

- Maddison A. 2001.** *Monitoring the World Economy: A Millennial Perspective*. Paris: OECD.
- McEvedy C., Jones R. 1978.** *Atlas of World Population History*. New York, NY: Penguin Books.
- Nordhaus W. 1997.** Do Real Output and Real Wage Measures Capture Reality?: The History of Light Suggests Not. *The Economics of New Goods* / Ed. by T. Bresnahan, R. Gordon. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Polanyi K. 1977.** *The Livelihood of Man*. New York, NY: Academic Press Inc.
- Simon J. 1977.** *The Economics of Population Growth*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Tsirel S. V. 2004a.** On the Possible Reasons for the Hyperexponential Growth of the Earth Population. *Mathematical Modeling of Social and Economic Dynamics*. Moscow: Russian State Social University.
- Tsirel S. V. 2004b.** Cycles of Agrarian Empires. *Proceedings of the Third International Conference "Hierarchy and Power in the History of Civilizations"*. Abstracts, p. 178–179. Moscow: Russian State University for the Humanities.
- Turchin P., Hall T. D. 2003.** Spatial synchrony and within world-systems: Insights theretical ecology. *Journal of World-System Research* 9: 37–64.
- United Nations 2001.** *World Population Ageing: 1950–2050*. New York, NY: United Nations.

Аннотация

В статье рассматриваются скорости процессов эволюции различных систем (биологических, социальных, знаковых, геологических и космических), обсуждаются меры скорости эволюции и методы их оценки. Основной вывод заключается в существовании двух основных паттернов течения процессов эволюции. Первый паттерн состоит из длительных этапов постепенной эволюции с более или менее постоянной скоростью, разделяемых короткими периодами кризисов или, другими словами, периодами быстрой эволюции. Второй паттерн, менее определенный, чем пульсирующая эволюция первого паттерна, включает в себя как замедляющуюся, так и ускоряющуюся эволюцию. Изменения скорости, характерные для второго паттерна, характеризуются очень сильными законами изменения параметров – экспоненциальными и даже гиперэкспоненциальными, в том числе гиперболическими, сходящимися к точке сингулярности или исходящими из нее. Два основных паттерна сложным образом вложены друг в друга, так что невозможно определить, какой из них является основным. При этом за обоими паттернами часто скрывается более или менее постоянная скорость изменений, приводящих к эволюции, причем эта скорость также является ограничением сверху темпа эволюционных изменений и определяет количественные и временные рамки периодов гиперэкспоненциального роста. Также в статье обсуждаются различные механизмы возникновения и прекращения гиперэкспоненциальных темпов эволюции, распространения изобретений и других инноваций, роста и падения мирового ВВП, способы измерения скорости исторического времени, влияние перенаселения на уровень жизни и т. д.

3

Наука как явление эволюции*

А. Д. Панов

1. Введение. Ограниченность ресурсов и наука

Практически все согласны с тем, что человечество находится в переломной точке своего развития. Суть происходящего перехода можно охарактеризовать как смену эволюционной траектории цивилизации с траектории экстенсивного роста, характеризующейся нарастанием потребления природных ресурсов и энергии, ростом населения, мирового валового продукта и т. д., на траекторию интенсивного развития, когда рост основных количественных показателей должен быть ограничен сверху или как минимум резко замедлиться.

Еще три-четыре десятилетия назад казалось, что поступательный количественный рост («технологический взрыв») человеческой цивилизации может быть продолжен за счет глобального выхода в космос и освоения его ресурсов. Но сейчас уже можно с уверенностью констатировать, что человечество отказалось от космических амбиций и останется на Земле как минимум на долгие десятилетия. Это хорошо видно по тому, как провалились планы освоения космического пространства, которые строились и экономически обосновывались в конце 1960-х – начале 1970-х гг., и каковы планы на будущее теперь. Вот только некоторые примеры (Левантовский 1976: 37). В 1974 г. известный специалист К. Эрике, занятый в космической программе США, заявлял, что после 1985 г. будет введена в строй орбитальная станция на 25–100 человек. В начале 1970-х гг. в качестве проектов ближайшего будущего рассматривалось строительство 90-метрового субмиллиметрового орбитального телескопа. По данным американской печати (1975 г.), к 2000 г. предполагалось ввести в строй космическую солнечную электростанцию на стационарной орбите со сроком эксплуатации 30 лет, мощностью 5 млн кВт, с площадью солнечных батарей 45 км². Другие примеры связаны с предполагаемым использованием ядерных ракетных двигателей (которые даже были созданы и испытывались [Паневин и др. 1978: 34]), полетом на Марс и т. д. – не будем на них останавливаться. Существующие планы освоения космоса не обещают очень быстрого прогресса. Если бы Нилу Армстронгу в 1969 г. (год первой высадки на Луне) сказали, что через 50 лет на Луну будут летать на несколько модифицированном «Аполлоне» (об американской лунной

* Работа поддержана грантом РФФИ № 07-06-00-300.

программе см.: Джонс и др. 2008), он вряд ли в это поверил бы. Хотя освоение космического пространства понемногу продолжается, но ни о каком экстенсивном броске в космос, который мог бы преодолеть ограниченность материальных и экологических ресурсов Земли, речи более не идет. Интересно, что подавляющая часть человечества даже не обратила внимание на этот великий перелом, что говорит о глубоких изменениях и в общественном сознании.

Однако несущая способность Земли близка к исчерпанию, поэтому уже сейчас следует ожидать появления указаний на прекращение роста цивилизации по основным экстенсивным показателям. Действительно, такие явления есть. Наиболее известен процесс глобального демографического перехода, исследованный, в частности, в трудах С. П. Капицы (см., например: Капица 1996). Это явление заключается в том, что население Земли вошло в фазу стабилизации численности (что сопровождается также радикальным изменением половозрастного состава). При этом наиболее развитые в экономическом отношении страны уже завершили демографический переход – их население полностью стабилизировано, а в ряде случаев есть признаки депопуляции.

Нечто подобное должно произойти и с мировым валовым продуктом, то есть можно говорить о предстоящем экономическом переходе, аналогичном демографическому переходу. Если этого не произойдет, неизбежно катастрофически быстрое исчерпание материальных ресурсов Земли и, по всей видимости, катастрофические же экологические последствия.

Подробное обсуждение этого явления могло бы быть темой отдельной большой статьи, здесь же мы его будем рассматривать только как одно из исходных предположений в дальнейшем анализе, поэтому лишь кратко поясним, о чем идет речь. Действительно, из самых общих соображений ясно, что среднемировой уровень индивидуального потребления в перспективе придется ограничить на довольно невысоком уровне. Сейчас по уровню душевого дохода различные страны отличаются на два порядка величины, и простой подсчет показывает, что для того, чтобы довести уровень жизни во всем мире до уровня жизни в США (чего многие хотели бы), производство всех благ в мире нужно увеличить не менее чем в 100 раз (Крылов 2000). Это абсолютно невозможно, так как пока нет способа увеличивать уровень жизни без наращивания потребления материальных ресурсов и энергии. При таком уровне потребления – даже при самых оптимистических прогнозах относительно развития ресурсосберегающих технологий и замкнутых производственных циклов – невозполнимые ресурсы Земли будут исчерпаны в лучшем случае за несколько лет, а соответствующее производство энергии приведет к перегреву атмосферы. К перегреву атмосферы не приводит солнечная, ветро- и гидроэнергетика, но вряд ли эти источники способны покрыть необходимые потреб-

ности в энергии. Поэтому уровень жизни в США представляется некоторым абсолютно недостижимым верхним пределом в уровне жизни, а реально достижимые величины, скорее всего, располагаются существенно ниже. Конечно, мировой продукт не сводится только к индивидуальному потреблению, но в современной либерально-рыночной экономике эти величины связаны очень тесно, поэтому вместе с ограничением роста населения ограниченность среднего душевого дохода означает фактически и ограниченность максимально возможного мирового продукта.

