



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 51 за 2013 г.



Малинецкий Г.Г.

Синергетика,
междисциплинарность и
постнеклассическая наука
XXI века

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Малинецкий Г.Г. Синергетика, междисциплинарность и постнеклассическая наука XXI века // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 51. 36 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-51>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

Г.Г. Малинецкий

**Синергетика, междисциплинарность
и постнеклассическая наука
XXI века**

Москва — 2013

Г.Г. Малинецкий

Синергетика, междисциплинарность и постнеклассическая наука XXI века

Рассматривается направление философии науки, связанное с прогнозом развития основных тенденций познания. Предложенный взгляд опирается на междисциплинарные подходы, играющие важнейшую роль в современной науке, на логико-методологический анализ и теорию типов рациональности, выдвинутую В.С. Стёпиным, на идеи постнеклассики.

Показано, что в точке бифуркации, которую сейчас проходит познание, возникают принципиальные трудности в продолжении ряда исследовательских программ, однако появляются новые возможности и перспективы. Рассмотрены ограничения в сфере науки, которые все глубже осознаются исследователями, а также быстрое и глубокое изменение самого субъекта познания, ожидающее нас в ближайшие десятилетия.

Ключевые слова: философия науки, типы рациональности, междисциплинарные подходы, когнитивный барьер, внутринаучная рефлексия, синергетика, постнеклассика, математическая история, большие данные, стратегический прогноз, обратные задачи, горизонт прогноза, внутринаучная рефлексия.

G.G. Malinetskii

Synergetics, interdisciplinarity and postnonclassical science of the 21th century

We consider a subfield of the philosophy of science connected with a forecast of the development of the fundamental cognition trends. We propose an opinion based on the interdisciplinary approaches of modern science, on the logical and methodological analysis, on the theory of rationality types risen by V.S.Stepin and on the postnonclassical ideas.

We show that in a bifurcation point, which is passing nowadays by the cognition, principal difficulties for continuation of a number of investigation programs arise, although new possibilities and prospects appear. Limitations in the field of science, which cause growing awareness of researchers, as well as rapid and profound change of the knowledge subject that awaits us in the coming decades are considered.

Key words: philosophy of science, the types of rationality, interdisciplinary approaches, cognitive barrier, intrascientific reflection, synergetics, postnonclassic, mathematical history, big data, strategic prediction, inverse problems, the forecast horizon, internal academic reflection.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (13-01-00617-а) и РГНФ (проект 12-03-00387-а).

ВВЕДЕНИЕ

Многие открытия отложены на будущие столетия, когда память о нас сотрется. Наш мир окажется жалким недо-
разумением, если каждому веку в нем не найдется, что ис-
следовать.

Сенека

Развитие различных областей знаний вновь и вновь показывает одну и ту же последовательность эволюции научных дисциплин: *описание – классификация – построение теорий – прогноз*. В настоящее время многие области науки, да и научное познание в целом, подошло к этапу своего развития, на котором важнейшим результатом научных исследований становится прогноз. Чтобы эффективно действовать и строить плодотворные и перспективные программы научных исследований, сегодня следует заглядывать в будущее.

В качестве примера можно привести такую научную дисциплину, как история. В 1996 году С.П. Капицей, С.П. Курдюмовым и Г.Г. Малинецким была выдвинута междисциплинарная исследовательская программа, получившая название *математической истории*, которая связана с тремя основными моментами [1]:

– полномасштабным математическим моделированием исторических процессов (что позволяет строить гораздо более полные, точные и объективные исторические реконструкции и помогает понять многие процессы на более высоком уровне);

– исследование на основе построенных моделей альтернативных сценариев исторических событий (при этом у истории появляется *сослагательное наклонение*);

– использование построенных концептуальных и математических моделей для *исторического прогноза*, на основе которого может быть дан *стратегический прогноз*, который должен лежать в основе управления обществом, его организации и самоорганизации (таким образом у истории появляется и *повелительное наклонение*).

При этом последний пункт особенно важен. При наличии достаточно подробного и проработанного исторического прогноза появляется возможность объективно оценить, насколько глубоко и точно мы понимаем причины, динамику и следствия исторических процессов.

Идеи математической истории были подхвачены рядом российских и американских исследователей [2,3], активно обсуждались на нескольких международных конференциях [4]. Несколько попыток исторического прогноза, опирающихся на формализованные модели, предпринятых около 30 лет назад в Институте прикладной математики, Институте системного анализа, Вычислительном центре Академии наук, а также рядом западных исследователей, дали удивительно точные описания исторического пути, пройденного нашей страной и мировым сообществом в последующие десятилетия [5,6].

Представляется интересным и важным с этой точки зрения взглянуть и на философию науки.

В самом деле, с одной стороны, в основополагающих работах В.С. Стёпина разработана целостная, системная логико-методологическая картина научного знания [7,8].

С другой стороны, в философии науки развивается представление о *неединственности путей развития научного знания, о поле возможностей*, из которого в ходе исторического развития выбирается одна или несколько траекторий [8, стр. 64]. «Вот так же, как наука движется в системе этих идеализированных объектов, философия начинает двигаться в системе этих идеализированных смыслов, причем она проводит эту работу постоянно. С одной стороны, она представляется рефлексией над основаниями культуры, она должна улавливать изменения, которые возникают в культуре своей эпохи, а с другой стороны, она изобретает иные миры, возможные миры человеческой жизнедеятельности. Вот тогда я вспомнил лейбницеву идею о том, что математика – это наука о возможных мирах человеческой жизнедеятельности: не тех, которые уже реализованы, а тех, которые могут возникнуть в возможном будущем».

С третьей стороны, начиная с ранних работ, касающихся критики Венского кружка, и кончая последними исследованиями, В.С. Стёпин следует идее Маркса, считавшего что «объект дан познающему субъекту не в форме созерцания, а в форме практики». Отсюда следует, что науку надо рассматривать в связи с философией и другими сферами культуры, во взаимодействии с деятельностью общества и в контексте исторического развития.

Развивая этот подход, можно вывести философию науки из области констатаций, рефлексии, методологии, ориентированной на прошлые достижения исследовательской деятельности отдельных цивилизаций и человечества в целом, и поставить вопрос о будущем. Вероятно, это направление, подобно математической истории, может обрести прогностические функции, найти опору в междисциплинарных подходах, вербальных и формализованных моделях, ориентированных на описание научной практики и её прогноз, непосредственно проследить взаимное влияние ценностей, смыслов, культуры и исследовательской стратегии общества.

Цель этих заметок – обосновать необходимость и очертить несколько направлений такого проектного, междисциплинарного подхода в философии науки.

КАРТА НЕЗНАНИЯ

А ведь одна из главных обязанностей ученого – определять не масштаб познанного (оно говорит само за себя), но размеры ещё не познанного, незримого Атланта наших познаний.

С. Лем

Важнейший вопрос в контексте перспектив познания – анализ переднего края науки и очерчивание области непонятого, неясного, неисследованного. Подобно мореплавателям эпохи Великих географических открытий, исследователям XXI века очень важно было бы иметь такую «карту незнания», а лицам, принимающим решения и определяющим научную политику, – перечень возможных экспедиций в неведомое и связанных с ними надежд. Это могло бы стать одной из важнейших задач философии науки начавшегося века.

В 1960-х годах на науку возлагались огромные надежды, а во множестве статей её рассматривали как «непосредственную производительную силу», считая, что вложение средств в научные поиски должно давать «экономический эффект» в обозримом будущем. И это действительно так, но только если направление выбрано верно, а научная работа выполняется на высоком уровне. В общем же случае это не так: множество исследований, выполненных в последующие десятилетия, не оправдали возлагавшихся надежд, породили в мировом сообществе атмосферу разочарования в науке и недоверия к ней.

В эти же годы на основе анализа, касающегося развития науки, было показано, что если N – численность исследователей и она достаточно велика в масштабах общества, то стоимость работы такого научного сообщества пропорциональна N^2 , а эффективность деятельности – объём новых полученных знаний – пропорциональна \sqrt{N} . Обе зависимости можно пояснить: наука – это диалог, взаимодействие, и поддержки требуют связи между учёными – научная инфраструктура, совместные проекты, организация взаимодействия. Число связей пропорционально N^2 (это согласуется с демографической моделью С.П.Капицы, в соответствии с которой *информационное взаимодействие*, обеспечивающее развитие нашей технологической цивилизации, определяется той же самой нелинейной функцией [1]). Со времён Сократа метафорой нашего знания является круг, границей наших познаний – его окружность. Если считать, что поддержка, передача, уточнение имеющегося знания требуют N человек (находящихся в этом круге), то на переднем крае науки, где делается принципиально новое, будет находиться порядка \sqrt{N} человек. Именно с их деятельностью и будет связано, в первую очередь, получение новых знаний.

Но из этих зависимостей немедленно следовало, что время экстенсивного развития миновало, что уже нельзя «заниматься всем» и «к каждой интересной задаче поставить по исследователю». Важнейшим становится верный, дальновидный выбор научных направлений, *карта незнания* и реалистичная оценка

тех рубежей, которых можно достичь. При этом необходимо понимание основных тенденций развития научного знания и ключевых достижений. Это радикально отличается от «эпохи одиночек» или периода «локальных групп» в науке, которые определяли организацию научной деятельности до середины XX века.

