

## НОБЕЛОВА НАГРАДА ЗА ПОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТТА НА ИКОНОМИЧЕСКИТЕ НАУКИ ЗА 2018 Г.\*

Кралската шведска академия на науките реши наградата на Шведската национална банка за постижения в областта на икономическите науки в памет на Алфред Нобел да бъде присъдена споделено на Уилям Д. Нордхаус за приноса му към „интегриране на климатичните промени в дългосрочен макроикономически анализ“ и на Пол М. Ромър за приноса му към „интегриране на технологични иновации в дългосрочен макроикономически анализ“.

Уилям Д. Нордхаус<sup>1</sup> е роден на 31 май 1949 г. в Ню Мексико, Албакърки, САЩ. Защитава докторската си дисертация през 1967 г. в Масачузетския технологичен институт, САЩ. Член е на Националната академия на науките на САЩ, Шведската академия за инженерни науки, Американската академия за изкуства и науки. Има множество почетни титли и награди. В момента е Sterling професор по икономика в университета Йейл, Ню Хейвън, Кънектикът, САЩ.

Пол Ромър<sup>2</sup> е роден на 6 ноември 1955 г. в Денвър, Колорадо, САЩ. Защитава докторската си дисертация през 1983 г. в Университета на Чикаго. Член е на управителния съвет на фондация „Карнеги“ за напредъка на преподаването, борда на директорите на Community Solutions – национална организация с нестопанска цел, отдадена на укрепване на общностите и прекратяване на бездомността. Има множество почетни титли и награди. В момента е професор по икономика в Университета на Ню Йорк, Ню Йорк, САЩ.

### 1. Въведение

Тазгодишната награда е оценка за приносите при проектирането на модели и методи за решаване на някои от най-фундаменталните и неотложни въпроси на съвременността, включващи дългосрочното развитие на глобалната икономика и благосъстоянието на гражданите. Пол М. Ромър дава нови инструменти, свързани с определянето на дългосрочната технологична промяна в условията на пазарна икономика, а Уилям Д. Нордхаус въвежда рамка, която се отнася до разбирането на взаимната зависимост между икономиката и климата на нашата планета.

Концентрирайки се върху фундаменталната ендегенност на технологичните промени, Ромър стига до заключението, че икономиката може да разшири границите и възможностите на бъдещите си дейности. Изследвайки основните предизвикателства на изменението на климата, Нордхаус откроява съществени отрицателни странични ефекти – а по този начин и ограничения, на усилията за постигане на бъдещ просперитет. Както Ромър, така и Нордхаус подчертават, че пазарната икономика, макар и мощен двигател на човешкото развитие, има сериозни несъвършенства. Техният принос е в това, че показват

---

\* Оригиналният текст на английски език на официалната научна обосновка на наградата може да бъде намерен в MLA style: Advanced information. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2018. Tue. 6 Nov 2018, <<https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/2018/advanced-information/>>.

<sup>1</sup> <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage.htm>

<sup>2</sup> <http://www.stern.nyu.edu/faculty/bio/paul-romer>

как политиката на правителствата би могла потенциално да подобри дългосрочното благосъстояние на хората.

*Разширяване на областта на икономиката: знание и природа.* В основен план работата на двамата учени черпи от и се припокрива с други науки. Докато напредъкът на технологиите и инженерството (в общи линии, техническите познания) обикновено се приемат за даденост от икономистите, според Ромър границите на знанието имат и централни икономически детерминанти. От своя страна Нордхаус смята, че глобалният климат (в широк смисъл природата) е не само важна детерминанта на човешката дейност, а засяга и обществото и се влияе от неговата икономическа дейност. По този начин двамата лауреати въвличат знанието и природата в сферата на икономическия анализ и ги превръщат в неразделна част от него.

*Дългосрочни проблеми.* Приносите на Ромър и Нордхаус са в областта на *дългосрочната макроикономика*. В учебниците макроикономическият анализ обикновено обхваща различни времеви периоди. Най-популярна е краткосрочната перспектива – проучване на бизнес цикли (възходи и спадове на производството) например в 10-годишен хоризонт. При този подход е лесно да се забрави дългосрочната перспектива – изследване на икономическия растеж (развитието на производството и по-общо на благоденствието на хората) в продължение на десетилетия или дори на столетия. Даже такива разлики в темповете на растеж, които могат да изглеждат малки в краткосрочна перспектива, обаче се натрупват и ако се проявяват систематично в продължение на десетилетия, предизвикват значителни промени в жизнения стандарт. Така дългосрочните макроикономически показатели са основен двигател на благосъстоянието на сегашните и на бъдещите поколения.

*Пазарни неуспехи.* Всеки от резултатите на Ромър и Нордхаус относно възможностите за и ограниченията върху бъдещото дългосрочно благосъстояние насочват вниманието към конкретен пазарен неуспех. И двамата учени определят основните *външни фактори*, които при липса на добра държавна намеса ще доведат до неоптимални резултати. В работата на Ромър тези външни фактори са предимно положителни – те се отнасят до преливането на знания. Нови идеи могат да бъдат използвани от други хора за създаване на нови стоки и на други идеи.<sup>3</sup> При Нордхаус те са преобладаващо отрицателни – свързани са с емисиите на парникови газове, които променят неблагоприятно климата. И в двата случая обаче външните фактори не се отчитат правилно от отделния новатор или от замърсителя, липсват интервенции с политики като субсидии/подкрепа за създаване на знания или данъци/квоти за емисии. В качествено отношение това заключение се връща към Pigou (1920), но за да се изработи „правилната доза от правилното лекарство“, са необходими модели от вида, който въвеждат Ромър и Нордхаус.

<sup>3</sup> Това, че преливането е положително, не означава, че всички нови идеи и продукти в действителност са полезни за човечеството. Читателят вероятно познава примери за идеи, намаляващи благосъстоянието.

*Глобални проблеми.* И в двата случая външните фактори и произтичащите от тях интервенции с политики са от *глобален* характер и имат дългосрочен обхват. Откъдето и да произхожда, една допълнителна идея (проект) за нова технология може по принцип да се използва някъде другаде за създаване на нови стоки и други идеи, сега или в бъдеще. По същия начин независимо от произхода ѝ допълнителна единица емисии на въглероден диоксид бързо се разпространява в цялата атмосфера и приблизително половината от нея остава там стотици години (а значителна част и много по-дълго), допринасяйки за глобалното затопляне. В този смисъл наградените приноси се отнасят до дългосрочен, глобален и устойчив растеж.

*Общ трамплин.* Приносите на Ромър и Нордхаус имат обща отправна точка в теорията за неокласическия растеж, за която Робърт Солоу получава Нобеловата награда за икономика през 1987 г. Всеки от двамата учени разширява тази рамка в значима и ползотворна посока – Ромър представя набор от двигатели за създаване на знания, способстващ за разбиране на определящите фактори за дългосрочния растеж на БВП, а Нордхаус включва набор от механизми на природните науки, за да може да установи как си взаимодействат глобалната икономика и глобалният климат.

Ромър и Нордхаус подчертават силните страни на оригиналната рамка на Солоу, а именно нейната приложимост към редица важни въпроси. В същото време обаче техните изследвания коригират два важни недостатъка на тази рамка.

*Ендогенизиране на технологичните промени.* В своя подход към разбирането на икономическия растеж в продължение на десетилетия и столетия Солоу възприема екзогенен устойчив път за технологиите – основният източник на икономически растеж и благополучие, и в този смисъл не разглежда самата същина на дългосрочния растеж. За разлика от него Ромър се съсредоточава върху основния въпрос как пазарните икономики могат да развият нови технологии чрез ориентирани към печалба усилия за научноизследователска и развойна дейност (НИРД).<sup>4</sup> Така той поставя основите на *теорията за ендогенния растеж*, която твърди, че „идеите” са от решаващо значение за икономическия растеж, и разяснява предпоставките за създаването на идеи.

Според Ромър новите идеи се различават много от повечето икономически стоки по това, че те *не са съперници* – използването на една идея от даден човек не отхвърля възможността да я използват и други. Авторът обаче разглежда и друг аспект на този въпрос – до каква степен идеите могат да се *изключват*. Дори дадена идея да може да се използва от две фирми по едно и също време, е възможно една от тях да бъде изключена (било чрез регулиране/патентен закон, или чрез техническа защита, например чрез криптиране). Ромър смята, че възможността идеите да бъдат изключвани е от реша-

<sup>4</sup> Ромър разработва и формализира идеята, представена от Douglass North, носител на Нобеловата награда за икономика за 1993 г. (North, 1981), че пазарната НИРД е от решаващо значение за технологичния трамплин на развитите икономики в модерната ера на растеж.

ващо значение за онези от тях, които се произвеждат на пазара, но не всички идеи го позволяват. Той посочва като пример някои форми на фундаментални изследвания, които не попадат в тази категория и следователно могат да бъдат възпроизведени най-добре в университетите.<sup>5</sup>

Ромър твърди също, че създаването на идеи обикновено води до увеличаване на възвръщаемостта от мащаба, с големи първоначални разходи за проекта и ниски, вероятно постоянни пределни разходи за по-късно възпроизвеждане. Той подчертава, че идеите и пазарната мощ вървят ръка за ръка – пазарната мощ е типичният начин, по който могат да се гарантират по-високи от пределните цени на разходите, което позволява на фирмите да възстановят фиксираните разходи за плановете. В този смисъл монополните печалби са двигателят на пазарната НИРД. Фундаменталната липса на съперничество на една продуктивна идея обаче може да се разглежда като (потенциално) положително преливане – положителен *външен фактор*. Тъй като пазарното решение включва както степен на монополна мощ, така и външно присъствие, то обикновено води до неефективен резултат. В обобщение, нерегулираните пазари ще доведат до технологични промени, но няма да го направят ефективно. Това показва потенциално важната роля на икономическата политика не само в рамките на всяка страна, но и по света.

*Ендогенизиране на изменението на климата.* Оригиналната рамка на Солоу не разглежда и никакви ограничения или пречки за растежа по пътя на непрекъснатото икономическо развитие. Нордхаус има дългогодишен интерес към тези проблеми, например към ограничеността на природните ресурси.<sup>6</sup> Неговият най-сериозен принос обаче е свързан с препятствията, дължащи се на изменението на климата, като авторът до голяма степен използва постижения от различни области на природните науки. Нордхаус разширява модела на Солоу с три важни механизма: (1) как концентрацията на въглерод в атмосферата зависи от икономическата активност чрез въглеродните емисии; (2) как глобалната температура зависи от концентрациите на въглерод в атмосферата чрез повишена радиация; (3) как икономическата активност и благосъстоянието на хората зависят от глобалната температура чрез вреди от много различни видове и с различна сила.

Така по интердисциплинарен начин Нордхаус разработва *интегрирани модели за оценка* – ИМО (Integrated Assessment Models – IAM), чието първо поколение е динамично интегриран модел на климата и икономиката (Dynamic Integrated Climate Economy – DICE). ИМО позволяват да се оценяват различните пътища на икономически растеж и тяхното отражение върху климата и в крайна сметка – върху благосъстоянието на бъдещите поколения. При тези динамични модели емисиите отразяват изгарянето на изкопаеми горива за нуждите на

<sup>5</sup> Дали университетите се финансират публично, или частно не е от основно значение за този довод. Aghion, Dewatripont и Stein (2008) обсъждат относителните предимства и недостатъци на научните изследвания в частния сектор.

<sup>6</sup> Вж. например Nordhaus, 1974.

икономиката и формират бъдещото благосъстояние чрез логическата верига въглеродни емисии → по-високи атмосферни въглеродни концентрации → глобално затопляне → икономически вреди. Също както при НИРД и при създаването на знания, пазарната икономика генерира неефективни бъдещи резултати на световно равнище. Тази идея е остро изразена в *The Stern Review* (2007): „Промените в климата са резултат от най-големия пазарен провал, който светът е виждал.”

За ограничаването на пазарните неуспехи много ценни биха могли да бъдат правителствените намеси чрез политики като въглеродни данъци или квоти за емисии с глобален обхват. Създадените от Нордхаус и от някои негови последователи ИМО позволяват цифрово да се сравняват различни пътища за бъдещ растеж и благополучие и различни начини на водене на политики.

*Необходимост от по-нататъшни изследвания.* Въпреки че не дават окончателни отговори, проучванията на Ромър и Нордхаус са критични стъпки напред и техните методологически пробиви проправят пътя за много по-нататъшни разработки (от тях самите и от други изследователи) на глобални, дългосрочни проблеми. Анализите на двамата учени разкриват редица ключови области, в които съществуващото знание е особено слабо. Изградените от Ромър и Нордхаус рамки осигуряват структура, насочваща бъдещите изследвания, които могат да запълнят тези пропуски в знанията. Последващите проучвания на технологичните промени и връзката между климата и икономиката са до голяма степен продължаващи усилия, които вече са довели до важни констатации, но остава още много.

*Изменение на климата и растеж.* Методите на Нордхаус представят принципите за анализ на растежа и изменението на климата от гледна точка на разходите и ползите. Анализът му обаче показва и важността на измерването на вредите от изменението на климата и на несигурността, свързана с тях. Изследванията, насочени към намиране на решение на задачите за измерване на вредите, са все още в начален стадий. Една от първите задачи, колкото обезсърчаваща, толкова и необходима, е да се „картографират вредите върху климата“. Тя произтича от хетерогенността и несигурността относно това как и по какви канали изменението на климата засяга различните региони по света.

Свързана с това е задачата, засягаща „приспособяването“, т.е. как ще се адаптират хората и техните общества (например чрез миграция) към различен климат. Технологичната промяна е друг важен адаптивен канал – според Ромър такава промяна е израз на целенасочена икономическа дейност. Следователно моделите, изградени върху основните му принципи, могат да помогнат да се постигне по-голяма яснота относно стимулите за разработване на технологии за улесняване на адаптацията и за това как политиката може да допринесе за пренасочване на технологичната промяна.

Нордхаус анализира и други проблеми. Предвид голямата несигурност относно състоянието на климата в бъдеще, изборът на подходящи политики изисква (определено или абсолютно) заемане на позиция по отношение на риска

и неизвестността, както и относно дисконтирането. Тъй като последиците от въглеродните емисии са много по-дългосрочни от продължителността на човешкия живот, от критично значение е да се оцени благосъстоянието на бъдещите поколения. И в двата случая е необходимо да са налице морални ценности, които да допълнят научните измервания. Това, което моделите могат да направят, е да преобразуват различните преценки за стойност в различни начини на водене политика.

*Технологични промени и растеж.* По-ранните трудове на Ромър имат огромно въздействие върху научните изследвания за икономическия растеж, посочвайки недостатъците на рамките, съществуващи в края на 80-те години на миналия век. Работата му поставя началото на голям брой теоретични и емпирични изследвания, целящи да разберат наблюдаваните проучвания на растежа.

Докато ключовият пробив на Ромър (Romer, 1990) разглежда иновациите, които разширяват разнообразието от стоки, други изследователи (например Aghion and Howitt, 1992; Grossman and Helpman, 1991a) анализират постепенното подобряване на фиксиран набор от стоки. Този алтернативен подход на *съзидателно разрушаване* сам по себе си е много важен и изяснява как една новаторска фирма може да замести съществуваща, като произведе дадена стока на по-ниска цена. Друга значима теория, изградена пряко въз основа на идеите на Ромър, се отнася до *насочената техническа промяна*, при която средствата, изразходвани за различни видове НИРД, отразяват пазарните сили. Проучване на Acemoglu (1998) показва колко много работници, завършили колежи в САЩ, са започнали изследвания в областта на технологиите заедно с висококвалифицираните работници. Това помага да се разбере нарастващото неравенство в заплащането в някои икономики.

Различията в темповете на растеж между отделните страни и времеви периоди са основна мотивация за изследванията на Ромър в тази сфера. Тъй като в наличните данни по темата липсва прогнозирането на централната конвергенция в основната рамка на Солоу, работата на Ромър става отправна точка на все повече разработки, изследващи тези данни по-внимателно с цел да се отличат различни теории за дългосрочен растеж. В тази емпирична литература се наблюдават няколко вълни, базирани на различни методи, вкл. „регресии на растежа” с насока към конвергенцията, структурни оценки на базата на „счетоводното отчитане на развитието” и подходи, основаващи се на „естествени експерименти”, за да се идентифицират причинните фактори за относителния растеж.

Първоначалното намерение на Ромър е да представи относителните (дългосрочни) темпове на растеж на отделните държави като ендеогенни за собствените си институции и избор на политики. Последващи емпирични изследвания подчертават ендеогенните относителни *нива* в профила на националните приходи. Тези емпирични изследвания до голяма степен продължават и до днес и се фокусират върху относителната технологична адаптация и иновации, подобренията в човешкия капитал, натрупването на физически капитал и институционалните условия като цяло. Точно както краткосрочните колебания

могат да бъдат стимулирани от различни събития в различни моменти във времето, така и дългосрочното ниво или разликите в растежа могат да имат различни обяснения в различен контекст. Ребусът на международния растеж може би никога няма да бъде напълно решен, но е много по-добре разбран днес, отколкото в началото на 90-те години на миналия век.

*Организиране на прегледа.* Тъй като и двамата лауреати започват от неокласическия модел на растеж, най-напред (в част 2) накратко са представени оригиналните му компоненти заедно с теорията на спестяванията, която доминира в съвременната макроикономика. На този общ фон в част 3 е разгледан основният принос на Ромър за ендогенизиране на създаването на идеи за нови технологии, а в част 4 – основният принос на Нордхаус за комбиниране на растежа и механизмите на естествените науки в модели за интегрирана оценка. Петата част съдържа заключение.

## 2. Неокласическият модел на растежа на Солоу

Макроикономическата среда има четири основни компонента: (1) ограничения на ресурсите, отразени в системата от национални сметки, при която продукцията (БВП) се разпределя за различните ѝ компоненти, по-специално за потребление и инвестиции; (2) производствена функция, описваща как се произвежда БВП от неговите основни детерминанти – капитал и труд; (3) уравнение, описващо натрупването на капитал; (4) уточняване на дела от БВП, който се използва за инвестиции и следователно за натрупване на капитал. Тук най-напред вниманието е насочено към тези четири елемента, а след това е представен моделът на Ромър и Нордхаус, който включва и модел на спестяване и надхвърля използвания от Солоу.

### 2.1. Модел на растежа

Моделът на Солоу (Solow, 1956; Swan, 1956) остава близо до националния доход и продуктите сметки, като първо определя ограничението на ресурсите. Той допуска, че икономиката има само една стока и следи производството и използването на тази стока във времето. Моделът е разработен в редица направления (позволяващи различни стоки, видове капитал и т.н.) и основните му изводи са, в общи линии, устойчиви на тези разширения. Тук фокусът е върху основната версия – отчасти, за да се опрости представянето, отчасти, за да се следват Ромър и Нордхаус, които са използвали това условие.

*Ограничение на ресурсите.* Ограничението на ресурсите през година  $t$  е

$$c_t + i_t = y_t,$$

където  $c$  е потреблението;  $i$  – инвестицията;  $y$  – резултатът.

Това ограничение изразява как БВП се изразходва за тези два компонента. Тук ще се приема като счетоводно уравнение за единична разпространена в икономиката стока, която може да се използва или за потребление, или за инвестиции. Националните сметки съдържат и други компоненти – държавни разходи и нетен износ. Държавните разходи се смятат за включени в  $c$  и  $i$ , а

нетният износ е приложим, ако се разглежда една от многото икономики в международен контекст. Вместо това Солоу разглежда „затворена“ икономика, т.е. такава, която не взаимодейства с външния свят. Подобно схващане може да изглежда напълно неподходящо при моделирането на отделни страни днес, като се има предвид съществуващият размер на интертемпоралната и интратемпоралната търговия. Но това е естествена първа стъпка в работата на Нордхаус, тъй като сферата на неговото изследване е светът като цяло. Работата на Ромър също може да се разглежда като особено важна за глобалния анализ.

