causing a significant impact on the return on capital market. Long term gain from this policy is approximately 1 °C.

**Keywords:** *intergenerational discounting, greenhouse gases emissions, global warming, overlapping generations, integrated assessment models.*

JEL Classification: H23, H41, Q4, Q2, Q20, Q28.