Голоса учёных, предсказывавших конец «золотого века» науки в 1960-х годах, потонули в хоре энтузиастов, увлечённых людей, полагавших, что именно развитие их области и является главным. В своё время выдающийся математик, академик А.И. Мальцев, говорил, что в современной алгебре так много интересных, содержательных задач, что их решением можно занять большую часть человечества. Один из основоположников системного программирования, академик А.П. Ершов полагал, что программирование станет массовой профессией в XXI веке и школьников, начиная с младших классов, следует учить азам этой деятельности.

На мониторинге и прогнозировании развития научного знания следует остановиться особо. В настоящее время активно развивается *теория самоорганизации*, или *синергетика* (от греческих слов «совместное действие»). По мнению В.С. Стёпина и ряда других исследователей [7-11], этот подход, понимаемый как *общая теория саморазвивающихся систем*, может стать основой научной картины мира XXI века. Одним из основополагающих понятий синергетики являются *параметры порядка* – ведущие переменные, которые с течением времени начинают определять динамику и развитие сложной системы и подчинять себе её остальные параметры. Именно выделение таких параметров порядка, связанное с эффективным упрощением сложного объекта, и происходит в ходе самоорганизации.

В естественных науках самоорганизация приводит к возникновению различных типов упорядоченности в физическом пространстве. В физиологии, например, самоорганизация происходит в ходе освоения навыков ходьбы, бега, речи, когда разные степени свободы организма эффективно связываются в некие блоки – синергии. В ходе профессиональной деятельности (например, деятельности лечащего врача) самоорганизация осуществляется в пространстве знаний и оказывается связана с формированием решающих правил, позволяющих из множества признаков и характеристик выделить главное и действовать на этой основе. Во всех этих случаях самоорганизация стихийна.

В научном сообществе есть возможность делать это сознательно, опираясь на конкретные данные, системный анализ, построенный стратегический прогноз и направляя самоорганизацию в желаемое русло. Опыт показывает, что простейшие стратегии: «всем сёстрам по серьгам», «дать деньги самым уважаемым людям», «дать тем, кто сдал вовремя бумаги» – и другие подобные способы определения приоритетов неэффективны. Издержки «научной демократии» также очевидны. Слишком малое сообщество не представляет всего имеющегося поля возможностей, слишком большим легко манипулировать.

К сожалению, зачастую научное сообщество не предоставляет лицам, принимающим решения, других возможностей. Это, например, наглядно показывает Отчёт государственных академий наук Правительству РФ. Этот доклад [12] невозможно прочитать, осмыслить и использовать при принятии решений о развитии науки. В нём не выделены параметры порядка. Он является ярким свидетельством того, что междисциплинарный метанаучный подход, взгляд с точки зрения философии науки и стратегического прогноза здесь совершенно необходимы.

КОНЕЦ ЭПОХИ ГУЛЛИВЕРА

Большинство физиков обладают непоколебимой верой в основную простоту природы – это один из самых эффективных руководящих принципов.

Ш.Л. Глэшоу

Смею утверждать, что опыты, стоимость которых превышает военный бюджет Соединённых Штатов, проводиться не будут.

Л. Смолин

Для философии науки характерно значительное запаздывание, большой лаг между текущими научными проблемами (не говоря уже о будущих) и теми прошлыми достижениями, которые подвергаются методологическому анализу. Хотя, разумеется, роль ретроспективного исследования научных достижений в разработке философии науки очень велика. «Философия науки без истории науки пуста; история науки без философии науки слепа», – пишет выдающийся философ науки И. Лакатос [14].

Создатель *теории научных революций* Т. Кун обращался к достижениям Птолемея, Коперника, Ньютона, Лавуазье, Дальтона [15]. Концепция *исследовательских программ* И. Лакатоса строилась на основе анализа работ Бора и Эйнштейна, опыта становления квантовой механики и теории относительности [14]. Многие принципиальные положения *структурно-логического анализа* научного знания, выдвинутого В.С. Стёпиным, опираются на опыт становления электродинамики [7,8].

Вместе с тем, можно предположить, что организация, цели и идеалы науки начала XXI века и обозримого будущего будут сильно отличаться от классических образцов. Очевидные, линейные экстраполяции в точке бифуркации, в которой находится наша цивилизация, в эпоху слома тенденций научного познания могут вводить в заблуждение. И в этой связи интересно обратиться и к прогнозам, которые делают сами исследователи, и к количественным характеристикам развития науки.

Книга Джонатана Свифта (1667-1745) – писателя, общественного деятеля, мыслителя, работавшего в жанре фантастической сатиры, современника Исаака

Ньютона – «Путешествия в некоторые отдаленные страны света Лемюэля Гулливера, сначала хирурга, а потом капитана нескольких кораблей» – определила два главных направления развития естественных наук. Во-первых, это – «путешествие к лилипутам», в мир микромасштабов. На этом пути появились молекулярная и атомная физики, квантовая механика, ядерная физика, теория элементарных частиц. Во-вторых – это «путешествие к великанам» в мир мегамасштабов, в космос, к далеким галактикам, к астрофизике и космологии.

Многие выдающиеся исследователи, проводя линейную экстраполяцию, считают, что в ближайшие полвека эти путешествия продолжатся [21]: «Вот список самых важных вопросов, стоящих перед фундаментальной физикой и космологией.

1. Верна ли квантовая теория, или её нужно изменить для более осмысленной физической интерпретации или для объединения с теорией относительности и космологией?

2. Какова квантовая теория гравитации? Какова структура пространства и времени в масштабах шкалы Планка (10^{-33} см, что на двадцать порядков меньше атомного ядра)?

3. Чем объясняются точные значения параметров, определяющих свойства элементарных частиц, включая их массы и силы взаимодействия?

4. Чем объясняется огромное количество элементарных частиц? Почему силы притяжения между двумя протонами в 10^{40} раз меньше силы их электростатического отталкивания? Почему Вселенная так велика? Почему она по крайней мере в 10^{60} раз превышает длину Планка? Почему космологические константы меньше любых других сходных физических параметров?

5. Что представлял собой Большой взрыв? Что определило свойства образовавшейся Вселенной? Положил ли Большой взрыв начало Вселенной, а если нет, то что было до него?

6. Что такое темная материя и темная энергия, на долю которых приходится от 80 до 95 процентов вещества Вселенной?

7. Как сформировались галактики? Что они представляли на ранних этапах развития?»

Этот прогностический взгляд на развитие важнейших областей науки XX века, данный авторитетным экспертом, разделяют многие ученые, из него исходят некоторые национальные и международные научные организации, значительная часть сообщества исследователей.

Заметим, что здесь противоположности сходятся – в одном прогнозе фигурируют и сверхмалые, и сверхбольшие масштабы. На эту тенденцию в развитии современного научного знания более 40 лет назад обращал внимание выдающийся советский физик, сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, академик Я.Б. Зельдович. По его мысли, мы присутствуем при заключительных актах «ускорительной физики». Создание инструментов с диаметром ускорительного кольца в сотни километров, необходимых для выхода на следующий уровень энергий, он считал невероятным. Поэтому будущее

«пути Гулливера», по которому физика успешно двигалась последние два столетия, он связывал с *космомикрофизикой*.

В рамках этого научного направления сама вселенная рассматривается как гигантский ускоритель, поставляющий частицы с энергиями, недоступными в земных условиях. При этом рождение и будущее вселенной определяется характеристиками фундаментальных составляющих материи, а свойства этих частиц и то, что происходило в первые мгновения после большого взрыва, надо восстанавливать по астрофизическим наблюдениям, по доступному нам «моментальному снимку космоса», решая так называемые *обратные задачи* (позволяющие по наблюдаемым следствиям выявлять причины и механизмы приводящих к ним явлений).

Допустим, что космология, теория элементарных частиц, космомикрофизика при наличии огромных (по научным масштабам) средств и большого количества людей, которые хотят этим заниматься, добьются поставленных целей. Пусть мы сумеем описать, что происходит на планковских пространственных (10^{-33} см) и временных (10^{-43} сек) масштабах. Сможем ли мы разумно распорядиться этими данными или, тем более, их использовать? Не пожалеем ли мы впоследствии о том, что выбрали это направление развития, пожертвовав многими другими задачами?

Вернемся к аналогии с Гулливером. Насколько важны ему знания, полученные в мире лилипутов и великанов? У него есть свои характерные размеры. Сверху они ограничены размерами L Солнечной системы, снизу – ядерными масштабами $l \approx 10^{-15}$ см (удивительно, что науке и технологиям удалось «дотянуться» до ядерных масштабов, в то время как подавляющее большинство физических, химических и биологических процессов лежит на атомном уровне и выше). Пожалуй, знания Гулливера об этих мирах можно сравнить с расшифровкой древних, мертвых языков – занятием интересным и поучительным, но не плодотворным, не дающим побегов в будущее.

Путь, начавшийся с Демокрита, ведущий вглубь, к анализу всё более мелких составляющих материи, по-видимому, завершается. «Анализ» в переводе с греческого – дробление, расчленение. И, приступая к нему, исследователи обычно держат в сознании следующую стадию – синтез, выяснение механизмов и результатов взаимодействия между изученными сущностями и, в конечном счёте, самоорганизацию, коллективные явления – самопроизвольное возникновение упорядоченности на следующем иерархическом уровне.