*Производствената функция.* Допуска се, че производството на единична стока ще се осъществи в съответствие с *агрегатната производствена функция*  $F$  на вложен капитал и труд:

$$y_t = F(k_t, l_t, t).$$

Тук  $k$  е капиталът,  $l$  – вложеният труд, а третият аргумент във функцията е времето, което представя промените в производствените възможности (особено подобренията, дължащи се на технологични промени) с течение на времето. Производствената функция е строго увеличаваща се в капитал  $F_k > 0$  и труд  $F_l > 0$  и има намаляващи пределни части на всеки фактор:  $F_{kk} < 0$  и  $F_{ll} < 0$ . Освен това  $F$  има постоянна възвръщаемост от мащаба в  $k$  и  $l$ , т.е. ако  $k$  и  $l$  се умножават по едно и също число  $\lambda$ , резултатът нараства с точно  $\lambda$ . Накрая Солоу допуска, че възможностите за производство се подобряват чрез техническа промяна с *увеличаващ се труд*:  $F(k_t, l_t, t) = F(k_t, (1 + \gamma)^t l_t)$ , където  $\gamma > 0$  е екзогенен темп на техническия прогрес.

*Натрупване на капитал и постоянни спестявания.* Уравнението за натрупване на капитал е ясно:

$$k_{t+1} = (1 - \delta)k_t + i_t,$$

където  $k$  е капиталовият запас, а  $\delta$  – годишната норма на физическа амортизация на този запас.

И накрая, необходимо е допускане за това как се определя темпът на инвестиции или спестяване. Моделът на Солоу допуска, че  $i_t = s y_t$ , където  $s$  е (екзогенен и постоянен) темп на спестяване, и приема, че темпът на нарастване на населението е постоянен. При тези допускания Солоу показва, че се постига *балансиран растеж* асимптотично, т.е. темповете на растеж на  $c$ ,  $y$  и  $k$  се приближават до обща стойност.<sup>7</sup> При постоянно население общият темп на растеж е  $\gamma$ . С други думи, ако запасите от технология с увеличаващ се труд растат екзогенно с темп  $\gamma$ , така ще растат и макроикономическите променливи в дългосрочен план.<sup>8</sup>

<sup>7</sup> За този резултат  $F_k$  трябва да бъде достатъчно висока за ниски стойности на  $k$  и достатъчно ниска за високи стойности на  $k$ .

<sup>8</sup> Предвид дългата американска история на забележителен, стабилен и балансиран растеж с около 2% годишно, това съвпада доста добре с данните за САЩ. Данните за света като цяло не са надеждни



## 2.2. Спестявания и решение на модела

Основният модел на спестяване в икономиката допуска, че потребителите спестяват по рационален начин с поглед към бъдещето. Голяма част от съвременния макроикономически анализ използва този подход, но съществуват и други методи за обобщаване на поведението на потребителите.<sup>9</sup> Единият се отнася до степента на потребителска хетерогенност на населението, а другият – до предпочитанията във времето и до човешкото потомство. Ще използваме същото допускане като в моделите на Ромър и Нордхаус, което е и най-разпространено. Агрегираното потребление се разглежда като поведение на „представителен потребител“, действащ като династия, т.е. тя оценява благосъстоянието на потомството си по начин, съответстващ на този, по който потомството оценява собственото си благосъстояние. Могат да се обсъдят и алтернативни допускания, без това да предизвика фундаментални промени в анализа.

*Оптимални спестявания.* Литературата, посветена на плодотворната работа на Солоу, разглежда оптималния избор на спестяване от гледна точка на максимизиране на благосъстоянието на потребителите. Както беше посочено, обект на анализ е династия, т.е. родословно дърво, където  $c_t$  е общата сума, която тя (с нейните различни членове) консумира на дата  $t$ . Функцията е следната:

$$\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(c_t),$$

където  $u$  е нарастваща и строго вдлъбната функция.<sup>10</sup> Допуска се, че *дисконтовият фактор*  $\beta$  е по-малък от 1 и представлява постоянен темп, при който потоците на бъдеща полезност за самия човек и за потомството му са намалени на годишна база. В контекста на династията  $\beta < 1$  може да се тълкува като нетърпение, в смисъл, че дадено лице поставя по-голяма тежест върху текущата, отколкото върху бъдещата полезност, както и че представителите на сегашната генерация придават по-малка тежест на полезност върху бъдещите поколения (в собствената им династия), отколкото върху себе си.

Може да се покаже, че ако човек избере оптимално последователността на потребление, инвестиция, капитал и резултат, според ограничението на ресурсите и уравнението за натрупване на капитал, тогава темповете на растеж на  $s$ ,  $y$  и  $k$  се приближават до  $\gamma$ , а темпът на спестяване,  $s_t \equiv 1 - c_t/y_t$ ,

---

и не позволяват дълги времеви редове, но наличните данни, в общи линии, съответстват с тези на САЩ.

<sup>9</sup> За повече подробности вж. например Royal Swedish Academy of Sciences, 2004.

<sup>10</sup> Такава полезна функция  $u$ , например  $\frac{c^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}$  за  $\sigma > 0$  (случаят  $\sigma = 1$  може да се тълкува като логаритъм  $\ln c$ ), представя идеята, че потребителите стриктно предпочитат по-голямо, отколкото по-малко потребление. Допуска се също, че те се наслаждават на всяко допълнително потребление все по-малко – пределната полезност  $u_c$  намалява.

който в този случай е ендогенен и зависим от времето, клони към константа. С други думи, допускането на Солоу, че темпът на спестявания е постоянен, е резултат от максимизирането на полезността. Оптимизационната версия на модела на Солоу често се разглежда като проблем на оптималните спестявания.<sup>11</sup>

*Решаване на модела с оптимални спестявания.* По-съвременната литература признава, че резултатите от оптималния растеж (пътищата за променливите на макроикономиката) се получават чрез модел без влияния на външни фактори или други причини за възможен провал на ценовия механизъм. Така може ясно да се представи пазарна версия на модела на растеж с ендогенно спестяване – динамично конкурентно равновесие, което дава точно същите пътища за макроикономическите променливи като тези, избрани от „благо-склонно социално планиране“. В такъв модел например потребителят ще работи за фирма, ще получава доход от заплатата, а след това оптимално – от гледна точка на династията си, ще раздели този доход на потребление и спестяване на пазар за заеми и кредитиране, където лихвеният процент е извън неговия контрол. Търсенето на капитал и труд идва от фирми, които купуват суровини на свършено конкурентни пазари на материали и които биха продали продукцията си също при свършена конкуренция. След това могат да се определят цени, т.е. заплатата и лихвен процент, за всеки период, така че пазарите (съответно за крайна продукция, труд и капитал) да са ясни.<sup>12</sup>

По-нататък в макроикономическия анализ често се допуска, че производствената функция приема специфична форма:  $F(k_t, A_t l = k_t^\alpha (A_t l)^{1-\alpha}$ , където  $\alpha \in (0,1)$ , а  $A_t$  – съкращение за текущото ниво на производителност с увеличен труд, т.е.  $A_t = (1 + \gamma)^t$  в момент  $t$ . Тази т.нар. производствена функция на Cobb-Douglas е не само математически удобен начин за вграждане на посочените допускания. Освен това тя притежава свойство, приблизително удовлетворено от историческите данни за САЩ (и за много други страни), а именно, че маргинализираният продукт на труда, умножен по общата му сума (общите реални доходи от труда, ако заплатата е равна на неговия маргинален продукт, както е при свършената конкуренция), е постоянна фракция в знаменателя  $1 - \alpha$  от продукцията независимо от специфичните стойности на капитала и труда.

Нека приемем производствената функция на Cobb-Douglas и функция на полезност  $u(c_t) = \frac{c_t^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma}$ , която има постоянна еластичност на интертемпорал-

<sup>11</sup> Относно оптималните спестявания вж. Ramsey (1928), който първи проучва динамичния оптимизационен проблем за спестяванията, както и статиите на Cass (1965) и Koopmans (1965), които за първи път прилагат този принцип за неокласическия модел на растеж. (Koopmans получава Нобеловата награда за икономика за 1975 г.).

<sup>12</sup> Допуска се, че предлагането на труд е екзогенно фиксирано на  $l$ , т.е. постоянна работна сила с постоянен темп на използване. Ясно е, че се ендогенизира предлагането на работна ръка.

ната замяна, дадена чрез  $\frac{1}{\sigma}$ .<sup>13</sup> Тогава можем да обобщим прогнозите на модела на Солоу с ендогенно спестяване като решение на следния проблем:

$$(1) \max_{\{c_t, k_{t+1}\}_{t=0}^{\infty}} \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{c_t^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma},$$

подлежащи на

$$c_t + k_{t+1} - (1-\delta)k_t = k_t^\alpha \left( (1+\gamma)l \right)^{1-\alpha} \quad \forall t = 0, 1, \dots$$

Ромър и Нордхаус разширяват тази рамка по фундаментален начин. Понататък ще разгледаме техните приноси.

### 3. Ендогенна техническа промяна

Предназначението на модела на Солоу е да обхване три ключови аспекта на дългосрочен растеж – в САЩ и навсякъде другаде. Макар системните дългосрочни данни за макроикономическите агрегати по онова време да са оскъдни, съществуват някои „стилизирани“ факти, по-специално: (1) доста стабилен растеж на продукцията ( $y_{t+1}/y_t$ ); (2) стабилно съотношение между капитал и продукция ( $k_t/y_t$ ); (3) стабилно съотношение на потреблението (или инвестицията) към продукцията ( $c_t/y_t$ ).<sup>14</sup> Теорията на Солоу има свойството на *конвергенция*, т.е. при описаните допускания независимо от началния капитал свойствата (1)-(3) характеризират дългосрочния растеж на икономиката.

Така от гледна точка на теорията на Солоу не е съвпадение, че икономиката притежава тези характеристики. Освен това специфичните стойности за темпа на растеж и съотношенията, към които икономиката конвергира, са лесни за извличане като функция на параметрите на модела. По-специално темпът на растеж е просто равен на екзогенния параметър  $\gamma$ .

Моделът на Солоу обаче прогнозира, че *ceteris paribus* (при равни други условия) по-бедните страни трябва да растат по-бързо и да настигнат по-богатите. Това прогнозиране на абсолютна конвергенция между страните отразява бързо намаляващата възвръщаемост на капитала, когато параметър  $\alpha$  е достатъчно нисък, за да бъде съвместим със свойствата (1)-(3) (вж. представената по-нататък дискусия). Разбира се, моделът би могъл да има устойчиви разлики в темпа на растеж, ако темпът на технологичен прогрес  $\gamma$  се различава в отделните икономики. Тези различия обаче само могат да се допуснат, те няма да получат обяснение, тъй като технологичната промяна идва екзогенно.

*Емпирична отправна точка.* Работата на Ромър е мотивирана от данните за макроикономическите агрегати и от по-изчерпателен набор от данни за стра-

<sup>13</sup> Еластичността на интертемпоралното заместване се определя като  $\frac{u'(c)}{u''(c)c}$ . Това количество трябва да бъде постоянно, така че моделът да съответства на наблюдението, че няма дългосрочна тенденция към връщане към спестяване.

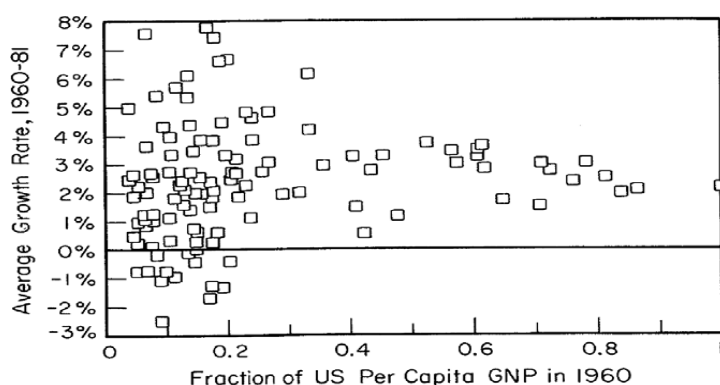
<sup>14</sup> Те са част от „стилизираните факти за растежа“ на Kaldor (вж. Kaldor, 1957).

Нобелова награда за постижения в областта на икономическите науки за 2018 г.

ните, който в този момент е станал достъпен (Summers and Heston, 1984). Той установява и подчертава, че тези данни показват много постоянни различия между отделните държави – не само в продукцията им на човек от населението, но и в темповете им на растеж. Освен това няма доказателства, че броят на победните страни се е увеличил по-бързо, отколкото на по-богатите.

Фигура 1

Ръст на БВП на човек от населението като функция от първоначалния БВП на човек от населението



Тези свойства са ясно видими на фиг. 1 (Romer, 1987b), на която са представени данни за доходните (производствените) нива от 1960 г. (отнесени към САЩ) и последващите средни темпове на растеж за 115 държави през периода 1960-1981 г.<sup>15</sup> Така прогнозата от модела на Солоу за абсолютна конвергенция е нарушена в по-широк диапазон от страни. По-дългите периоди, през които са налице постоянно различаващи се темпове на растеж на производството, предполагат масови промени в относителния просперитет в световната икономика – очевидно най-съществения въпрос в икономиката и в по-широк план в съвременния свят. Ромър си поставя за цел разработването на нова теория, която е адресирана към дълги периоди на различен растеж в различни страни.

*Ендогенна технология.* Подходът на Ромър е да мисли за детерминантите на  $y$  в описаната рамка. Как може технологичният растеж да отразява съзнателните решения за натрупване на знания от пазарни агенти? Ще бъде ли постоянен с течение на времето, или ще варира? Как реагира на стимули и икономическа политика и трябва ли политиката да се опита да му повлияе? Тази линия на атакуване на проблема създава огромни трудности. Може да се формулира проблем на социално планиране, където нивото на технологията  $A$  е избрано съвместно с други ресурс.<sup>16</sup> Такава рамка обаче е трудно да се

<sup>15</sup> Моделът на фиг.1 е налице и ако периодът е разширен до днес.

<sup>16</sup> Такъв подход е изследван в литературата (вж. Shell, 1967).

изучи в пазарния контекст, поне при типичното допускане за съвършена конкуренция. Ако се избере и  $A$ , производствената функция има увеличаваща се възвръщаемост от мащаба, а такава функция не е съвместима със съвършената конкуренция.

Анализът на Ромър за технологичното производство и условията то да се случва на пазара се основава на по-абстрактно мислене за създаване на знания. Той твърди, че „идеите“, макар и произведени с вложения капитал и труд, се различават от обикновените стоки и услуги в две измерения: степента, до която те *си съперничат* – независимо дали могат да бъдат използвани от повече от един участник наведнъж, и дали могат да се *изключват* – доколко лесно може да се предотврати използването им от други. Ромър подчертава, че идеите не си съперничат и в различна степен могат да се изключват. Ще се върнем към този въпрос по-нататък, тъй като той е от концептуално значение.

Ромър смята също, че идеите вървят ръка за ръка с увеличаването на възвръщаемостта от мащаба. Те са свързани с първоначално високи разходи, например значителна работа за изготвяне на чертеж (първо копие) на нов продукт, но с по-типична структура на разходите и (приблизително) постоянна възвръщаемост от мащаба за производство на допълнителни копия. Следователно общата производствена функция е изпъкнала с намаляващи пределни разходи, поради което трябва да се разглежда като отклонение от съвършената конкуренция. Ключова предпоставка за наличието на монополна сила е идеята или нейното използване да бъдат достатъчно изключващи, така че дадена фирма да може да е единственият ѝ доставчик. Най-известната статия на Ромър (Romer, 1990) достига до тези изводи в среда, която съдържа ключовите елементи, вкл. монополистична конкуренция и увеличаваща се възвръщаемост от мащаба, и е изградена пряко върху модела на Солоу.

*Устойчив дългосрочен растеж.* Формулировката на Ромър от 1990 г., както и останалите му статии подчертават ендегенността на дългосрочния темп на растеж. За да стигне до технологично-производствен модел с това свойство, Ромър не само включва фундаменталните характеристики на представените идеи. Той установява също, че възвръщаемостта към натрупаните фактори като капитал трябва да остане строго положителна, за да може моделът да доведе до устойчив растеж. За да бъде равновесният темп на растеж постоянен в дългосрочен план, когато растежът произтича от ендегенното натрупване на производствен фактор, технологията на натрупване трябва да бъде линейна. Това намира лесно обяснение в модела на Солоу, където растежът се развива с намаляваща възвръщаемост от мащаба  $\alpha < 1$ , но продължава с постоянен темп  $\alpha = 1$ .

Този технически въпрос, помогнал на други изследователи да създадат различни модели за ендегенен растеж, е ясно разработен в първата публикация на Ромър за растежа (Romer, 1986). Ако обаче единствената промяна в модела е да се направи производствената функция линейна по отношение на капитала (например просто чрез задаване на  $\alpha = 1$  в модела на Солоу), това омало-

важава неакумулиращите фактори като труда. В статията си от 1986 г. Ромър коригира този недостатък, като въвежда ефект на преливане на капиталобразуването. В резултат растежът се превръща в страничен продукт от редовното натрупване на капитал, но без изрични решения за изразходване на средства за НИРД. Това е коментирано накратко в част 3.3, а тук е наблегнато върху трудовете, които възприемат по-фундаменталния подход за моделиране на производството на нови идеи.

Първоначално Ромър (Romer, 1987a) очертава рамката за разработване на нов продукт, където растежът се генерира като страничен продукт от натрупването на капитал, но непрекъснато нарастващото разнообразие от междинни стоки не разрешава спадането на възвръщаемостта на капитала до нула. През 1990 г. в разработката си, смятана за вододел в неговата работа (Romer, 1990), той показва как рамка, близка до тази от 1987 г., може да бъде използвана за моделиране на решения за НИРД в децентрализирана пазарна икономика.

### 3.1. Нови продукти и възвръщаемост на капитала

Нека първо се опитаме да изясним защо Солоу прави допусканията, че растежът в крайна сметка произтича от технологичния напредък и че  $\gamma > 0$ . За да разберем защо натрупването на капитал не може да доведе само по себе си до устойчив растеж на производството, ще разгледаме пределния продукт на единица капитал  $F_k$ . Въпреки че аргументът е по-общ, за илюстрация е удобно да се използва производствената функция на Cobb-Douglas. По този начин получаваме  $F_k(k_t, (1 + \gamma)^t l) = \alpha k^{\alpha-1} ((1 + \gamma)^t l)^{1-\alpha}$ . Ако при увеличаване на запаса от капитал  $\gamma = 0$ ,  $F_k$  непременно намалява към нула, това прави устойчивия растеж невъзможен без технически промени – дори при темп на спестявания единица дългосрочното производство на икономиката не може да надхвърли ограничената стойност  $\frac{-\alpha}{\delta^{1-\alpha} l}$  ако  $\gamma = 0$ .<sup>17</sup> Растежът спира поради намаляващия пределен продукт на капитала, който е крайъгълен камък на неокласическата теория на Солоу. По-нататъшното натрупване на капитал дава все по-малко и в крайна сметка амортизацията на капитала надвишава прибавянето му към производството. Обратно, когато размерът на труда в „единици на ефективност“ се увеличава, както е при  $\gamma > 0$ , възвръщаемостта на натрупването на капитал не би могла да достигне нула.

