

# ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

**М. А. Пахнин**

Dr. rer. pol., доцент Европейского университета в Санкт-Петербурге; научный сотрудник Института проблем региональной экономики РАН

## ЭКОНОМИКА ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ 2018 Г. УИЛЬЯМА НОРДХАУСА<sup>1</sup>

### 1. Введение

В 2018 г. премию памяти Альфреда Нобеля по экономике разделили между собой Уильям Нордхаус (Йельский университет, США), «за интеграцию изменений климата в долгосрочный макроэкономический анализ», и Пол Ромер (Нью-Йоркский университет, США), «за интеграцию технологических инноваций в долгосрочный макроэкономический анализ». Формально, важнейшие научные работы обоих лауреатов премии можно отнести к теории роста, а точнее, к области «моделей эндогенного роста с экстерналиями»<sup>2</sup>. Однако если посмотреть на работы лауреатов подробнее, то выяснится, что фундаментальных различий между ними гораздо больше, чем сходств. Эти различия связаны не столько с формальными вещами, такими как характер экстерналий в их моделях (Ромер анализировал положительные экстерналии, возникающие при производстве знаний, а Нордхаус занимался отрицательными экстерналиями изменения климата), сколько с содержательными — в частности, тем, как по-разному ученые применяют экономическую теорию к решению своих задач и как по-разному они предлагают думать о долгосрочном экономическом росте.

Подробное описание того, за что получил Нобелевскую премию 2018 г. Пол Ромер, можно найти в работе (Вымятниной, 2019)<sup>3</sup>. Данная же работа целиком посвящена премии Уильяма Нордхауса, главный вклад которого — ряд работ по экономике изменения климата и, в частности, разработка интегрированных оценочных моделей, связывающих климат и экономику. Результаты этих численных моделей позволяют спрогнозировать состояние климата на горизонте порядка 100 лет и оценить влияние тех или иных рекомендаций по проведению климатической политики.

В настоящей работе мы покажем, как Нордхаус в ходе своей научной карьеры пришел к экономике изменения климата, опишем структуру предложенной Нордхаусом динамической интегрированной модели климата и экономики (DICE), а также обсудим ее основные выводы и недостатки.

### 2. Уильям Нордхаус и его научная карьера

Уильям Нордхаус родился в 1941 г., в 1963 г. стал бакалавром в Йельском университете, а в 1967 г. получил степень PhD по экономике в Массачусетском технологическом

<sup>1</sup> Автор благодарен К. Ю. Борисову и Ю. В. Вымятниной за ценные советы при подготовке статьи. Автор выражает благодарность ПАО «Северсталь» за поддержку в ходе работы над статьей.

<sup>2</sup> Детальный разбор вклада лауреатов в эту область можно найти в обзоре (Замулин, Сонин, 2019).

<sup>3</sup> Интересующиеся Нобелевскими премиями по экономике могут также обратиться к работе (Борисов, Раскина, 2018), посвященной премии 2017 г.

институте. Символично, что научным руководителем его диссертации под названием «Теория эндогенных технологических изменений» был знаменитый Роберт Солоу, ставший в 1987 г. лауреатом Нобелевской премии за свои основополагающие работы именно по теории роста. Таким образом, формально две последние Нобелевские премии «за экономический рост» получили учитель и ученик.

С 1967 г. Нордхаус работает в Йельском университете. Область его научных интересов достаточно широка — так, например, он является одним из основоположников теории политических деловых циклов, которая связывает экономические и электоральные циклы. В модели, предложенной в (Nordhaus, 1975), циклические колебания в экономике объясняются поведением политиков, которые обладают властью в данный момент и принимают экономические решения исключительно исходя из желания остаться у власти<sup>1</sup>.

Ряд работ Нордхауса, появившихся в середине 1970-х гг., посвящен актуальной в то время теме исчерпаемых природных ресурсов. Особую важность этой теме придали два обстоятельства. Во-первых, в 1972 г. был опубликован нашумевший доклад Римскому клубу под названием «Пределы роста» (Meadows et al., 1972). Авторы доклада приводили результаты численного моделирования развития человечества исходя из имевшихся на тот момент данных о росте населения Земли и запасах природных ресурсов, из которых следовало, что без активного ограничения рождаемости или открытия неограниченного источника энергии человечество ждет резкое снижение уровня жизни и падение численности. Во-вторых, в 1973 г. разразился первый серьезный нефтяной кризис, в результате которого цена на нефть в мире выросла в четыре раза — примерно с 3 до 12 долларов за баррель (ВР, 2019).

Эти обстоятельства заставили экономистов всерьез задуматься о том, возможен ли долгосрочный экономический рост в присутствии невозобновляемых природных ресурсов, насколько экономика зависима от энергии и как обеспечить устойчивое развитие в условиях жестких ресурсных ограничений. Важность этих вопросов для того времени была столь велика, что в 1974 г. специальный выпуск журнала *Review of Economic Studies* вышел под заголовком «Симпозиум по экономике исчерпаемых природных ресурсов» (см. (Neal, 1974), а также все остальные работы в этом выпуске, подготовленные, среди прочего, Робертом Солоу и Джозефом Стиглицем).

Одним из тех, кто принимал активное участие в обсуждении этой темы, был и Нордхаус. В своей заметке «Ресурсы как ограничения для роста» (Nordhaus, 1974) он метафорически назвал господствовавший раньше взгляд на развитие (расточительность и игнорирование ресурсных ограничений) «ковбойской» экономикой, а новую точку зрения (согласно которой к природе и ее богатствам необходимо относиться как к редкому, а не как к свободному благу) уподобил самоподдерживающейся экономике «космического корабля». Нордхаус указывал на три возможных канала, через которые природные ресурсы могут повлиять на долгосрочный экономический рост: доступность ресурсов, их цена и воздействие на окружающую среду. По его оценкам, наличие ресурсов не является насущной проблемой, поскольку при сохранении текущей нормы потребления и даже с имеющимися на тот момент технологиями энергоресурсов человечеству хватит на 8000 лет<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Несмотря на то, что Нордхаус получил Нобелевскую премию за работы по экономике изменения климата, самой цитируемой его статьей с большим отрывом (согласно *Google Scholar*) остается именно работа про политические деловые циклы (Nordhaus, 1975).

<sup>2</sup> Тот факт, что дефицит энергоресурсов человечеству не грозит, в целом подтверждается и современными данными. Например, только доказанных запасов нефти в 2018 г. хватит еще на 50 лет при сохранении текущего объема добычи (ВР, 2019). Поэтому в ближайшее время климат действительно является более серьезной и насущной проблемой.

Что касается цен на энергоносители, то результаты численного моделирования Нордхауса из чуть более ранней работы (Nordhaus, 1973) показывали, что при оптимальном распределении природных ресурсов во времени и пространстве, а также при некоторых дополнительных предположениях относительно будущих технологий равновесный темп роста относительных цен на энергию всегда (на горизонте в 200 лет) будет оставаться ниже темпа роста производительности, то есть заработных плат. Поэтому исчерпание относительно дешевых источников энергии не приведет к снижению среднего уровня жизни.

Так что самым важным каналом оказывается именно последний, связанный с окружающей средой. Таким образом, уже в середине 1970-х гг. Нордхаус обращает внимание на то, что действительная проблема, связанная с ограниченностью природных ресурсов, заключается не в исчерпании энергоресурсов, а в ограниченной возможности окружающей среды абсорбировать выбросы от использования энергоресурсов. Это дало толчок серии работ по экономике изменения климата и привело Нордхауса к построению численных моделей, описывающих взаимовлияние климата и экономического роста<sup>1</sup>.