Видимо, здесь область нашего незнания особенно близка, а перспективы наиболее впечатляющи.

Двадцать лет назад были, без претензий на полноту, сформулированы *три сверхзадачи науки XXI века*, которые будут порождать исследовательские программы и представлять, используя терминологию А. Эйнштейна, сочетание «внутреннего совершенства» и «внешнего оправдания» (социального заказа, ожиданий общества) [1]. Обратим внимание на них.

Теория управления рисками. Важнейшим условием успешного управления является *карта угроз* для объекта управления. Роль науки здесь огромна. Новейшая история, множество событий XXI века показали, что при высоком темпе социально-экономических и технологических перемен управляющие воздействия зачастую приводили к совершенно иным результатам, чем планировалось. Второстепенные факторы, которыми в ходе выработки решений пренебрегали, оказывались ключевыми. Например, на полях сражений Первой мировой войны (ход которой разительным образом отличался от планов генеральных штабов воюющих сторон) погибло около 7 миллионов человек. В то же время, по оценкам эпидемиологов, в результате гриппа «испанки», бушевавшего в те же годы, – фактора, который не принимали в расчет, – погибло более 50 миллионов человек.

Будущее человечества и его стратегических субъектов в огромной мере зависит от того, насколько эффективно они научатся управлять рисками своего развития. Знания, необходимые для этого, и должна дать наука.

Подобным образом в мировом научном сообществе задача ставится с 1994 года (Конференция по стихийным бедствиям и природным катастрофам в Иокогаме) в различном контексте [22]. Пока важность этого круга проблем недооценивается, однако каждая неожиданная катастрофа углубляет понимание фундаментальности и большого прикладного значения этих проблем.

Нейронаука. Одна из главных научных загадок, ответ на которую, вероятно, будет дан в XXI веке – это понимание тайны сознания и принципов функционирования мозга. В самом деле, мозг является загадкой в техническом смысле – скорость срабатывания триггера в микросхеме в миллион раз меньше, чем скорость срабатывания нейрона в мозге. Информация в нервной системе передается *в миллион раз медленнее*, чем в компьютере. «Перефразируя специалиста по искусственному интеллекту Марвина Минского, удивительно не то, что «Deep blue» может играть в шахматы с чемпионом мира, а то, что человек, имеющий гораздо меньше возможностей рассчитывать десятки ходов, способен конкурировать с компьютером», – пишет выдающийся специалист по анализу саморазвивающихся систем, один из авторов генетических алгоритмов Дж.Х. Холланд [22].

Если XIX век принес открытие «химического кода вселенной» (все вещества которой состоят из элементов Периодической системы), если XX век – загадку «биологического кода живого» (записанного на языке последовательностей из 4-х букв – А, Т, Г, Ц), то XXI век может дать понимание «психологического кода» – алгоритмов кодировки организмами сигналов внешнего мира, их обработки, запоминания, механизмов использования.

В настоящее время в этой области выдвигается очень широкий класс моделей. В традиционных подходах, связанных с теорией нейронных сетей, феномен сознания рассматривается как результат самоорганизации в ансамблях нейронов. Альтернативный подход, связанный с нанобиологией и новым взглядом на квантовую механику, был развит выдающимся математиком и физиком-

теоретиком Роджером Пенроузом [24]. По его мысли, каждая клетка представляет собой своеобразный «квантовый компьютер», и самоорганизация происходит не на клеточном, а на квантовом уровне.

Чтобы прояснить эти и многие другие вопросы, связанные с нейронаукой, в 2013 году в США был начат большой исследовательский проект «Картирование мозга» с бюджетом более 3-х миллиардов долларов. Цель проекта – используя нанотехнологии, томографы нового поколения, компьютерные реконструкции и модели, выявить структуру мозга и динамику протекающих в нем процессов. Аналогичный проект начинается в Европейском сообществе.

Третья задача – *построение математической истории*, включая модели мировой динамики и системы стратегического прогноза. Успех этого проекта может помочь человечеству прийти в более благополучное, стабильное и обеспеченное будущее, по сравнению с неосознаваемым и делаемым стихийно выбором.

По-видимому, «путь Гулливера» завершается, и на авансцену науки выходят междисциплинарные исследовательские программы, имеющие дело с «человекомерным» диапазоном масштабов. Постнеклассические проекты и концепции постепенно вытесняют «неклассику» на периферию сознания научного сообщества, подобно тому, как «неклассика» век назад приходила на смену представлениям классической науки.

Есть ещё один простой и надежный способ объективно оценить масштаб «смены вех», переоценки ценностей в науке XXI века.

Чтобы заглянуть в будущее, представить, чем будут заниматься ученые в течение ближайших 20-30 лет, в какие направления технологий, ориентированных на перспективу, будут вкладываться главные усилия, можно посмотреть

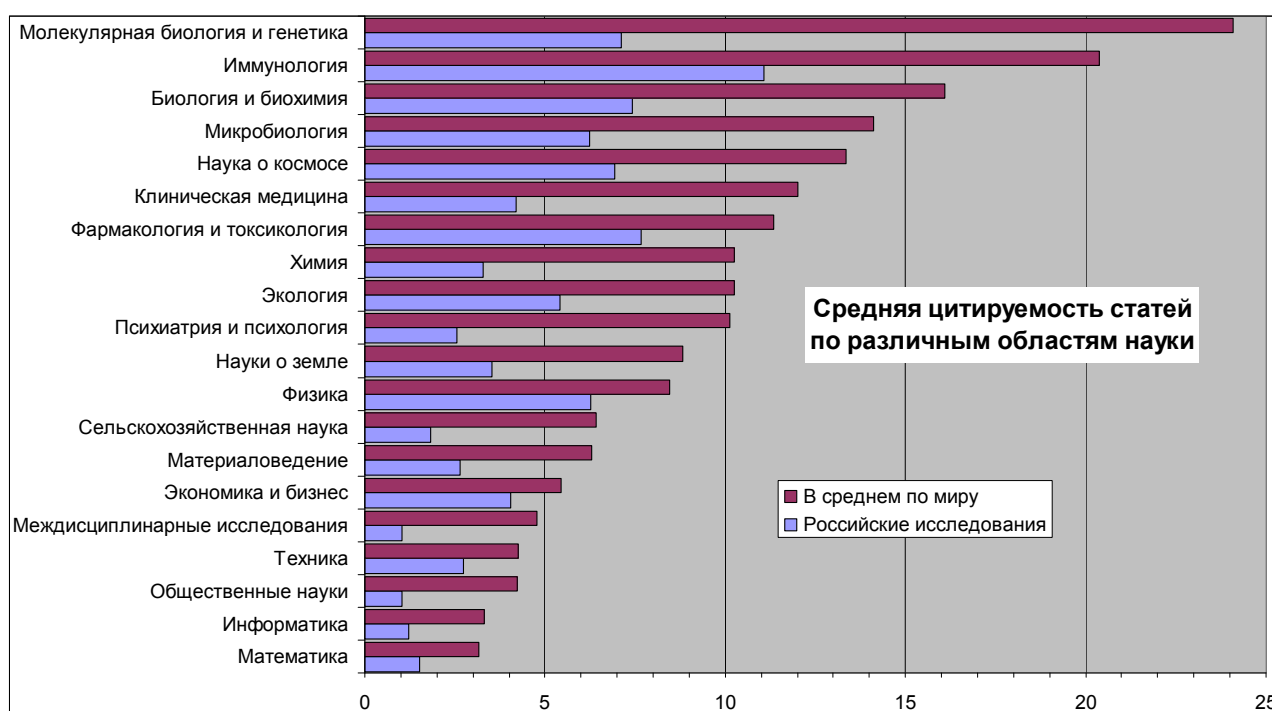


Рис. 1. Научные приоритеты в естественных науках в России и в мире

среднюю цитируемость работ в различных областях знания в настоящее время. Цитируемость статей показывает, насколько большими и активными являются сообщества, работающие в различных научных дисциплинах.

Со школьных времен у большинства остается представление, что математика – большой и сложный предмет, физика и химия примерно в два раза меньше и проще, а биология в два раза меньше и проще физики и химии.

Однако «взрослая наука» выглядит сегодня совершенно иначе (см. рис.1) [34]. Возьмем «наследниц» школьной биологии – *молекулярную биологию и генетику* (24,08), *биологию и биохимию* (16,09), *микробиологию* (14,11), *фармакологию с токсикологией* (11,34) – они в 12 раз превосходят *физику* (8,45), в 8 – *химию* (10,16) и в 27 – *математику* (3,15) или *информатику* (3, 32).

Это связано с тем, что науки живут как бы в «разном возрасте» – одни в старости, другие в зрелости, третьи в юности. Многие идеи, методы и подходы, пройденные в одной области исследований, могут оказаться волнующей перспективой в другой. Поэтому самим учёным очень нужны *междисциплинарные подходы*, которые позволяют мыслить широко, поверх отдельных дисциплин, научных направлений и школ, помогают ломать барьеры, мешавшие двигаться вперед.