*Любов към разнообразие.* Идеята на Ромър е да открие как може да се предотврати възвръщаемостта на капитала да достигне нула, когато капиталът расте без граници. В статията си от 1987 г. той представя алтернативен на този на Солоу модел, където „любовта към разнообразие“ и специализацията позволяват на капитала да получи стабилна положителна възвръщаемост. Вместо

<sup>17</sup> Трябва да се има предвид, че при спестявания единица се получава  $k_{t+1} = (1 - \delta)k_t + k_t^\alpha l^{1-\alpha}$ . Лесно е да се очертае тази функция и да се види, че с  $\alpha, \delta \in (0, 1)$  тя се приближава монотонно до посочената стойност.

да има хомогенен капиталов запас като ресурс, производството идва от (труд и) *интервал* на междинните капиталови стоки, индексирани от  $i$ :  $x(i)$  е количеството на стока  $i$ , а  $A$  – ендогенно определената дължина на този интервал, която започва от 0. Така общият резултат е:

$$(2) \quad y = \left( \int_0^A x(i)^\alpha di \right) l^{1-\alpha}, \text{ където } \alpha \in (0,1).$$

Освен това се допуска, че дължината на интервала на разнообразие ( $A$ ) и размерът на всяка специализирана капиталова стока се определят от съществуващото количество на стандартната (хомогенна) капиталова стока във всеки отделен момент. От гледна точка на хомогенния капитал разходите за производство на  $x$  единици от специализирана капиталова стока са изпъкнали и включват фиксирана цена – те са равни на  $(1 + x^2)/2$ . Максимизирането на  $\int_0^A x(i)^\alpha di$  над  $A$  и на  $x(i)$  при даден наличен капитал  $k$  предполага, че  $A = (2 - \alpha)k$  и  $x(i) = \sqrt{\frac{\alpha}{2 - \alpha}} \equiv \bar{x}$  за всички  $i \in [0, A]$  и  $x(i) = 0$  в противен случай.

Напълно интуитивно наличието на фиксираната цена прави оптимален избора на ограничен интервал от дължина, пропорционален на  $k$ . Поради изпъкналите разходи и намаляващите възвръщаемости на всеки  $x(i)$  е оптимално да се определи еднакво положително ниво на предлагане за всеки  $x(i)$  в употреба. Вмъкването на  $A = (2 - \alpha)k$  и  $x(i) = \bar{x}$  в (2) добива вида

$$y = (2 - \alpha)k \bar{x}^\alpha l^{1-\alpha},$$

където, както беше посочено,  $\alpha$ ,  $\bar{x}$  и  $l$  са екзогенни константи. Тоест след максимизиране над  $x(i)$  и  $A$  независимо от наличното ниво на капитал  $k$  продукцията е линейна в това ниво. Това означава, че с натрупването на капитал неговият пределен продукт не достига нула – той винаги ще бъде постоянен. С натрупване на повече капитал броят на специализираните капиталови разнообразия продължава да се увеличава, докато всяка единица се използва на същото ниво.

*Създаване на условия за устойчив растеж.* Идеята, че разрастването/специализацията на разнообразието може да доведе до запазване на пределния продукт на капитала въпреки увеличаването на капитала, позволява растежът да продължи.

Ако инвестицията е  $sy$ , както в оригиналния модел на Солоу, настоящата ситуация става

$$k_{t+1} = (1 - \delta)k_t + s(2 - \alpha) \bar{x}^\alpha l^{1-\alpha} k_t$$

Очевидно капиталът и производството винаги ще нарастват с положителен темп, стига да е изпълнено условието  $s(2 - \alpha) \bar{x}^\alpha l^{1-\alpha} > \delta$  (темът на

растеж на икономиката е разликата между тези два израза). Така темпът на растеж е *ендогенен* – той не зависи тривиално от първоначално допуснатите опростявания в модела, вкл. от темпа на спестявания.

Този опростен анализ показва как Ромър успява да създаде икономически механизъм, при който натрупването на капитал чрез превръщането му във увеличаващо се разнообразие от специализирани капиталови стоки, не води до ниска възвръщаемост. В същото време анализът не установява целенасочено развитие на технологиите. Изглежда обаче, че една малко по-различна версия на същия модел се е приспособила към тази интерпретация.

### 3.2. Производство на идеи

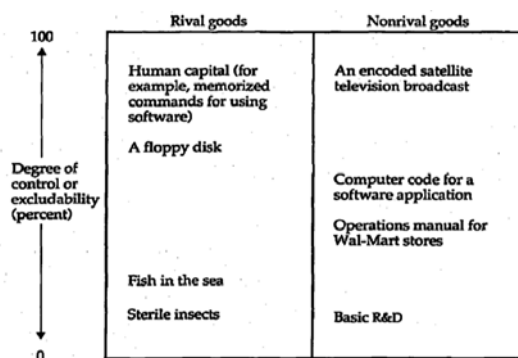
В статията си от 1990 г. Ромър предполага, че за модел на дългосрочен икономически растеж биха били желателни следните пет свойства .

1. Натрупването на идеи е източник на дългосрочен икономически растеж.
2. Идеите не си съперничат.
3. По-големият брой идеи улеснява намирането на нови идеи.
4. Идеите се създават със скъпа, но целенасочена дейност.
5. Идеите могат да бъдат притежавани и собственикът може да продава на пазарна цена правата за използването им.

Както беше посочено, Ромър подчертава второто и петото свойство – липса на съперничество (което предполага форма на положителен външен фактор) и възможност за частично изключване (което предполага монополно изкривяване, когато се прилага в пазарна икономика). В своя статия от 1993 г. той описва примери за продукти/услуги в тези две измерения с диаграмата, представена на фиг. 2.

Фигура 2

Стоки и услуги: дали си съперничат и/или могат да се изключват



Очевидно не всички идеи могат да бъдат изключвани в достатъчна степен, за да работи пазарно решение – оттук произтича и нуждата от различна форма



на производство на идеи (например в университети). Ромър не изследва напълно границите, заложи в тази диаграма, т.е. не формулира теория (или не тества хипотези емпирично) за това кои идеи ще бъдат предоставени от пазарите и кои не. Това остава интересна изследователска тема, тъй като има ценни идеи, които не се произвеждат нито на пазара, нито на друго място.

*Моделирание на идеи за нови разновидности.* Да се върнем към рамката на Ромър в част 3.1., но включвайки липсващите елементи. Нека идеята в модела да е нова разновидност  $i$ , която не може да бъде приложена, докато не бъде разработена. Тя е разработена в скъп процес, който сега използва като ресурс труд (за разлика от капитал в част 3.1.), т.е. тук трудът може да бъде използван по два начина. Както и преди, той може да се използва за производство на крайна продукция, но и за създаване на нови идеи – в този случай трудовите ресурси могат да се разглеждат като изследователски усилия. Нека допуснем, че цената за производството на дадена идея е  $1/(\varepsilon A_t)$  единица труд. Отбелязвайки броя на изследователите в момент  $t$  от  $l_t^R$ , броят на нови идеи (разширяването на разновидността) е представен чрез  $A_{t+1} - A_t = \varepsilon A_t l_t^R$ .

Фактът, че производителността на изследователите е пропорционална на запаса от съществуващи идеи  $A_t$ , улеснява включването на третото свойство в модела. Този начин на моделиране също удовлетворява линейността, необходима за генериране на постоянен темп на растеж в дългосрочен план.

В модифицираната рамка изследователска идея  $i$ , вкарана в употреба, е просто количество, произведено от  $x(i)$ , т.е. специализирана капиталова стока. Както преди,  $x(i)$  се произвежда от основна капиталова стока, но с по-проста линейна производствена структура – за производството на единица  $x(i)$  са необходими  $\eta$  единици основен капитал. С това допускане се получава следното ограничение на капиталовите ресурси:

$$\int_0^{A_t} \eta x_t(i) di = k_t.$$

Като се вземе предвид, че всяко  $x(i)$  има намаляваща възвръщаемост при крайното производство, оптимално е общият капитал да се разпредели поравно между специализираните стоки –  $x_i(i) = k_t/(\eta A_t)$  за всички  $i$ .

В тази ситуация всички идеи са еднакво добри от гледна точка на производството и техните единични производствени разходи също са идентични. От гледна точка на фиг. 2 Ромър се фокусира върху проста симетрична структура, която улавя идеи, принадлежащи към горния десен квадрант.

*Проблемът на плановика.* Вече могат да бъдат посочени всички ключови уравнения, определящи количествата в този модел. По-конкретно, доброжелателен социален плановик би решил следния проблем:

$$\max_{\{c_t, k_{t+1}, A_{t+1}, l_t^R\}_{t=0}^{\infty}} \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{c_t^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma},$$

предмет на  $c_t + k_{t+1} - (1 - \delta)k_t = A_t \left(\frac{k_t}{\eta A_t}\right)^\alpha (l - l_t^R)^{1-\alpha}$

и

$$A_{t+1} - A_t = \varepsilon A_t l_t^R \text{ за всички } t = 0, 1, \dots$$

Производствената функция може да бъде записана като пропорционална на  $k_t^\alpha (A_t l_t^F)^{1-\alpha}$ , където  $l^F \equiv l - l^R$  е количеството труд, използван в производство на крайни стоки.<sup>18</sup> Така темпът на растеж на  $A$ ,  $-\varepsilon l_t^R$ , е аналогичен на екзогенния темп  $\gamma$  в модела на Солоу, но тук  $l_t^R$  е ендеогенен – резултат от избор, който разменя използването на работниците в производството на крайна продукция с използването им в производство на изследвания/идеи.

*Пазарна НИРД.* За да се изясни как пазарите могат да предлагат НИРД, да разгледаме производителя на всяка специализирана капиталова стока  $i$ . Ромър допуска, че за да имат стойност идеите, те трябва да получат патентни права. Така производството на стока  $i$  изисква патент, който първоначално се купува от изобретателя. В най-простия случай, да предположим, че патентните права са вечни. Тогава в интерес на притежателя на патента е да бъде единственият производител, а на изобретателя – да продаде патента само на един производител. Оттук Ромър разглежда монополен производител на всяка стока  $i$ .

Тъй като има много конкурентни капиталови стоки и те са несвършени заместители в производството (свършени заместители има, когато  $\alpha = 1$ ), можем да разглеждаме рамка с монополна конкуренция, както в Dixit и Stiglitz (1977). За да се извлече функцията на търсене за всеки продукт  $i$ , срещу който монополистът ще максимизира печалбите, ще разгледаме производители на крайни стоки, за които се допуска, че работят в свършена конкуренция. Те максимизират печалбите си, което може да се изрази по следния начин:

$$\max_{(x_t(i)), l_t^F} \left( \int_0^{A_t} x_t^\alpha(i) di \right) (l_t^F)^{1-\alpha} - \omega_t l_t^F - \int_0^{A_t} q_t(i) x_t(i) di.$$

Тук  $w$  е заплатата, а  $q(i)$  – цената на специализирана капиталова стока  $i$ . Проблемът на фирмата е статичен и  $\omega_t$  и  $q(i)$  са даденост. Първите условия от този проблем са:

$$(3) \quad \omega_t = (1 - \alpha) (l_t^F)^{-\alpha} \int_0^{A_t} x_t^\alpha(i) di$$

$$(4) \quad q_t(i) = \alpha (l_t^F)^{1-\alpha} x_t^{\alpha-1}(i).$$

Уравнение (4) може да се интерпретира като обратна функция на търсене за стока  $i$ . Всички останали съответни цени се приемат за даденост, вкл. наемната тарифа  $\tau_t$ , заплатена за капитала, който се наема от потребителите. След това собственикът на патента  $i$  получава максимални печалби  $\pi_t(i) = \max_{k_t(i)} \{q_t(i) x_t(i) - \tau_t k_t(i)\}$ , или замествайки от (4) и  $x(i)\eta = k_t(i)$ ,

$$(5) \quad \pi_t(i) = \max_{k_t(i)} \left\{ \alpha (l_t^F)^{1-\alpha} \left( \frac{k_t(i)}{\eta} \right)^\alpha - \tau_t k_t(i) \right\}.$$

Първото условие за този проблем е

$$(6) \quad \alpha^2 (l_t^F)^{1-\alpha} \eta^{-\alpha} k_t(i)^{\alpha-1} = \tau_t.$$

<sup>18</sup> Константата на пропорционалност е  $\eta^{-\alpha}$ .

Да обърнем внимание, че  $\pi(i) > 0$  е допустим – фирмата притежава патент и получава наем от него, което прави патента ценен.

Патентът се изработва от НИРД фирми в съвършена конкуренция. Нека  $p_t^P$  показва цената на патента в момент  $t$ . Тогава производителите на идеи решават:

$$(7) \quad \max_{A_{t+1}, l_t^R} p_t^P (A_{t+1} - A_t) - \omega_t l_t^R$$

$$(8) \quad A_{t+1} - A_t = l_t^R \varepsilon A_t.$$

Тъй като Ромър допуска свободен достъп до индустрията за идеи, равновесната печалба от участието в НИРД трябва да бъде нула. Тази формула има имплицитен динамичен външен фактор, понякога обозначаван като „стоящ на раменете на великани“. Решението, включващо промяната  $A_{t+1} - A_t$ , повишава производството на нови идеи във всички бъдещи периоди  $t + j$ ,  $j \geq 1$  чрез  $\varepsilon A_{t+j}$  за всички  $j' \in \{1, \dots, j\}$  в уравнението за движение на  $A$ .

Подобен положителен ефект на приливане обаче не е от полза за фирмата, която избере да промени  $A$ . Динамичното преливане е втората причина, поради която плановете и децентрализираните проблеми ще имат различни решения.<sup>19</sup>

Условието за нулева печалба в индустрията за идеи изисква цената  $p_t^P$  да бъде определена от линейното условие

$$(9) \quad p_t^P \varepsilon A_t = \omega_t,$$

където  $\omega_t$  е същият като на пазара за крайни стоки – за работниците трябва да е безразлично в коя дейност да се включат (научни изследвания или производство на крайни стоки).<sup>20</sup>

Нека  $p_t^C$  обозначава относителната цена на потребителските (крайните) стоки при  $t$  (по отношение на потребителски стоки в момент 0). Тогава свободно влизане предполага, че

$$(10) \quad p_t^P p_t^C = \sum_{s=t+1}^{\infty} \pi_s(i) p_s^C.$$

В резултат от това уравнение не се генерират чисти печалби в равновесие. Въпреки това извънредните наеми, които производителите на междинни стоки ще получат от закупуването на правата върху изобретението, се определят от изобретателите на нови патенти.

*Затваряне на пазарния модел.* Проблемът на потребителите в такава икономика също има очевидно описание. Потребителите са крайните собственици на фирмите и за тях цените са даденост. Те получават приходи от печалбата на фирмите, които притежават патенти в момент 0, но не всички фирми, създадени

<sup>19</sup> Трябва да се отбележи, че предлагането на патентованите стоки е недостатъчно поради монополния елемент.

<sup>20</sup> Тук е разгледан един вид труд само за илюстрация. Би било по-реалистично да се разгледа хетерогенността на уменията на работниците, имайки предвид че не всички работници могат да бъдат изобретатели.

в момент 0 и по-късно, имат нетни приходи. Потребителите също натрупват капитал и го продават/отдават под наем на монополистичните фирми. Те получават и доходи от заплати както от производителите на крайни стоки, така и от фирмите за научноизследователска и развойна дейност. Равновесие може да бъде постигнато, когато се включат всички посочени вече условия.

Поучително е да комбинираме условията на равновесие с набор от уравнения и да ги сравним с уравненията, резултат от решаването на проблема с планирането. Подобно сравнение разкрива, че има твърде малко изследвания и натрупване по темата при пазарното равновесие в сравнение с ефективното разпределение, основано на планирането. Затова равновесният темп на растеж е твърде нисък, въпреки че наличието на патенти с безкрайна дължина стимулира извършването на изследвания на пазара. За отстраняването на този пазарен неуспех е необходима добре разработена държавна политика, вкл. субсидии за научни изследвания.

### 3.3. Моделът на Ромър за външния фактор на капитала

Както вече беше споменато, началният труд на Ромър от 1986 г. е първият, в който дългосрочният темп на растеж се определя нетривиално и в същото време равновесните резултати са в унисон с набор от исторически данни за растежа на американската икономика.

За да се види приносът в статията на Ромър (1986), трябва да се има предвид, че простата т. нар. версия  $A_k$  на модела на Солоу представя ендогенен дългосрочен темп на растеж. В тази версия производствената функция е линейна по отношение на капитала, без да се отчита ролята на ресурса „труд“. Линеиното производство  $y_t = Ak_t$  и натрупването на капитал  $k_{t+1} = (1 - \delta)k_t + sy_t$  дават (краткосрочен и) дългосрочен темп на растеж както за капитала, така и за производството, равен на  $sA - \delta$ , където  $A$  е константа, а  $s$  – темпът на спестяване. Така, ако  $sA > \delta$ , тази икономика има положителен и постоянен дългосрочен растеж без никаква технологична промяна. Причината е, че пределният продукт на капитала не намалява, а е постоянен при  $A$ . Модерните прогнози обаче се сблъскват с други исторически факти – не само че трудът е определящ при приблизително постоянен дял от разходите на фирмите, но този дял е значителен – около две трети.

Ромър (1986) формулира прост модел, който има характеристика  $A_k$ , както и ендогенен дългосрочен темп на растеж, но все пак в съответствие с ключовите исторически фактори за растежа. На индивидуално фирмено ниво той допуска, че  $y_t = k_t^\alpha (A_t l)^{1-\alpha}$ , където  $A_t$  е равен на  $\bar{k}_t$ , и използваният от една фирма капитал формира положителен принос към всички останали фирми. В равновесие имаме  $k_t = \bar{k}_t$  и  $y_t = \bar{k}_t l^{1-\alpha}$ . Тъй като продукцията е линейна по отношение на капитала, има стабилен растеж. В същото време агрегираното преливане е безплатно и всяка отделна фирма плаща само за капитала и труда, които наема. В резултат от това дяловете на капитала и труда на фирмено

ниво, както и съвкупните разходи съответстват на данните за  $\alpha = 1/3$  (респ. тези дялове са една трета и две трети).

Ключовият компонент в статията на Ромър (Romer, 1986) е модел  $A_k$  с положителен дял на труда, получен в децентрализирано равновесие с външни фактори.

#### 3.4. Последващи развития

Ранната работа на Ромър има дълбоко и трайно въздействие върху анализите на икономическия растеж като област в макроикономиката. Доказателство за това е, че докато до 90-те години на миналия век всички големи университетски учебници се фокусират изключително върху бизнес циклите, днес те акцентират много повече върху темата за растежа, а някои от тях дори започват с дългосрочна макроикономика. В тези учебници вече са възприети и утвърдени разбиранията на Ромър относно производствената идея и причините за технологичните промени.

В последващата изследователска литература се открояват две отделни направления, които ще бъдат представени накратко в тази и в следващата част. Много научни статии, основаващи се пряко върху работата на Ромър, разработват теориите за движещите сили, които стоят зад технологичните промени и растежа. Другото, не по-малко широко направление, включва емпиричните изследвания на растежа в контекста на различните страни. Тази емпирична литература се базира само косвено върху работата на Ромър, макар че очевидно е вдъхновена от нея.

*Алтернативни двигатели на ендогенния растеж.* Една от посоките на изследване е вдъхновена от дискусиите на Ромър относно намаляващата възвръщаемост на капитала като пречка за дългосрочен растеж при липсата на технологични промени. Rebelo (1991) например представя рамка, където капиталовите стоки – агрегатните инвестиции, се произвеждат по висококапиталоемък начин. Той приема, че трудът изобщо не се използва в сектора на капиталовите стоки и следователно производството на нови инвестиционни стоки се намира в линейна зависимост от използвания капиталов запас. Същевременно секторът на потребителските стоки има стандартна форма, в която делът на труда е две трети. Rebelo твърди, че такава икономика ще има дългосрочен растеж без технологични промени, защото капиталът като натрупващ се (акумулиращ се) фактор въздейства, без да се намалява възвръщаемостта. Неговото изследване може да се разглежда като продължение на работата на Ромър от 1986 г.