Предтечей всех интегрированных оценочных моделей является модель линейного программирования, предложенная в (Nordhaus, 1977). Фактически, это модель частичного равновесия на «рынке» энергоресурсов, совмещенная с очень простой моделью углеродного цикла. В результате линейные ограничения на использование ресурсов связаны не только с их физической доступностью, но и с необходимостью ограничить выбросы в атмосферу. Для дальнейшего развития требовалось усложнять подобные модели как идейно (например, в работе (Nordhaus, 1991) рассматривается уже модель общего равновесия, правда, только стационарная), так и технически. Конечно, существенную роль в этом процессе сыграло быстрое увеличение вычислительных мощностей и распространение компьютеров, поскольку единственным способом получать результаты в таких моделях является численное моделирование.

В начале 1990-х гг. Нордхаус представляет первую версию динамической интегрированной модели климата и экономики (DICE). Базовая модель и основные расчеты в ее рамках приводятся в ряде публикаций (Nordhaus, 1992; 1993), а вскоре выходит книга (Nordhaus, 1994b), содержащая подробное описание и детальный анализ результатов работы модели DICE. С этого времени экономика изменения климата становится главной темой его исследований — он занимается оценками последствий изменения климата в денежном выражении (Nordhaus, 1994a; 2006; Nordhaus, Moffat, 2017), а также калибровкой и обновлением модели DICE (Nordhaus, 2013; 2018). Наконец, в 2018 г. (в возрасте 77 лет) за свои многочисленные работы по экономике изменения климата Нордхаус был удостоен Нобелевской премии.

### 3. Изменение климата как глобальная экстерналия

Прежде чем перейти собственно к рассказу о модели Нордхауса DICE, необходимо разобраться, в чем состоит мотивация построения подобных моделей и почему изменение климата является в первую очередь экономической проблемой.

С начала XIX в. мировая экономика демонстрирует стабильный рост выпуска и дохода на душу населения, который еще больше ускоряется в XX в. Этот

<sup>1</sup> Хороший обзор литературы по экономике изменения климата, в котором обсуждается в том числе история зарождения этой области науки, можно найти в (Dobes, Jotzo, Stern, 2014).

устойчивый рост, принципиально не наблюдавшийся ранее, в первую очередь связан с достижениями промышленной революции, а главным источником такого роста стала дешевая энергия, которую человечество получает от сжигания ископаемого топлива (прежде всего нефти, природного газа и угля). Однако химический процесс, лежащий в основе получения этой энергии, — экзотермическая реакция окисления углерода до углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), — подразумевает, что неизбежным следствием получения большого количества тепловой энергии являются выбросы  $\text{CO}_2$ , которые накапливаются в атмосфере.

Ближе к концу XIX в. стало понятно, что эти выбросы вовсе не являются безобидным побочным эффектом. Английский физик Джон Тиндаль (Tyndall, 1861) обнаружил, что углекислый газ является одним из основных *парниковых газов*<sup>1</sup> — он прозрачен для идущего на Землю излучения Солнца, но не пропускает инфракрасное излучение Земли обратно в космос, тем самым играя роль своеобразной «крыши теплицы». В результате возникает *парниковый эффект* — увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере ведет повышению температуры на поверхности Земли. Чуть позже шведский химик Сванте Аррениус (Arrhenius, 1896) количественно оценил возможную величину парникового эффекта и одним из первых обратил внимание на то, что деятельность человека по получению энергии (промышленные выбросы  $\text{CO}_2$ ) вносит вклад в парниковый эффект и способна привести к глобальным изменениям климата.

За прошедшие сто с лишним лет физика атмосферы и климатология сделали огромный скачок в развитии, и все, что ученым на сегодняшний день известно, полностью подтверждает выводы Аррениуса (по крайней мере качественно). Измерения показывают, что к 2019 г. средняя концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере выросла на 47% процентов по сравнению с доиндустриальным уровнем (уровнем 1750 г.)<sup>2</sup>. При этом есть множество доказательств того, что это увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  именно антропогенное — оно произошло и продолжает происходить за счет промышленных выбросов  $\text{CO}_2$ <sup>3</sup>. Одновременно с этим на Земле действительно происходит глобальное изменение климата — ученые фиксируют повышение средней мировой температуры, уровня мирового океана и частоты стихийных бедствий, а также уменьшение массы Антарктического ледяного щита и площади морского льда в Арктике (IPCC, 2014; IPCC, 2018). Более того, данные наблюдений свидетельствуют не только о том, что со времен Аррениуса средняя мировая температура выросла на 1 °С, но и о том, что глобальное потепление ускоряется — в начале XX в. темп роста средней мировой температуры составлял 0,03 °С в десятилетие, а за последние 20 лет уже 0,17 °С в десятилетие (IPCC, 2018). Подобный темп роста является беспрецедентным не только в истории человечества, но и в истории всей планеты в целом.

Таким образом, побочные эффекты от экономического роста влияют на изменение климата и тем самым отражаются на судьбе всей планеты. Это означает, что энергия, которую человечество получает от сжигания ископаемого топлива, на самом деле является не такой дешевой (а рост — не таким устойчивым), как представляется на первый взгляд. Стоимость дополнительной тонны угля для отдельной фирмы (частные предельные издержки) заведомо отличается от затрат, которые касаются всего человечества (общественные предельные издержки). Экономисты говорят, что изменение климата представляет собой экстерналию — ситуацию,

<sup>1</sup> К парниковым газам относятся также водяной пар, метан, закись азота и озон, но углекислый газ является главным, на содержание которого в атмосфере влияет деятельность человека.

<sup>2</sup> См.: <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve>.

<sup>3</sup> Самое убедительное доказательство основано на изотопном анализе содержащегося в атмосфере  $\text{CO}_2$  (см. Росгидромет, 2014).

в которой действия одних агентов напрямую влияют на выгоды или издержки остальных, но никак не отражаются в рыночных ценах.

В экономике примеры экстерналий встречаются довольно часто и тесно связаны с общественными благами. Например, классический пример положительной экстерналии — фундаментальные научные исследования и производство знаний, за анализ которых Нобелевскую премию с Нордхаусом разделил Пол Ромер (см.: Вымятина, 2019). Затраты на исследования несет только одна фирма, а выгоды от научного открытия получают сразу все, так как знания являются неконкурентным благом (они не уменьшаются от того, что ими владеет не одна фирма, а несколько), а также практически неисключаемы (очень трудно установить права собственности на научные открытия). Синонимичный пример положительной экстерналии — накопление человеческого капитала. Можно считать, что затраты на образование, которые несет индивид, обеспечивают дополнительные выгоды для всего общества в целом, происходящие, например, от повышения гражданской ответственности и самосознания, снижения уровня преступности в обществе и т. п.

Серьезная проблема человечества связана с тем, что изменение климата представляет собой отрицательную экстерналию. Атмосфера Земли — это глобальное общественное благо (природный ресурс открытого доступа), поскольку ее используют все, но она при этом никому не принадлежит. Сжигание каждой тонны угля отдельным агентом (индивидом, фирмой или государством) приводит к выбросам  $\text{CO}_2$  в атмосферу, которые усиливают парниковый эффект и влияют на изменение климата, увеличивая тем самым издержки всех остальных агентов (человечества в целом). Поэтому изменение климата — это самая глобальная экстерналия из всех, с которыми человечество сталкивалось до сих пор.