Интересно сравнение приоритетов мировой и отечественной науки (Россия/мир). Вероятно, XXI век будет веком человека. Развитие возможностей и способностей людей и коллективов станет магистральным направлением прогресса. С ним будут связаны и главные возможности, и основные угрозы. Поэтому весьма показателен перечень «аутсайдеров» научного пространства России, в которых отрыв от мирового уровня по показателю цитируемости статей особенно велик. Это общественные науки (1,02/ 4,23), а также *психология и психиатрия* (2,54/10,23). Здесь мы отстали от мировых показателей вчетверо. И завершают список междисциплинарные исследования, где отставание оказывается почти пятикратными (1,04/4,78).

О крутом повороте в развитии научного знания говорит и экономическая логика. Опыт показывает, что базисные, ключевые технологии данного технологического уклада создаются в ходе развития предыдущего [39]. (Просто в данном технологическом укладе они делаются простыми, дешёвыми, удобными, доступными. Наглядный пример – взлет персональных компьютеров, планшетников, коммуникаторов, в основе которых лежат результаты фундаментальных исследований полувековой давности). Тем не менее, решаемые экономикой задачи также влияют на развитие фундаментальных научных исследований.

И здесь показательна технологическая платформа SCBIN (Socio Cognito Bio Info Nano, или в её прежней версии NBIC – Nano Bio Info Cognito). По существу, вся эта платформа и по своему замыслу, и по целям, и по технологиям является «человекомерной» [40]. Нижняя граница пространственных масштабов – атомные размеры, верхняя – размеры, на которых общество меняет окружающую среду. И именно в этом контексте «с человеческим лицом» понятия

сложности, технологических вызовов XXI века, альтернативы развития цивилизации рассматриваются с точки зрения методологии и междисциплинарных подходов многими отечественными и зарубежными исследователями [25,29,31-33,36-38].

ПОЛЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ЕГО ОГРАНИЧЕНИЯ

Делать длительные прогнозы – значит уподобиться Прометею: судьба таких прогнозов (если не предсказателей) наверняка будет печальной. И всё же это очень заманчиво.

Дж. Х. Холланд

В самых разных исследованиях, от экономических до сельскохозяйственных, мы будем ограничены фактором сложности – барьером, который вряд ли будет преодолен самыми мощными и быстродействующими компьютерами. Мы ещё не знаем, где именно лежат эти барьеры, но через пять-десять лет обязательно узнаем.

Дж. Ланье

Идея научного и технического прогресса как основного способа решения проблем нашей технологической цивилизации пришла к нам из Нового времени. Эта идея, вошедшая в плоть и кровь нашей культуры, порождает подсознательное ощущение безграничных возможностей, в частности, для развития науки.

Это согласуется с возрастной психологией человека. Ребенок уверен, что он вырастет очень сильным и умным, что родители будут жить вечно и что, несмотря на мелкие трудности сегодняшнего дня, всё сложится в конце концов отлично. Но с годами юноша понимает, что, вероятно, каких-то целей он достичь не сумеет. Взрослый же, сложившийся человек, старается объективно, трезво и реалистично оценить свои возможности, ресурсы и шансы на успех, а также имеющиеся ограничения, приступая к любому серьезному делу.

По-видимому, тот же путь проходит научное знание. И развитие постнеклассических подходов, в которых наука рассматривается не как самодостаточный и не связанный с другими сферами жизнедеятельности поиск истины, а как деятельность, учитывающая цели, идеалы и задачи, решаемые обществом, – это признак «взросления» науки и сообщества исследователей. Поэтому важно осмыслить ограничения, очерчивающие поле возможностей развития науки.

Каждая фундаментальная теория не только давала более глубокое понимание реальности и новые инструменты, но и формулировала принципы запрета или ограничения, в пределах которых могут ставиться и решаться научные задачи.

В самом деле, классическая механика, с её законом сохранения энергии, убедительно показала, что не приходится надеяться на создание *вечного двигателя первого рода*, позволяющего производить работу без затрат энергии. Тер-

динамика показала невозможность создания *вечных двигателей второго рода*, основанных на передаче теплоты от холодного тела к горячему без изменения окружающей среды. Квантовая механика с её соотношением неопределенностей показывает принципиальную *невозможность одновременно определять координату и импульс микрочастицы с произвольной точностью*. Одним из следствий теории относительности является *невозможность передавать информацию со сверхсветовой скоростью*. Нелинейная динамика и синергетика показали в 1960-х годах *невозможность глобального прогноза или реконструкции* для широкого класса динамических систем и существование у них *конечного горизонта прогноза*.

К этому списку можно добавить *принцип запрета Паули*. Законы сохранения и тесно связанные с ними симметрии приводят к своим запретам и ограничениям.

Нарушения принципов запрета, открываемые учеными для каких-то конкретных систем, заставляют исследователей менять или существенно корректировать парадигму и являются выдающимися научными достижениями (наиболее яркий пример – нарушение СРТ-инвариантности, открытие которого было удостоено Нобелевской премии).

Выявление и осознание принципов запрета является показателем зрелости научной дисциплины и одним из важнейших показателей её развития.

Лидером по числу и фундаментальности выявленных ограничений на сегодняшний день является физика. Причина этого – три века интенсивного развития данной области науки, высокая точность измерений, позволяющая ставить «критические эксперименты», развитые методы количественного, формализованного описания исследуемых явлений.

Кроме того, физики становились участниками крупных научно-технических проектов, требовавших ясного и объективного понимания, что возможно в данных технологических рамках, а что нет.

Можно ожидать, что по мере развития научного знания сеть принципов запрета и осознанных ограничений будет расти, и не только в естественных, но и в гуманитарных науках.

В ряде случаев выявленные ограничения исключительно конструктивны. Из отношений неопределенности

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar, \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar,$$

где Δp , Δx , ΔE и Δt – неопределенность в измерении, соответственно, импульса, координаты, энергии и времени, \hbar – постоянная Планка, видна предельная доступная нам точность пространственно-временных измерений. В приведенном выше списке среди главных вопросов физики и астрофизики фигурировала мечта выйти на планковские пространственные и временные масштабы (ряд теоретиков полагает, что на них электрон уже не будет точечной частицей и станет видна дискретность пространства-времени). Из этих формул

непосредственно видно, какими гигантскими должны быть доступные нам энергии и импульсы микрочастиц, чтобы заглянуть в эту область параметров.

Однако о пределах возможностей отдельного человека и общества мы в начале XXI века продолжаем судить на интуитивном уровне – мифы тут оказываются тесно переплетены с научными данными. Попытку изменить такую ситуацию предпринял в середине XX века выдающийся французский историк, представитель научной школы «Анналов» Фернан Бродель [26]. Он попытался оценить темпы технологических и социальных изменений в течение трех веков становления капитализма в Европе и *отделить возможное от невозможного* в исторических процессах этого периода. Возможно, к этим попыткам удастся вернуться на более высоком уровне в контексте развития математической истории [1-3]. Приобретения на этом пути также лишат научное знание ряда существующих иллюзий.

Рассматривая динамику развития науки, следует обратить внимание на явление, иногда называемое «синдромом географических открытий». Представители различных научных дисциплин, живущие своим делом, как правило, уверены, что именно их область находится на взлете, на пороге научной революции и именно в ней могут открыться новые горизонты. Однако, строя карту незнания, определяя стратегию развития науки на десятилетия вперед, было бы опрометчиво доверять только этим оценкам.

То, что это может быть не так, показывает наглядный пример – развитие географии. Изначально цель этой области науки – описание поверхности Земли и построение географических карт, позволяющих представлять полученные знания в наглядном и обозримом виде. Эта захватывающая деятельность, включавшая путешествия, открытие новых стран и материков, заняла много веков. Однако к началу XX столетия задача, ставившаяся этой наукой, оказалась решена.

На следующем этапе «после конца науки» либо изменяется предмет исследования, либо создаются исследовательские программы на стыке с другими дисциплинами, либо акцент делается на использовании этих знаний. Пример первой альтернативы – перейти от описания земной поверхности к исследованию и картографированию дна морей и океанов. «Подводная география» – одно из важных научных достижений XX века, решающий вклад в которое был внесен советскими исследователями. Вторая альтернатива – разработка экономической географии (стык: география + экономика), географии расселения (география + демография), военной географии, геополитики (география + военная наука + стратегический анализ), математической географии и т.д. Третья альтернатива – туризм, обеспечение возможности повторить путешествия великих землепроходцев и мореплавателей прошлого, реконструкция великого в игровой форме.

Однако при этом важно отдать себе отчет в том, что исходная исследовательская задача решена, что в этом смысле география имела начало и конец.

Таким же образом можно посмотреть и на другие научные дисциплины, чтобы понять, в каком возрасте, на какой стадии развития они находятся. Такой анализ для химии провел сотрудник Института физической химии, профессор О.В. Крылов [27,28].

При наличии принтеров, сканеров и компьютеров, росте информационного шума, при побуждении руководителей и фондов требовать от исследователей потока публикаций, динамика числа статей не является хорошим показателем, отражающим научные достижения, получаемые в конкретной области. Существенны открытия, ключевые достижения, формирующие «скелет науки», около которого растет массив научного знания. О.В. Крылов, чтобы исключить субъективность и конъюнктурность, взял несколько наиболее популярных в мире химических энциклопедий. Затем он выделил набор основополагающих достижений, которые послужили отправной точкой последующих работ. После этого он зафиксировал год сделанного открытия, построил зависимость числа таких открытий по времени и усреднил её по десятилетиям (см. рис. 2).