Някои изследователи вземат предвид и други натрупващи фактори в производството и твърдят, че ако тези фактори заедно могат да бъдат възпроизведени линейно, икономиката също показва непрекъснат растеж без технологични промени. Такъв подход прилага самостоятелно и едновременно с ранната работа на Ромър Робърт Е. Лукас, научен ръководител на неговата дисертация и нобелов лауреат по икономика за 1995 г. Той разработва теория за човешкия капитал като двигател на растежа заедно с натрупването на физически капитал (Lucas, 1988). Непрекъснатото и ендогенно изграждане на човешкия

капитал, което по същество увеличава приноса на труда в рамката на Солоу, възпрепятства намаляването на възвръщаемостта от капитала и така води до непрекъснато натрупване на физически капитал. Изследването на Lucas не се основава на работата на Ромър, но съдържа същата функция на ендогенен растеж.

Stokey и Rebelo (1995) представят проследима версия на двуфакторния модел на растеж, сходен с моделите на Rebelo (1991) и на Lucas (1988). В друга разработка по същата тема като отделен ресурс в производството е представена инфраструктурата. Тя се разглежда като стока, предоставена от правителството, до голяма степен заради нейната природа – обществена стока с естествен производител правителството. В този случай има постоянен растеж, ако общата възвръщаемост на инфраструктурата и на капитала е линейна (производствената функция е хомогенна от първа степен по отношение на векторите на тези два продукта).<sup>21</sup>

*Алтернативна среда за НИРД.* Друга линия в изследванията представя алтернативи на специфичния процес на НИРД, разработен от Ромър (1990). Най-влиятелен в това отношение е приносът на Aghion и Howitt (1992). Подобно на Segerström, Anant и Dinopoulos (1990), те допускат, че новите продукти заменят старите като перфектни заместители в употреба, но при по-ниски производствени разходи на единица продукт, и вграждат този механизъм в модел на растеж. Според тях възможността за замяна на стари стоки означава, че един новатор може да „открадне бизнес“ от съществуваща фирма и чрез конкуренция да я отстрани от пазара. Наричан също и „съзидателно разрушаване“, този процес напомня на разработения по-късно от Дж. Шумпетер (Schumpeter, 1942), и очевидно е важна част от движещите сили на технологичните промени. Aghion и Howitt (1992) показват, че наличието на т.нар. кражба на бизнес има много важно значение – тя води до отрицателно преливане на съществуващите фирми, поради което темповете на НИРД и на растеж могат да станат твърде високи. Голяма част от изследванията, свързани с ендогенния растеж със „съзидателно разрушаване“, следват Aghion и Howitt (1992) (за общ преглед вж. Aghion и Howitt, 1998).

Друга ключова стъпка в разширяването на теорията е направена от Grossman и Helpman (1991a), които обединяват възгледите за новата теория на растежа с тези за новата теория на търговията, за да анализират отношенията между търговията, иновациите и растежа. Grossman и Helpman (1991b) представят широко проучване на растежа и иновациите в реалистична среда, в която страните са част от глобалната икономика.

Използвайки идеята за „съзидателното разрушаване“, моделите на растеж залягат в основата на множество прогнози в областта на индустриалната организация, конкуренцията и пазарната структура, както и в сферата на търговията.

---

<sup>21</sup> Varro (1990) предлага подобен модел, при който потокът от публични разходи допринася за развитието на производството.

Тези прогнози пораждават нова вълна от емпирични изследвания на иновациите и растежа, която често се базира на микроданни за отделните фирми.

Един по-широк поглед върху иновациите показва, че някои нововъведения допълват разновидностите, като заменят съществуващите разновидности с нови, по-ефективни варианти. Ключов фактор е степента на взаимозаменяемост между стари и нови продукти. Освен това съществуващите продукти могат (или не могат) да бъдат произведени от едни и същи фирми, които имат иновации. Дали технологичните връзки са интернализирани, зависи от точната пазарна структура. Неотдавнашно проучване на Garcia-Macia, Hsieh и Klenow (2016) се опитва да оцени количествено как различни видове нововъведения могат да бъдат причина за съвкупните американски иновации.

Друга част от литературата разглежда намаляващата възвръщаемост на изследванията като алтернатива на линейната формулировка на Ромър. Така наречените модели за „полуендогенен“ растеж (вж. например Jones, 1995a; Kortum, 1997) включват намаляваща възвръщаемост, но позволяват тя се противопоставя на нарастването на населението и по този начин обвързват дългосрочния темп на технологичен растеж с темпа на увеличаване на населението.

*Насочена техническа промяна.* Отделно теоретично разширение в литературата по въпроса разглежда как технологичната промяна е насочена към различни приложения. Acemoglu (1998, 2002) например моделира връзката между ресурсите, изразходвани за различни видове изследвания, и пазарните сили. В тези влиятелни проучвания се подчертава, че много студенти, завършили висше образование в САЩ, проявяват интерес към научни изследвания в областта на технологиите, в допълнение към висококвалифицираните работници. Това може да доведе до повишаване на заплатите въпреки по-големия брой на завършилите колеж. Какво ще се случи с общия дял на заплатите, зависи от степента на взаимозаменяемост между високо- и нискоквалифицирания труд в производството. Acemoglu твърди, че заменяемостта е достатъчно голяма, за да помогне да се разбере нарастващото неравенство в заплащането в повечето икономики. Това е пример за изследване на ендогенна технология, което се основава пряко на идеите на Ромър. Някои от трудовете за насочена техническа промяна използват модела на Ромър (Romer, 1990) с разширяващи се разновидности, а други – модела на „съзидателно разрушаване“ на Aghion и Howitt (1992).

В по-скорошна работа Acemoglu и неговите съавтори (Acemoglu et al., 2012) прилагат идеята за насочена техническа промяна по отношение на важна тема в областта на промяната на климата, а именно каква част от НИРД е посветена на технологични изследвания, насочени към подобряване на „зелени“ (за разлика от „мръсни“) технологии. Тук, прилагайки техниките и вижданията на Ромър, се стига до заключението, че субсидиите за развитие на зелени технологии могат да помогнат за смекчаване на изменението на климата чрез намаляване на зависимостта от изкопаеми горива. Нещо повече, дори временна

политика би могла да изиграе много голяма роля чрез постоянните ефекти, присъщи на постановката на Ромър. Основният извод е, че това правило трябва да насочи пазарната научноизследователска и развойна дейност към разработването на идеи, които да са от полза за благосъстоянието. Понятието за насочена, ендогенна технологична промяна се прилага и в друг контекст, например в теорията на търговията.

### 3.5. Количествени оценки

Ромър е мотивиран от предизвикателството да обясни наличните данни за страните, засягащи растежа на продукцията, и във времевия прогресия (вж. фиг. 1). Въз основа на тези данни той посочва очевидното – че световните икономики изглеждат далеч от конвергиране до едно общо ниво на продукция на човек от населението, и показва как основната теория на растежа може да бъде изменена, за да вземе предвид емпиричните модели. Това се превръща в мощен стимул за по-нататъшни емпирични изследвания. Дълго време този тип данни, както и теоретичните постановки на Ромър са били извън центъра на икономическите изследвания и преподаването на макроикономика. В резултат от десетилетия емпирична работа, свързана с икономическия растеж, ситуацията днес е много по-различна. Какво открива емпиричната литература?

*Намаляване на растежа.* Както вероятно би могло да се очаква, емпиричната литература не предлага убедителни доказателства за „най-големите двигатели“ на растежа в страните. Тя обаче е генерирала много прозрения и е достигнала значителна зрялост. В следващата кратка дискусия ще изложим нашето разбиране за сегашния консенсус по някои първостепенни въпроси.

Що се отнася до показателите за *относителен* растеж, консенсусът, изглежда, е някъде между теорията на Солоу, основана на конвергенция, и тази, базирана на ендогенния растеж. *Условната* конвергенция е факт, т.е. страни с подобни характеристики и политики са склонни да се конвергират със сходно ниво на БВП на човек от населението. За постигането на този консенсус основен принос има Robert Barro (вж. Barro, 2015, за скорошно резюме).

Конвергенцията обаче е много по-бавна, отколкото се предполага чрез пряко калибриране на модела на Солоу, където се твърди, че  $\alpha$  обикновено е около  $1/3$ .<sup>22</sup> С други думи, в съответствие с фиг. 1 относителната позиция на дадена страна може да бъде драстично и трайно повлияна от определена политика или от други фактори, които карат темповете ѝ на растеж да се отклонят значително от световното средно равнище за продължителен период. Консенсусът показва също, че рано или късно темпът на растеж на дадена страна ще се забави до средното световно ниво – не е възможно той да расте много дълго с по-висок темп, отколкото останалата част на света. По този начин, като се върнем към модела на Солоу и неговите параметри, стойността на  $\alpha$  изглежда много по-висока, отколкото се е предполагало, но е по-малка от 1. Освен това страните могат да повлияят както върху относителните си стойности

<sup>22</sup> При съвършена конкуренция тази стойност е равна на дела на капитала в дохода.



на  $A$ , така и върху своята позиция спрямо световната граница. Ранните научни статии, които съдържат елементите на такъв модел на икономика, са на Mankiw, Romer и Weil (1992) и на Parente и Prescott (1994). Друг пример е влиятелният учебник на Jones (1998). Идеята тук е, че темповете на растеж на средния  $A$  в света или тези на водещите държави са ендегенна функция на световните инвестиции в създаването на технологии и знания.<sup>23</sup>

Казано по друг начин, консенсусът е, че БВП на човек от населението в отделните страни има относително стабилно цялостно разпределение в *относително изражение*, където (1) средният БВП на човек продължава да расте стабилно, но (2) относителните позиции в разпределението са съществено пренаредени с течение на времето. С други думи, продължават да се наблюдават едновременно и „чудеса“, и „злополуки“ на растежа, т.е. дълготрайни и големи промени в относителните позиции както нагоре, така и надолу. Съществува по-малък консенсус относно това, което движи тези „чудеса“ или „злополуки“. Като главни двигатели често се сочат институционалните фактори, натрупването на човешки капитал и отвореността към търговията, въпреки че анализът на конкретни случаи показва, че относителното значение на тези фактори се различава значително при двете ситуации.

*Емпирични тестове на теорията на растежа.* Има и емпирични изследвания на растежа от по-глобална гледна точка, но те са рядкост. Kremer (1993) разглежда ключовото приложение на теорията на Ромър, а именно увеличаването на възвръщаемостта – обществата с по-голямо население трябва да постигат по-високи темпове на растеж. Хипотезата е трудна за тестване, тъй като страните отдавна са свързани чрез обмен на идеи и търговия, така че дадена държава едва ли може да се приеме като единица за анализ. Затова Kremer се връща много назад във времето и намира подкрепа за теорията на Ромър, разглеждайки изолирани общества. Jones (1997) насочва вниманието си към последиците от хипотезата – че размерът на населението е от ключово значение за дългосрочните темпове на растеж. По-общо, в поредица от статии (Jones, 1995a, b; 1999) той оценява ефективността на теориите за ендегенен растеж от емпирична гледна точка. По-скорошен труд на Bloom, Jones, van Reenen и Webb (2017) пък установява значителна степен на намаляваща производителност на изследванията, разглеждана от гледна точка на световната технологична граница.

Емпирично предизвикателство при оценката на теориите за технологична промяна е трудността да се измерят броят и икономическите стойности на иновациите. Натрупаните напоследък множество микроикономически данни за патенти и притежатели на патенти дават възможност да се тестват различни версии на теорията за ендегенния растеж, което води до активизиране на изследователските усилия. По подобен начин увеличаването на достъпа до

<sup>23</sup> Ранен теоретичен труд, наблягащ на отношението на света както към тези инвестиционни решения, така и към международното разпространение на знания, е на Rivera-Batiz и Romer (1991), който изследва модел с две страни и показва потенциалното значение на търговията за световния темп на растеж.

Нобелова награда за постижения в областта на икономическите науки за 2018 г.

преброявания и регистрационни данни на физически лица позволява да се идентифицират „иноваторите“ и „предприемачите“ и по такъв начин способства да се тестват специфичните микрооснови за различните модули на НИРД модели. Тази активна изследователска област днес има важен принос в обсъждането на определящите фактори за неравенство, тъй като голяма част от т.нар. нови богатства се дължат на възвръщаемостта на иновациите и свързаното с нея предприемачество, като се засяга и ролята на политиката както от гледна точка на иновациите, така и на неравенството.<sup>24</sup>

#### 4. Интегрирани модели за оценка

Нордхаус поставя основите за разширяване на модела на Солоу за улавяне на дългосрочните взаимодействия между обществото и климатичните изменения. Интересът му към тези взаимодействия датира от 70-те години на миналия век. По това време учените от областта на естествените науки обръщат все по-голямо внимание на практическото значение на една теоретична възможност – изгарянето на изкопаеми горива за енергия за производство или консумация може да доведе до значително затопляне.<sup>25</sup> Освен това те предупреждават, че по-топлият климат може да навреди по много начини. Нордхаус следи отблизо тези дискусии и се заема със задачата, едновременно обезкуражаваща и новаторска, да моделира взаимодействията между икономическия растеж и измененията на климата.

*Общ подход.* Идеята на Нордхаус е да разгледа как производството и по-общо човешкото благосъстояние ще бъдат ограничени от промените в климата, дължащи се на използването на изкопаеми горива. Според него, за да се анализира как икономиката влияе върху климата, как той от своя страна въздейства върху икономиката и как различните политики се отразяват върху резултата, знанията от природните науки трябва да се включат в подходящ модел на дългосрочен растеж.

За да се удовлетворят тези изисквания, моделът климат-икономика трябва да бъде динамичен и да включва три взаимодействащи подмодела:

1) модел на циркулация на въглерода, който картографира емисиите на изкопаем въглерод по пътя им на концентрация на атмосферен въглероден диоксид (CO<sub>2</sub>);

2) климатичен модел, който описва развитието на климата във времето в зависимост от пътя на концентрацията на CO<sub>2</sub>;

3) икономически модел, който описва как икономиката и обществото се влияят от измененията на климата във времето и – затваряйки веригата, как икономическата дейност води до емисии на изкопаем въглерод.

<sup>24</sup> Вж. например Akcigit, Celik, and Greenwood, 2016; Acemoglu, Robinson, and Verdier, 2017; Aghion, Akcigit, Bergeaud, Blundell, and Hemous, 2018.

<sup>25</sup> Нобеловият лауреат по химия за 1903 г. Svante Arrhenius е направил първия анализ дали колебанията в концентрацията на CO<sub>2</sub> в атмосферата са достатъчно важни, за да обяснят колебанията в наблюдаваните температури (Arrhenius, 1896). Вж. дискусията, представена по-нататък.

Нордхаус показва как тези много различни подмоделни могат да бъдат интегрирани в една рамка, която в днешно време често се нарича „интегриран модел за оценка“ (ИМО). ИМО може да направи съвместими прогнози, например да симулира бъдещия климат, основаващ се на развитието на емисиите на изкопаеми горива, произведени от глобален икономически модел, който приема същите тези климатични симулации като входни данни. Съвместимостта на симулациите очевидно не е гаранция за точни прогнози, но въпреки това е желателна черта, особено ако целта е да се проучат последиците от политика, тъй като те включват обратна връзка – от икономиката, през климата, и отново към икономиката.

Както беше отбелязано в част 1 и 2, Нордхаус основава работата си на неокласическата теория за растеж – в параметризирана версия рамката да съответства на историческите макроикономически данни с функции на ендогенно спестяване и безусловно благоденствие. Имайки предвид тези функции на благоденствие, моделите могат да дадат отговор на някои въпроси, свързани с нормативната уредба, например желанието с течение на времето да се пристъпи към въвеждане на глобален въглероден данък. Очевидно е, че всяко нормативно заключение отразява нормативни допускания като данъчната тежест, налагана на хората в различни точки от времето и пространството, наречена „тежест на благоденствието“. Прилагайки набор от тежести на благоденствието, моделът може лесно да се използва за определяне на „оптимална“ политика. Когато се говори за оптимална политика по-нататък, имаме предвид използването на модела по този начин, а именно да се определи как (различни) нормативни допускания формират променливи като въглеродни данъци, температурни ограничения и пътища на емисиите.

*Защо такъв опростен модел?* Подходът на Нордхаус е да опрости и да консолидира най-съвременните знания за глобалното циркулиране на въглерод и за климатичната система в съвкупност от (близки до) линейни уравнения, които са достатъчно гъвкави за работа в икономически модел. За да се разбере необходимостта от сериозни опростявания на елементите на ИМО от естествените науки, трябва да се има предвид, че икономическият модел допуска, че агентите са насочени към бъдещето. Безпокойството на хората относно изменението на климата само по себе си е доказателство, че посоката на развитие на човечеството е напред. Подобно на Ромър, Нордхаус приема като еталон рационалността. При рационалното поведение, насочено към бъдещето, условията за оптималност, които определят законите на движението за ендогенните променливи (вкл. цените на горивата и лихвените проценти), предполагат, че настоящите променливи, например потреблението, зависят от целия път на бъдещите ендогенни и екзогенни променливи.<sup>26</sup>

<sup>26</sup> За да бъдат валидни доводите, пълната рационалност в бъдещото поведение не е от съществено значение. Докато агентите са до известна степен насочени напред, решаването на динамичен икономически модел включва проблем с фиксирана точка, чиято сложност нараства много бързо с броя на базовите променливи.

Следователно ключова стъпка в изграждането на икономически модел е да се *реша* моделът. За целта е необходимо да се намери начин за проследяване на променливите – от „базовите“ (предварително определени), например капиталова наличност и ниво на технологията в началото на определен период, до ендогенните (например потребление), което да удовлетворява условията, насочени към бъдещето. Тази стъпка липсва при моделите на климата и циркулацията на въглерода, тъй като диференциалните уравнения, които определят динамиката на модела, са рекурсивни и нямат компоненти, насочени към бъдещето. Това показва, че частиците в моделите от естествените науки (за разлика от хората в икономическите модели) не избират пътя си въз основа на очаквания за бъдещи събития (вкл. как ще действат други частици както в момента, така и в бъдеще).

Тази фундаментална разлика прави стандартните мащабни модели на климата и циркулацията на въглерода несъвместими с икономическите модели. Самото присъединяване към набор от стандартни (под)модели ще даде модел, твърде сложен за решаване, предвид голямото пространство на конвенционалните модели в природните науки. Несъвместимостта се увеличава, когато се използват модели за намиране на оптимална политика, тъй като е много трудно наборът от възможни политики за разглеждане и сравнение да се намали до управляем размер. Ето защо демонстрацията на Нордхаус, че компактният и лесен за анализ климат и система на циркулация на въглерода може да се направи съвместим с икономически модел с поглед напред, е фундаментален принос. Очевидно опростяването на използваните инструменти при естествените науки има своята цена. Тъй като природата е сложна и нелинейна, трябва да се внимава да се избегнат опростявания, които водят до неоправдани изводи. Това е нещо, върху което Нордхаус продължава да набляга още от началото на проучванията си в тази област.<sup>27</sup>

По-нататък описваме ключовите модели на ИМО, които Нордхаус изгражда, техните приложения и бъдещото им развитие. Част 4.1. започва с кратко описание на предшественика на основното му постижение, представено в част 4.2.