Тем не менее, как иронично заметил знаменитый американский экономист Мартин Вейцман в своей книге 2015 г. «Климатический шок» (Wagner, Weitzman, 2015), никто не сможет получить Нобелевскую премию по экономике за решение проблемы изменения климата — просто потому, что эффективный способ борьбы с экстерналиями уже давно и хорошо известен. Около ста лет назад британский экономист Артур Сесил Пигу (Pigou, 1920) объяснил, что для того чтобы обеспечить оптимальный с точки зрения общества исход, необходимо ввести корректирующий налог (впоследствии получивший название «налога Пигу»), который повысит частные предельные издержки до уровня общих. Если издержки от выброса дополнительной тонны  $\text{CO}_2$ , которые несут отдельные фирмы, будут включать в себя в явном виде тот урон, который при этом наносится человечеству, то стимулы и решения фирм будут согласованы с тем, что выгодно для всего общества (экстерналия будет интернализирована).

На практике идею Пигу можно реализовать разными способами — либо в явном виде установив налог на выбросы, либо создав рынок для торговли квотами на выбросы парниковых газов (механизм *capand trade*). Но, так или иначе, чтобы применить эту идею, необходимо знать те самые общественные предельные издержки. Для этого в первую очередь и используются интегрированные оценочные модели. Основным результатом работы подобных моделей является расчет *социальной стоимости углерода* (*social cost of carbon, SCC*) — величины потерь от выброса дополнительной тонны  $\text{CO}_2$  с точки зрения общества в целом. Именно величина SCC определяет оптимальную климатическую политику (величину налога на выбросы). Так что замечание Вейцмана применимо и к Нобелевской премии Нордхауса — на самом деле она получена не за решение проблемы изменения климата, а за расчеты, которые должны помочь человечеству применить уже известное решение на практике.



#### 4. Экономические оценки последствий изменения климата

Для того чтобы вообще можно было говорить о социальной стоимости углерода (предельных издержках), необходимо сначала понять, каковы общие издержки человечества в связи с изменением климата? В этом разделе мы обсудим, каким образом экономисты пытаются получать ответы на подобные вопросы.

Хотя последствия изменения климата для всей планеты в целом многочисленны и непредсказуемы, наибольший урон, по мнению ученых, способны нанести повышение уровня моря, усиление ураганов и стихийных бедствий, окисление океана, а также утрата биологического разнообразия (см.: Nordhaus, 2013)<sup>1</sup>. Одним из направлений деятельности Нордхауса и его коллег является попытка учесть все последствия изменения климата в денежном выражении для отдельных стран или регионов мира. Подобные исследования возникли в начале 1990-х гг. (Nordhaus, 1991; Fankhauser, 1995), и продолжают до сих пор (см.: обзоры Tol, 2009; 2014; Nordhaus, Moffat, 2017). Обычно в контексте подобных исследований принято оценивать эффект, который окажет удвоение концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере (по сравнению с доиндустриальным уровнем), ожидаемое уже к середине XXI в., на общемировой выпуск (глобальный ВВП).

Как правило, для денежной оценки последствий изменения климата, экономисты используют одну из трех методологий. Во-первых, некоторые исследования основаны на *опросах экспертов* (см., в частности: Nordhaus, 1994a). Во-вторых, иногда используется *статистический метод* (см.: Mendelsohn et al., 2000), основанный на выявлении реального уровня адаптации людей и фирм к изменению климата. В этом методе сравниваются экономические характеристики более теплого региона с характеристиками более холодного региона внутри одной и той же страны. Предполагая, что наблюдаемая разность пространственных характеристик остается неизменной во времени, оказывается возможным спрогнозировать, как будущее увеличение температуры скажется на разных регионах.

Наконец, в-третьих, самым популярным и получившим наиболее широкое распространение является *инвентаризационный метод*, базирующийся на опубликованных в академических журналах исследованиях ученых в разных областях науки. Так, многие физические эффекты изменения климата оказывается возможным оценить напрямую по рыночной стоимости. В частности, экономисты берут прогнозы влияния потепления на урожайность из сельскохозяйственной научной литературы и по ним оценивают изменение дохода от сельского хозяйства в разных странах мира. А издержки от строительства дамб и потери земли, которые возникают от повышения уровня моря, оцениваются исходя из публикаций в инженерной литературе. Для случая нерыночных товаров и услуг (в первую очередь, здоровья), экономистам приходится привлекать более грубые соображения, такие как *метод переноса выгод*. Например, из литературы по эпидемиологии берутся данные о воздействии изменения климата на здоровье и окружающую среду, которые затем пересчитываются в денежном выражении с использованием оценок риска смертности (стоимостей среднестатистической жизни), рассчитанных для других контекстов.

Разные исследования отличаются друг от друга не только методологией, но также используемыми оценками равновесной температурной чувствительности (того, насколько повысится средняя мировая температура от удвоения концентрации CO<sub>2</sub>). Поэтому нет ничего удивительного в том, что денежные оценки урона,

<sup>1</sup> Все эти последствия уже наступают. Например, в Австралии в 2016 г. из-за повышения уровня Мирового океана исчезла и была официально переведена в категорию вымерших животных рифовая мозаичнохвостая крыса (*Melomys rubicola*), см.: <https://nplus1.ru/news/2019/02/19/truly-gone>.

полученные в разных работах, довольно сильно разнятся. Например, удвоение концентрации  $\text{CO}_2$  в одном исследовании приводит к потеплению на  $4^\circ\text{C}$  и падению глобального ВВП на 17,8%, а в другом исследовании — к потеплению на  $10^\circ\text{C}$  и к падению ВВП на 6% (см.: Nordhaus, Moffat, 2017, табл. 2). Разброс оценок настолько большой, что две разные работы самого Нордхауса приводят практически противоположные цифры — увеличение средней мировой температуры на  $3^\circ\text{C}$  согласно одной из них приведет к росту глобального ВВП на 0,9% (Nordhaus, 2006), а согласно другой — к падению на 2,25% (Nordhaus, 2013).

Сами экономисты признают, что количественные оценки экономического эффекта изменения климата содержат значительное количество ошибок и являются плохо воспроизводимыми. Одним из способов получить более точные результаты, чем те, которые приводятся в отдельных работах, служит метаанализ — статистическое исследование оценок, взятых сразу из многих работ. Такая попытка предпринята в недавней работе Нордхауса и Эндрю Моффата (Nordhaus, Moffat, 2017). В ней авторы собрали 36 оценок влияния потепления на глобальный выпуск из 27 различных исследований, присвоили им определенные веса и построили регрессию по этим наблюдениям. Правда, для получения итоговой оценки найденные коэффициенты были произвольным образом увеличены на 25%, чтобы дополнительно учесть пропущенные в исходных оценках нерыночный урон и потери от катастроф. Так что точность полученной в рамках метаанализа оценки все равно находится под большим вопросом. Так или иначе, Нордхаус и Моффат находят, что потепление на  $3^\circ\text{C}$  приведет к падению общемирового ВВП на 2,04 ( $\pm 2,21$ )%, а потепление на  $6^\circ\text{C}$  уменьшит выпуск на 8,16 ( $\pm 2,43$ )%. Именно эти оценки легли в основу функции урона в последней версии модели DICE (см. раздел 5.1).

## 5. Интегрированные оценочные модели на примере DICE-2016R2

Главный вклад Нордхауса в экономическую науку, отмеченный Шведской королевской академией наук, — это разработка динамической интегрированной модели климата и экономики (DICE), которую он развивал и обновлял на протяжении последних двадцати пяти лет<sup>1</sup>. Общей идеей подобных моделей является попытка написать разумную систему уравнений, которая отражала бы долгосрочное взаимовлияние экономических процессов, происходящих согласно некоторым экономическим законам, и геофизических процессов, описывающих физику изменения климата. Сам Нордхаус для обозначения области науки, к которой относятся его модели, даже использует неологизм «геомакроэкономика» (Nordhaus, 2017).