Из графика следует, что наиболее активно эта область знания развивалась в период, соответствующий Второй мировой войне, а затем в период создания ядерного оружия.

История советского и американского ядерных проектов показывает, что научные задачи, решенные химиками, оказались не менее важными и значимыми, чем достижения физиков. Аналогичный анализ был проведен для отдельных отраслей химии. В частности, он показал, что пик развития органической химии пришелся на 1900-й год, а биохимии – на 1960-й.

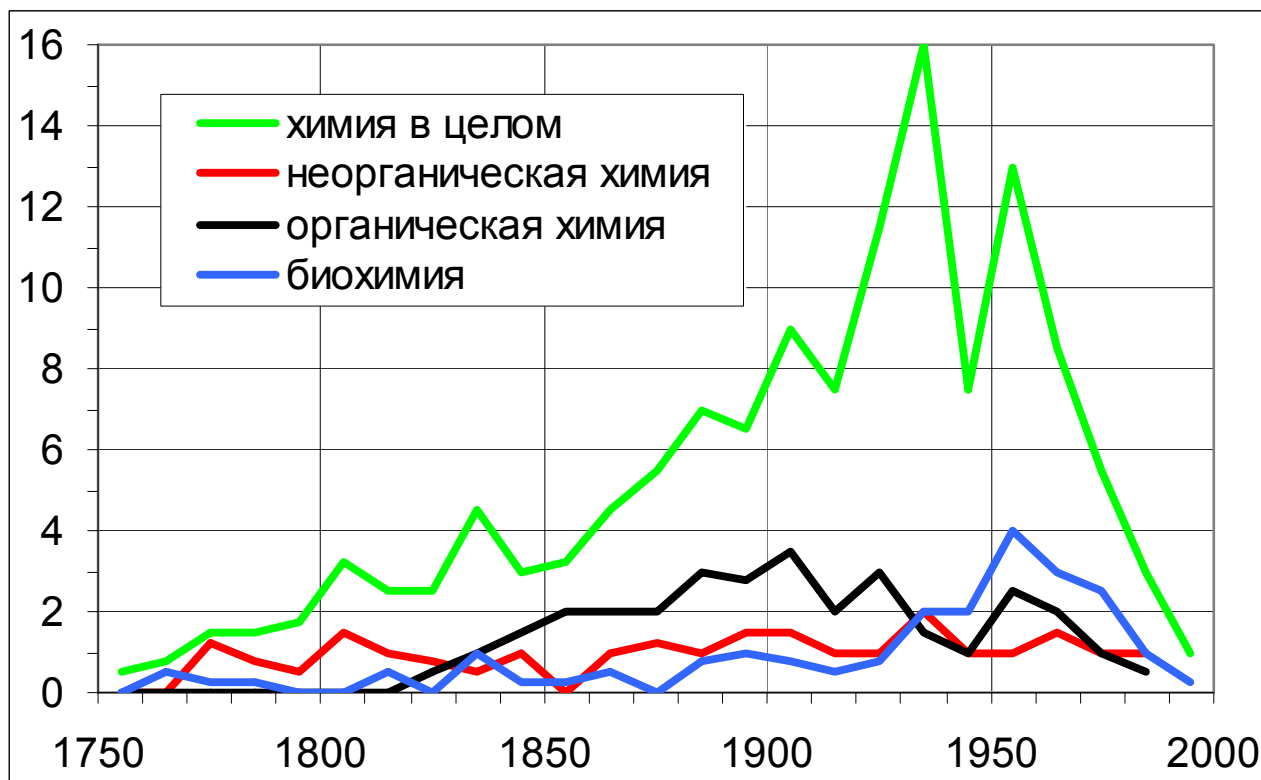


Рис. 2. Среднее по десятилетиям количество ключевых открытий в химии и ее областях

Другими словами, мы имеем ситуацию, схожую с «синдромом географических открытий» – основной массив фундаментальных знаний уже получен. Пройден славный путь – исследовано более 100 тысяч неорганических и 20 миллионов органических веществ. И сейчас на переднем крае этой области оказываются инженеры, технологи, изобретатели. Пришла пора эффективно и масштабно *использовать* полученные знания. Здесь тоже можно проследить географическую аналогию – Колумб открыл Америку в 1492 году, и понадобилось почти 300 лет, чтобы освоить эту территорию и создать на ней сильное независимое государство.

В химии, как, вероятно, во многих других научных дисциплинах, кончилась пора научных открытий и началась эпоха освоения открытого и понятного. Этот вывод подтверждает анализ Нобелевских премий по химии, также проведенный О.В. Крыловым [27], которые можно рассматривать как идентификатор того, что научное сообщество считает наиболее важными достижениями. Со временем, в течение XX века, происходит сдвиг от ключевых, основополагающих проблем данной отрасли науки к её периферии, к методологическим вопросам, к инструментам, к технологиям, к коллективным исследованиям, к работам, находящимся на стыках нескольких дисциплин. В своё время Нобелевский комитет принял решение не присуждать премии за осуществление какого-либо органического синтеза, как бы он ни был сложен. Это признание того, что такая деятельность перешла из сферы науки в область технологий.

По сути дела, подобный финал – вполне успешный и благополучный «конец науки» или «конец исследовательской программы». В своё время В.С. Стёпин неоднократно обращал внимание на феномен *технонауки*, характерный для стран-лидеров технологического развития. В них вначале выясняется, каких фундаментальных знаний недостает, чтобы производить какие-либо товары или услуги, которые могут быть востребованы рынком, а затем целенаправленно организуется научная работа для того, чтобы восполнить имеющиеся пробелы. Если «критическая масса» знаний, технологий и стратегий, определяющих перспективу, достигнута, то запускается саморазвивающийся процесс, замыкается петля положительной обратной связи: *рост масштабов прикладных исследований и подготовки кадров → удешевление и повышение эффективности товаров и услуг данной продукции → расширение рынка → рост масштабов прикладных исследований и подготовки кадров*.

Классическим примером такой «экономической неустойчивости», генерируемой новыми товарами и технологиями, является развитие компьютерной индустрии. Напомним, что научная активность научного сообщества, занимающегося информатикой, в России вчетверо, а в мире в 1,5 раза ниже, чем у исследователей, занимающихся экономикой, бизнесом (см. рис.1). Переход от фундаментальной науки к прикладной, а затем к технологиям здесь уже произошёл.

Как показывает мировой опыт, необходимым условием такого развития, эффективного использования технонауки, является наличие крупных высоко-

технологичных компаний, ориентированных на массовый рынок как в своей стране, так и за рубежом. К сожалению, это условие в настоящее время не выполнено в России, что является системной причиной кризисных явлений в отечественных науке и образовании.

В настоящее время процессы, связанные с развитием технонауки, происходят в одной из локомотивных отраслей VI технологического уклада – *биотехнологии*. Основной массив фундаментальных знаний, который привел к взрывному технологическому росту, был получен в ходе реализации программы «Геном человека» (на которую в США было затрачено 3,8 млрд. долларов). При этом были запущены исследования и разработки, направленные на повышение эффективности расшифровки генома человека.

Расшифровка последовательности первого генома (текст из 3-х миллиардов букв, записанный буквами А, Т, Г, Ц) потребовала многих лет работы и нескольких миллиардов долларов. Расшифровка генома нобелевского лауреата, «отца» двойной спирали, Дж. Уотсона в 2007 году заняла два месяца и стоила около миллиона долларов. В настоящее время в США полная расшифровка генома занимает две недели и стоит около 5 тысяч долларов. В соответствии с выполняемой национальной программой стоимость этой процедуры должна в ближайшие годы уменьшиться до 1 тысячи долларов, а сам анализ стать массовым (см. рис. 3).

Создание отрасли индустрии, выросшей около этого научного и технологического достижения, очень существенно повлияло на систему здравоохранения, фармацевтику, сельское хозяйство, оборонный комплекс и систему охраны правопорядка. В США ежегодно подвергается аресту более 14 миллионов человек, у них берутся пробы ДНК, которые затем вносятся в базу данных. К этой базе криминалисты потом обращаются при поиске преступников [44].