#### 4.1. Временният модел 1975/1977

Тук е резюмиран моделът на Нордхаус от 1975-1977 г. (Nordhaus, 1975, 1977). Това не е пълноправен взаимодействиращ ИМО, тъй като липсва модел на климата и изрична формулировка на икономическите вреди от неговото изменение. Това обаче е важен предшественик на по-късната работа на Нордхаус. Целта на учения е да определи как концентрацията на атмосферен CO<sub>2</sub> – а оттам и изменението на климата, може да се задържи на допустимо ниво при най-ниска възможна цена. Такъв анализ е ценен и днес, особено в

<sup>27</sup> Разбира се, моделите на растеж на Ромър споделят тези характеристики – те са динамични и насочени в перспектива. Тук наблягаме на трудностите, тъй като те контрастират с моделите на естествените науки и налагат ограничения върху модулите на ИМО за климата и въглеродния цикъл.

контекста на поставените в Парижкото споразумение от 2015 г. съгласно Рамковата конвенция на Обединените нации за изменение на климата политически цели да се задържи повишаването на средната глобална температура под 2 градуса по Целзий.

*Циркулация на въглерода.* Необходима съставна част в един интегриран модел климат-икономика е да се опише начинът, по който развитието на емисиите на CO<sub>2</sub> променя атмосферните концентрации на CO<sub>2</sub>. Моделирането на връзката между емисиите и концентрациите на свой ред изисква разбиране на много сложни физически и биологични процеси, например фотосинтеза, обмен на газове между атмосферата и океана и смесване на различни океански слоеве. Основавайки се на статия на Machta (1972), представена на 20-ия Нобелов симпозиум „Променящата се химия на океаните“, Нордхаус (Nordhaus, 1975) конструира модел със седем различни складове на въглерод: (1) тропосферата (<10 км); (2) стратосферата; (3) горните слоеве на океана (0-60 м); (4) дълбокият океан (>60 м), (5) краткосрочната биосфера, (6) дългосрочната биосфера и (7) морската биосфера. Въз основа на констатации от природните науки Нордхаус твърди, че брутните потоци между тези складове могат да бъдат приближени пропорционално на източниците на складовете. Например в калибрирането на Нордхаус 11% от въглерода в тропосферата се отделя всяка година в горния слой на океана и 9% от въглерода в горния океански слой се отделя в другата посока.

Имайки предвид тези допускания, циркулацията на въглерод може да бъде моделирана като линейна система от първи ред с времева стъпка от една година

$$(11) \quad M_{t+1} = D \cdot M_t + E_t,$$

където  $M_t$  е 7-елементен вектор, обхващащ размерите на седемте въглеродни склада.  $D$  е 7 x 7 матрица на коефициентите на потока, където например първият елемент в третия ред дава годишен дебит от 9% от горния слой на океана до тропосферата. Диагоналът на  $D$  показва колко въглерод във всеки склад остава в него. Елементите във всяка колона се събират в единство – в системата не се губи въглерод. Накрая,  $E_t$  са емисиите. Тъй като всички емисии отиват в тропосферата,  $E_t$  е 7-елементен вектор, където само първият елемент не е нулев.

Използвайки този модел, може да се опише еволюцията на концентрацията на CO<sub>2</sub> в атмосферата (както и количеството въглерод в другите складове) за всеки сценарий на емисии.

*Икономиката.* Икономическата част на интегрирания модел трябва най-малкото да предвиди път за емисиите и да опише как различните политики влияят върху тях. За да се извърши нормативен анализ – да се класифицират различни политики според привлекателността им, моделът трябва да включва някаква мярка за благосъстояние. Статията на Нордхаус (1975) е доста подробна рамка за глобалното търсене на енергия. За разлика от по-късната

Нобелова награда за постижения в областта на икономическите науки за 2018 г.

му работа, тя е формулирана като модел на частично равновесие, който приема динамиката на световния БВП за даденост и я използва като принос към търсенето на енергия. Търсенето на енергия е свързано с четири различни цели – електричество, индустрия, жилища и транспорт, в два региона (САЩ и останалата част от света). Тя се доставя от 6 различни природни ресурса: нефт, природен газ, въглища, шисти и два вида уран ( $U_{235}$  и  $U_{238}$ ). Вземат се предвид разходите за добив, преобразуване и транспортиране, както и геоложката наличност.

По-късно Нордхаус полага значителни усилия да оцени вредите (и ползите) за обществото от изменението на климата. Тъй като по онова време липсват обобщения на тези ефекти, Нордхаус (1975) твърди, че разумна първа стъпка е да се анализира как може да се постигне ограничаване на концентрацията на  $CO_2$  в атмосферата при минимални разходи. Той отбелязва, че няма за цел да описва колко климатични промени трябва да намерят решение. Но статията разглежда възможните последици от различните пътища на развитие на концентрациите на  $CO_2$ , вкл. ефектите върху температурите и морското равнище, използвайки опростени климатични модели, интегрирани с останалата част от модела. При липса на оценки на общите разходи моделът се използва за изчисляване на икономическите разходи за удовлетворяване на различни сценарии за концентрации на  $CO_2$ .

#### 4.2. Първият завършен модел

Първият фундаментален, количествен принос на Нордхаус е изграждането на динамичен интегриран модел на климата и икономиката (DICE). Публикуван от Нордхаус (Nordhaus, 1994a), този модел поставя основите на ИМО, все още използвани и днес, например от Междуправителствения панел по изменението на климата (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC).<sup>28</sup> Първият вариант на DICE използва най-новите знания от природните науки, за да изгради динамична система за циркулация на въглерода, както и динамична връзка между промените в глобалното енергийно равновесие и глобалната средна температура. Тези връзки са достатъчно опростени, за да бъдат комбинирани с модела на Солоу за икономически растеж, където производството на крайна продукция използва изкопаеми горива в добавка към капитала и труда, както в Dasgupta и Heal (1974).

Две години по-късно Нордхаус представя модифициран модел с редица региони (Nordhaus and Yang, 1996), обозначен като RICE<sup>29</sup> (регионален динамичен интегриран модел на климата и икономиката). Както DICE, така и RICE са адаптирани към цифровите програмни пакети GAMS и EXCEL, така че моделите да бъдат прозрачни и лесни за работа и от други изследователи. Още от

<sup>28</sup> Тази организация получава Нобелова награда за мир за 2007 г.

<sup>29</sup> Regional dynamic Integrated model of Climate and the Economy.

оригиналните им версии и RICE, и DICE са непрекъснато развивани и усъвършенствани както от Нордхаус, така и от други учени. Те все още остават основните работни модели за икономиката на климата по целия свят.

По-нататък са разглеждаме по-подробно различните компоненти на DICE и RICE, като се започне с елементите на естествените науки и се стигне до икономическите елементи.<sup>30</sup> Първо, обсъждаме как Нордхаус включва в анализа модел на климата – тази част приема пътя на концентрацията на въглерод в атмосферата като вход и генерира път на климата (глобални средни температури) като изход. Второ, показваме модела на циркулация на въглерода – опростена версия на описания в предходния подраздел. Трето, описваме икономическите „вреди“, едно допълнение към модела, което е необходимо за точен анализ на разходите и ползите. Четвърто, представяме останалите характеристики на икономическия модел, чието ядро (модела на Солоу) вече беше описано. Накрая, изясняваме как да се калибрират параметрите на модела и той да се реши, преди да бъде използван.

*Климат.* От повече от 100 години се знае, че CO<sub>2</sub> е парников газ, който променя топлинния баланс между входящата слънчева светлина и изходящата топлинна радиация на дългите вълни. Нобеловият лауреат по химия за 1903 г. Svante Arrhenius описва прекия ефект на концентрациите на CO<sub>2</sub> върху топлинния баланс чрез известната и все още много използвана формула:

$$(12) \quad F_t = \frac{\eta}{\ln 2} \ln \frac{M_t}{M_0}.$$

Формулата на Arrhenius гласи, че промяната в топлинния баланс  $F$ , измерена като мощност на площ, е пропорционална на естествения логаритъм на съотношението между действителната и базисната атмосферна концентрация на CO<sub>2</sub>, означена с  $M_t$  и  $M_0$ . Параметърът  $\eta$  измерва начина на промяна на топлинния баланс при двойна концентрация на CO<sub>2</sub>. С това опростено представяне на парниковия ефект Нордхаус формулира система от диференчни уравнения за глобалната средна (повърхностна) температура  $T_t$  и температурата на океана  $T_t^\circ$ , и двете изразени като отклонения от техните прединдустриални нива. Тези уравнения трябва да се разглеждат като линейни приближения около прединдустриалното равновесно състояние на нелинейна система, основана на природния закон, че енергията не изчезва. Можем да обозначим системата като „глобален енергиен бюджет“ и топлинният баланс DICE е

$$(13) \quad T_t - T_{t-1} = \sigma_1((F_t + O_t - kT_t) - \sigma_2(T_{t-1} - T_{t-1}^\circ))$$

$$T_t^\circ - T_{t-1}^\circ = \sigma_3(T_{t-1} - T_{t-1}^\circ), \text{ с декадална стъпка от време.}$$

Изразът  $(F_t + O_t - kT_t) - \sigma_2(T_{t-1} - T_{t-1}^\circ)$  описва топлинния баланс на атмосферата и горния слой на океаните. Тук  $F_t$  измерва добавките на енергийни

<sup>30</sup> Описанието се основава на DICE и RICE в Nordhaus and Boyer (2000). Незначителните разлики от оригиналните модели DICE и RICE са посочени по-нататък.

потоци, дължащи се на парниковия ефект от  $\text{CO}_2$ ,  $O_t$  включва и други добавки, създадени от човека, вкл. метан и аерозолни емисии, а  $kT_t$  измерва факта, че по-топло тяло излъчва повече енергия. В този случай т.нар. Планк обратна връзка означава, че по-топлата земя, при равни други условия, излъчва повече енергия в пространството под формата на инфрачервена светлина. Изразът  $\sigma_2(T_{t-1} - T_{t-1}^\circ)$  отразява енергийните потоци от атмосферата до дълбоките океани, той е функция на температурната разлика и влиза с отрицателен знак в топлинния баланс на атмосферата. Ако общият топлинен баланс на атмосферата и на горния слой на океана е с излишък, температурата на атмосферата ще се повиши:  $T_t - T_{t-1} > 0$ . За даден излишък скоростта на покачване на температурата се определя от топлинната мощност на атмосферата и горния слой на океана, параметризирани от  $\sigma_1$ .<sup>31</sup>

Топлинният баланс на дълбокия океан е по-прост и съдържа само енергийния поток от атмосферата и горния слой на океана. Ако е с излишък, т.е. ако нетните енергийни потоци са в посока надолу и  $T_{t-1} - T_{t-1}^\circ > 0$ , океаните стават по-топли при скорост, определена от  $\sigma_3$ .

Много ясно се вижда, че ако концентрацията на  $\text{CO}_2$  се стабилизира на 2 пъти по-голямо ниво от преиндустриалното ( $\frac{M_t}{M_0} = 2$ ), добавката към топлинния баланс е  $\eta$ . Без да се отчитат други екзогенни добавки към топлинния баланс ( $O_t = 0$ ), в крайна сметка ще се получи ново равновесно състояние, в което двете температури са постоянни. За да бъде възможно това, атмосферната температура трябва да се увеличи, за да балансира парниковия ефект:

$$T = \frac{\eta}{k}.$$

Съотношението  $\frac{\eta}{k}$  често е наричано „равновесна климатична чувствителност“. Равновесието тук се отнася до отговор на дългосрочното стабилно състояние. Отговорът за краткотрайни хоризонти се нарича „преходна климатична чувствителност“, определена за конкретен времеви хоризонт. Тъй като реално действат много, повече или по-малко добре разбрани, механизми за обратна връзка, има значителна несигурност по отношение на тази стойност. Например петият петия доклад на IPCC твърди, че равновесната климатична чувствителност е „вероятно в диапазона от 1.5 до 4.5°C“. През 1999 г. Нордхаус избира стойност от 2.9 за  $\frac{\eta}{k}$  в DICE и RICE.

**Циркулация на въглерода.** Моделът на циркулация на въглерод в DICE и RICE описва динамичната еволюция на емитирания  $\text{CO}_2$  и по този начин е тясно свързан със системата от статията на Нордхаус (Nordhaus 1975), описана в част 4.1. Той има само три склада: атмосферата ( $M_t$ ), биосферата и горните

<sup>31</sup> Сам по себе си топлинният капацитет на атмосферата е много нисък в сравнение с този на океаните, което предполага бързо изравняване на собствения му топлинен баланс, ако е изрично посочен.



слоеве на океана ( $M_t^U$ ), и дълбоките океани ( $M_t^L$ ). Тук променливите  $M_t$ ,  $M_t^U$  и  $M_t^L$  измерват масата на въглерода в съответните складове.<sup>32</sup>

Опростявайки (11) на тези три компонента и използвайки свойствата, че въглеродът не може да изчезне и че входящите потоци от един склад трябва да бъдат идентични с изходящите от друг, системата за циркулация на въглерода може да се изрази като:

$$(14) \quad \begin{aligned} M_t - M_{t-1} &= -\phi_{12}M_{t-1} + \phi_{21}M_{t-1}^U + E_{t-1}, \\ M_t^U - M_{t-1}^U &= \phi_{12}M_{t-1} - (\phi_{21} + \phi_{23})M_{t-1}^U + \phi_{32}M_{t-1}^L, \\ M_t^L - M_{t-1}^L &= \phi_{23}M_{t-1}^U - \phi_{32}M_{t-1}^L. \end{aligned}$$

Тук  $\phi_{12}M_{t-1} - \phi_{21}M_{t-1}^U$  представлява нетният въглероден поток от атмосферата до горния склад  $M_t$ , който се изважда в първото уравнение и се добавя във второто. Аналогично,  $\phi_{23}M_{t-1}^U - \phi_{32}M_{t-1}^L$  е нетният поток към дълбокия океан от биосферата и горните слоеве<sup>33</sup> на океана, извадени от второто уравнение и добавени в третото. След като определя динамичния модел на циркулацията на въглерода, Нордхаус калибрира неговите параметри, за да се постигне съответствие с най-съвременните модели на циркулация на въглерода.<sup>34</sup>

*Вреди.* Ключово нововъведение в DICE и RICE от статията на Нордхаус (1975) е добавянето на функция на вреди, която проследява глобалните средни температури и ги превръща в икономически вреди. Нордхаус (1994а) е пионер в подхода „отдолу нагоре“ за агрегиране на вредите, събирайки голям брой микро-икономически изследвания, свързани с различните последици от изменението на климата, например вредите за селското стопанство, за крайбрежните райони, отдиha, биологичното разнообразие и човешкото здраве. От особен интерес е т.нар подход Ricardian, приложен от Mendelsohn, Nordhaus и Shaw (1994), които използват връзката между температурата и пазарните цени на земеделските земи в 3000 американските окръга, за да проучат последиците от изменението на климата. Този подход е широко разпространен в много аспекти от работата на основните институции.

Нордхаус посочва, че подобен подход за измерване „отдолу нагоре“ изключва някои вреди, особено екстремни резултати с малка вероятност. Той изтъква, че „имаме само „най-вероятни“ сценарии за климатични промени и за социалните реакции, които биха могли да предизвикат“ (Nordhaus, 1994b). Според Нордхаус могат да възникнат много подвеждащи ефекти от политика, използваща модел, който не взема под внимание най-добрите предположения

<sup>32</sup> Тъй като съотношението на текущата атмосферна концентрация към преиндустриалното равнище е равно на съотношението, измерено във въглеродната маса, законът на Arrhenius в (12) е еднакъв за двете дефиниции.

<sup>33</sup> Някои потоци, например дишането и фотосинтезата, могат да се дефинират като брутни потоци, докато други, например газовият обмен между атмосферата и океанската повърхност, не могат.

<sup>34</sup> Той използва модела на BERN за циркулация на въглерода, приложен също и от IPCC (1996).

относно свързаните с изменението на климата вреди, макар да могат да се представят малко твърди доказателства за тях. Той провежда проучване сред внимателно избран панел от учени със специфичен опит в областта на изменението на климата и неговите последици,<sup>35</sup> което съдържа оценки на потенциално вредните последици от изменението на климата и свързаните с тях вероятности. Резултатите от проучването са представени обобщено в компонент „катастрофално въздействие“, включващ рискова премия (в зависимост от това кой е готов да плати над очакваната стойност, за да намали риска).

Накрая Нордхаус определя функция

$$(15) \quad \Omega(T_t) \equiv \frac{1}{1 + \theta_1 T_t + \theta_2 T_t^2},$$

за да представи дела на БВП след вредите върху климата (регионално за RICE и глобално за DICE). Той избира параметрите  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , за да накара тази функция на общите вреди да се приближава до сумата на функциите със специфичен механизъм, включващи компонента на катастрофалното въздействие. Тази функция описва колко губи обществото в резултат от глобалното затопляне, използвайки по-малко ресурси за потребление и инвестиции<sup>36</sup> и е част от икономическата характеристика на модела, която ще обсъдим по-подробно.

*Икономическият модел.* Както вече споменато, икономическите модели в DICE и RICE се основават на модела на Солоу с оптимални спестявания. Като такива те включват агенти с изрична функция на полезност. В RICE се приема, че светът се състои от осем региона: САЩ; ОИСР-Европа; други държави с високи доходи; Русия и Източна Европа; държави със средни доходи; държави с по-ниски средни доходи; Китай; държави с ниски доходи. Потребителите максимизират своята полезност, като избират колко да спестят и да консумират при зададени цени. По-конкретно в регион  $j$ , благосъстоянието на потребителите е

$$(16) \quad \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t L_{j,t} \frac{c_{j,t}^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma},$$

където  $L_{j,t}$  е населението на региона в период  $t$ , а  $c_{j,t}$  е потреблението му на човек аналогично на (1). Първоначално  $L_{j,t}$  се увеличава в съответствие с наблюдавания ръст на населението, но се допуска, че с времето той намалява, което в крайна сметка води до стабилно световно население. Често калибрирането на  $\sigma$  е единица, включваща логаритмична функция на полезност. Както в модела на династията, разгледан в част 2, безкрайната сума в израза на благосъстоянието отразява допускането, че индивидите от различни поколения действат алтруистично, което ефективно създава династии с безкраен живот.

Фирмите максимизират дисконтираните суми от печалбите също при зададени цени. Те произвеждат крайната стока и наемат труд, капитал и енергия

<sup>35</sup> Имената на членовете на панелите са дадени изброени в Nordhaus (1994b).

<sup>36</sup> Някои от вредите, включени в  $\Omega$ , не са буквално загуби на изхода, а например загуба на живот, загуба на отдих и т.н. Подходът на Нордхаус е да ги превърне в еквивалентни загуби при изхода.

на конкурентни пазари. Както при модела на Солоу, се допуска, че се използва производствена функция на Cobb-Douglas, където продукцията на крайната стока в регион  $j$  и период  $t$  е

$$(17) \quad \Omega_j(T_t)A_{j,t}k_{j,t}^\alpha l_{j,t}^{1-\alpha-\gamma_j} es_{j,t}^{\gamma_j}.$$

Включването на ограничен ресурс  $es$  – енергийни услуги, основани на изкопаеми горива, разширява основния модел на Солоу, както е описано от Dasgupta и Heal (1974). Общата факторна производителност  $\Omega_j(T_t)A_{j,t}$  има два изрази. Единият е  $\Omega_j(T_t)$  – описаната вече функция „без вреди“. Това води до повишаване на отрицателните външни фактори, тъй като нито едно отделно икономическо действащо лице не влияе върху начина, по който индивидуалните му решения засягат глобалните температури. Вторият израз е  $A_{j,t}$  – технологичен параметър, който се увеличава екзогенно с течение на времето, точно както в оригиналния модел на Солоу (Нордхаус не включва механизма на ендогенната технология на Ромър). Размерът на енергийните услуги на единица въглеродни емисии е  $es_{j,t} = \varepsilon_{j,t}e_{j,t}$ , където  $e_{j,t}$  е използването на изкопаеми горива, а  $\varepsilon_{j,t}$  – обратната интензивност на изкопаемите горива.