Аналогичная проблема связана с дефицитом воды, эрозией и засолением почв и производством продуктов питания. Этот фактор уже сейчас называется самым серьезным образом. Утверждается, что среднее душевое потребление продуктов питания населением Земли достигло максимума в районе 1985–1990 гг. и с тех пор падает (Крылов 2000), что по сути означает снижение, а вовсе не рост среднемирового уровня жизни. Это уже сейчас можно рассматривать как признак экономического перехода, и хорошо, если эту тенденцию в отношении продуктов питания удастся переломить. Признаки экономического перехода заметны и в наиболее развитых странах. Так, отмечается (Паршев 2002), что «реальный жизненный уровень в США начиная с 1970-х гг. не увеличивается, а реальная заработная плата 80 % работающих даже понижается» (Он же 2003)¹. По мнению многих американцев (что автору настоящей статьи известно из личных контактов), максимум уровня жизни в США был достигнут даже еще раньше – в начале 1960-х гг., и с тех пор только медленно падает. Это напоминает ситуацию с демографическим переходом – экономический переход происходит раньше в наиболее экономически развитых странах. Гигантский мировой скачок цен на нефть и продукты питания в 2007–2008 гг. тоже вполне может оказаться в ряду явлений, связанных с экономическим переходом, так как очевидным образом ограничивает потребление. Хотя из-за финансового кризиса к концу 2008 г. цены на нефть и упали, но остались в несколько раз выше, чем 8–10 лет назад. Есть основания предполагать, что процесс в длительной перспективе будет и дальше идти в среднем в том же направлении, что отнюдь не исключает колебаний с короткой шкалой времени.

Эти данные не дают возможности предсказать в точности, что произойдет в отдаленной перспективе: стабилизация или, возможно, падение среднего уровня жизни на планете вместе с уровнем совокупного мирового продукта. Возможен и медленный поступательный рост и того и другого, в частности за счет постепенного освоения космического пространства и выноса части промышленности и производства энергии в космос.

¹ Автор настоящей статьи ознакомился с книгой А. П. Паршева «Почему Америка наступает» по официальному интернет-изданию, снабженному специальным предисловием Паршева. Приведенная цитата находится в главе «А так ли уж нужна эта самая нефть?».

Освоение космоса ведь хоть и крайне медленно, но продолжается. Но ясно, что совершенно исключен рост в режиме «технологического взрыва» XIX–XX столетий. Это позволяет в первом приближении исходить из модели стабилизации мировой экономики на постоянном уровне и принципиальной ограниченности материальных ресурсов и отдельно обсуждать возможные отклонения от этого сценария.

Что будет с наукой в этих новых условиях ее развития на фоне ограниченных сверх материальных ресурсов? Обсуждая этот вопрос, мы не будем касаться национальных особенностей развития науки, но будем подходить к науке как к глобальному общечеловеческому явлению.

2. Наука в контексте эволюции

Не существует общепринятого определения понятия «наука», поэтому уточним, что будет пониматься под этим термином в данной статье. Прежде всего наука является одним из методов познания окружающей действительности. Познание, вообще говоря, есть отражение реальности в сознании человека. Существует несколько способов такого отражения: мифология, искусство, религия, философия, наука. Поэтому научное познание не тождественно познанию вообще. От других методов познания наука отличается тем, что приводит к результатам, обладающим свойством *воспроизводимости* в строго определенном смысле. В науке фиксированы два основных способа получения результатов, приводящих к понятию воспроизводимости, – это, во-первых, воспроизводимый опыт и, во-вторых, математическая дедукция. Будем называть наукой метод познания, приводящий к воспроизводимым результатам на основе комбинированного использования воспроизводимого опыта и математической дедукции. Для большей ясности приведем простой практический пример использования этого определения. Из него следует, в частности, что философия не принадлежит науке, так как философское знание в общем случае не обладает свойством воспроизводимости, – с этим и связано обилие конкурирующих друг с другом философских систем. Философия не предусматривает никаких регулярных методов проверки истинности своих утверждений. В отличие от философии как таковой история философии является наукой, так как она оперирует объектами – философскими системами, – в существовании которых каждый может убедиться, обратившись к соответствующим источникам. Анализ существующих источников есть один из вариантов воспроизводимого опыта. Отметим, что приведенное выше определение науки является скорее идеалом, к которому стремится научное познание, но не реальной практикой, которой наука строго следует.

В путях реализации этого определения есть много тонкостей, анализ которых, однако, выходит за рамки нашего обсуждения.

В первом приближении наука делится на прикладную и фундаментальную. Прикладная наука изучает, грубо говоря, как делать различные полезные вещи, а фундаментальная наука изучает, как устроена природа. Конечно, между прикладной и фундаментальной наукой нет непроходимой границы. Более того, прикладная и фундаментальная науки существуют в тесной взаимосвязи: прикладная наука снабжает фундаментальную методами исследования, фундаментальная прикладную – идеями. Основные результаты, о которых будет идти речь ниже, имеют отношение прежде всего к фундаментальной науке; возможная связь с прикладной наукой также будет отмечена.

Всякое явление в жизни может быть правильно понято только в контексте его становления, в контексте эволюции. Именно с этой точки зрения мы хотим взглянуть на науку.

Отметим некоторые важные черты эволюционного процесса. Мы будем исходить из представления, согласно которому эволюция как человеческой цивилизации, так и биосферы в значительной степени имеет характер прерывистого равновесия (Назаретян 2004; Колчинский 2002: 420–423; Дьяконов 1994; Панов 2008: 27–36) и представлена последовательностью фаз и фазовых переходов между ними. В течение периодов относительно спокойного развития происходит количественный рост и (или) плавный рост разнообразия системы, но способность системы удерживать равновесие постепенно исчерпывается (по причинам, на которых мы здесь не будем подробно останавливаться, см. по этому поводу цитированную выше литературу), что приводит к возникновению кризиса – цивилизационного или биосферного. Кризис разрешается путем перехода системы на следующий эволюционный уровень, характеризующийся усложнением как структуры системы в целом, так и составляющих ее единиц и переходом к поддержанию равновесия на более высоком уровне организации (присваивающее производство сменяется более сложным производящим, фауна пресмыкающихся сменяется фауной млекопитающих и т. д.). Во время преодоления эволюционного кризиса, при переходе от одной фазы эволюции к следующей, существенно используется так называемый фактор избыточного многообразия (Назаретян 2004: 228–230). Под избыточным многообразием понимаются эволюционные формы, которые на данной фазе эволюции не являются существенным системообразующим фактором, часто плохо адаптированы к существующей действительности и «актуально бесполезны». Однако в моменты кризисов именно среди этого «актуально бесполезного» разнообразия происходит интенсивный отбор форм, способных стать системообразующим фактором на новой ступени эволюции. Так, например, примитивные млекопитающие возникли задолго до того, как вымерли динозавры. И только спустя длительное время

млекопитающие стали мощным системообразующим фактором биосферы и т. д. Можно привести множество подобных примеров.

В контексте представлений о прерывистом равновесии науку следует рассматривать как типичное явление эволюции. Становление научного метода сопровождало промышленную революцию XV–XVI вв. (внедрение механизированного промышленного производства, географические открытия, книгопечатание). Промышленной революции предшествовал затяжной аграрный кризис в Европе, сопровождаемый разрушением экосистем и массовыми эпидемиями. Промышленная революция вместе со всеми сопутствующими явлениями, включая и становление науки, являясь ответом на этот эволюционный кризис, что и обеспечило выход из эволюционного тупика (Назаретян 2004: 133). Таким образом, наука была существеннейшим фактором цивилизационного фазового перехода, соответствующего промышленной революции. Затем наука постепенно превратилась в ведущий фактор развития цивилизации, определяющий также и лицо современной инновационной экономики. Можно также отметить, что некоторые элементы научного мышления, например в форме античной математики и астрономии, возникли задолго до того, как научное знание стало реально направлять развитие цивилизации. Наука существовала в форме избыточного многообразия еще до Бэкона, Галилея и Ньютона.

Как показывает опыт, прогрессивные эволюционные решения не являются вечными и универсальными как в социальной эволюции, так и в эволюции вообще (вероятно, это можно рассматривать как один из основных законов эволюции, который пока неизменно работал). Лидирующее положение земноводных на суше в конце палеозоя сменилось лидерством пресмыкающихся; те в свою очередь в конце мезозоя уступили лидерство млекопитающим; млекопитающие уступили свое лидерство наступившей цивилизации людей. Нерасчлененное первобытное сознание человека отступило перед мифологией, на смену мифологическому сознанию пришла религия и философия и т. д. Представление о том, что некоторая эволюционная форма может стать вечной основой прогресса и лидером эволюции – это вера в «дурную бесконечность». Наука, будучи прогрессивным эволюционным решением на определенной стадии развития социальной системы, вряд ли является исключением. На основании этой простой экстраполяции можно предположить, что наука в какой-то момент начнет утрачивать свое лидерство в формировании вектора развития цивилизации.