Хотя написать подобную систему уравнений оказывается возможным, получить ее аналитическое решение нельзя, так что все подобные модели принципиально рассчитываются только численно. В частности, вместо всех параметров, фигурирующих в модели, необходимо подставить конкретные числа, что сильно усложняет задачу и приводит к дополнительным неточностям. В данном разделе мы следуем работе (Nordhaus, 2018) и описываем последнюю версию предложенной Нордхаусом модели, DICE-2016R2, а также результаты, к которым она приводит.

### 5.1. Модель DICE-2016R2: экономический сектор

Экономический сектор в модели DICE-2016R2 базируется на неоклассической модели экономического роста (модели Рамсея), в которой климат рассматривается

<sup>1</sup> Параллельно Нордхаус разработал также региональную интегрированную модель климата и экономики (RICE), которая представляет собой, по сути, дезагрегированную версию модели DICE, примененную к отдельным регионам мира.

как еще одна разновидность капитала. Общество максимизирует свою функцию полезности, оптимальным образом выбирая траектории двух переменных — потребления на душу населения и нормы снижения выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Функция общественного благосостояния имеет вид:

$$W = \sum_{t=1}^{T_{\max}} \frac{c(t)^{1-\alpha}}{1-\alpha} L(t) \frac{1}{(1+\rho)^t},$$

где  $c(t)$  — потребление на душу населения,  $L(t)$  — численность населения в момент времени  $t$ ,  $\alpha$  — постоянная эластичность межвременного замещения<sup>1</sup>,  $\rho$  — ставка дисконтирования, а  $T_{\max}$  — горизонт планирования (обычно модель рассчитывается до 2100 г.).

Ключевым параметром функции общественного благосостояния и всего экономического сектора модели является ставка дисконтирования — мера терпеливости общества, отражающая готовность отложить сегодняшнее потребление ради увеличения потребления в будущем. Выбирая ставку дисконтирования, Нордхаус исходит из того, что она должна отражать реальный экономический выбор и соответствовать рыночной ставке процента (Nordhaus, 2007). Так как в модели Рамсея на оптимальной траектории выполняется *правило Кейнса–Рамсея*, то ставка процента связана со ставкой дисконтирования следующим образом:  $r = \rho + \alpha g_c$ , где  $g_c$  — темп роста потребления. По оценкам Нордхауса, средняя ставка процента в мире до 2100 г. будет равна  $r = 4,25\%$ , и исходя из этого он подбирает значение  $\rho = 1,5\%$ . При этом  $\alpha = 1,45$ , что соответствует  $g_c = 1,9\%$ , в соответствии с прогнозами темпа роста общего выпуска (см. сноску 13).

С этим выбором ставки дисконтирования активно спорят многие экономисты, и в частности Николас Стерн, который в своем обзоре (Stern, 2007) утверждает, что ставка дисконтирования должна быть нормативно выбрана очень низкой,  $\rho = 0,1\%$ , поскольку нет никаких оснований занижать вес благополучия будущих поколений. Прислушиваясь к этой критике, Нордхаус отдельно рассчитывает в своей модели сценарий, основанный на ставке дисконтирования Стерна. Как мы увидим в разделе 5.3, значение ставки дисконтирования существенно меняет результаты и рекомендации по климатической политике.

Общий выпуск в модели задается стандартной производственной функцией Кобба–Дугласа, зависящей от технического прогресса, физического капитала и населения. При этом в каждый момент времени общий выпуск уменьшается из-за изменения климата, а кроме того, часть выпуска расходуется на снижение выбросов. Так что *чистый выпуск* имеет вид

$$Q(t) = (1 - \Lambda(t)) (1 - \Omega(t)) A(t) K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma},$$

где  $A(t)$  — уровень технического прогресса,  $K(t)$  — запас физического капитала,  $\Lambda(t)$  — функция затрат на снижение выбросов, а  $\Omega(t)$  — функция урона. Этот чистый выпуск делится на потребление и инвестиции в запас капитала:

$$K(t) = Q(t) - c(t)L(t) - \delta_K K(t-1),$$

где  $\delta_K$  — норма амортизации физического капитала. Население и технический прогресс в модели экзогенны, а их темпы прироста снижаются со временем

<sup>1</sup> Эластичность межвременного замещения отвечает за неприятие неравенства. Чем выше этот параметр, тем больше потребления в разные моменты времени будут сходны друг с другом.



и подобраны (калиброваны) так, чтобы соответствовать имеющимся прогнозам по росту выпуска<sup>1</sup>.

Функция урона показывает потери общего выпуска от изменения климата, выражающегося в росте температуры поверхности Земли, и имеет вид

$$\Omega(t) = \psi_1 T_{AT}(t) + \psi_2 [T_{AT}(t)]^2,$$

где  $T_{AT}$  — увеличение среднемировой температуры. Хотя из оценок, обсуждавшихся в разделе 4, и можно сделать вывод, что функция урона растет с увеличением температуры, конкретная квадратичная зависимость является совершенно произвольной. Параметры этой функции согласованы с оценкой из работы (Nordhaus, Moffat, 2017).

Функция затрат на снижение выбросов отражает долю выпуска, который тратится на уменьшение выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу (переход к чистой энергии) и имеет вид

$$\Lambda(t) = \theta_1(t)\mu(t)^{\theta_2},$$

где  $\mu(t)$  — норма снижения выбросов, показывающая, какая доля выбросов не попадает в атмосферу. Переменная  $\mu(t)$  однозначно соответствует налогу на выбросы, так что траектория нормы снижения выбросов полностью определяется выбранной климатической политикой. Заметим, что чем выше норма снижения выбросов (чем сильнее общество хочет бороться с изменением климата), тем большую долю выпуска на это необходимо потратить. Параметры данной функции задаются как  $\theta_1(t) = 0,0741 \times 0,0904^{t-1}$  и  $\theta_1 = 2,6$ . Параметр  $\theta_1(t)$  можно интерпретировать как стоимость полного отказа от ископаемого топлива и перехода на чистую энергию. Его величина означает, что при отсутствии выбросов в начальный момент времени, на снижение выбросов будет тратиться 7,41% выпуска, и в дальнейшем эта доля будет уменьшаться с темпом 2% в год, что отражает технический прогресс в энергетике. Степенная и сильно выпуклая зависимость затрат от снижения выбросов (величина  $\theta_2$ ) отражает сложность этого процесса, так как подразумевает, что предельные затраты на снижение выбросов резко увеличиваются с ростом нормы снижения выбросов.

Наконец, общий выпуск связан с выбросами  $\text{CO}_2$  в атмосферу (с учетом нормы снижения выбросов), так что антропогенный парниковый эффект описывается следующим уравнением:

$$E(t) = \sigma(t)[1 - \mu(t)]Y(t) + E_{Land}(t),$$

где  $E(t)$  — суммарная величина выбросов,  $\sigma(t)$  — интенсивность выбросов (количество  $\text{CO}_2$ , приходящегося на каждый доллар ВВП), а  $E_{Land}(t)$  — экзогенно заданные выбросы от сельского хозяйства и землепользования<sup>2</sup>. Интенсивность выбросов является экзогенным параметром, темп прироста которого снижается со временем, что отражает эффект постепенной декарбонизации (уменьшения углеродоемкости ВВП).

Теоретически, суммарная величина выбросов за все время должна быть ограничена сверху. Поскольку запасы полезных ископаемых на планете ограничены, то по последним оценкам мировая экономика не сможет произвести выбросов больше, чем 6 триллионов тонн  $\text{CO}_2$ . Тем не менее, в данной модели такое ограничение никогда не достигается (не является связывающим) и не играет никакой роли.