Приема се, че цената на изкопаемите енергийни източници (без транспортните разходи и регионалните данъци) е изравнена между регионите. Брутните цени обаче могат да се различават в зависимост от специфичните за региона надценки, вкл. транспортни разходи и енергийни данъци. С времето интензитетът  $1/\varepsilon_{j,t}$  на изкопаемите източници спада, което от своя страна намалява необходимото количество въглерод за единица услуга от въглеродна енергия. Изкопаемите горива са изчерпаеми и разходите за тяхното производство се увеличават поради дългия исторически период на извличане. По-конкретно моделът допуска, че разходите за добив на изкопаемо гориво се увеличават рязко, когато кумулираното извличане достига критично ниво  $CumC$ . Така разходите за изкопаеми горива се определят като:

$$q_t = x_1 + x_2 \left( \frac{\sum_{s=1995}^t E_s}{CumC} \right)^4,$$

където  $q_t$  е цената на производството на изкопаемо гориво в период  $t$ , а  $E_t = \sum_j e_{j,t}$  – глобалното използване на изкопаеми горива в периода  $t$ . Параметрите  $x_1$ ,  $x_2$  и  $CumC$  са избрани така, че първоначално предлагането е доста еластично, но когато кумулираното извличане доближи  $CumC$  става много нееластично. Тъй като агентите са ориентирани към бъдещето, това означава, че цената на изкопаемите горива включва т.нар. условие на Hotelling, представляващо увеличението на бъдещите разходи за добив в зависимост от пределна единица използване на изкопаеми горива (Hotelling, 1931).

Накрая агрегираното използване на изкопаеми горива  $E_t$  влиза като израз на емисиите в (14), който затваря модела. Емисиите на изкопаем въглерод в атмосферата влизат в системата на циркулацията на въглерода, което

води до концентрация на атмосферния въглерод. Чрез парниковия ефект това повишава глобалната средна температура  $T_t$ , което намалява крайните резултати чрез  $\Omega_j(T_t)$  – функциите на регионалните вреди. Тъй като всяка емитираща фирма е малка, а вредите са разпространени в целия свят, ефектът от емисиите на фирмата върху собствената ѝ производителност е незначителен и фирмата не го калкулира. Все пак съвкупният ефект от всички емисии в света със сигурност не е незначителен, поради което създава предпоставки за неуспех на нерегулираните пазари.

*Калибриране на модела и изчисления на благосъстоянието.* Основен принцип при моделирането на Нордхаус е, че моделите трябва да получат положителна интерпретация, т.е. да отговарят на съответните наблюдения в реалността. Що се отнася до научните компоненти, които описват климата и циркулацията на въглерод, това е единственият разумен подход – трябва да се изберат параметри и други характеристики на модела, за да се направи разумно съвместим с историческите данни и да използва наличната теория за прогнозите в бъдеще.

Нордхаус твърди, че детайлите на икономическия модел трябва да се изберат по същия начин. В този смисъл той следва подхода в модерната макроикономика, където историческите данни, както и микроикономическата информация се използват за калибриране на различни параметри (вж. например Royal Swedish Academy of Sciences, 2004).

Въпреки това някои икономически параметри могат да бъдат включени и в нормативни преценки. Да вземем дисконтовия процент  $\beta$ , който улавя относителната тежест върху бъдещите поколения. Този параметър може да бъде калибриран така, че да съответства на броя на домакинствата, които спестяват и завещават на потомството.<sup>37</sup> Това отразява положителния елемент на моделирането. Дисконтовият фактор обаче също може да се разглежда като нормативен параметър, отразяващ колко голяма тежест да се определи на бъдещето, когато се изчислява благосъстоянието. Така моделиращият, който използва ИМО, има избор дали да базира изчисленията за благосъстоянието на дисконтов процент в съответствие с емпиричните наблюдения, или на етични съображения. Важно е да се отбележи, че моделите на Нордхаус могат да отчитат един дисконтов процент при моделиране на индивидуалните решения на домакинствата и друг при оценката на съвкупното благосъстояние. Въпреки че най-често срещаният избор в икономиката е и в двата случая да се използва същият дисконтов процент, силен довод е, че икономиката на климата е различна, тъй като се отнася до много по-дълги перспективи, отколкото в повечето други приложения. Ако обаче за общото благосъстояние се използва различен от калибрирания за индивидуалните решения дисконтов процент, това не само променя оптималната данъчна ставка. Обикновено, ако физическите лица из-

<sup>37</sup> Влиянието на модела върху лихвените проценти е обвързано с дисконтовия фактор – наблюденията на лихвения процент се използват за неговото измерване.

ползват по-висок дисконтов процент от този, който се смята за етично оправдан при общото благосъстояние, са необходими други политики, например субсидии за спестяване и инвестиции.

Аналогично, тъй като подаръците сред (а не в) династиите играят количествено незначителна роля в реалните икономики, Нордхаус приема, че домакинствата в модела не извличат полза от благосъстоянието на други домакинства (например хора в други региони по света). Моделиращият обаче може да избере всякакви тегла за регионите, когато формира функция на социално благосъстояние. Един възможен набор от тегла е този, генериращ сегашното разпределение на потреблението в световен мащаб, но дали те са правилните тегла на благосъстоянието, пак е етичен въпрос. Отново, ако на благосъстоянието на бедните хора се придаде по-голямо тегло, това има отражения не само върху оптималните данъци върху въглеродните емисии, но и върху международните системи за трансфер.

Въпреки това на някои въпроси може да се отговори с икономически модели, вкл. ИМО, без да се налагат някакви тежести на благосъстоянието. По-конкретно, човек може да се стреми да определи политики, които водят до оптимални разпределения на Парето. Те имат свойството, че никой индивид не може да има по-добро благосъстояние, без поне някой друг да има по-лошо. Политиката, която въвежда такова разпределение, често е наричана „оптимална“. Образно казано, тази концепция увеличава „размера на пая“, но мълчи за това как трябва да се раздели.

По-нататък (най-вече) използваме думата „оптимално“ по същия начин като Нордхаус, т.е. за да се покаже тежестта на благосъстоянието, която управлява поведението на домакинствата в модела.

*Решение на модела.* Когато са зададени параметри, моделът трябва да бъде решен, а това означава намиране на правилата за вземане на решения от страна на участниците в него. Подходът за решаване на RICE и DICE се различава в различните приложения и цифрови програмни пакети, но всички модели са напълно съвместими модели за общо равновесие.

Както вече беше посочено, частните агенти в икономиката (фирми и домакинства) не отчитат никакви външни фактори. Така при пазарно равновесие те пренебрегват ефектите от собственото си потребление на изкопаеми горива върху сегашната и бъдещата производителност на факторите  $\Omega_j(T_t)A_{j,t}$ . При това допускане икономическият модел може да бъде решен със стандартни методи според пазарноравновесния подход. Например използването на енергия се определя от равновесието на енергийния пазар, което изисква пределният продукт от енергията, получен от (17), да се равнява на цената на горивото, обусловена от разходите, надценките и условието на Hotelling. Когато се използва пазарноравновесният подход за решаване на модела, всеки оптимален данък се изчислява въз основа на принципа на Pigou – той е равен на настоящата дисконтирана стойност на ефектите върху текущата и бъдещата продукция на пределната единица емисии.

Оптималното решение може да се намери директно като решение за централизирано планиране. В този случай пътят на всички ендогенни променливи (потребление, капитал и гориво) се избира така, че да максимизира претеглената сума от регионалното благосъстояние (16), предмет на ограниченията, поставени от производствените функции, факторното предлагане, циркулацията на въглерода и модела на климата. Определят се т.нар. Negishi тегла, използвани за агрегиране на регионалното благосъстояние, за да направят разпределението съответстващо на действителното разпределение на потреблението в световните региони. Решението на модела (пътят на ендогенните променливи) сега съвпада с равновесното разпределение, което би възникнало в пазарното стопанство при определен набор от цени. Когато максимизирането на централното планиране напълно отчита въздействието на емисиите от изкопаеми горива върху производителността, разпределението изисква като пазарно равновесие да се приложат данъците върху изкопаеми горива или разрешителните за емисии. Необходимите данъци или, равнозначно, пазарните цени на разрешителните за емисии произтичат от тази максимизация и следователно са оптимални предвид модела и неговите параметри.

Решението за планиране е използвано и при намиране на некооперативното решение на RICE (Nordhaus and Yang, 1996). Тогава се предполага, че всеки регион максимизира собственото си благосъстояние от уравнение (16), приемайки поведението на други региони за даденост. Тъй като регионите са сравнително големи, избрани техни емисии имат незначително влияние върху собствената им регионална производителност и благосъстояние. Тъй като обаче това въздействие е много по-малко от глобалното, смекчаването на емисиите е твърде ниско от гледна точка на глобалното благосъстояние.

Чрез манипулиране на функцията на вредите сценарии като ограниченията върху размера на приемливата промяна на климата могат да бъдат проучени чрез подход на максимизиране. Например, ако функцията на вреди е силно изпъкнала при праг от 2°C, оптималното разпределение би могло да се разглежда като зависещо от това да остане под този праг. Подобно упражнение далеч не е тривиално, тъй като много политики биха могли да задоволят температурните ограничения. Тогава е важно да се анализира дали тези политики се различават по своите последици върху благосъстоянието и ако е така, да се намери това, което изпълнява ограничението при възможно най-ниски разходи.

#### *4.3. Въвеждане на модела в употреба*

ИМО са разработени в различни измерения, които са представени в част 4.4. Въпреки това основната структура на последните версии на собствените модели DICE и RICE на Нордхаус, както и модели като CETA (Peck and Teisberg, 1992), MERGE (Manne et al., 1995), WITCH (Bosetti et al., 2006) и Golosov et al. (2014), е доста сходна с първите модели на Нордхаус.<sup>38</sup> Тези модели се из-

<sup>38</sup> Съществува и друг подход за моделиране, прилаган в инженерните и природните науки. Тук се моделира по-подробно описание на енергийния сектор и физическите последици от изменението

ползват, за да оценят последиците от различните алтернативи на политиката и последователно да симулират глобалното затопляне. Нордхаус (2014) изброява няколко ключови приложения на ИМО:

- изготвяне на проекции с последователни входове и изходи на различните компоненти на модела;
- изчисляване как алтернативните допускания формират важни променливи като продукцията, емисии, промяна на температурата и вреди;
- проследяване на последиците от алтернативните политики по последователен начин и оценка на разходите и ползите от алтернативните стратегии;
- оценяване на несигурността, свързана с алтернативните променливи и стратегии;
- изчисляване на последиците от намалената несигурност относно ключови параметри или променливи, както и оценяване на стойността на научните изследвания и новите технологии.

В тази част ще бъдат обсъдени някои от изброените приложения, вкл. тяхното количествено съдържание.

*Дефиниране и анализ на сценарии.* Приложенията често изискват ИМО да се изпълнява с различни набори от допускания. Различните *сценарии* могат например да представят различни допускания за това как ще се предприемат политики в бъдеще. Но те могат също и да проверят чувствителността към несигурни параметри, например към климата и към вредите. Моделът създава логически съгласувани прогнози, зависими от допусканията в различни сценарии, но самостоятелно не може да направи оценка на тяхната вероятност. Въпреки това тези условни прогнози са важни, особено в дискусиите за избора на политика. Например може да е трудно или дори невъзможно някои рискове да се определят количествено при сегашните познания. Тогава става важно да се анализират оптималните политики, зависещи от екзогенни ограничения, например изискването затоплянето да остане под определено ниво.

Тъй като оптималните политики, както са дефинирани тук, намират Парето ефективни решения, основани на зададени (пакети от) тегла на благосъстояние, практическото им приложение зависи от възможността да компенсират потенциалните губещи от промените в политиката. На практика липсата на глобална система за преразпределение може да направи политически невъзможно да се постигне всеобщо или дори частично съгласие относно прилагането на конкретна политика. Ето защо е от голям интерес да се анализират не само „първите най-добри“ политики, но и вторите, които изпълняват някои ограничения

---

на климата. Това моделиране е сложно и предвид наличните компютърни технологии и цифрови техники, е невъзможно да се комбинира с изрично моделиране на пазарите с агенти с поглед напред в рамка на неокласически растеж. Тези модели допълват ИМО, следвайки традицията на Нордхаус, като отговарят на друг вид въпроси – например как различните сценарии за смекчаване се превръщат в нужди от конкретни инвестиции и заместване на горивата (за по-съвременен преглед вж. Weyant, 2017).

Нобелова награда за постижения в областта на икономическите науки за 2018 г.

на разпределението. Моделите DICE/RICE и разработените впоследствие ИМО са изключително подходящи за такива анализи.

Много сценарии са анализирани през годините, откакто Нордхаус е построил първия ИМО. Като пример ще представим резултата от скорошно проучване (Nordhaus, 2017), което решава и симулира последния вариант на DICE модела (DICE-2016) за четири сценария:

1. *Базов* – не се приемат политики за борба с изменението на климата, които да надхвърлят ограничените политики, утвърдени през 2015 г.<sup>39</sup>

2. *Оптимален* – избрани са пътища за политиките за промяна на климата, чрез които да се постигне максимално агрегирано (претеглено) благосъстояние в рамките на модела от 2015 г.

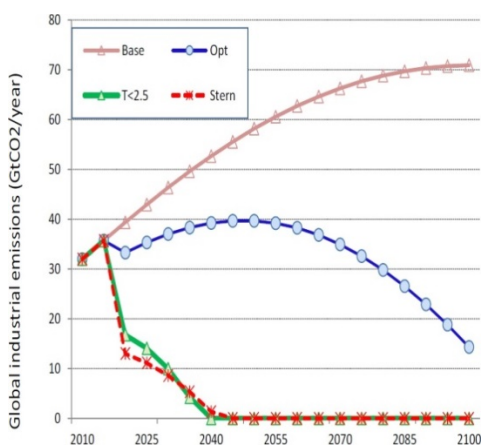
3. *Температурен лимит* – избират се оптимални пътища на политики, предмет на по-нататъшно ограничение глобалната температура да не по-висока от 2.5°C над средната стойност от 1900 г.

4. *Дисконтиране на Stern* – за субективен дисконтов процент, определен на 0.1% годишно, са избрани оптимални пътища на политики, както е предложено във влиятелния The Stern Review (Stern, 2007).

Поради голямата несигурност за много от параметрите на модела, Нордхаус (2017) решава модела за голям набор от параметри. Във фиг. 3 и 4 са представени изходни модели за средни (*най-добри предположения*) стойности на параметрите. Във фиг. 3 е показан пътят на емисиите, а във фиг. 4 са симулирани температури в тези четири сценария.

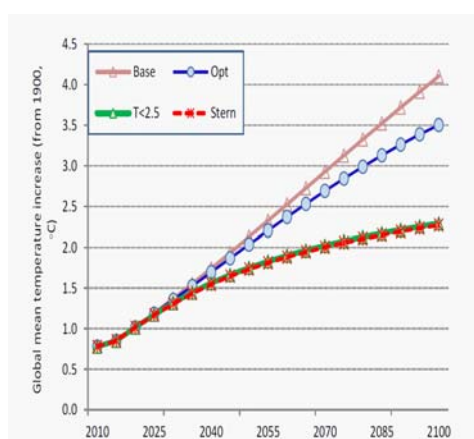
Фигура 3

Емисии на CO<sub>2</sub> в четири сценария.  
Прогнози от DICE-2016R2



Фигура 4

Увеличаване на средната глобална температура. Прогнози от DICE-2016R2



<sup>39</sup> Нордхаус оценява тези политики като еквивалентни на въглероден данък от 2 USD/метричен тон CO<sub>2</sub>.



Както се вижда от фиг. 3, в четирите сценария емисиите са доста различни. Базовият сценарий предполага непрекъснато увеличаване, а двата оптимални сценария – температурен лимит и дисконтиране на Stern, напротив, включват радикални и незабавни намаления на емисиите. Оптималният сценарий, който според Нордхаус е най-доброто предположение за параметрите, води до малко увеличение на емисиите, последвано от намаляващи емисии от средата на века.

Както беше отбелязано, фиг. 4 показва как се развива глобалната средна температура в четирите сценария. Поради инерцията в земната система разликите не са много големи до втората половина на века, но към края на столетието диапазонът максимум-минимум е близо 2°C.

*Социалната цена на въглерода.* Друго основно приложение на моделите DICE и RICE е за изчисляване на *социалната цена на въглерода*. Тя е дефинирана като настоящата стойност на потока от вреди, произтичащи от пределна единица емисии на изкопаеми горива. При липса на взаимодействия с други пазарни неуспехи социалната цена на въглерода съвпада с оптималния данък. За да се изчисли тази цена, се изисква пълен ИМО. По-конкретно: (1) модулът на въглеродния цикъл е необходим, за да се предвиди как една единица въглеродни емисии влияе върху развитието на бъдещата концентрация на атмосферен CO<sub>2</sub>; (2) климатичният модул е необходим, за да се прогнозира как измененият път на концентрация на CO<sub>2</sub> променя климата (глобалните температури), и (3) икономическият модел е необходим за оценяване на икономическите и социалните вреди.

В първия ред на следващата таблица е посочена социалната цена на въглерода, т.е. оптималният въглероден данък на модела за метричен тон CO<sub>2</sub>, като се вземат предвид най-добрите предположения на Нордхаус за параметрите. Вторият ред представя данъка, необходим за ограничаване на затоплянето до 2.5°C по най-ефективния начин. Третият ред е оптималният данък, като се има предвид ниската дисконтова норма от 0.1% годишно, предложена от Stern (2007). Ясно е, че политиките са много различни – двата сценария с рязко и незабавно намаляване на емисиите от фиг. 3 изискват 5-10 пъти по-високи данъчни ставки от социалната цена на въглерода в модела. Както се вижда от таблицата, и трите профила се покачват с течение на времето – наклонът нагоре отразява главно ръста на БВП и реалните заплати.

Таблица

Въглеродни данъци 2010 (USD)

	2015 г.	2020 г.	2025 г.	2030 г.	2050 г.
Оптимален (най-добро предположение за параметъра на Нордхаус)	29.5	35.3	49.1	64.0	153.5
Оптимален (температурен лимит < 2.5°C)	184.1	229.0	284.0	351.0	1008.4
Оптимален (дисконтиране на Stern на 0.1%)	256.5	299.6	340.7	381.7	615.6

Нобелова награда за постижения в областта на икономическите науки за 2018 г.

*Несигурност на параметрите.* Както беше посочено, някои параметри на модела са много несигурни. Колко надеждни са прогнозите от модела, основан на набор от най-добри предположения за параметри? Един от начините за решаване на този въпрос е да се определи разпределението на неизвестните параметри и моделът да се реши за всяка комбинация от параметри. Тази процедурата е лесна за прилагане в ИМО като DICE/RICE и позволява на потребителя да прецени надеждността на ключовите прогнози на модела в различни измерения.