Подчеркнем, что смена лидера эволюции, как правило, не означает полное исчезновение предыдущих эволюционных форм (земноводные не исчезли при наступлении фауны пресмыкающихся, философия и религия не исчезли после становления науки), но означает именно лишь смену лидера при сохранении старых форм в несколько редуцированном виде. Это является частным случаем закона иерархических компенсаций Е. А. Седо-

ва (Седов 1988)². Примерно такого сценария можно ожидать и в отношении науки. Научный метод познания не исчезнет, но может быть потеснен совсем другими методами познания или даже некоторыми формами культурной деятельности, вовсе не являющимися познанием с современной точки зрения. Подобная смена лидерства не может пройти безболезненно. Это означает, что рано или поздно наука может столкнуться с серьезными кризисными явлениями.

Это чувствуют многие, что породило обширную литературу, посвященную «концу науки». Приведем для примера лишь пару ссылок на современные работы этого типа (Хорган 2001; Крылов 1999). Одним из первых и в то же время одним из наиболее глубоких (по мнению автора настоящей статьи) исследователей этой проблемы был Станислав Лем. В книге «Сумма технологии» (Лем 2002), написанной им в 1963 г., подробно обосновывается тезис: «Нам представляется, что у лавинообразного метода познания есть свой потолок и, более того, мы вскоре уже его достигнем» (под лавинообразным познанием Лем понимает именно стремительно расширяющееся познание научным методом, характерное для времени написания его книги) (Там же: 132). Лем рассматривает это ограничение как потенциальную причину серьезнейшего цивилизационного кризиса, и большая часть книги (примерно 3/4) посвящена вопросу, *что происходит с цивилизацией, оставшейся без науки* (Там же: 141). Надо сказать, что такая постановка вопроса в свое время произвела ошеломляющее впечатление на автора настоящей статьи.

Свой тезис об ограниченности познания Лем обосновывает примерно следующим образом. Каждое новое открытие вызывает постановку нескольких новых научных проблем, поэтому по мере развития науки число научных проблем растет экспоненциально (с этим невозможно не согласиться). Но число исследователей не может расти столь же быстро, поэтому в какой-то момент ученых начинает не хватать для исследования каждой актуальной научной проблемы. Наука же эффективна только в том случае, когда она исследует существенно все, что входит в ее сферу, так как никто заранее не может предугадать, что окажется важным, а что – нет. Внутренние связи науки рвутся, важные возможности оказываются упущенными, наука теряет свою эффективность и в конце концов деградирует.

Действительно, с тем, что такой кризисный фактор реально существует и действует, трудно не согласиться. В связи с этим хотелось бы отметить одно важное обстоятельство. Существует мнение, что возможный кризис науки может быть связан также с тем, что природа в какой-то момент окажется просто исчерпанной для научного познания: в физике бу-

² Термин принадлежит А. П. Назаретяну (Назаретян 2004: 225).

дет создана универсальная «теория всего», и дальше фундаментальной науке идти будет просто некуда (Липунов 2001). Самые фундаментальные разделы науки окажутся не у дел. Такая идея существенно противоречит предположению Лема, что каждая новая решенная научная задача порождает несколько новых. Предположение об исчерпаемости природы для познания может оказаться как верным, так и неверным, но, по нашему глубокому убеждению, в настоящее время для такого предположения нет ни малейших оснований. Скорее, проблема может оказаться в другом. Может случиться так, что один и тот же набор экспериментальных фактов, относящихся к наиболее фундаментальной структуре материи, будет одинаково успешно описываться несколькими непротиворечивыми, но полностью исключаящими друг друга теориями, а на пути получения дополнительных экспериментальных данных встанут непреодолимые трудности (такого рода трудности более подробно обсуждаются в заключительном разделе статьи). Так как в этом случае не будет никакого средства выбрать одну из теорий в качестве правильной, фундаментальная наука зависнет в состоянии неопределенности, и это, конечно, тоже будет означать кризис. Пока что ситуация в фундаментальной физике развивается по очень похожему сценарию³, но будущее может преподнести сюрпризы.

Помимо этих внутренних, системных кризисов можно указать множество других факторов, которые способны приводить к возникновению кризисных явлений в науке. Это и наступление лженауки, и снижение интереса общества к науке, и падение ее престижа, и многое другое. Мы не будем все их перечислять и обсуждать в этой статье, но остановимся на одном явлении, которое, по нашему мнению, может оказаться важнее других. Речь идет о ресурсных ограничениях на фоне грядущего экономического перехода.

По мере накопления знаний о природе, добытых научным методом, получение новых фундаментальных знаний обходится все дороже и дороже. К сожалению, рост эффективности научных методик не компенсирует роста сложности задач. Действительно, если в XIX в. и в первой половине XX в. большинство наиболее фундаментальных открытий делалось либо учеными-одиночками, либо очень небольшими группами, то с середины XX в. на фундаментальных направлениях, как правило, работали уже крупные коллаборации, а в последней четверти – почти исключи-

³ Можно отметить, например, конкуренцию петлевой квантовой гравитации, теории суперструн и некоторых других подходов в качестве кандидатов на роль самой фундаментальной физической теории (Smolin 2003, Пенроуз 2007: 724–847). Пока сохраняются надежды, что по крайней мере некоторые из этих теорий удастся исключить с помощью эксперимента, но надежды могут и не оправдаться. Похожая ситуация может сложиться в области космологии. Например, некоторые инфляционные сценарии Большого взрыва и так называемые сценарии сталкивающихся бран могут быть почти совершенно неотличимыми по наблюдательным проявлениям, не имея при этом ничего общего в физике (Greene 2004: 407–410).

тельно международные научные коллаборации постоянно растущего размера, так как фундаментальная наука становится уже не по карману национальным экономикам. Однако ресурсы, которые человечество может потратить на науку, с учетом перспективы грядущего экономического перехода заведомо ограничены сверху. Ограниченность ресурсов вместе с удорожанием научных исследований может вести к снижению потока новых научных результатов (потока открытий). Это явление запускает очень опасный для науки процесс. Снижение потока открытий снижает интерес общества к науке. Снижение интереса к науке влечет уменьшение средств, выделяемых на нее. Причем в первую очередь под ударом оказываются самые фундаментальные направления, так как они находятся дальше всего от потребительских интересов общества и общество меньше всего понимает, для чего они нужны. Кроме того, наибольший рост стоимости характерен именно для самых фундаментальных направлений науки. Уменьшение затрат на науку влечет еще более прогрессивное падение числа открытий, что приводит к дальнейшему падению популярности науки и т. д. – так замыкается петля положительной обратной связи. Это может породить лавинообразный процесс коллапса фундаментальной (в первую очередь) науки, точнее – коллапс ее финансирования. Процессы могут оказаться столь стремительными, что участники событий даже не сумеют толком понять, что происходит.

3. Математическая модель динамики фундаментальной науки

В оставшейся части статьи мы рассмотрим простую математическую модель динамики фундаментальной науки на фоне ограниченных ресурсов земной цивилизации, включающую описание упомянутой выше петли положительной обратной связи и коллапса финансирования.

3.1. Описание модели

Модель строится на основе системы рекуррентных соотношений с квантом времени 5 лет. Идея состоит в том, что показатели динамики науки в некоторую пятилетку определяют политику в отношении науки в следующую пятилетку. Модель основана на трех основных простых предположениях. Сначала мы приведем эти три предположения и рассмотрим результаты работы основного варианта модели, затем рассмотрим, насколько устойчивы результаты к некоторым из этих предположений.

Предположение 1. Мировой совокупный доход следует S-образной логистической кривой, описывающей переход в интенсивную фазу развития мировой экономики и соответствующую стабилизацию мирового сово-

купного продукта (экономический переход). Для модели несущественны детали этого поведения, поэтому кривая была выбрана в простейшей форме:

$$X(T) = [1 + \exp(-T/\tau)]^{-1}, \quad (1)$$

где T – время в годах; τ – постоянная времени перехода, которая принималась равной 50 годам; время $T=0$ соответствует точке перегиба логистической кривой. Как нам представляется, этот момент по смыслу приблизительно соответствует 2000 г., хотя думать так необязательно. Мы работаем в условных единицах времени, которые описывают некоторую абстрактную модельную социальную систему. Поскольку нас будут интересовать только качественные результаты, необязательно привязывать модель к нашим реалиям. Мировой доход измеряется в относительных единицах, так что в состоянии насыщения по определению $X=1$. Кривая $X(T)$ показана на Рис. 1.