<sup>1</sup> Динамика населения и технического прогресса подобрана так, чтобы в 2100 г. население в мире составило 10,5 миллиардов и постоянный темп роста общемирового выпуска на душу населения был равен 2,1% с 2015 по 2050 г. и 1,9% с 2050 по 2100 г.

<sup>2</sup> В 2010 г. выбросы от сельского хозяйства и землепользования (значительная часть которых является выбросами метана от крупного рогатого скота) составили 15,6% всех антропогенных выбросов (см.: IPCC, 2014).

## 5.2. Модель DICE-2016R2: геофизический сектор

Геофизический сектор в модели DICE-2016R2 описывается рядом уравнений, которые связывают суммарную величину выбросов с различными физическими процессами, влияющими на изменение климата.

Земля моделируется как система из трех геохимических резервуаров — атмосферы (AT), верхних слоев океана и биосферы (UP) и глубинных слоев океана (LO). Выбросы  $\text{CO}_2$  попадают в атмосферу, а затем углерод переносится между соседними резервуарами в процессе углеродного цикла:

$$\begin{aligned}M_{AT}(t) &= E(t) + \varphi_{11}M_{AT}(t-1) + \varphi_{21}M_{UP}(t-1), \\M_{UP}(t) &= \varphi_{21}M_{AT}(t-1) + \varphi_{22}M_{UP}(t-1) + \varphi_{32}M_{LO}(t-1), \\M_{LO}(t) &= \varphi_{23}M_{UP}(t-1) + \varphi_{33}M_{LO}(t-1),\end{aligned}$$

где  $M_{AT}(t)$  — концентрация углерода в атмосфере, а  $\varphi_{ij}$  — коэффициенты переноса. Параметры этих уравнений откалиброваны по существующим физическим моделям углеродного цикла и историческим данным.

Накопление промышленного  $\text{CO}_2$  в атмосфере увеличивает радиационное воздействие парниковых газов:

$$F(t) = \eta \log \left\{ \frac{M_{AT}(t)}{M_{AT}(1750)} \right\} + F_{EX}(t),$$

где  $F(t)$  — изменение общего радиационного воздействия парниковых газов с 1750 г., на которое влияют непосредственно выбросы промышленного  $\text{CO}_2$ , а также внешние воздействия  $F_{EX}(t)$ , учитывающие вклад остальных парниковых газов, изменения отражательной способности поверхности Земли (альбедо) и иные факторы<sup>1</sup>. Данное уравнение было получено на основе эмпирических измерений и климатических моделей.

Наконец, увеличение радиационного воздействия увеличивает температуру атмосферы, включая ее нижние слои и поверхность Земли, что по цепочке приводит к нагреву верхних слоев океана, а затем, с некоторой задержкой, определяющейся скоростью диффузии, к нагреву глубинных слоев океана. Эти процессы упрощенно описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}T_{AT}(t) &= T_{AT}(t-1) + \xi_1 \{F(t) - \xi_2 T_{AT}(t-1) - \xi_3 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)]\}, \\T_{LO}(t) &= T_{LO}(t-1) + \xi_4 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)],\end{aligned}$$

где  $T_{AT}(t)$  — увеличение среднемировой температуры на поверхности Земли (фигурирующее в функции урона), а  $T_{LO}(t)$  — изменение температуры глубинных слоев океана.

Ключевым параметром этих уравнений и всего геофизического сектора модели является равновесная температурная чувствительность — температура, которая установится в новом тепловом равновесии в результате удвоения концентрации  $\text{CO}_2$ . Этот параметр рассчитывается как взвешенное среднее различных оценок и прогнозов, полученных в том числе на основе климатических моделей (моделей общей циркуляции атмосферы) и исторических наблюдений. В результате

<sup>1</sup> По прогнозам модели, к 2100 г. вклад внешних факторов в радиационное воздействие составит порядка 10% от вклада промышленного  $\text{CO}_2$ .

равновесная температурная чувствительность в модели отвечает потеплению на 3,1 °C в результате удвоения концентрации CO<sub>2</sub>.

### 5.3. Результаты моделирования

Выбрав конкретные численные значения параметров и начальные значения переменных (взяты из реальных данных), модель DICE-2016R2 можно запустить на компьютере и посмотреть на динамику выбросов и концентрации CO<sub>2</sub>, а также на рост температуры до 2100 г. в различных сценариях. Кроме того, модель позволяет численно рассчитать социальную стоимость углерода (SCC). В модели SCC в каждый момент времени определяется как производная функции общественного благосостояния по суммарной величине выбросов (в единицах текущего потребления):

$$SCC(t) = \frac{\partial W / \partial E(t)}{\partial W / \partial c(t)} \equiv \frac{\partial c(t)}{\partial E(t)}.$$

Климатическая политика является оптимальной, если налог на выбросы (исходя из которого определяется траектория нормы снижения выбросов) равен SCC, то есть стоимость выбросов совпадает с общими предельными издержками. Чем ближе цена на углерод к SCC, тем лучше интернализирована экстерналия изменения климата.

Нордхаус приводит результаты численного моделирования четырех возможных сценариев. Первый сценарий — *основной*. В нем климатическая политика отсутствует, а цена на углерод в 2015 г. равна 2 долл. за тонну CO<sub>2</sub> и растет темпом 2% в год. Второй сценарий — *оптимальный*, в котором общество проводит оптимальную климатическую политику (цена на углерод в каждый момент времени равна SCC). Третий сценарий — *оптимальный с ограничением температуры*. В нем проводится оптимальная климатическая политика и устанавливается дополнительное ограничение, не допускающее увеличения температуры выше 2,5 °C. Четвертый — *сценарий Стерна*, в котором оптимальная климатическая политика рассчитана при низкой ставке дисконтирования  $\rho = 0,1\%$ , предложенной Стерном.

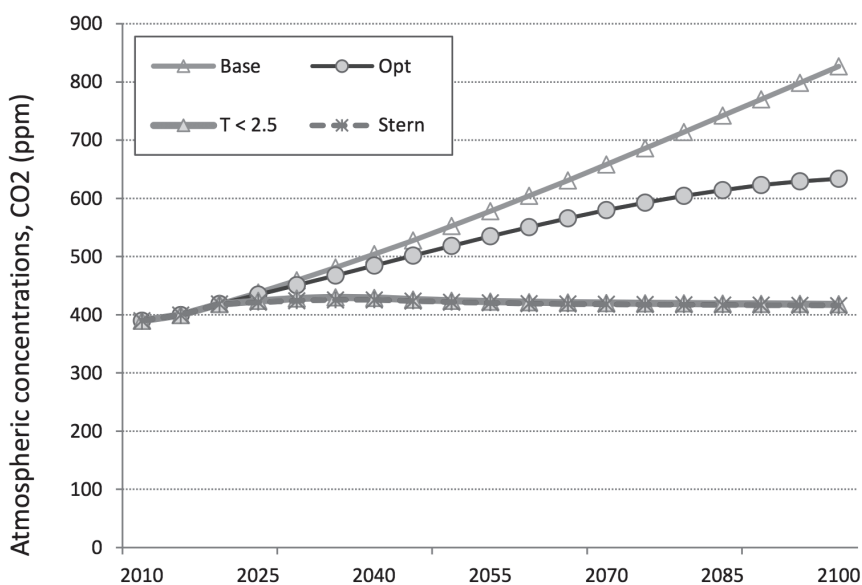


Рис. 1. Выбросы углекислого газа, 2010–2100 (гигатонны CO<sub>2</sub> в год)