Это достижение стало фактором геэкономике и геополитики. В феврале 2013 года Барак Обама в обращении к согражданам заявил: «Настало время выйти на уровень научных исследований и разработок, невиданный с момента пика космической гонки... Сейчас не время потрошить инвестиции в науку и

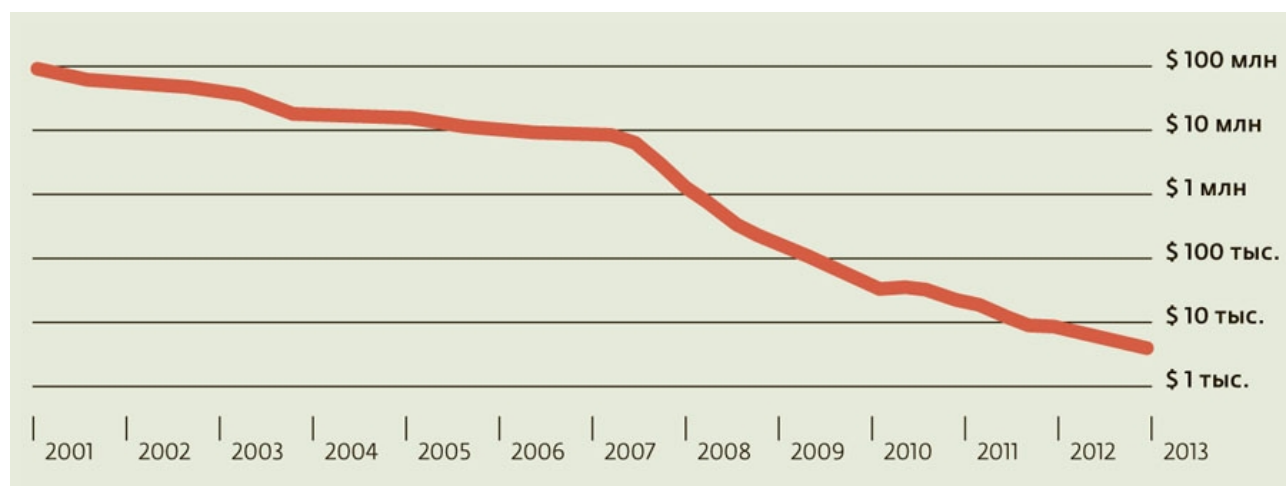


Рис. 3. Изменение стоимости расшифровки генома человека в США

инновации... Каждый доллар, который мы вложили в создание карты человеческого генома, вернул по 140 долларов в нашу экономику – каждый доллар!» [30].

Таким образом, ещё одна граница развития науки лежит там, где она соприкасается с промышленностью. Основополагающие научные достижения выдающихся ученых одной эпохи позволяют организовать массовые, рутинные технологические операции в другую. Это и является одним из важнейших механизмов развития общества.

ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ЗВЕНО

Мир представляет реализацию простейших математических конструкций.

А. Эйнштейн

Будущая эра пробуждения человеческого интеллекта вполне может привести к пониманию качественного содержания уравнений. Сегодня мы этого не можем. Сегодня мы не видим, что уравнение течения воды включает такие вещи, как структуры турбулентности. Сегодня мы не знаем, содержит ли уравнение Шрёдингера лягушек, композиторов или мораль. Мы не можем сказать, есть ли необходимость в чем-то большем, а именно, в Боге. И мы все можем иметь на этот счет собственное мнение.

Р. Фейнман

На первый взгляд, структура научной деятельности представляется достаточно простой. Вначале формулируется проблема, затем для её разрешения организуются наблюдения или ставится эксперимент, чтобы объяснить его, развивается теория. Её предсказания сопоставляются с реальностью, и далее мы выясняем, позволяет ли достигнутый уровень понимания ответить на первоначально заданный вопрос.

В этой ясной и логичной цепочке упущено очень важное звено, лежащее между результатами наблюдений или эксперимента и суждениями о том, что же на самом деле стоит за тем, что мы видим, измеряем, фиксируем.

Постановка этой ключевой для научного познания проблемы восходит к Платону, представившему в своих диалогах миф о пещере. Он предложил проанализировать следующую ситуацию. Узники прикованы к стенам пещеры таким образом, что они не могут непосредственно наблюдать то, что происходит за её пределами. Однако у них есть возможность видеть тени людей, животных, предметов, проходящих и проносимых мимо пещеры и отбрасывающих тени на противоположную стену. Встает вопрос, насколько полно и объективно узники могут судить об окружающем мире, находясь в такой ситуации.

Этот миф очень важен для развития идей объективного идеализма, поэтому он многократно обсуждался, переосмысливался и интерпретировался как на протяжении прошедших веков, так и в течение последних лет.

Традиционно мифу сопоставлялся образ наших чувств, дающих нам искаженную, неполную и неточную картину совершенных идеальных сущностей (образ мира, находящегося вне пещеры).

Наука и технологии нашего времени многократно расширили возможности органов чувств человека. Приборы гиперспектрального зондирования позволяют наблюдать поверхность Земли не в 7 естественных цветах спектра, видимых невооруженным взглядом, а в 1000 условных цветов. Астрономия стала всеволновой.

Тем не менее, значительная часть всей прикладной математики, связанная с анализом результатов наблюдений и экспериментов, в XX веке развивалась под знаком мифа о пещере.

Дело в том, что ученые в прошедшем столетии начали задавать гораздо более сложные вопросы, чем раньше, и пришли к необходимости анализировать так называемые *обратные задачи*.

Отличие между прямыми и обратными задачами можно пояснить с помощью простой формулы

$$Az = u.$$

В прямых задачах A – известный оператор, отражающий свойства исследуемого объекта, u – его свойства или будущее состояние (или характеристики объекта, которые мы хотим определить). Законы природы, если они известны, и позволяют для конкретной системы строить оператор A (или, что то же самое, математическую модель).

Однако, возможна другая ситуация, с которой современная наука встречается всё чаще. Нам известно *нынешнее состояние* объекта и оператор A , отражающий свойства изучаемой системы. И по этим данным требуется определить *начальное состояние* изучаемой системы. Другой вариант – у нас есть несовершенные измерения свойств объекта u (аналог теней на стене в платоновском мифе), мы знаем свойства измеряющего прибора A , и нам нужно восстановить исходные свойства объекта (те самые «идеальные сущности», свойства предметов, проносимых мимо пещеры в мифе).

Фундаментальность и общность обратных задач для современной науки была осознана одним из основоположников прикладной математики XX века Андреем Николаевичем Тихоновым, вторым директором ИПМ [33]. Он столкнулся с этой ситуацией, рассматривая задачу о тепловом режиме Земли. Пробурив скважину и достав kern, мы можем измерить его температуру (вектор u). Законы теплопроводности хорошо известны уже несколько веков (оператор A). Требуется определить, какая температура была на поверхности Земли в разные исторические эпохи (вектор z). Другими словами, надо решить обратную задачу

$$z = A^{-1}u.$$

Прямую задачу на экзамене по математической физике должен с легкостью решать студент физического или математического факультета университета. Проблем здесь нет.

С обратной задачей ситуация совершенно иная. Она является *некорректной*. Суть этого важнейшего для современной математики понятия вновь непосредственно связана с платоновским мифом. Дело в том, что разные предметы могут отбрасывать *одни и те же тени*. Очень мало отличающимся векторам u могут соответствовать очень сильно отличающиеся вектора z .

Как же тут быть? Здравый смысл подсказывает очевидное. Если кто-то из узников был вне пещеры, то он может иметь представления о том, что же могут проносить мимо неё и представлять, между какими образами делается выбор. Он может располагать *априорной информацией (относительно возможных свойств вектора z)*. К нему и следует обратиться за советом! И тогда, решая обратную задачу, мы должны это знание каким-то образом учесть.

Иногда это знание может прийти из другой области исследований. И в основе современной теории некорректных задач лежат способы учета априорной информации.

Это очень важный и интересный сюжет и для междисциплинарных исследований, и для философии науки в её постнеклассическом контексте.

Из статьи в статью кочуют высказывания выдающихся физиков о том, что новая теория должна быть «красива» или «достаточно безумна». Это тоже субъективные критерии отбора среди теорий, привносимая априорная информация. (Представления о «красоте» и «безумности», бытующие в научном сообществе, очень сильно меняются со временем). И сейчас здесь требуется глубокий методологический анализ той априорной информации, которая привносится в теории различных областей науки, определяющих нашу картину мира.

Говоря языком студентов-математиков, известный оператор A может обладать «хорошими» свойствами, а оператор A^{-1} – многими «плохими», и его следует заменить на «хороший» оператор \tilde{A}^{-1} , близкий к A^{-1} , учитывающий имеющуюся априорную информацию, и дающий наилучшее (в том смысле, о котором исследователи тоже должны договариваться) возможное решение обратной задачи. Сегодня прикладная математика знает об этом гораздо больше, чем в начале XX века, и гораздо меньше, чем нужно было бы.

Задача, о которой шла речь, совершенно типична для медицинской диагностики и экспертного анализа в целом [43,43]. Просто, если в естествознании мы во многих случаях представляем, как обращаться с оператором A^{-1} , то для многих важных областей исследование такого фактора – «человеческих» алгоритмов учета априорной информации, образа действий «узников пещеры» – анализ оператора A^{-1} находится в самом начале.

Однако наука не ждет, пока мы «разберемся с простыми задачами» и «возьмемся за сложные». Обычно все эти вопросы решаются одновременно.

Исследователи в области космологии, математической истории, многих других областей имеют дело с ещё более сложной ситуацией, в которой неизвестен не только вектор z , но и многие свойства оператора A . Например, в космологии учёные пробуют реконструировать не только состояние вселенной в первые мгновения после большого взрыва, но и «оператор эволюции вселенной», наблюдая «мгновенный снимок» космоса и привнося в космологию результаты других областей науки.