Предположение 2. Уровень затрат на науку в пятилетку пропорционален совокупному мировому продукту в ту же пятилетку (чем больше денег, тем лучше финансируем науку) и количеству открытий в предыдущую пятилетку (если наука работала хорошо, то есть смысл ее и дальше финансировать, если плохо – то что же зря на нее деньги тратить?). Это предположение в простейшей форме отражает идею, что интерес к науке связан с ее результативностью. При этом предполагается, что затраты на науку ни при каких условиях не могут превысить некоторой предельной доли M от совокупного дохода. В математической форме эти простые предположения можно записать в виде двух соотношений:

$$R(T+5) = \alpha X(T+5)n(T); \quad R(T+5) \leq M \times X(T+5), \quad (2)$$

где $R(T+5)$ – затраты на науку в пятилетку с началом в момент $T+5$; $n(T)$ – число открытий в пятилетку с началом в момент T ; α – коэффициент пропорциональности. Заметим, что мы не даем точного определения, что такое «число открытий», предполагая просто, что эту величину можно каким-то разумным образом определить. Это очень существенный момент, к обсуждению которого мы еще вернемся. Ясно, что точное определение этого понятия – сложная задача науковедения, которую мы не пытаемся решить в настоящей работе. Субъективно – это количество событий (возможно, как-то включается «вес» каждого события), вызывающих эмоциональную реакцию вроде: «Да, это что-то действительно новое!». Количество опубликованных научных статей не имеет прямой связи с количеством научных открытий.

Предположение 3. Количество открытий в некоторую пятилетку увеличивается пропорционально росту затрат по сравнению с затратами в прошлую пятилетку, но уменьшается из-за роста стоимости одного открытия:

$$n(T+5) = n(T) \frac{R(T+5)}{R(T)} \frac{E(T)}{E(T+5)}, \quad (3)$$

где $E(T)$ – средняя стоимость «одного открытия» в пятилетку T в некоторых относительных единицах. По нашему предположению, стоимость одного открытия как-то растет вместе с суммой накопленных открытий, но детальный вид этой зависимости неясен (субъективно она кажется очень крутой). Ввиду этой неопределенности исследовались разные сценарии, и было обнаружено, что во всех случаях качественное поведение модели – одно и то же. Здесь мы представляем результаты для двух вариантов – экспоненциального и квадратичного роста стоимости:

$$S(T) = \sum_{t=T_0}^T n(t); \quad E_1(S) = \exp(S/N_0); \quad E_2(S) = 1 + (e-1) \frac{S^2}{N_0^2}, \quad (4)$$

где $S(T)$ – число открытий, накопленных наукой за все время развития науки от момента T_0 в прошлом до времени T ; $E_1(S)$ и $E_2(S)$ – два варианта кривой роста стоимости открытий; N_0 – некоторая постоянная; $e = 2,71828\dots$

Уравнения (2) и (3) задают полную систему рекуррентных соотношений для определения двух неизвестных функций – $R(T)$ и $n(T)$. Задав некоторое начальное условие для n и выбрав параметры α , N_0 и M , решая уравнения, шаг за шагом находим затраты на науку и число открытий в каждую пятилетку в зависимости от времени.

В расчетах условно принималось, что наука начала свое развитие за 250 лет до момента $T=0$, и для начала расчета было выбрано достаточно случайное малое начальное значение числа открытий в пятилетку $n(T_0) = 1$ (точное значение несущественно, так как оно быстро «забывается» динамикой). Постоянная α была равна 0,001 (она не имеет большого физического смысла, так как значение α зависит от единиц, в которых измеряется «количество открытий»), N_0 было равно 2500 для функции $E_1(S)$ и 1000 для функции $E_2(S)$. Эти числа достаточно произвольны и выбраны просто из соображений удобства, чтобы в результате получались разумные масштабы времени для основных особенностей решения. В основном варианте расчетов принималось, что доля расходов на науку никогда не может превышать 2,5 % от мирового продукта.

3.2. Основные результаты

Перейдем к результатам моделирования. На Рис. 2 показана полученная зависимость расходов на науку от времени для случая экспоненциальной зависимости стоимости науки от накопленного интеграла открытий. На

кривой выделяются три участка. В самом начале происходит быстрый рост расходов до тех пор, пока не достигается максимально допустимый уровень в 2,5 % от мирового дохода. Затем длительное время расходы на науку удерживаются на этой предельной величине, поэтому кривая расходов на науку точно следует кривой мирового продукта (на Рис. 2 примерно от -200 до 500 лет). После этого расходы на науку начинают быстро падать, пока не снижаются практически до нуля. Большая часть этого обвала происходит всего за несколько десятков лет. Это падение расходов связано с включением той самой положительной обратной связи, о которой шла речь выше. Таким образом, модель вполне подтверждает качественные рассуждения.

* Заметим, что не стоит придавать серьезного значения полученным датам. Имеет смысл только качественное поведение решения. Мы специально исследуем простейшую из возможных моделей, чтобы природа явления не заслонялась несущественными деталями. В действительности различные коэффициенты модели (α и прочие) легко сделать функциями, которые отслеживают некоторые более тонкие связи, и путем такой подгонки сделать предсказания модели очень «реалистичными» (на субъективный взгляд автора; в частности, легко получить и гораздо более ранний или гораздо более стремительный коллапс). Но исследование этих тонких деталей не входит в нашу задачу.

На Рис. 3 показана зависимость количества открытий в пятилетку от времени. Здесь обнаруживаются новые любопытные детали. Несмотря на то, что финансирование науки от $T = -50$ лет до $T = 500$ лет поддерживалось на постоянном относительном уровне (а в абсолютных цифрах росло вместе с мировым доходом), темп поступления новых открытий падал. Это связано с увеличением стоимости единичного открытия по мере накопления суммы знаний о природе. Хотя длительное время снижение потока открытий не сказывается на финансировании науки, но в конце концов финансирование срывается в лавинообразный коллапс. Таким образом, модель предсказывает постепенное падение количества научных результатов на фоне стагнации финансирования с последующим внезапным коллапсом.

Теперь в порядке обсуждения основного результата мы рассмотрим некоторые вариации основной базовой модели.

3.3. Влияние активной политики финансирования науки на ее динамику

Прежде всего немедленно возникает вопрос: что можно изменить в этом сценарии при реализации какой-либо активной финансовой политики в

отношении науки? Первое, что приходит в голову, – нельзя ли отсрочить возникновение финансового коллапса за счет постепенного повышения потолка финансирования науки? Предположим, что начиная с 10 года (в нашей условной шкале времени), когда падение эффективности науки уже становится довольно заметным, финансирование науки начинает увеличиваться в линейном режиме таким образом, чтобы к 300 году достигло 20 % мирового дохода (вместо 2,5 % в 10 году). На Рис. 4 видно, как растут расходы и как, начиная с 10 года, из-за этого возрастает поток открытий. Однако совершенно неожиданно коллапс финансирования науки наступает *раньше*, чем при более низком уровне финансирования. Более того, коллапс наступает раньше, чем расходы на науку достигают своего предельного уровня в 20 %. На первый взгляд, это совершенно контринтуитивный результат: усиленная поддержка науки приводит лишь к ее более раннему коллапсу.

Понять, почему это происходит, можно, если проследить за ростом полного интеграла накопленного научного знания при постоянном и при растущем режимах финансирования. На Рис. 5 видно, что в обоих случаях коллапс науки происходит при почти одном и том же значении полного интеграла знаний. При растущем финансировании финальная сумма знаний оказывается даже несколько больше, несмотря на более раннее завершение процесса накопления знаний. Интерпретация этого результата состоит в следующем. Коллапс науки связан с быстрым ростом стоимости научных открытий по мере накопления суммы научных знаний, и при росте финансирования науки быстрее исчерпывается «фонд относительно дешевых доступных открытий». Просто быстрее обрываются «нижние груши», а до «верхних груш» все равно не достать. Это похоже на то, как будто существует почти непробиваемая и почти неподвижная граница доступной области фундаментальных знаний, которую вы тем быстрее достигнете, чем быстрее будете к ней приближаться.