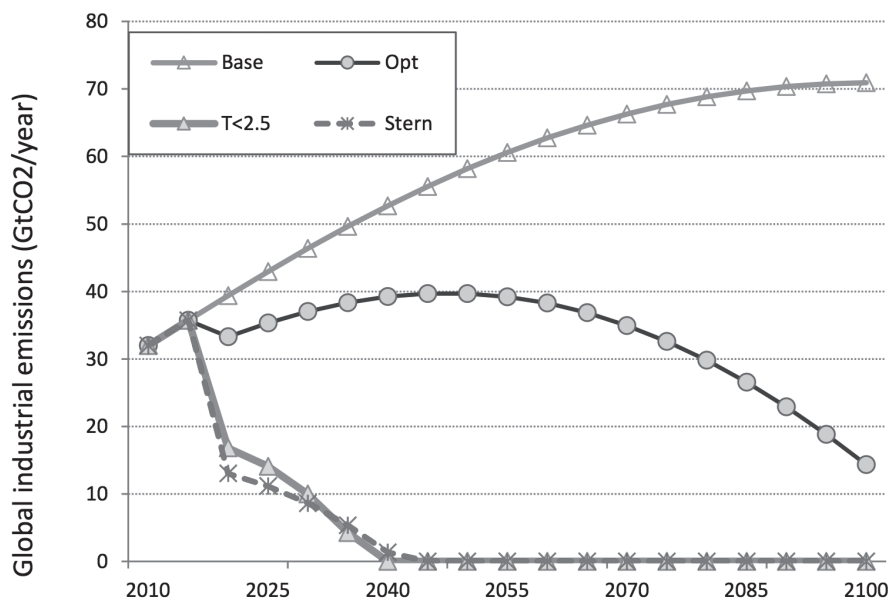


Рис. 2. Концентрация парниковых газов в атмосфере, 2010–2100 (миллионные доли)

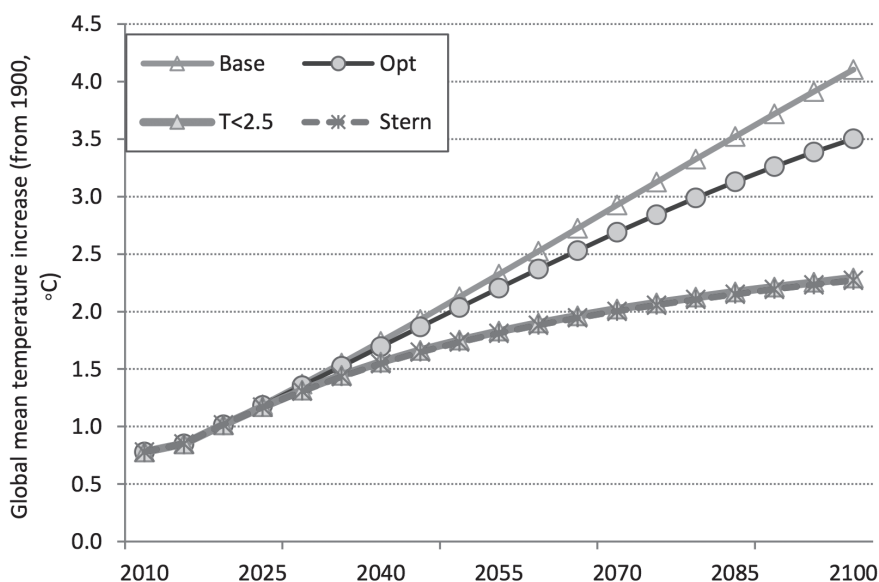


Рис. 3. Изменение среднемировой температуры по сравнению с 1900 г. (°C)

На рис. 1–3, взятых из статьи Нордхауса (Nordhaus, 2018), видно, что в основном сценарии выбросы, концентрация CO<sub>2</sub> и среднемировая температура монотонно растут, причем к 2100 г. концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере утроится по сравнению с доиндустриальным уровнем, а температура вырастет на 4 °C по сравнению с началом XX в. В оптимальном сценарии выбросы продолжают расти примерно до середины XXI в., поскольку развивающимся странам необходимо сохранить у себя традиционное промышленное производство и догнать по уровню дохода развитые страны. Поэтому даже несмотря на то, что выбросы CO<sub>2</sub> с середины XXI в. начинают уменьшаться, в силу значительной инерции климатической

системы концентрация CO<sub>2</sub> и температура в оптимальном сценарии тоже монотонно увеличиваются до 2100 г., хотя и не так быстро, как в основном сценарии.

Оптимальный сценарий с ограничением температуры и сценарий Стерна схожи друг с другом как в своих оптимистичных прогнозах, так и в практической невыполнимости — для их реализации необходимы очень быстрые, строгие, скоординированные и единогласно соблюдаемые меры глобальной климатической политики. В обоих этих сценариях выбросы снижаются до нуля уже к середине XXI в., за счет чего концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере останется примерно на текущем уровне, а средняя температура не увеличится больше чем на 2,5 °С. Заметим также, что согласно расчетам Нордхауса международно признанная цель не допустить увеличения температуры выше 2 °С (зафиксированная, в частности, в Парижском соглашении 2015 г.), не может быть достигнута в рамках модели DICE-2016R2, если только к середине XXI в. не появится технология, которая обеспечит отрицательные выбросы (удаление CO<sub>2</sub> из атмосферы).

Отдельного разговора заслуживает показатель социальной стоимости углерода в каждом из сценариев. В табл. 1, взятой из той же статьи (Nordhaus, 2018), сверху указан год выбросов, так что, например, значение SCC, равное 284,0 в 2025 г., означает, что стоимость выброса дополнительной тонны CO<sub>2</sub> в атмосферу в 2025 г. составит 284 долл. в единицах потребления в 2025 г.

Таблица 1

**Социальная стоимость углерода (международные доллары 2010 г. за тонну CO<sub>2</sub>)**

Сценарий	2015	2020	2025	2030	2050
Основной	30,0	35,7	42,3	49,5	98,3
Оптимальный (ρ = 1,5%)	29,5	35,3	41,8	49,2	99,6
Оптимальный с ограничением температуры (T < 2,5 °C)	184,1	229,0	284,0	351,0	1008,4
Сценарий Стерна (ρ = 0,1%)	256,5	299,6	340,7	381,7	615,6
Основной сценарий с разными ставками дисконтирования					
ρ = 2,5%	111,1	133,4	148,7	162,3	242,6
ρ = 3%	71,6	85,3	94,4	104,0	161,7
ρ = 4%	34,0	39,6	44,5	49,8	82,1
ρ = 5%	18,9	21,7	24,8	28,1	48,4

Во-первых, сразу обращает на себя внимание, что реальная цена углерода в 2015 г. (2 долл. за тонну CO<sub>2</sub>) была существенно ниже, чем оптимальная с точки зрения общества цена (SCC). Фактически, в настоящее время выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу сильно субсидируются, даже с точки зрения сценариев, не подразумевающих активных и безотлагательных мер. Во-вторых, социальная стоимость углерода растет со временем — поскольку климат очень инерционен, температура по прогнозам модели продолжит расти даже в оптимальных сценариях, а значит, будущие выбросы принесут большой урон. По оценкам Нордхауса, в сценарии с ограничением температуры к 2050 г. SCC даже превысит 1000 долл. за тонну CO<sub>2</sub>.

Наконец, в-третьих, социальная стоимость углерода крайне чувствительна по отношению к выбранной ставке дисконтирования. Оценки в сценариях с низкой



и высокой ставками дисконтирования отличаются в десятки раз. Это создает большую методологическую трудность для применения модели DICE-2016R2 к оценке различных климатических политик (см. также раздел 6).

## 6. Критика интегрированных оценочных моделей

Как мы отчасти уже видели, модели Нордхауса вызывают множество обоснованных вопросов, которые снижают их дескриптивную и нормативную ценность до нуля или даже до отрицательных величин. В данном разделе мы обсудим основные серьезные недостатки интегрированных оценочных моделей.