Нордхаус (2017) предоставя такъв анализ на чувствителността за пет ключови несигурни параметъра:

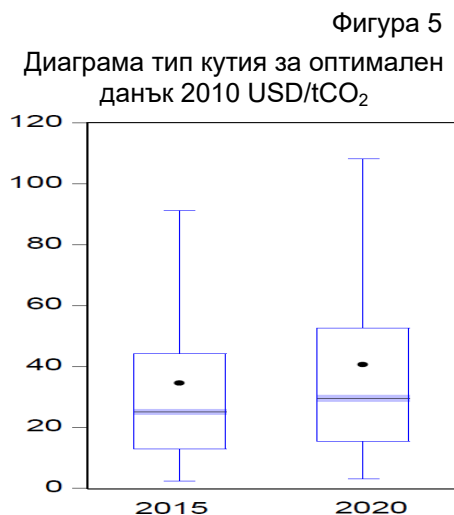
- 1) коефициент на температурата на квадрат във функцията за вреди;
- 2) темп на растеж на агрегирана производителност;
- 3) скорост, с която икономиката се декарбонизира чрез техническа промяна;
- 4) чувствителност на климата;
- 5) капацитет на междинния въглероден склад  $M^U$  за съхраняване на въглерод.

За всеки от тях са зададени 5 квинтилни променливи, получавайки  $5^5 = 3,125$  или 125 възможни комбинации от параметри. Моделът се решава за всяка от тези комбинации както за оптималното решение, така и за обичайното. Това води до разпределение на ключовите променливи, които представляват интерес. Например оптималният данък в началото на симулационния период (2015 г.) се разпределя със средна стойност от 32.5 USD/тон CO<sub>2</sub> и стандартно отклонение от 28.6. Без допълнителна политика по отношение на климата температурата през 2100 г. има средно увеличение от 4.2°C със стандартно отклонение от 1.12°C. При оптималния данък нивото и променливостта са по-ниски, съответно на 3.5°C и 0.75°C. Причината за по-ниската променливост е, че несигурността на параметрите е противодействана от вариациите в оптималната данъчна ставка. Например, ако чувствителността на климата е висока, това изисква по-големи данъци.<sup>40</sup>

Характеристиките на надеждността на модела могат да бъдат илюстрирани с диаграми тип кутия. Във фиг. 5 е показана такава диаграма за оптималния данък. Точката е средната стойност от 3125 симулации, кутията показва средните 50% от реализациите, а баровете съдържат 99% от реализациите (за нормално разпределение). Ясно е, че несигурността относно параметрите води до голяма неопределеност на политиката. Тази констатация изисква повишено внимание и комбиниране на прогнози, основаващи се на най-добрите предположения, с анализи за надеждност от такъв вид.<sup>41</sup>

<sup>40</sup> Възниква проблем с научаването. Реално политиката трябва да бъде решена, преди да се реши несигурността относно параметрите. Това създава предпазен мотив за строга политика. Този въпрос е обсъден в следващата част.

<sup>41</sup> Gillingham et al. (2018) разширяват анализа на несигурността, за да обхванат неопределеността на модела, и установяват, че несигурността на параметрите е по-важна от неопределеността на модела, предвид съществуващия набор от модели.



*Създаване на политики в реалния свят.* Как трябва да се провежда на практика политиката в областта на климата? Как е била провеждана досега? Ще обсъдим накратко тези въпроси, като акцентираме върху това как действителната политика е свързана с политиките, предложени в изследванията на Нордхаус.

В RICE и DICE равновесието на децентрализирания пазар, където външните колективни климатични вреди от въглеродните емисии балансират частните ползи от употребата на въглерод, изисква емитентите да се съобразяват с правилните пределни разходи за емитиране. Моделът обаче не споменава дали този принцип трябва да се прилага чрез въглеродни данъци или търгуеми разрешителни за емисии. Въпреки че може да има практически предимства от използването на данък, на практика системите за търговия с емисии се използват също поне толкова често.<sup>42</sup> И в двата случая въглеродните емисии са скъпи за емитента, а когато цената на разрешителното е равна на данъка, двете интервенции са еквивалентни. Данните от годишния доклад на Световната банка за системите за ценообразуване на въглеродните емисии (World Bank, 2018) показват, че с времето броят на схемите за ценообразуване на въглерода се увеличава с доста бърз темп. По такъв начин приходите от тези схеми нарастват от 52 млрд. USD през 2017 г. до 82 млрд. USD през 2018 г. Схемите за ценообразуване на въглерода, които съществуват сега или се планира да бъдат въведени, покриват около 20% от глобалните емисии. Това е далеч от пълното глобално покритие, което Нордхаус и по-общо изследванията климат-икономика предписват.

<sup>42</sup> С несигурността данъкът дава възможност на формиращите политики за по-добър контрол върху цената на емисиите, докато търговията с емисии увеличава контрола върху количеството (за ранно и общо третиране на въпроса за използването на цени или количества като контролна променлива вж. Weitzman, 1974).

Нобелова награда за постижения в областта на икономическите науки за 2018 г.

Системата за търговия с емисии в ЕС (EU ETS) е най-голямата сред въведените системи за ценообразуване на въглерода и покрива около 45% от емисиите на Съюза. Проблемът при нея е ниската цена на емисионните права в сравнение с очакваните социални разходи за въглерод. Неотдавнашните реформи в системата се опитват да намалят предлагането на неизползвани права за емисии и оттогава цените започват да се доближават до оптималните данъци, предписани от най-добрата версия на DICE-2016. Размерът на планираната национална система за търговия с емисии в Китай ще бъде подобен на EU ETS (World Bank, 2018).

Монетизираната стойност на вредите от въглеродните емисии е полезна и за други области на правенето на политики. Например Агенцията за опазване на околната среда на САЩ (Environmental Protection Agency – EPA), в сътрудничество с други агенции е изготвила оценки на социалната цена на въглерода (social cost of carbon – SCC), която да се използва в анализите на разходите и ползите от федералните инициативи и регламенти. Според EPA целта на изготвянето на тези оценки е „да се позволи на агенциите да включат социалните ползи от намаляването на емисиите на въглероден диоксид (CO<sub>2</sub>) в анализите на разходите и ползите от регулаторните действия“ (EPA, 2016). Ключов елемент на анализа е DICE моделът на Нордхаус. Както беше посочено, SCC зависи от използвания дисконтов процент – параметър с важен етичен компонент. Във връзка с това публикуваният труд на EPA дава различни стойности за SCC за различни дисконтови проценти. Последната актуализация от август 2016 г. посочва текущата SCC на 36 и 56 USD на тон CO<sub>2</sub> при дисконтови проценти съответно от 3 и 2.5% годишно.<sup>43</sup> EPA извършва също и квантификация на несигурността, заложена в SCC – например 95-ия персентил на SCC с 3% дисконтиране е 105 USD/метричен тон CO<sub>2</sub>. От 2018 г. обаче EPA вече не предоставя оценки на SCC.

#### 4.4. Разширения и развития на модела

Разбирането за процесите, свързани с изменението на климата и с това как то се отразява върху икономиката и обществото, се развива бързо. В тази част ще бъдат разгледани редица важни разширения и развития на модела.

*Актуализации на параметри.* Моделите DICE и RICE на Нордхаус се адаптират лесно към постоянния поток от нови знания от природонаучните и икономическите общности. Тези модели са с отворен код и се предлагат в прозрачни и удобни за ползване версии във вид на електронни таблици. За потребителите не е трудно да променят параметрите на модела, например тези във функцията на вреди. Самият Нордхаус непрекъснато актуализира своите модели и документира тяхното развитие.

<sup>43</sup> Трябва да се отбележи, че тези цифри представят глобалните вреди, свързани с пределните емисии. EPA прави и оценки, в които са включени само вреди в САЩ. Те са по-малки, насочвайки към големия проблем с координацията, свързан с прилагането на подходящи в световен мащаб политики.

Съвсем скорошен пример е статията на Нордхаус от 2018 г. (Nordhaus, 2018), където се появяват няколко нови особености, вкл. обърнато е изрично внимание на покачването на морското равнище вследствие от топенето на ледниците и термичното разширение и на икономическата му цена. Друг важен пример е повторното калибриране на параметрите на циркулацията на въглерода, адаптирани към по-слабата способност на океаните да абсорбират атмосферния въглерод. Прогнозите за вредите, описани по-нататък, също са актуализирани.

Взети заедно, тези актуализации значително увеличават очакваната SCC, а по този начин и оптималния данък върху въглеродните емисии. За 25 години ревизии SCC в моделите на Нордхаус е нараснала от 5 до 31 USD на тон CO<sub>2</sub>. Нордхаус отбелязва: „Тази голяма промяна е обезпокоителна, но трябва да се признае, че има сериозна грешка в изчисленията на SCC. Изчислената (5%, 95%) връзка на несигурността за SCC в модела от 2016R е (USD6-USD93) на тон CO<sub>2</sub>. Тази широка връзка отразява комбиниращите се рискове при температурната чувствителност, растежа на продукцията, функцията на вредите и други фактори” (Nordhaus, 2017).

Ще разгледаме по-подробно развитието на промените в параметрите.

*Оценки на вредите.* Подходът „отдолу нагоре”, който стои в основата на функциите на вредите в ИМО на Нордхаус, е допълнен с подходи, предложени от други икономисти. Алтернативен и допълващ начин за оценка на съвкупните ефекти на климата върху икономическата дейност е използването на отношението в данните за икономическите резултати и температурата в редуцирана форма. Тук се използват както вариацията във времето, така и регионалните вариации, за да се установят последиците от изменението на климата. По отношение на първите Dell et al. (2014) обобщават литературата, която изследва как естествените вариации в температурните и климатичните характеристики влияят върху икономическите резултати. Те заключават, че в бедните страни загубите за производството, производителността на труда и икономическия растеж могат да са от порядъка на 1-2% на градус по Целзий. Ефектите се определят, като се използват временни температурни промени и добре идентифицирани краткосрочни каузални ефекти. Въпреки това авторите предупреждават, че от тези оценки не трябва да се правят изводи за постоянни ефекти.

Съществува и систематична връзка между географското изменение на температурата и икономическия резултат. Нордхаус (2006) използва изходни данни за 25 000 1-на-1 градус клетки от географска мрежа, за да покаже модел във формата на гърбица между температурата и резултата. Върхът на гърбицата, където се намира най-високата средна стойност на резултата на квадратен километър, е при приблизително 12°C.<sup>44</sup> При допускането, че напречното сечение между температурата и резултата е невариантно, то може да се използва, за

<sup>44</sup> Въпреки това (средната) връзка между резултата *на човек* и температурата е монотонна и отрицателна.

да се изведат последиците от изменението на климата върху глобалния БВП. Прогнозите в статията на Нордхаус сочат загуби от около няколко процента от световния БВП, ако глобалната средна температура се увеличи с 3°C (Nordhaus, 2006). Макар че тези оценки разчитат на силни допускания, те не се определят дори и като краткосрочни вариации, затова са допълващи подходите от времеви серии.

Измерването на вредите включва и отчитането на разходите и ползите от различните начини за приспособяване към изменението на климата. В някои случаи е лесно да се изчислят разходите за адаптиране. Например разходите за увеличената зависимост от климатици могат да бъдат изчислени с разумна точност. Много по-трудно е обаче да се оценят другите форми на адаптация, например миграцията. Тъй като изменението на климата засяга отделните региони по много различни начини, вероятно то ще създаде голям миграционен натиск. Миграцията е мощен адаптивен механизъм, който помага на човечеството да се справи с историческите промени в климата и има потенциала да помогне и в бъдеще. В същото време тя може да доведе до конфликти в рамките на и между страните, а свързаните с това разходи са много трудни за определяне.<sup>45</sup>

*Прагове и преломни моменти.* Функцията на вредите (15) и на климата (13), както и модулите на въглеродния цикъл (14) са гладки функции на техните движещи променливи. Функцията на вредите (15) има ограничена изпъкналост, което означава, че SCC не е много чувствителна към количеството емисии. Ясно е, че тези допускания могат да се окажат неточни. Например функцията на вредите може да стане много по-изпъкнала извън обхвата, в който може да бъде калибрирана спрямо исторически данни. Последните версии на RICE и DICE включват тази възможност, като позволяват силно изпъкнали вреди, когато глобалната средна температура достигне до определено критично ниво.

Климатът и въглеродният цикъл могат да включват прагове, извън които динамиката на климата се променя рязко. Например неговата чувствителност може да се изостри поради по-силните ефекти на обратната връзка в климатичната система, когато се премине някакъв глобален праг на температурата. Промененият климат може да доведе до изменения в динамиката на въглеродния цикъл, предизвиквайки складовете да освобождават, а не да абсорбират атмосферния въглерод след определен момент. Тъй като нелинейностите от този вид могат да бъдат много и да взаимодействат помежду си, общата динамика на земната планета става много трудна за прогнозиране.<sup>46</sup> В редица статии Weitzman твърди, че основна грижа на политиката трябва да бъдат малко вероятните катастрофални събития – те трябва да мотивират значително по-строга политика по отношение на климата, отколкото най-вероятните (Weitzman, 2009, 2014; Wagner and Weitzman, 2015). Според него политиката

---

<sup>45</sup> За проучвания на миграцията, свързана с климата, вж. например Desmet and Rossi-Hansberg, 2015; Feng, Krueger, and Oppenheimer, (2010; Harari and la Ferrara, 2018.

<sup>46</sup> За преглед вж. Lenton et al., 2008.

в областта на климата се превръща в застрахователна полица, която намалява риска от малко вероятни катастрофални събития срещу приемливо ниска застрахователна премия. Как нелинейностите в биофизичните и икономическите системи могат да взаимодействат, за да генерират прагове и множество стабилни състояния, също е фокус на разширяващата се литература, свързана с устойчивостта на нашата глобална система (вж. например Folke, 2006; Steffen et al., 2015). Alley et al. (2003) представят ранно описание на последиците от политиката, в случай че се допусне възможност за рязка промяна на климата.

Фундаментален проблем в този контекст е трудността да се прецени вероятността на такива малко вероятни усложнения. ИМО могат да се използват информативно, за да се оценят последициите от подобни усложнения, ако те се случат. За тази цел Нордхаус (2013) разглежда две екстремни стойности на параметри – една в областта на естествените науки и една в икономическата област. По-конкретно това са чувствителност на климата 10 и праг на вредите 3°C, над който температурният коефициент във функцията на вреди нараства от 2 на 6. В комбинация тези стойности увеличават оптималния въглероден данък с фактор осем, а при липса на политика резултатът е катастрофален – социалната цена на въглерода в обичайния сценарий се повишава повече от 100 пъти и икономиката се срива, като потокът на вреди достига до 96% от световния БВП.

Въпреки че науката все още не е открила колко могат да се повишат глобалните температури, преди да се стигне до критичната точка на допустимост, важно е тези характеристики да бъдат включени в модели, които се опитват да определят количествено социалната цена на въглерода и оптималната политика. Рамката на DICE/RICE се оказва способна да включи внезапни промени, например във въглеродния цикъл и климатичните модули, въпреки че понякога трябва да се използва по-сложен механизъм за решение. Lemoine и Traeger (2016) разширяват версията на DICE, като позволяват преломни моменти във всичките три подмодула на модела. Техният извод е, че тези моменти удвояват социалната цена на въглерода. Lontzek, Cai, Judd и Lenton (2016) добавят към DICE редица събития, вкл. безвъзвратното топене на ледниците в Гренландия, изсъхването на тропическите гори на Амазонка и по-голямата амплитуда на цикъла Ел Нињо Южно трептене (El Niño Southern Oscillation). Тези преломни събития са стохастични и се допуска, че вероятността им расте по отношение на средната глобална температура. Освен това въздействието може да се натрупва бавно, но необратимо. Включването на тези събития повишава SCC с около 50%.<sup>47</sup>

*Дисконтиране.* The Stern Review (2007) е поръчан от министъра на финансите на Великобритания Гордън Браун, за да предостави насоки в политиката в областта на климата. Прегледът има огромно въздействие, а един от ключо-

<sup>47</sup> Сега има доста литература, разглеждаща праговете и преломните моменти в ИМО (вж. например Gjerde, Grepperud, and Kverndokk, 1999; Castelnovo, Moretto, and Vergalli, 2003 и van der Ploeg and de Zeeuw, 2015).

вите му ресурси е работата на Нордхаус, въпреки че в него са използвани и други модели за оценка и той налага своя избор за различни параметри. The Stern Review твърди, че е нецелесъобразно да се дисконтира благосъстоянието на бъдещите поколения и призовава да се използва много нисък дисконтов процент при изчисляването на SCC. Докладът използва дисконтов процент на благосъстоянието от 0.1% годишно за разлика от DICE/RICE, които предполагат дисконтов процент около 1.5%.

Както беше посочено, срещу (високите) дисконтови проценти за бъдещото благосъстояние може да се приложи етичен аргумент. Същевременно (и в по-голяма степен в съответствие с подхода на Нордхаус), когато се използват пазарни цени, за да се разбере как самите домакинства намаляват бъдещото благосъстояние, обикновено се установява дисконтов процент на благосъстояние в размер на или около процент годишно. Освен това възвръщаемостта на пазара предоставя информация за алтернативни начини за прехвърляне на ресурси към бъдещето. Ако сегашните поколения искат да се заемат с такива трансфери, може да се твърди, че те трябва да направят това по най-ефективния начин – смекчаването на климатичните изменения е само една възможност. Въпреки това в анализите на разходи и ползи от големи инфраструктурни проекти винаги е било дискутирано кои дисконтови проценти на благосъстояние да се използват. Тези въпроси са изключително важни и имат голямо количествено значение в областта на икономиката на климата, където времевият хоризонт е особено продължителен.

Тъй като въглеродът, емитиран в атмосферата, остава там за много дълго време (голяма част остава за хиляди години), сегашните емисии могат да причинят изключително сериозни вреди в много далечно бъдеще. Дисконтов процент от 0.1% предполага, че теглото на благосъстоянието след 500 години ще е 0.60, а дисконтов процент от 1.5% годишно предполага тежест от 0.0005. Като се има предвид това, не е трудно да се разбере, че при равни други условия по-ниският дисконтов процент води до много по-висока социална цена на въглерода. За да илюстрираме тази точка в рамката на ИМО, приемаме, че вредите на единица излишък от въглерод в атмосферата са постоянен дял от БВП (което е приблизително случаят на DICE/RICE), ползата от потреблението е логаритмична, а темпът на спестявания е постоянен. Тогава ясно се вижда, че SCC е пропорционална на продължителността на въглерода с дисконтов процент на тежестите на социалната издръжка, дефинирани като

$$D(p) = \int_0^{\infty} (1 - d_s) e^{-ps} ds,$$

където  $1 - d_s$  е дялът на въглерода, който остава в атмосферата  $s$  периоди след емитиране, а  $p = 1 - \beta$  – дисконтовият процент на благосъстояние.<sup>48</sup>

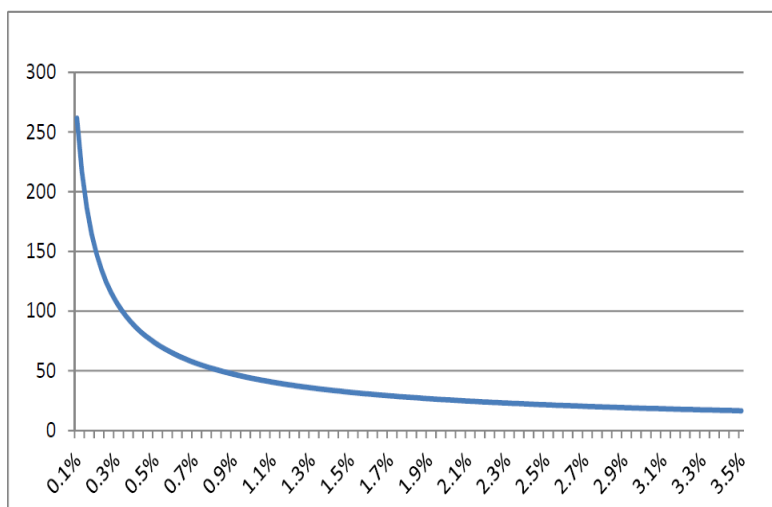
<sup>48</sup> Социалната цена на въглерода в период  $t$  е  $\int_0^{\infty} e^{-ps} \frac{u_c(c_{t+s})}{u_c(c_t)} \frac{\partial Y_{t+s}}{\partial S_{t+s}} \frac{\partial Y_{t+s}}{\partial E_t} ds$ .