Результат кажется парадоксальным только на первый взгляд. В действительности очень похожие события можно обнаружить уже сейчас, если рассматривать отдельные направления фундаментальной науки. Показателен пример физики элементарных частиц на циклических ускорителях. В 1993 г. из-за прекращения финансирования (по причине слишком высокой стоимости) был закрыт проект гигантского сверхпроводящего суперколлайдера в США (SSC). Из-за этого физика элементарных частиц по крайней мере на 10 лет впала в состояние стагнации и продолжала вялое существование в ожидании реализации проекта другого, более слабого и дешевого коллайдера LHC (пробный запуск осуществлен в 2008 г., но на прехотную мощность выйдет, вероятно, не ранее 2010 г.). После того, как LHC будет запущен, физика элементарных частиц получит новое дыхание и по меньшей мере до 2020 г. будет существовать в активном режиме, пи-

таясь результатами LHC. Однако очень велик шанс, что на этом классическая ускорительная физика элементарных частиц на циклических ускорителях прекратит свое существование, так как еще более мощная машина должна быть совершенно фантастическим сооружением (кольцо в сотни километров диаметром) и стоить столь фантастических денег, что вряд ли человечество пойдет на такие траты. В то же время если бы проект SSC был реализован (что означало бы более высокое финансирование науки в прошлом), то всей той суммой знаний в физике частиц, которой мы будем обладать только лет через 10–15 (и даже несколько большей, так как SSC должен был быть мощнее LHC), мы обладали бы уже сейчас, но и ускорительная физика на циклических ускорителях уже теперь прекратила бы свое существование. Этот сценарий довольно точно соответствует тому, что наша модель предсказывает для фундаментальной науки в целом. Есть надежда, что к 2020 г. будет построен новый линейный ускоритель (ILC – International Linear Collider), тогда ускорительная физика частиц продолжит свое существование еще какое-то время. Но эта гигантская машина (длина туннеля ускорителя – 35 км) вполне может оказаться последней уже в ряду линейных ускорителей, так как трудно будет пойти на финансирование еще более гигантского сооружения. Новые принципы ускорения частиц тоже, конечно, разрабатываются, но перспективы здесь пока совершенно неясны.

3.4. Предположения о скорости роста стоимости науки

Насколько критичным является предположение об экспоненциально быстром росте стоимости науки? На Рис. 6 показаны результаты расчетов для модели квадратичного роста стоимости науки по мере накопления суммы научных знаний (вместо экспоненциального роста, как это было в основном варианте расчета). Видно, что хотя графики на Рис. 6, соответствующие квадратичному росту, отличаются в деталях от графиков на Рис. 4 и 5, соответствующих экспоненциальному росту, основные качественные особенности динамики, которые мы отмечали выше, – те же самые. Добавим, что даже модель линейного роста стоимости науки при полной стагнации мирового продукта приводит качественно к тем же результатам (мы здесь не показываем детали соответствующих расчетов).

Нетрудно понять, что справедлив общий результат, который заключается в том, что если скорость роста стоимости фундаментальной науки опережает скорость роста мирового продукта (в случае, если нет полной стагнации уровня мирового продукта), денег на науку рано или поздно не хватит, и произойдет коллапс финансирования по рассмотренному механизму. Иллюстрация этого вывода более детально рассмотрена в разделе 3.5.

То, что такой режим рано или поздно станет реальностью, представляется весьма вероятным. Таким образом, выводы (в главном) нечувствительны к деталям модели, относящимся к темпу роста стоимости науки.

3.5. Предположение о стабилизации уровня мирового продукта

Рассмотрим, насколько критическим для поведения модели является предположение о полной стабилизации мирового продукта. Вопрос состоит в том, не может ли рост мирового продукта воспрепятствовать предсказанному моделью коллапсу финансирования науки. Нет смысла рассматривать сценарии, в которых мировой продукт со временем растет очень быстро – экспоненциально, квадратично и т. д., так как такие сценарии в любом обозримом будущем заведомо исключены. Мы приводим результаты для модели линейного⁴ роста мирового продукта начиная с времени $T=0$ (Рис. 7) в сочетании с основной моделью экспоненциального роста стоимости науки и в предположении ограничения расходов на науку на уровне 2,5 % от мирового продукта (так же, как в основном варианте расчета). Линейный рост был выбран таким, что для $T=200$ мировой продукт превышает показатели основного варианта расчета со стабилизацией в два раза, для $T=300$ – в три раза и т. д. На Рис. 8 показаны предсказанные моделью затраты на науку и количество открытий в пятилетку в зависимости от времени. Первое, что можно заметить, – это что коллапс науки никуда не исчез. Это происходит из-за того, что скорость стоимости науки превышает скорость роста мирового продукта (как и следовало ожидать: см. раздел 3.4). Но в расчете появилась новая деталь: осцилляции, имеющие характер коротких всплесков, после первого коллапса финансирования. Что это такое?

Смысл этих осцилляций, как нам представляется, может состоять примерно в следующем. После очередного обвала финансирования науки мировой продукт (как заложено в модель руками) продолжает расти. Это создает соблазн снова попытаться пустить увеличивающиеся материальные ресурсы на фундаментальную науку. Однако из-за высокой стоимости исследований результат разочаровывает, и финансирование снова прекращается.

Скорее всего, эти осцилляции являются артефактом модели. Вряд ли предсказательная сила модели может распространяться далеко за фазу первого коллапса финансирования науки. К тому же модель совершенно не учитывает обратную связь между наукой и мировым продуктом. Воз-

⁴ Более точно – речь идет о наличии дополнительного линейного множителя к стандартной модели с полной стагнацией экономики, который приводит к асимптотически линейному росту.

можно, после первого коллапса финансирования науки никакой линейный рост мирового продукта будет просто невозможен. Но что модель предсказывает однозначно – так это первый коллапс финансирования науки, и в этом отношении снова полностью воспроизводятся качественные результаты модели с ограниченным мировым продуктом, несмотря на рост мирового дохода. Таким образом, в главном модель оказывается не зависящей и от деталей поведения мирового продукта во времени. Главное – коллапс происходит, если скорость роста стоимости науки превышает темпы роста мировой экономики.

4. Обсуждение результатов

Несмотря на отмеченную устойчивость результатов к деталям предположений, заложенных в модель, необходимо отметить, что рассмотренная математическая модель является, конечно, крайне грубой. На наш взгляд, ее даже трудно назвать качественной, скорее, она чисто иллюстративная. Правильнее всего было бы рассматривать полученные результаты как некий детализированный способ *задать вопрос* о будущем науки, но не как футурологический прогноз. Действительно, полученные выводы могут не понравиться, но основные предположения модели четко сформулированы и открыты для анализа и критики.

Заметим также, что в модели имеются заведомые переупрощения. Так, например, динамика науки рассматривается на фоне заданной динамики мирового дохода, и мы полностью пренебрегли возможными обратными связями. А они могут привести как к дополнительной стабилизации науки (если, например, благодаря научным знаниям мировой доход будет постепенно расти, а не будет стабилизирован на постоянном уровне, как предполагается в основном варианте модели), так и к дестабилизации, если мировой доход начнет падать из-за ослабления потока инноваций, связанных с наукой. Модель предсказывает падение финансирования науки до нуля, но это, конечно, идеализация. Какое-то остаточное финансирование может сохраниться в рамках закона иерархических компенсаций Седова. Кроме того, даже полный коллапс централизованного финансирования не означает полного прекращения научных исследований, так как всегда найдутся люди, которые просто не могут не заниматься наукой, и они будут делать это совершенно бесплатно, на свой страх и риск. Но, конечно, для них будет недоступно строительство гигантских экспериментальных установок. Кстати, в очень значительной степени именно в таком режиме существует наука в России. Модель не учитывает многие другие разновидности кризисных процессов, имеющих место в науке, которые могут усугубить ситуацию; также модель не основана на реальных исходных числовых данных.