Во-первых, учет всех последствий изменения климата в денежном выражении является слишком произвольной и потому практически невозпроизводимой деятельностью. С одной стороны, это вполне объяснимо, поскольку для большинства этих последствий не существует никакого экономического рынка, на котором их можно было бы обменять или продать, а значит, не существует хорошо определенной цены. С другой стороны, в качестве компенсации этого факта, для того чтобы получить «более точную» оценку снижения глобального выпуска от потепления на 3 °С, Нордхаус предлагает просто произвольно увеличить оцененный урон на 25% (см. раздел 4), что гораздо больше похоже на гадание, чем на экономический прогноз. А ведь в дальнейшем эти оценки используются в моделях и на их основе определяются рекомендации по проведению климатической политики.

Во-вторых, сама модель содержит слишком много произвольных предположений, касающихся характера зависимостей и значений параметров. Эти предположения полностью определяют выводы модели, но не могут быть подтверждены или проверены ни с какой разумной точностью. Самыми выразительными примерами здесь являются равновесная температурная чувствительность и функция урона. Несмотря на значительный прогресс в понимании физических процессов, которые вызывают изменение климата, климатическая система остается малоизученной и содержит множество сложных положительных и отрицательных обратных связей. В связи с этим многие физики признают, что на данный момент получить оценку равновесной температурной чувствительности принципиально невозможно (Allen, Frame, 2007). В то же время Нордхаусу для запуска модели приходится из каких-то соображений фиксировать значение и этого параметра.

Что касается функции урона, то явный вид этой функции (очевидно, необходимый для расчетов по модели) не может быть выведен ни из каких теоретических или эмпирических соображений, а должен быть просто постулирован. В частности, Нордхаус предполагает, что функция урона квадратична по увеличению среднемировой температуры, но с тем же успехом она может быть любой другой монотонно возрастающей функцией (например, экспонентой), что сразу же изменит результаты и выводы модели. Кроме того, спецификация Нордхауса подразумевает, что потепление влияет на *уровень* выпуска, в то время как экономические исследования последнего времени указывают на то, что изменение климата гораздо сильнее влияет на *темп роста* выпуска (см. теоретическую модель в (Bretschger, 2017) и эмпирическое исследование в (Dell, Jones, Olken, 2012)).

В-третьих, отдельной и большой трудностью является уже упоминавшийся выбор ставки дисконтирования. Фактически, ставка дисконтирования является нормативным параметром, а значит, точно таким же нормативным параметром в модели оказывается и социальная стоимость углерода. Можно заранее выбрать любое значение (в очень широких пределах) этого параметра климатической

политики и получить его в модели Нордхауса как общественные предельные издержки при какой-то ставке дисконтирования.

В результате, как справедливо замечает Роберт Пиндайк, интегрированные оценочные модели создают ложную видимость научной добросовестности и точности, а на самом деле позволяют получить и обосновать абсолютно любой результат, потому что входные данные могут быть выбраны произвольно (Pindyck, 2013).

## 7. Заключение

В данной работе мы рассмотрели научную карьеру Уильяма Нордхауса и его вклад в теорию экономического роста, за который он был удостоен премии памяти Альфреда Нобеля по экономике в 2018 г. Нордхаус был одним из первых, кто стал говорить о том, что отрицательная экстерналиа изменения климата является очень серьезной и глобальной проблемой; пытаться оценивать экономические эффекты от увеличения среднемировой температуры в денежном выражении; строить интегрированные оценочные модели, помогающие выделить и понять механизмы, через которые экономическая деятельность вызывает изменение климата, а изменение климата влияет на экономическую деятельность; а также определять параметры оптимальной климатической политики и предлагать рекомендации по ее проведению. Впрочем, как мы постарались показать, интегрированные оценочные модели только создают видимость научной добросовестности, а на самом деле являются очень сомнительным способом анализировать последствия изменения климата.

Можно было бы сказать, что вручение Нобелевской премии Нордхаусу, произошедшее в один день с выходом специального доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата «Глобальное потепление на 1,5 °C» (IPCC, 2018), призвано привлечь внимание общества и прежде всего экономистов к проблеме изменения климата. Как мы видели, изменение климата действительно является в первую очередь именно социально-экономической проблемой и требует если не скорейших мер климатической политики, то хотя бы адекватного анализа ситуации. Скорее всего, это действительно было частью замысла Шведской королевской академии наук, но в этом кроется злая ирония по отношению к Нордхаусу. Его работы были бы гораздо более уместными экономическими упражнениями, если бы эффекты от потепления не были так сильно выражены и проблема изменения климата не была такой насущной. Ирония же состоит в том, что чем сильнее меняется климат Земли, тем менее точными и полезными становятся модели, оценки и выводы Нордхауса.

## Источники

*Борисов К. Ю., Раскина Ю. В.* Хорошо ли сумасшедшие руководят больницей? Субъективные рассуждения о прогрессе экономической науки, навеянные недавней книгой Ричарда Талера и его Нобелевской премией // *Финансы и бизнес*. 2018. Т. 14. № 2. С. 4–19.

*Вымятина Ю. В.* Знания – дары Афины или ящик Пандоры? Нобелевская премия Пола Ромера // *Финансы и бизнес*. 2019. Т. 15. № 2. С. 3–17.

*Замулин О. А., Сонин К. И.* Экономический рост: Нобелевская премия 2018 года и уроки для России // *Вопросы экономики*. 2019. № 1. С. 11–36.

Росгидромет. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2014.

*Allen M. R., Frame D. J.* Call Off the Quest // *Science*. 2007. N 318(5850). P. 582–583.

*Arrhenius S.* On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground // *Philosophical Magazine*. 1896. N 41(251). P. 237–276.