Фиг. 6 показва функцията  $D(p)$  за стандартни допускания за амортизация на въглерода от IPCC (2007).<sup>49</sup>

Фигура 6

Фактор на пропорционалност във формулата за оптимален данък с логаритмична полезност и постоянно спестяване



При равни други условия социалната цена на въглерода е 8.2 пъти по-висока при дисконтиран процент на полезност 0.1, а не 1.5% годишно. Така ИМО предполагат много висока чувствителност на SCC към дисконтовия процент, което е съществен резултат. „При равни други условия“ обаче е важна уговорка. Ако все пак се изисква моделът да генерира реалистични възвръщаемости на капитала, намаляването на дисконтовия процент на благосъстояние изисква да се намали интертемпоралната еластичност на заместване. Тогава ефектът от намаляването на дисконтовия процент на благосъстояние върху оптималния данък е до голяма степен заглушен (Nordhaus, 2014).

Друга възможност е свързана с убеждението (по нормативни причини), че хората средно поставят много малко тегло на бъдещето и затова спестяват (и

с логаритмична полезност, (приблизително) константен темп на спестявания и при допускането

$$\frac{\partial Y_{t+s}}{\partial S_{t+s}} = \gamma Y_{t+s}, \text{ то се редуцира до } \gamma Y_t D(p).$$

<sup>49</sup>  $1 - d(s) = a_0 + \sum_{i=1}^3 (a_i e^{-\frac{s}{T_i}})$ , с  $a_0 = 0.2017$ ,  $a_1 = 0.259$ ,  $a_2 = 0.338$ ,  $a_3 = 0.186$ ,  $\tau_1 = 172.9$ ,  $\tau_2 = 18.51$  и  $\tau_3 = 1.186$ , при  $S$  измерено в години.

инвестират) твърде малко. Тогава оптималният път на въглеродните данъци, изчислен при нисък дисконтов процент, ще трябва да бъде придружен от (глобална) субсидия за спестявания, за да се приложи равновесното решение, свързано с тези данъци.

*Технология.* Технологичните промени са от първостепенно значение за реакцията на икономиката на изменението на климата и за политическите инструменти, използвани за справянето с него. Оригиналните модели RICE/DICE са построени върху модела на Солоу за екзогенен растеж, но по-късни развития следват духа на Ромър и ендогенизираните технологични подобрения. Важен пример е WITCH моделът (World Induced Technical Change Hybrid Model, Bosetti et al., 2006). Той започва от основната структура на RICE, но добавя по-подробно описание на енергийния сектор и възможността за секвестриране на въглерода. Технологична промяна, която намалява разходите за предлагане на енергия (от изкопаеми източници и зелена), се моделира в съответствие с два ендогенни процеса. Единият е „учене чрез правене“, при който производствените разходи зависят от глобалния наличен капацитет. Както и в статията на Ромър (Romer, 1986), това създава външен фактор и води до твърде бавно приемане на нови технологии в нерегулирана икономика. Другият процес е целенасочена научно-изследователска и развойна дейност, както в статия на Ромър (Romer, 1990), ориентирана към енергийна ефективност и производство на биогорива, което също предизвиква преливане – идеите, създадени от НИРД в един регион, могат да се използват в други региони, макар и с изоставане. Други примери за модели, изградени върху RICE/DICE с ендогенна технологична промяна, са тези, основани на насочена техническа промяна, които представихме в част 3.4.

*Политическа икономика.* Стандартният ИМО разглежда политиката като екзогенен избор – тя няма елементи на „политическа икономия“. И все пак ограниченията за прилагане могат да бъдат от решаващо значение за такива политики. Една от причините е, че обхватът на политиката е глобален и поради това включва много региони и държави. За прилагане на оптимално ценообразуване на въглеродните емисии може да са необходими схеми, свързани с тази глобална компенсация. Друга причина е, че много дългият хоризонт на политиката може да се сблъска с краткосрочните ѝ перспективи.

ИМО могат да бъдат полезни за положителни анализи на политиката. Nordhaus и Yang (1996) например използват модела DICE, за да сравнят оптималния данък на въглерод от изкопаеми горива с данъка, който би довел до равновесие на Наш без международно сътрудничество. Техните резултати показват, че глобалното сътрудничество е от ключово значение. Без сътрудничество политиката на равновесие би довела до средна данъчна ставка, която е едва 1/25 от глобалния оптимален данък. Литературата на политическата икономика относно промените в климата е важна нова област на изследване (за ранни проучвания вж. Kolstad and Toman, 2005, а за скорошен принос към теоретичната литература за споразумения за климата, вж. Battaglini and Harstad, 2016).

## 5. Заключение

Пол М. Ромър и Уилям Д. Нордхаус разработват нови инструменти за анализ на дългосрочното развитие. От дългосрочна глобална перспектива технологичните промени и изменението на климата са ключови аспекти на продължителен и устойчив дългосрочен икономически растеж. Двамата учени имат силно влияние в една широка изследователска общност. И двамата започват от една и съща изходна точка, а именно модела на неокласическия растеж, и я допълват с ключови движещи сили на дългосрочната икономическа активност – технологично развитие и климат, които са разглеждани от много стопански историци, но възприемани като външни (екзогенни) за системата от повечето икономисти. И Ромър, и Нордхаус наблягат на външните фактори в своите анализи на желани дългосрочни резултати, като по този начин открояват потенциално важната роля на икономическата политика и предлагат нови насоки за нейното проектиране.

В перспектива обединената работа на Пол М. Ромър и Уилям Д. Нордхаус дава възможност на изследователската общност да се заеме с дългосрочните проблеми, свързани с климата, предлагането на енергия и устойчивостта, като изучава политиката на правителствата заедно с ендегенната технологична промяна в световната пазарна икономика.

### Използвана литература:

*Acemoglu, D.* (1998). Why Do New Technologies Complement Skills? Directed Technical Change and Wage Inequality. *Quarterly Journal of Economics*, 113(4), 1055-1089.

*Acemoglu, D.* (2002). Directed Technical Change. *Review of Economic Studies*, 69(4), 781-809.

*Acemoglu, D., J. A. Robinson, and T. Verdier* (2017). Asymmetric Growth and Institutions in an Interdependent World. *Journal of Political Economy*. 125(5), 1245–1305.

*Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, and D. Hemous* (2012) The Environment and Directed Technical Change. *American Economic Review*, 102(1), 131-166.

*Aghion, P., U. Akcigit, A. Bergeaud, R. Blundell, and D. Hemous* (2018). Innovation and Top-Income Inequality, forthcoming in *Review of Economic Studies*.

*Aghion, P., M. Dewatripont, and J. Stein* (2008). Academic Freedom. Private-Sector Focus. and the Process of Innovation. *Rand Journal of Economics*. 39(3), 617-635.

*Aghion, P., and P. Howitt* (1992). A Model of Growth through Creative Destruction. *Econometrica*. 60(2), 323-351.

*Aghion, P., and P. Howitt* (1998). *Endogenous Growth Theory*. Cambridge. MA: MIT Press.

*Akcigit, U., M. A. Celik, and J. Greenwood* (2016). Buy, Keep or Sell: Economic Growth and the Market for Ideas. *Econometrica*, 84(3), 943-984.

*Alley, R. B., J. Marotzke, W. D. Nordhaus, J. T. Overpeck, D. M. Peteet, R. A. Pielke Jr., R. T. Pierrehumbert, P. B. Rhines, T. F. Stocker, L. D. Talley, and J. M. Wallace* (2003). Abrupt Climate Change. *Science*, 299(5615), 2005-2010.

*Arrhenius, S.* (1896). On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41, 237-275

Нобелова награда за постижения в областта на икономическите науки за 2018 г.

- Barro, R. (1990). Government Spending in a Simple Model of Endogenous Growth. *Journal of Political Economy*, 98(5), 103-125.
- Barro, R. (2015). Convergence and Modernisation. *Economic Journal*, 125(585), 911-942.
- Battaglini, M., and B. Harstad (2016). Participation and Duration of Environmental Agreements. *Journal of Political Economy*, 124(1), 160-204.
- Bloom, N., C. I. Jones, J. Van Reenen, and M. Webb (2017). Are Ideas Getting Harder to Find?. NBER Working Paper 23782.
- Bosetti, V., C. Carraro, M. Galeotti, E. Massetti, and M. Tavoniet (2006). WITCH A World Induced Technical Change Hybrid Model. *The Energy Journal*, 27(1), 13-37.
- Cass, D. (1965). Optimum Growth in an Aggregative Model of Capital Accumulation. *Review of Economic Studies*, 32(3), 233-240.
- Castelnuovo, E., M. Moretto, and S. Vergalli (2003). Global Warming. Uncertainty and Endogenous Technical Change. *Environ. Model. Assess*, 8(4), 291-301.
- Dasgupta, P., and G. Heal (1974). The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. *Review of Economic Studies*, 41(5), 3-28.
- Dell, M., B. Jones, and B. Olken (2014). What Do We Learn from the Weather? The New Climate-Economy Literature. *Journal of Economic Literature*, 52(3), 740-798.
- Desmet, K. and E. Rossi-Hansberg (2015). On the Spatial Economic Impact of Global Warming. *Journal of Urban Economics*, 88, 16-37.
- Dixit, A. K., and J. E. Stiglitz (1977). Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity. *American Economic Review*, 67(3), 297-308.
- EPA (2016). EPA homepage January 2017, <https://19january2017snapshot.epa.gov/climatechange/social-cost-carbon.html>
- Feng, S., A. Krueger, and M. Oppenheimer (2010). Linkages among Climate Change, Crop Yields and Mexico-US Cross-border Migration. *Proceedings from the National Academy of Sciences*, 107(32), 14257-14262.
- Folke, C. (2006). Resilience: The Emergence of a Perspective for Social-Ecological Systems Analyses. *Global Environmental Change*, 16(3), 253-267.
- Garcia-Macia, D., C.-T. Hsieh, and P. J. Klenow (2016). How Destructive is Innovation? NBER Working Paper 22953.
- Gillingham, K., W. D. Nordhaus, D. Anthoff, V. Bosetti, H. McJeon, G. Blanford, P. Christensen, J. Reilly, and P. Sztorc (2018). Modeling Uncertainty in Integrated Assessment of Climate Change: A Multimodel Comparison. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 5(4), 791-826.
- Gjerde, J., S. Grepperud, and S. Kverndokk (1999). Optimal Climate Policy under the Possibility of a Catastrophe. *Resour. Energy Econ.*, 21, 289-317.
- Golosov, M., J. Hassler, P. Krusell, and A. Tsyvinski (2014). Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium. *Econometrica*, 82(1), 41-88.
- Grossman, G. M. and E. Helpman (1991a). Quality Ladders in the Theory of Growth. *Review of Economic Studies*, 58(1), 43-61.
- Grossman, G. M., and E. Helpman (1991b). *Innovation and Growth in the Global Economy*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Harari, M., and E. La Ferrara (2018). Conflict, Climate, and Cells: A Disaggregated Analysis *Review of Economics and Statistics*, forthcoming.
- Hotelling, H. (1931). The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 39(2), 137-175.

IPCC (1996). Intergovernmental Panel on Climate Change. *The Science of Climate Change. The Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J.P. Houghton, L. G. Meira Filho, B.A. Callendar, A. Kattenberg, and K. Maskell (eds.). Cambridge. UK: Cambridge University Press.

Jones, C. I. (1995a). R&D-based Models of Economic Growth. *Journal of Political Economy*, 103(4), 759-784.

Jones, C. I. (1995b). Time Series Tests of Endogenous Growth Models. *Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 495-525.

Jones, C. I. (1997). Population and Ideas: A Theory of Endogenous Growth. NBER Working Paper 6285.

Jones, C. I. (1998). *Introduction to Economic Growth*. New York, NY: Norton.

Jones, C. I. (1999). Growth: With or Without Scale Effects? *American Economic Review*, Papers and Proceedings, 89(2), 139-144.

Kaldor, N. (1957). A Model of Economic Growth. *Economic Journal*, 67(268), 591-624.

Kolstad, C. and M. Toman (2005). The Economics of Climate Policy. In: Maler K-G. and J. R. Vincent (eds.). *Handbook of Environmental Economics*, Vol. 3. 1562-1593, Amsterdam: Elsevier.

Koopmans, T. (1965). On the Concept of Optimal Economic Growth. In: *The Economic Approach to Development Planning*, 225-287. Chicago, IL: Rand McNally.

Kortum, S. (1997). Research, Patenting, and Technological Change. *Econometrica*, 65(6), 1389-1420.

Kremer, M. (1993). Population Growth and Technological Change: One Million B.C. to 1990. *Quarterly Journal of Economics*, 108(3), 681-716.

Lemoine, D., and C. P. Traeger (2016). Economics of Tipping the Climate Dominoes. *Nature Climate Change*, 6(5), 514-519.

Lenton, T. M., H. Held, E. Kriegler, J. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf, and H. J. Schnellhuber (2008). Tipping Elements in the Earth's Climate System. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1786-1793.

Lucas, R. (1988). On the Mechanics of Economic Development. *Journal of Monetary Economics*, 22(1), 3-42.

Lontzek, T., Y. Cai, K. L. Judd, and T. M. Lenton (2015). Stochastic Integrated Assessment of Climate Tipping Points Indicates the Need for Strict Climate Policy. *Nature Climate Change*, 5, 441-444.

Mankiw, N. G., D. Romer, and D. N. Weil (1992). A Contribution to the Empirics of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 107(2), 407-437.

Manne, A., R. Mendelsohn, and R. Richels (1995). MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies. *Energy Policy*, 23(1), 17-34.

Mendelsohn, R., W. D. Nordhaus, and D. Shaw (1994). The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *American Economic Review*, 84(4), 753-771.

Nordhaus, W. D. (1974). Resources as a Constraint on Growth. *American Economic Review*, 64(2), 22-26.

Nordhaus, W. D. (1975). Can We Control Carbon Dioxide? IIASA Working Paper, 75-63. Vienna, Austria.

Nordhaus, W. D. (1977). Economic Growth and Climate: The Case of Carbon Dioxide. *American Economic Review*, 67(1), 341-346.

Нобелова награда за постижения в областта на икономическите науки за 2018 г.

Nordhaus, W. D. (1994a). *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*. Cambridge, MA: MIT Press.

Nordhaus, W. D. (1994b). Expert Opinion on Climate Change. *American Scientist*, 82, 920-937.

Nordhaus, W. D. (2013). Integrated Economic and Climate Modeling. Chap 16. *Handbook of CGE Modeling, Vol. 1*, Amsterdam: Elsevier.

Nordhaus, W. D. (2014). Estimates of the Social Cost of Carbon: Concepts and Results from the DICE-2013R Model and Alternative Approaches. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1, 273-312.

Nordhaus, W. D. (2017). Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. NBER Working Paper 22933.

Nordhaus, W. D. (2018). Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE model, 1992-2017. NBER Working Paper 23319.

Nordhaus, W. D., and J. Boyer (2000). *Warming the World: Economic Models of Global Warming*. Cambridge, MA: MIT Press.

Nordhaus, W. D., and Z. Yang (1996). A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies. *American Economic Review*, 86(4), 741-765.

North, D. (1981). *Structure and Change in Economic History*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Parente, S., and E. C. Prescott (1994). Barriers to Technology Adoption and Development. *Journal of Political Economy*, 102(2), 298-321.

Peck, S. C., and T. J. Teisberg (1992). CETA: A Model for Carbon Emissions Trajectory Assessment. *The Energy Journal*, 13(1), 55-177.

Pigou, A. C. (1920). *The Economics of Welfare*. London, UK: MacMillan and Co.

Ramsey, A. S. (1928). A Mathematical Theory of Saving. *Economic Journal*, 38(152), 543-559.

Rebelo, S. (1991). Long-Run Policy Analysis and Long-Run Growth. *Journal of Political Economy*, 99(3), 500-521.

Rivera-Batiz, L. A., and P. M. Romer (1991). Economic Integration and Endogenous Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 106(2), 531-555.

Romer, P. M. (1986). Increasing Returns and Long-Run Growth. *Journal of Political Economy*, 94(5), 1002-1037.

Romer, P. M. (1987a). Growth Based on Increasing Returns Due to Specialization. *American Economic Review, Papers and Proceedings*, 77(2), 56-62.

Romer, P. M. (1987b). Crazy Explanations for the Productivity Slowdown. In: Fischer, S. (ed.). *NBER Macroeconomics Annual*, 2, 163-210.

Romer, P. M. (1990). Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy*, 98(5), S71-S102.

Romer, P. M. (1993). Two Strategies for Economic Development: Using Ideas and Producing Ideas. In: *Proceedings of the World Bank Annual Conference of Development Economics 1992*. Washington, DC: World Bank.

Royal Swedish Academy of Sciences (2004). Advanced Information on the Bank of Sweden Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel: Finn Kydland and Edward Prescott's Contribution to Dynamic Macroeconomics: The Time Consistency of Economic Policy and the Driving Forces behind Business Cycles.

- Schumpeter, J. A.* (1942). *Capitalism. Socialism and Democracy*. New York, London: Harper & Brothers.
- Segerström, P. T., C. A. Anant, and E. Dinopoulos* (1990). A Schumpeterian Model of the Product Life Cycle. *American Economic Review*, 80(5), 1077-1091.
- Shell, K.* (1967). A Model of Inventive Activity and Capital Accumulation. In: Shell, K. (ed.). *Essays on the Theory of Optimal Economic Growth*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Solow, R. M.* (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94.
- Steffen, W., K. Richardson, J. Rockström, S. E. Cornell, I. Fetzer, E. M. Bennett, R. Biggs, S. R. Carpenter, W. de Vries, C.A. de Wit, C. Folke, D. Gerten, J. Heinke, G. M. Mace, L. M. Persson, V. Ramanathan, B. Reyers, and S. Sörlin* (2015). Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science*, 347(6223).
- Stern, N.* (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. London, UK: Cambridge University Press.
- Stokey, N. L., and S. Rebelo* (1995). Growth Effects of Flat-Rate Taxes. *Journal of Political Economy*, 103(3), 519-550.
- Summers, R., and A. Heston* (1984). Improved International Comparisons of Real Product and its Composition: 1950-1980. *Review of Income and Wealth*, June, 207-262.
- Swan, T.* (1956). Economic Growth and Capital Accumulation. *Economic Record*, 32(2), 334-361.
- Van der Ploeg, F. and A. J. de Zeeuw* (2015). Climate Tipping and Economic Growth: Precautionary Saving and the Social Cost of Carbon. OxCarre Research Paper 118.
- Wagner, G., and M. Weitzman* (2015). *Climate Shock*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Weitzman, M.* (1974). Prices vs. Quantities. *Review of Economic Studies*, 41(4), 477-491.
- Weitzman, M.* (2009). On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change. *Review of Economics and Statistics*, 91(1), 1-19.
- Weitzman, M.* (2014). Fat Tails and the Social Cost of Carbon. *American Economic Review, Papers and Proceedings*, 104(5), 544-546.
- Weyant, J.* (2017). Some Contributions of Integrated Assessment Models of Global Climate Change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 115-113.
- World Bank (2018). State and Trends of Carbon Pricing 2018. Washington, DC: World Bank Group.

Превод Диана Димитрова