Последнее замечание особенно важно. Реальных числовых данных нет не потому, что автору лень было их собрать, а потому, что с принципиальной точки зрения неясно, как можно объективно оценить такие количественные характеристики, использованные в модели, как число открытий в единицу времени и стоимость одного открытия. Результаты, полученные в модели, показывают, насколько важно было бы получить метод объективной оценки этих величин и их динамики. Важно также, что предположение о том, что скорость роста стоимости науки превышает скорость роста мировой экономики, является наиболее критическим пунктом для полученных выводов, и крайне важно понять, верно это или нет. Ясно, что предположение может быть и ошибочным. Без построения методики количественной оценки нужных характеристик ответить на эти вопросы невозможно. Как мы видели, другие предположения модели являются критическими в меньшей степени.

Важно также отметить, что фундаментальная наука сама по себе неоднородна. Имеются фундаментальные исследования, не требующие очень больших материальных затрат, и многие выдающиеся открытия, как, например, открытие теплой сверхпроводимости или простого и дробного квантового эффекта Холла, сравнительно недавно были сделаны именно этим способом. Но определенно имеется *экстремально затратный сектор*, связанный как раз с самыми фундаментальными направлениями, – это фундаментальная микрофизика, фундаментальная астрофизика, экзобиология и проблема поиска разума во вселенной (SETI – Search for Extra Terrestrial Intelligence). Все эти направления в обозримой перспективе объединены использованием очень дорогих астрофизических методик космического и наземного базирования (космические телескопы и другие космические миссии; гигантские наземные и подземные оптические, радио-, нейтринные, гравитационные и другие телескопы). Фундаментальная микрофизика будет требовать дополнительно еще очень дорогой ускорительной техники, пока потенциал этого направления не будет окончательно исчерпан.

Особо отметим проблему SETI (Гиндилис 2004). Она в настоящее время лежит далеко на периферии науки и, кроме того, сильно заболтана часто недобросовестными и неквалифицированными уфологами и средствами массовой информации, а также низкопробными космическими триллерами. Между тем реальное решение этой проблемы совершенно бы изменило сам фон, на котором проводится обсуждение будущего науки и более широко – будущего цивилизации. Все обсуждаемые здесь модели стали бы заведомо недействительными, и вектор эволюции земной цивилизации мог бы измениться крайне радикальным образом (Панов 2008: 91–115). При этом, как показывает анализ (Там же: 89–90), решение проблемы SETI даже в довольно оптимистических вариантах является чудо-

вишно трудным и дорогим. Реальное решение проблемы с априори заметной отличной от нуля вероятностью достигается, только если под непрерывным мониторингом держать порядка миллиона подозрительных звезд, для чего необходимо строительство гигантских фазированных решеток радиотелескопов⁵. Плюс требуется еще развитие сети инфракрасных космических интерферометров для обнаружения у звезд планет земного типа, чтобы не вести поиски совершенно вслепую. Проблема столь трудна, что интерес к ней вполне может угаснуть раньше, чем она будет решена. Уже сейчас существует мнение, что на проблему SETI были затрачены «огромные усилия», а результата что-то все нет, так стоит ли и продолжать? Это очень большая ошибка. В действительности были затрачены практически нулевые усилия по сравнению с теми, которых реально требует эта проблема для своего решения. Фактически это направление еще не вышло из стадии чисто методических разработок.

Кстати, проблема SETI указывает еще на один изъян модели. Финансирование этой задачи, хоть и более чем скромное, но все же существует (и даже медленно растет), несмотря на полное отсутствие результатов в течение очень длительного времени. Это говорит о том, что в общем случае нет такой жесткой связи между уровнем результатов и уровнем финансирования, как предполагалось в предположении 2 модели (см. раздел 3.1). При осознании чрезвычайной важности определенные секторы науки долго могут финансироваться и при нулевой их результативности. Это говорит о том, что в условиях, когда наша модель предсказывает коллапс, при наличии соответствующей доброй воли законодательным или каким-то иным способом в принципе может быть установлена нижняя планка финансирования фундаментальной науки независимо от ее результативности. Вот только насколько это реально?

Под действие рассмотренных моделей в первую очередь попадает экстремально затратный сектор фундаментальной науки. Вполне возможно, что только к этому сектору в какой-то степени они и применимы. Можно, конечно, предполагать, что коллапс финансирования только в этом секторе может произойти совершенно незаметно для благополучной динамики всей остальной науки. Ведь была же, например, эра Великих географических открытий, да прошла. Крайне важная в свое время наука география покинула лидирующее положение в человеческом познании – и ничего, наука продолжила благополучное существование. Однако фундаментальная астрофизика и микрофизика в отличие от географии являются своеобразным и острием, и фундаментом человеческого познания вообще, в це-

⁵ Существует направление поиска сигналов искусственного происхождения в оптическом диапазоне (Бескин и др. 2007). Пока это направление не выглядит настолько дорогим, как поиск в радиодиапазоне, но в случае повышения требований к чувствительности масштабы установок и их стоимость начнут расти.

лом, так как они ставят вопрос, что есть материальная основа всего сущего? Коллапс в этой области означал бы отказ от дальнейших попыток проникновения в фундамент бытия и ограничил бы науку эмерджентными явлениями верхнего системного уровня. Острые познания было бы сломано. Без надежды проникновения вглубь материи все прочие науки приобрели бы неистребимый привкус феноменологии и сами могли бы начать стагнировать. Представляется вполне вероятным, что коллапс в самой фундаментальной области исследований постепенно начнет распространяться по всей науке. Не следует забывать, что ведь продолжают действовать и кризисообразующие факторы, рассмотренные Станиславом Лемом, которые в равной степени имеют отношение ко всей науке, а также и другие упоминавшиеся выше и неупоминавшиеся факторы. Все это может способствовать развитию негативных тенденций в науке. Заметим, что кризисный процесс вполне может добраться до инновационных технологий, неразрывно связанных с наукой, а это уже может означать коллапс цивилизации современного типа, основанной на инновациях. Таким образом, рассмотренный механизм финансового коллапса фундаментальной науки может оказаться существенной составной частью вполне закономерно ожидаемого общего эволюционного кризиса науки, о котором мы говорили в разделе 2, и послужить причиной серьезнейшего цивилизационного кризиса.

Положение представляется достаточно серьезным. Для того, чтобы избежать реализации описанного выше сценария (если предсказания модели действительно имеют какое-то отношение к действительности) и преодолеть отвечающий ему цивилизационный кризис, должно произойти нечто экстраординарное. Наука, вероятно, должна быть заменена некоторым новым типом познавательной деятельности (более эффективным или имеющим какие-то другие преимущества), либо вектор развития цивилизации еще каким-то парадоксальным образом должен будет радикально измениться. Мы уже упоминали, что одна возможность такого радикального поворота связана с решением проблемы SETI, другие надежды могут быть связаны с созданием искусственного интеллекта (ИИ) и родственными направлениями (о чем, в частности, пишет Лем в «Сумме технологий»), есть и другие возможности, которые мы здесь не будем обсуждать. Если потенциал для преодоления этого кризиса существует, то в соответствии с принципом избыточного внутреннего многообразия (см. о нем раздел 2) будущее решение проблемы в зачаточной форме может существовать уже сейчас. Возможно, ростки этого нового в культуре человеческого сознания уже есть, надо только внимательно посмотреть, чтобы их увидеть.

Как относиться к полученному результату, что при увеличении финансирования науки коллапс фундаментальной науки наступает раньше? Если это действительно так, то имеет ли смысл увеличивать финансовую

поддержку фундаментальной науки, или, напротив, лучше держать науку на голодном пайке, что продлит ее существование? Для ответа на этот вопрос надо иметь в виду, что наука важна для человечества не только сама по себе, как важная форма культурной деятельности и как основа инновационной экономики, но и добытыми ею знаниями. Все рассмотренные выше процессы в науке должны протекать и протекают на фоне многочисленных общецивилизационных кризисных явлений – энергетического и сырьевого, генетического кризиса и др. Преодолеть все эти кризисы будет крайне трудно, но чем лучше человечество окажется вооружено научными знаниями, тем больше будет шансов найти выход из всех этих эволюционных тупиков. Поэтому чем раньше мы станем обладателями возможно большего количества знаний, тем лучше. Тем более что накопленная сумма знаний может подготовить становление новых (пока гипотетических) методов познания, более эффективных, чем классический научный метод, о чем мы упоминали выше. Можно сказать, что усиленная поддержка науки не только приближает будущее, но и повышает шансы в него прорваться. Наше мнение состоит в том, что в любом случае науку надо финансировать настолько, насколько это возможно, и даже больше.