- BP Statistical Review of World Energy 2019.
- Bretschger L.* Climate Policy and Economic Growth // Resource and Energy Economics. 2017. Vol. 49. P. 1–15.
- Dell M., Jones B. F., Olken B. A.* Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century // American Economic Journal: Macroeconomics. 2012. Vol. 4. N 3. P. 66–95.
- Dobes L., Jotzo F., Stern D. I.* The Economics of Global Climate Change: A Historical Literature Review // Review of Economics. 2014. Vol. 65. N 3. P. 281–320.
- Fankhauser S.* Valuing Climate Change: The Economics of the Greenhouse. London, 1995.
- Heal G.* Introduction to Symposium on the Economics of Exhaustible Resources // Review of Economic Studies. 1974. Vol. 41. P. 1–2.
- IPCC. 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 [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 2014.
- IPCC. Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report. In Press. 2018.
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens III W. W.* The Limits to Growth. N. Y., 1972.
- Mendelsohn R., Morrison W., Schlesinger M. E., Andronova N. G.* Country-specific Market Impacts of Climate Change // Climatic Change. 2000. Vol. 45. N 3–4. P. 553–569.
- Nordhaus W. D.* The Allocation of Energy Resources // Brookings Papers on Economic Activity. 1973. Vol. 3. P. 529–576.
- Nordhaus W. D.* Resources as a Constraint on Growth // American Economic Review. 1974. Vol. 64. N 2. P. 22–26.
- Nordhaus W. D.* The Political Business Cycle // Review of Economic Studies. 1975. Vol. 42. N 2. P. 169–190.
- Nordhaus W. D.* Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem // American Economic Review. 1977. Vol. 67. N 1. P. 341–346.
- Nordhaus W. D.* To Slow or Not to Slow: The Economics of the Greenhouse Effect // Economic Journal. 1991. N 101(407). P. 920–937.
- Nordhaus W. D.* An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases // Science. 1992. N 258(5086). P. 1315–1319.
- Nordhaus W. D.* Rolling the «DICE»: An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases // Resource and Energy Economics. 1993. Vol. 15. N 1. P. 27–50.
- Nordhaus W. D.* Expert Opinion on Climatic Change // American Scientist. 1994a. Vol. 82. N 1. P. 45–51.
- Nordhaus W. D.* Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change. Cambridge (MA), 1994b.
- Nordhaus W. D.* Geography and Macroeconomics: New Data and New Findings // Proceedings of the National Academy of Science. 2006. Vol. 103. N 10. P. 3510–3517.
- Nordhaus W. D.* A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change // Journal of Economic Literature. 2007. Vol. 45. N 3. P. 686–702.
- Nordhaus W. D.* The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World. Yale University Press, 2013.
- Nordhaus W. D.* Integrated Assessment Models of Climate Change / NBER Reporter. National Bureau of Economic Research (NBER), Cambridge (MA), 2017. Iss. 3. P. 16–20.
- Nordhaus W. D.* Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies // American Economic Journal: Economic Policy. 2018. Vol. 10. N 3. P. 333–360.
- Nordhaus W. D., Moffat A.* A Survey of Global Impacts of Climate Change: Replication, Survey Methods, and a Statistical Analysis / NBER Working Paper N 23646, National Bureau of Economic Research. 2017.
- Pigou A.* The Economics of Welfare. London, 1920.
- Pindyck R. S.* Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us? // Journal of Economic Literature. 2013. Vol. 51. N 3. P. 860–872.
- Stern N.* The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge University Press, 2007.
- Tol R. S.* The Economic Effects of Climate Change // Journal of Economic Perspectives. 2009. Vol. 23. N 2. P. 29–51.
- Tol R. S.* Correction and Update: The Economic Effects of Climate Change // Journal of Economic Perspectives. 2014. Vol. 28. N 2. P. 221–226.
- Tyndall J.* On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours, and on the Physical Connexion of Radiation, Absorption, and Conduction // Philosophical Magazine. 1861. N 22(146). P. 169–194.

Wagner G., Weitzman M. L. *Climate Shock: The Economic Consequences of a Hotter Planet*. Princeton University Press, 2015.

## References

- Allen M. R., Frame D. J. Call Off the Quest. *Science*, 2007, N 318(5850), pp. 582–583.
- Arrhenius S. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine*, 1896, N 41(251), pp. 237–276.
- Borissov K. Yu., Raskina Yu. V. Horosho li sumasshedshie rukovodyat bol'nicej? Sub'ektivnye rassuzhdeniya o progresse ekonomicheskoy nauki, naveyannye nedavnej knigoj Richarda Talera i ego Nobelevskoj premiej [How well are the lunatics running the asylum? Reflections on the progress of economics inspired by Richard Thaler's recent book and his Nobel Prize]. *Finansy i biznes* [Finance and business], 2018, vol. 14, N 2, pp. 4–19. (In Russian)
- BP. *Statistical Review of World Energy 2019*.
- Bretschger L. Climate Policy and Economic Growth. *Resource and Energy Economics*, 2017, vol. 49, pp. 1–15.
- Dell M., Jones B. F., Olken B. A. Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2012, vol. 4, N 3, pp. 66–95.
- Dobes L., Jotzo F., Stern D. I. The Economics of Global Climate Change: A Historical Literature Review. *Review of Economics*, 2014, vol. 65, N 3, pp. 281–320.
- Fankhauser S. *Valuing Climate Change: The Economics of the Greenhouse*. London, 1995.
- Heal G. Introduction to Symposium on the Economics of Exhaustible Resources. *Review of Economic Studies*, 1974, vol. 41, pp. 1–2.
- IPCC. *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 [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, 2014.
- IPCC. *Global Warming of 1.5 °C*. An IPCC Special Report. In Press. 2018.
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens III W. W. *The Limits to Growth*. New York, 1972.
- Mendelsohn R., Morrison W., Schlesinger M. E., Andronova N. G. Country-specific Market Impacts of Climate Change. *Climatic Change*, 2000, vol. 45, N 3–4, pp. 553–569.
- Nordhaus W. D. The Allocation of Energy Resources. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1973, N 3, pp. 529–576.
- Nordhaus W. D. Resources as a Constraint on Growth. *American Economic Review*, 1974, vol. 64, N 2, pp. 22–26.
- Nordhaus W. D. The Political Business Cycle. *Review of Economic Studies*, 1975, vol. 42, N 2, pp. 169–190.
- Nordhaus W. D. Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem. *American Economic Review*, 1977, vol. 67, N 1, pp. 341–346.
- Nordhaus W. D. To Slow or Not to Slow: The Economics of the Greenhouse Effect. *Economic Journal*, 1991, N 101(407), pp. 920–937.
- Nordhaus W. D. An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases. *Science*, 1992, N 258(5086), pp. 1315–1319.
- Nordhaus W. D. Rolling the «DICE»: An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases. *Resource and Energy Economics*, 1993, vol. 15, N 1, pp. 27–50.
- Nordhaus W. D. Expert Opinion on Climatic Change. *American Scientist*, 1994a, vol. 82, N 1, pp. 45–51.
- Nordhaus W. D. *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*. Cambridge (MA), 1994b.
- Nordhaus W. D. Geography and Macroeconomics: New Data and New Findings. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2006, vol. 103, N 10, pp. 3510–3517.
- Nordhaus W. D. A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Literature*, 2007, vol. 45, N 3, pp. 686–702.
- Nordhaus W. D. *The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*. Yale University Press, 2013.
- Nordhaus W. D. Integrated Assessment Models of Climate Change. *NBER Reporter, National Bureau of Economic Research (NBER)*. Cambridge, MA, Iss. 3, 2017, pp. 16–20.
- Nordhaus W. D. Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy*, 2018, vol. 10, N 3, pp. 333–360.
- Nordhaus W. D., Moffat A. A Survey of Global Impacts of Climate Change: Replication, Survey Methods, and a Statistical Analysis. NBER Working Paper 23646, National Bureau of Economic Research. 2017.

- Pigou A. *The Economics of Welfare*. London, 1920.
- Pindyck R. S. Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us? *Journal of Economic Literature*, 2013, vol. 51, N 3, pp. 860–872.
- Roshydromet. *Vtoroj ocenochnyj doklad Roshydrometa ob izmenenijah klimata I ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii* [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. Moscow, 2014. (In Russian)
- Stern N. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, 2007.
- Tol R. S. The Economic Effects of Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*, 2009, vol. 23, N 2, pp. 29–51.
- Tol R. S. Correction and Update: The Economic Effects of Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*, 2014, vol. 28, N 2, pp. 221–226.
- Tyndall J. On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours, and on the Physical Connection of Radiation, Absorption, and Conduction. *Philosophical Magazine*, 1861, N 22(146), pp. 169–194.
- Vymyatnina Yu. V. Znanija – dary Afiny ili jashhik Pandory? Nobelevskaja premija Pola Romera [Knowledge — Athena’s gifts or Pandora’s box? Paul Romer’s Nobel prize]. *Finansy i biznes [Finance and business]*, 2019, vol. 15, N 2, pp. 3–17. (In Russian)
- Wagner G., Weitzman M. L. *Climate Shock: The Economic Consequences of a Hotter Planet*. Princeton University Press, 2015.
- Zamulin O. A., Sonin K. I. Jekonomicheskij rost: Nobelevskaja premija 2018 goda i uroki dlja Rossii [Economic growth: Nobel prize in economic sciences 2018 and the lessons for Russia]. *Voprosy Ekonomiki [Economic Issues]*, 2019, N 1, pp. 11–36. (In Russian)