Посмотрев на развитие знания с точки зрения мифа о пещере и теории обратных задач, мы гораздо яснее, чем раньше, можем очертить пределы научного анализа. В упоминавшейся задаче о тепловом режиме Земли исследователи располагают точностью измерения нынешнего состояния ε , и это позволяет заглянуть в прошлое на $T(\varepsilon)$ лет назад. То, что было до этого момента, при современном уровне эксперимента находится в сфере гипотез, догадок, домыслов, мифов, веры.

Чтобы продвинуться дальше в прошлое, нам надо увеличить точность измерения (уменьшив ε). Это возможно далеко не всегда. Вероятно, у нас появится новая теория (новый оператор A), для которой будут не такие жесткие ограничения (например, в световой микроскоп нельзя увидеть атомы, но есть ряд электронных микроскопов, с помощью которых это можно сделать). Иначе надо дать себе отчет, что этот круг явлений находится (а, возможно, и всегда будет находиться) вне сферы научного знания. На мой взгляд, ясное и трезвое понимание этого сделает науку сильнее.

В рамках постнеклассической научной рациональности представляется очень важным и интересным проанализировать новую роль математики в процессе познания и связанные с этим ограничения.

Анри Пуанкаре предполагал, что в будущем можно будет предсказывать новые физические явления на основании анализа общих свойств математической модели, описывающей исследуемые явления. В XX веке это предвидение стало реальностью благодаря развитию нелинейной динамики и широкому использованию компьютерного моделирования. Многие науки сейчас проходят путь, который завершён в физике. В самом деле, вначале к физике относились и опыты, и гипотезы, и зачатки теории. Это примерно то, что проходят в школе или на первых курсах университетов в курсах «общей физики». Затем, по мере развития науки, произошло разделение «по вертикали» на *экспериментальную* и *теоретическую* физики и по «горизонтали», по отраслевому принципу (механика, электродинамика, физика твердого тела, биофизика и т.д.)

С усложнением теоретической физики возникла потребность исследовать свойства предложенных моделей и построенных концепций как математических объектов – родилась *математическая физика*. Однако для того, чтобы использовать новые инструменты, осмысливать их возможности и ограничения,

исследователями, начиная с 1960-х годов, начала создаваться *вычислительная физика*.

Две последние «физики» сейчас в огромной мере играют объединяющую, интегрирующую роль. Они позволяют увидеть единство в многообразии физического мира и дают язык для его описания. Они позволяют избегать «эффекта вавилонской башни», когда специалисты, работающие в близких областях, перестают понимать друг друга.

Это дало огромный импульс и самой математике. Академик В.И. Арнольд, придерживавшийся радикальных воззрений, считал: «Математика – это часть физики».

Вместе с тем стоит обратить внимание на парадоксальность нынешней ситуации. Обратим внимание на статистику информационной системы Google за 2011 год, категория «наука». Десять самых популярных запросов в мире: *математика, Луна, клетка, Википедия, ДНК, химия, математические игры, физика, Большой взрыв (испанский сегмент)*. Десять самых популярных запросов в США: *математика, Луна, наука, математические игры, занимательная математика, Земля, калькулятор, занимательные математические игры, химия, периодическая таблица элементов*. Десять самых популярных запросов в Австралии: *математика, занимательная математика, математические игры (math games), занимательные математические игры, математика, Луна, математические игры (math games,) акула, занимательная математика*.

Примерно таким же образом дела обстоят в большинстве развитых стран – математика фигурирует в том или ином виде в первой десятке, а во многих странах и не по одному разу. На 2800% выросло за 2011 год число запросов «*занимательная математика*».

Несколько иначе дела обстоят в России. Наша «горячая десятка»: *ЕГЭ (единый государственный экзамен) ГДЗ (готовые домашние задания), решебник, ответы, результаты ЕГЭ, Википедия, ЕГЭ по русскому, ЕГЭ-2011, Алгебра, ГДЗ по алгебре*.

Рубеж роста в 5000% в российском сегменте интернета превысили такие запросы, как «*Википедия*», «*ГДЗ по алгебре*», «*ГДЗ по геометрии*», «*ГДЗ по русскому*», «*ЕГЭ-2011*» и «*радикал*». Согласно статистической российской поисковой системе Яндекс 23 млн страниц содержат аббревиатуру «*ЕГЭ*».

Таким образом, интерес части общества, связанной с математикой, очень велик. В то же время среди областей научных исследований и математика, и информатика находятся в положении аутсайдеров. Каково же объяснение этой парадоксальной ситуации?

По-видимому, многое делает понятным мысль Нильса Бора: «Математика – это язык». Этот язык становится всё более важным и востребованным. Его можно сравнить с нашим обычным языком, который необходим всем. При этом профессии исследователей языка – филологов, лингвистов – совсем не являются массовыми, несмотря на обширность и важность предмета, которым они занимаются. По-видимому, во всё большей степени занятия профессиональных

математиков и филологов будут во многом сближаться (заметим, что и филология является древнейшей и вечно молодой наукой...).

Вместе с тем язык для познающего субъекта очень важен. Мы не можем передать своё понимание и знания, если в языке нет средств для этого. Существует обратная связь – изменение реальности меняет язык, используемый язык формирует реальность. В полной мере это относится к математике и другим языкам науки.

Язык – важнейший инструмент познающего субъекта – тоже должен быть важной темой постнеклассического анализа.

И здесь есть над чем задуматься. До появления неевклидовой геометрии математика казалась совершенной, абсолютной и единственно возможной. Но кризис этой науки в XX веке показал, что есть неразрешимые задачи, что существует множество альтернатив, много вариантов классической теории – математического анализа – вошедшей в кровь и плоть современного естествознания. Было осознано, что есть совершенно разные направления развития и представления о том, какой должна быть математика. Один взгляд, тяготеющий к формализации и к приоритету алгебраических подходов, был выдвинут Д. Гильбертом, предложившим в 1900 году свои 23 знаменитые проблемы. Другой – опирающийся на идеи геометризации всех разделов математики – был обоснован Анри Пуанкаре.

Естественно, встал вопрос, какие образцы математического творчества, концепции и понятия в наибольшей степени соответствуют нашей реальности или её отдельным фрагментам?

На этот вопрос обратили внимание философы ещё во времена Исаака Ньютона. В версии математического анализа, предложенной Ньютоном и Лейбницем и в течение нескольких веков развиваемой их последователями, одними из важнейших понятий являются *бесконечно малые* и *бесконечно большие* величины. Бесконечно малая величина, умноженная на любое конечное число, остается бесконечно малой. Выдающийся британский философ и теолог Джордж Беркли (1685-1753) иронизировал над этим понятием, вопрошая, не являются ли бесконечно малые величины тенью безвременно усопших конечных величин. (Строгое обоснование этого понятия – нестандартный анализ, в котором отдельно вводятся пространства бесконечно малых и конечных величин – достижение второй половины XX века).

Понятие бесконечно малых величин возникает при обосновании предельного перехода и определении понятия мгновенной скорости

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t},$$

где $v(t)$ – мгновенная скорость, Δx – малое приращение пути, Δt – времени. Именно процедура такого предельного перехода и лежит в основе дифференци-

альных уравнений – языка, с помощью на котором сформулировано большинство известных нам законов природы.

Введение этого понятия определило магистральный путь, на котором были достигнуты главные успехи естествознания и математики последних трех столетий.

По-видимому, и этот путь кончается.

В начале XX века математиками был построен ряд парадоксальных, очевидным образом противоречащих здравому смыслу примеров. Это множество на прямой, которое не содержит ни одного отрезка, но ... имеет ограниченную длину (вариант канторова множества). Это множество на плоскости, которое имеет ограниченную площадь и... бесконечный периметр (остров Коха). Это тело, имеющее конечный объем и... бесконечную площадь поверхности (один из вариантов губки Серпинского). Все эти множества получились предельным переходом, после бесконечного количества одинаковых, достаточно простых шагов.

Большинство фундаментальных курсов математического анализа начинается с построения теории действительных чисел. Само это понятие, если вдуматься, парадоксально – числу сопоставляется бесконечная последовательность $a_1, a_2, a_3, a_4 \dots$. Но ведь мы не можем измерить что-то с бесконечной точностью (чтобы определить, с каким же действительным числом мы имеем дело). Нам недоступна бесконечная последовательность даже очень простых шагов.

Характеризуя электромагнитное поле – важнейшее физическое понятие – выдающийся теоретик и блестящий лектор Ричард Фейнман пояснял, что это просто шесть чисел в каждой точке пространства, хотя сам он этого представить не может. Но ни мы, ни компьютеры не умеем оперировать с бесконечным числом величин.

Поэтому возникает целая «индустрия перевода», позволяющая иногда приводить задачи к доступному нам и компьютерам виду. Сама теория самоорганизации возникает как попытка разобраться, что же является главным, как обойтись без бесконечного количества шагов, каковы алгоритмы выделения ключевых переменных и процессов.

Но поскольку на «перевод» тратится так много усилий, то, вероятно, и исходный «язык» скоро ждут большие перемены.

Наличие как угодно больших и малых чисел в описании физических процессов приводит к множеству парадоксов. В своё время выдающийся физик-теоретик Ф. Дайсон утверждал, что, вероятно, самое большое число, которое может возникнуть в физических исследованиях, не будет превышать 10^{100} . Для этого гигантского числа он предложил специальное название – гугол (отсюда и наименование популярной поисковой системы Google). Один из основоположников синергетики Д.С. Чернавский, чтобы избежать ряда парадоксов в статистической физике, предлагал не рассматривать величин, меньших, чем «обратный гугол» – 10^{-100} [45]. Всё это – признаки неудовлетворенности способами описания оснований науки. Вероятно, это признак грядущих перемен.