Библиография

- Бескин Г. М., де-Бур В., Карпов С., Плохотниченко В., Бондарь С. 2007. Поиск оптических сигналов ВЦ в САО – прошлое, настоящее, будущее. *Бюллетень специальной астрофизической обсерватории* 60–61: 217–225.
- Гиндилис Л. М. 2004. *SETI: Поиск Внеземного Разума*. М.: Физматлит.
- Джонс У., Дингелл Ч., Уайт Дж. К. 2008. Люди возвращаются на Луну и планируют задержаться там надолго. *В мире науки* 1.
- Дьяконов И. М. 1994. *Пути истории. От древнейшего человека до наших дней*. М.: Вост. лит.-ра. 2-е изд. М.: КомКнига/URSS, 2007.
- Капица С. П. 1996. Феноменологическая теория роста населения Земли. *Успехи физических наук* 166/1: 63–80.
- Колчинский Э. И. 2002. *Неокатастрофизм и селекционизм: Вечная дилемма или возможность синтеза? (Историко-критические очерки)*. СПб.: Наука.
- Крылов О. В. 1999. Будет ли конец науки. *Российский химический журнал* 46/6: 106.
- Крылов О. В. 2000. Ограниченность ресурсов как причина предстоящего кризиса. *Вестник РАН* 70/2: 136–146.
- Левантовский В. И. 1976. *Транспортные космические системы*. М.: Знание.
- Лем С. 2002. *Сумма технологий*. М.; СПб.: Terra Fantastica.
- Липунов В. М. 2001. О проблеме сверхразума в астрофизике. *Труды Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга* 67/II: 139–146.

- Назаретян А. П. 2004. *Цивилизационные кризисы в контексте Универсальной истории. (Синергетика – психология – прогнозирование)*. 2-е изд. М.: Мир.
- Паневин И. Г., Прищепа В. И., Хазов В. Н. 1978. *Космические ядерные ракетные двигатели*. М.: Знание.
- Панов А. Д. 2008. *Универсальная эволюция и проблема поиска внеземного разума (SETI)*. М.: Издательство ЛКИ/URSS.
- Паршев А. П. 2002. *Почему Америка наступает*. М.: АСТ; Астрель.
- Паршев А. П. 2003. *Почему Америка наступает*. Интернет-ресурс. Режим доступа: <http://lib.ru/POLITOLOG/PARSHEW/amerika.txt>
- Пенроуз Р. 2007. *Путь к реальности, или законы, управляющие Вселенной. Полный путеводитель*. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика».
- Седов Е. А. 1988. Информационные критерии упорядоченности и сложности организации структуры систем. В: *Системная концепция информационных процессов*. Сборник трудов ВНИИ системных исследований. Вып. 3. (с. 39). М.: ВНИИСИ.
- Хорган Дж. 2001. *Конец науки. Взгляд на ограниченность знания на закате Века Науки*. СПб.: Амфора/Эврика.
- Greene B. 2004. *The fabric of the cosmos. Space, time and the texture of reality*. New York, N. Y.: Alfred A. Knopf.
- Smolin L. 2003. *How far are we from the quantum theory of gravity?* Интернет-ресурс. Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/hep-th/0303185>

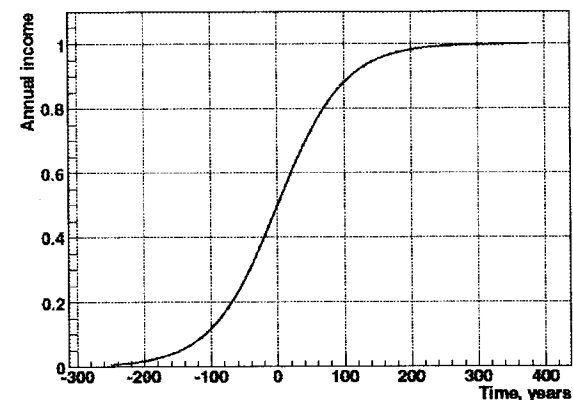


Рис. 1. Модель зависимости мирового продукта от времени, представляющая экономический переход

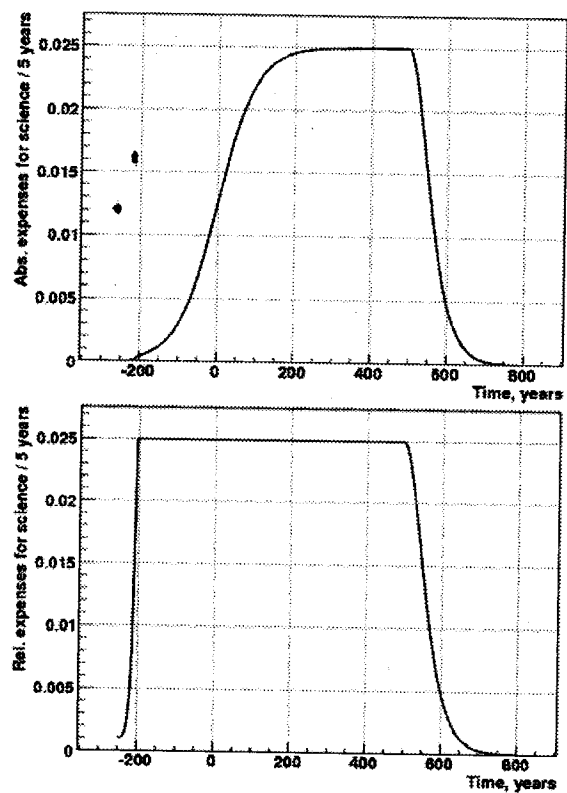


Рис. 2. Зависимость расходов на науку от времени (верхний график – в абсолютном выражении, в тех же единицах, что и мировой продукт (Рис. 1), нижний график – в долях мирового дохода)

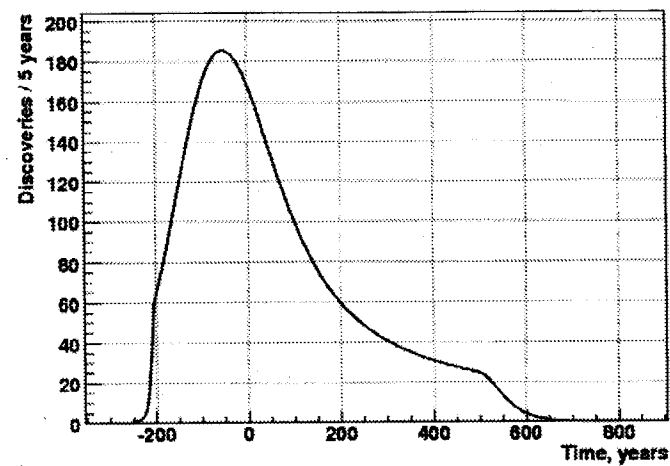


Рис. 3. Зависимость количества открытий в пятилетку от времени

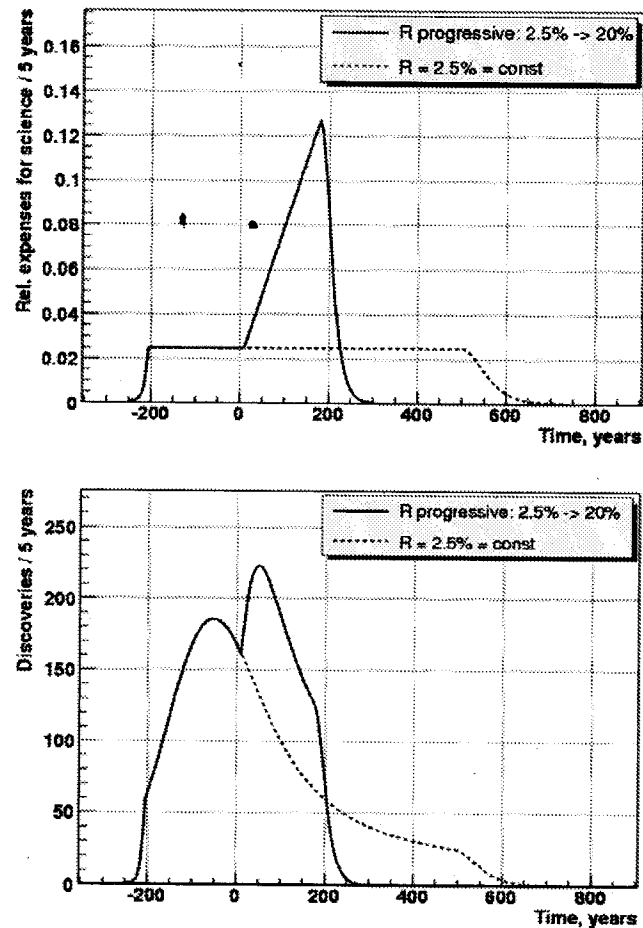


Рис. 4. Влияние увеличения расходов на динамику науки. Вверху – финансирование (по отношению к мировому доходу), внизу – число открытий в пятилетку. Пунктирные кривые соответствуют постоянному верхнему пределу финансирования науки на уровне 2,5 % от мирового дохода, сплошные кривые соответствуют прогрессивному наращиванию финансирования. Кривые демонстрируют эффект более раннего наступления коллапса при увеличении финансирования науки

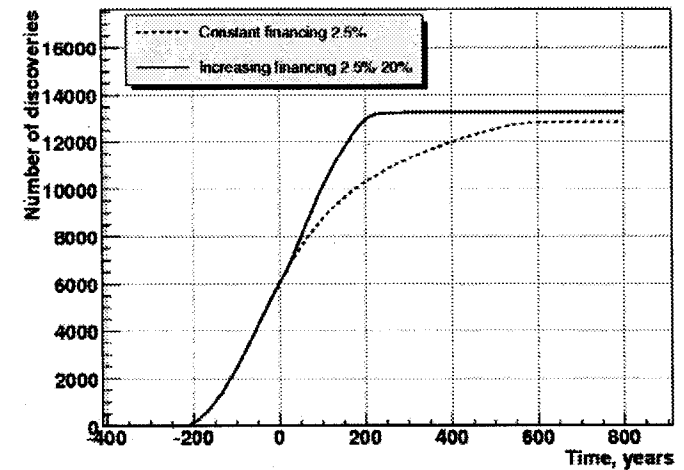


Рис. 5. Зависимость интеграла накопленных научных знаний от времени для двух сценариев финансирования науки: с постоянным верхним пределом в 2,5 % от мирового дохода и с постепенным наращиванием до 20 % к 2300 г.

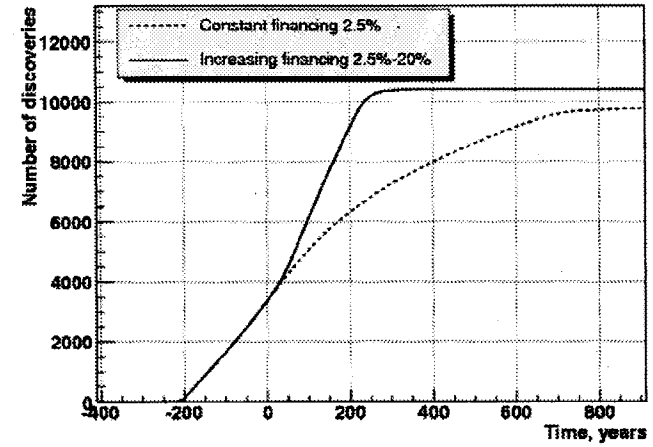
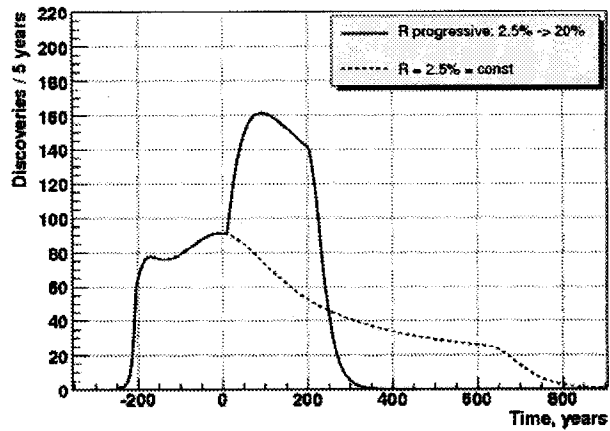
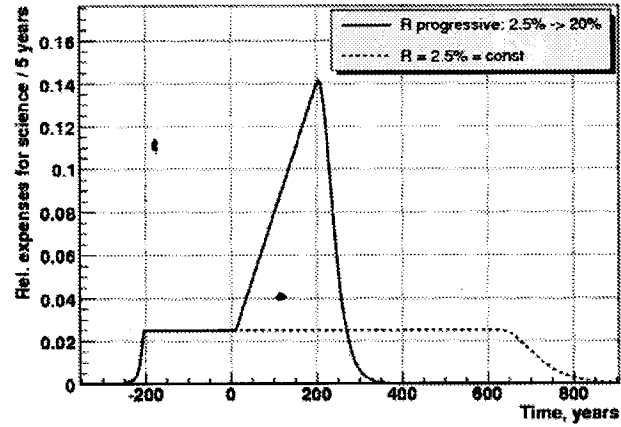


Рис. 6. Результаты расчетов для модели с квадратичным ростом стоимости науки по мере накопления суммы научных знаний. Приведенные графики аналогичны соответствующим графикам на Рис. 4 и 5 для модели экспоненциального роста стоимости

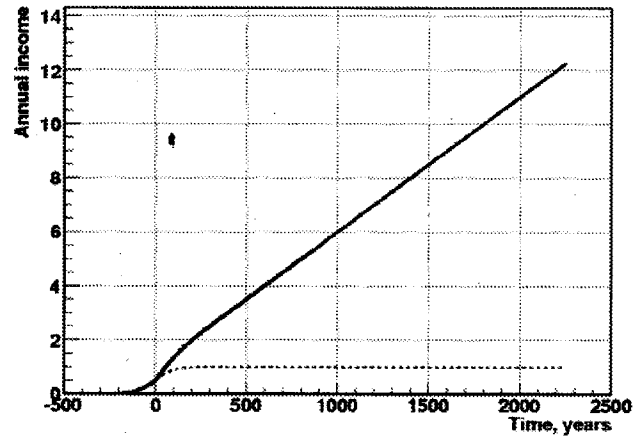


Рис. 7. Модель линейного роста мирового продукта (сплошная линия). Для сравнения приведена модель ограниченного роста мирового продукта, использованная в основном варианте расчета (пунктир)

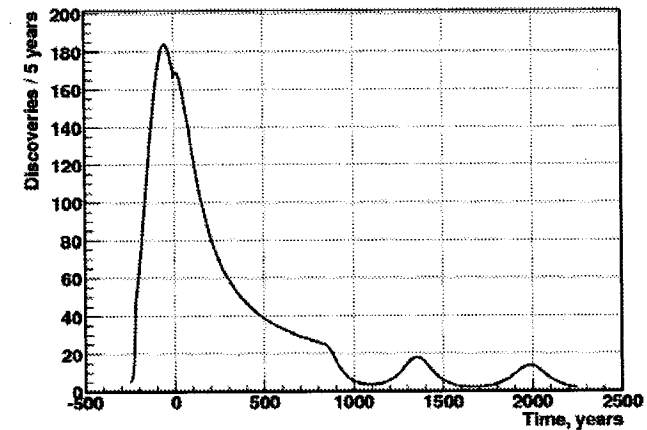
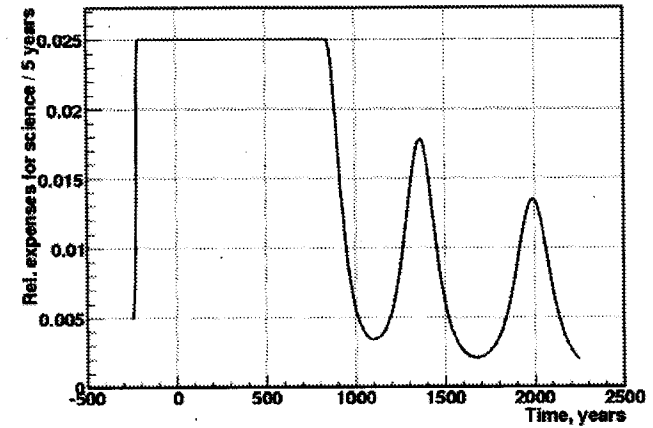


Рис. 8. Поведение относительных затрат на науку (верхний график) и количества открытий в пятилетку (нижний график) в зависимости от времени в модели линейного роста мирового продукта