В «цифровой реальности», в которую мы вступили, по-видимому, быстро вырастет роль дискретной математики, которая может обойтись без многих предельных переходов [46].

Кроме того, такие явления, как землетрясения, биржевые явления, описания которых требуют учёта нескольких уровней организации, уже моделируются на другом языке – с помощью так называемых клеточных автоматов [47]. В таких системах мир (пространство, время, измеряемые функции) дискретен.

Пока важнейшая роль математического языка – важнейшего промежуточного звена между субъектом и объектом познания – недооценивается. Однако ситуация быстро меняется. И несовершенство этого языка всё чаще воспринимается как одно из принципиальных ограничений на пути к более полному и точному пониманию реальности.

ПОСТНЕКЛАССИКА И ОГРАНИЧЕНИЯ ВТОРОГО ТИПА

Чем больше изучаем мы наук,
Тем меньше неизвестного вокруг.
Чем больше мы с тобою узнаем,
Тем больше забываем мы вдвоем.
Чем больше забываем истин мы,
Тем меньше перегружены умы.
Чем меньше изучаем мы предмет,
Тем реже забываем мы ответ.
Чем меньше забываем мудрых слов,
Тем больше светлых среди нас голов.
Зачем науки сложные учить,
Раз можем мы их так легко забыть?

Английский фольклор, вольный перевод В. Рыскулова

Мы привыкли к ясной, простой ситуации, когда всё познанное и темное простирается перед сплошным фронтом науки, а всё завоеванное и понятное служит ей тылом. Но по сути безразлично, таится ли неведомое в лоне природы или погребено в каталогах никем не посещаемых книгохранилищ – то, что не включено в кровообращение науки, не оплодотворяет её, всё равно что не существует.

С. Лем «Глас Господа»

Традиционные ограничения в процессе познания в природе исследуемых явлений, в *объектах* анализа, подробно анализировались и естественниками, и специалистами по философии науки. Однако всё более важными становятся ограничения, диктуемые *субъектом познания* – отдельным учёным, научным сообществом, человечеством. Если границы, накладываемые объектом анализа, считать *ограничениями первого рода*, то пределы, связанные с субъектом, можно назвать *ограничениями второго рода*.

Именно их анализ представляется естественным в контексте постнеклассической рациональности. Автор этой концепции – В.С. Стёпин – характеризуя глобальные научные революции, в ходе которых происходит радикальная перестройка научной картины мира, идеалов и норм науки, её философских оснований, определяет типы рациональности следующим образом [7, с.67-68].

«Первый из них (классика) характеризуется особым пониманием объяснения и описания. Предполагается, что объективность объяснения и описания достигается только тогда, когда в цепочке деятельности «субъект – средства (операции) – изучаемый объект» объяснение сосредотачивается только на объекте и будет исключено всё, что относится к субъекту, средствам и операциям деятельности.

Второй (неклассика) эксплицирует связи между знаниями об объекте и характером средств и операций деятельности. Объяснение и описание включает принцип относительности объекта к средствам наблюдения (квантово-релятивистская физика).

Третий (постнеклассика) расширяет поле рефлексии над деятельностью, учитывает соотнесённость получаемых знаний об объекте не только с особенностью средств и операций деятельности, но и с её ценностно-целевыми структурами. В явном виде учитывается связь между внутринаучными и вненаучными социальными целями и ценностями».

До сих пор традиционной для научных исследований была ситуация, в которой основную проблему составляло получение экспериментальных данных и построение теории, дающей их объяснение. С хранением, систематизацией, обработкой результатов наблюдений, как правило, проблем не возникало, либо последние относили к техническим, легко преодолимым трудностям, не накладывающим серьёзных ограничений на процесс и результаты научного познания.

Однако на наших глазах ситуация быстро и кардинально меняется. Наука является неотъемлемой частью культуры – и то, с чем столкнутся учёные, как в области технологий, так и в сфере фундаментальных исследований, за десятилетия (а то и века) до этого часто отыгрываются в художественной литературе. И здесь весьма показателен известный роман Станислава Лема «Глас Господа», в котором учёные зафиксировали сложный, периодически приходящий из космоса сигнал [16]. Данных оказывается слишком много, и совершенно неясно, что из них существенно, а что нет. Собственно, необходимый объём работы по анализу уже имеющихся данных может быть недоступен для объекта. И это его проблемы, а не свойства исследуемой системы или используемых инструментов.

По-видимому, первыми осознали и начали активно использовать эту новую для науки ситуацию специалисты по криптографии. Пусть N – число, характеризующее объём входных данных. *Простыми* были названы задачи, в которых для получения ответа требуется произвести не более, чем $Q \sim N^\alpha$ действий, где α – постоянная, не зависящая от N степень.

Задачи, в которых функция $Q(N)$ растёт в зависимости от N быстрее, были названы *сложными*. Именно на использовании сложных задач основано большинство современных алгоритмов защиты информации – так называемая *криптография с открытым ключом* [17]. Шифры строятся таким образом, чтобы для прочтения сообщения без знания ключа с помощью существующих компьютеров требовалось решить сложную задачу, что требовало бы времени, превышающего возраст вселенной.

Сложные задачи не являются экзотикой – мир полон ими. Простейший пример – задача коммивояжёра: на плоскости расположены N населённых пунктов, и коммивояжёру требуется объехать их всех по кратчайшему пути. Каков же этот путь? Математическая теория показывает, что в этой задаче для получения точного решения необходим полный перебор вариантов, требующий порядка $Q \sim N^N$ операций. Если на плоскости всего 100 населённых пунктов, то $Q \sim 100^{100} = 10^{200}$. Это число довольно велико, поскольку, по представлениям физиков, во вселенной около 10^{80} атомов.

В существующих и широко используемых для защиты информации алгоритмах в качестве сложной задачи используется разложение N -значного числа на простые множители. Если $N = 1000$, то потребуются $Q \sim 10^{23}$ операций, которые гигафлопсный компьютер будет выполнять более 10 миллионов лет [18].

До недавнего времени все эти оценки и рассуждения считались далёкими и от фундаментальной науки, и, тем более, от характеристик познающего субъекта. Однако развитие науки и технологий в последние годы поставило эту проблему, получившую название Большие Данные (Big Data), со всей остротой [19].

Например, на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе происходит 20 млн. соударений в секунду. За день это даёт количество данных, сравнимое со всем объёмом интернета. Часто говорят, что большие данные характеризуются тремя V : Variety, Velocity, Volume (неструктурированность, высокая скорость поступления и обработки и большие объёмы). Иногда проблему больших данных связывают с развитием SCBIN (Socio Cognito Bio Info Nano) – технологической платформы. Единицами измерения в этой области являются петабайты (2^{50} бит $\approx 10^{15}$) и зеттабайты ($2^{70} \approx 10^{21}$ бит). К 2016 году каждую секунду через интернет будет передаваться столько материалов, что для их просмотра человеку потребовалось бы 833 дня.

И здесь мы вновь приходим к научным задачам. Открытие «кандидата в бозоны Хиггса» потребовало много месяцев, чтобы набрать достаточную статистику. А если бы речь шла о событиях, вероятность которых хотя бы в миллиард раз меньше ... В Институте геохимии им. В.И. Вернадского была высказана гипотеза, в соответствии с которой в происхождении жизни огромную роль играют так называемые «медленные реакции», которые занимают ... десятилетия или века.

Вернёмся к сюжету, обозначенному С.Лемом. В истории астрономии уже не раз учёные принимали периодически повторяющиеся сигналы за послания других цивилизаций [20]. Профессор Б.А. Воронцов-Вельяминов на лекции часто просил студентов перевернуть страницу в конспекте и пояснял, что затраченная на это каждым из них работа превышает всю энергию, принятую всеми радиотелескопами Земли за всё время их существования. В 2015 году планируется запустить радиотелескоп SKA с площадью антенны один квадратный километр, с которого будет передаваться сигнал со скоростью в несколько петабайт в секунду, что в 100 раз больше нынешнего трафика глобального интернета.

По оценкам специалистов, потенциально полезными являются 23% собираемых данных. При этом из них используется менее 3% собираемой информации. Если прорывов в данной области не произойдёт, то эта доля будет и дальше уменьшаться. По имеющимся оценкам, объёмы собираемой информации будут удваиваться каждые два года в течение ближайших 8 лет. Во многом этот взрывной рост связан с увеличением доли автоматически генерируемых данных. Если в 2005 году они составляли 11% информации, то к 2020 году их доля превысит 40%.

Мы уже оказались в новой реальности, гораздо более близкой к картине, описанной фантастами, чем к тем прогнозам, которые давали учёные всего 10 лет назад. Причина этого также понятна – технологии, связанные с накоплением и анализом огромных массивов данных, оказались очень востребованными в системах поиска в глобальных компьютерных сетях и в электронной торговле. Именно сюда и были вложены огромные ресурсы транснациональных корпораций.

Возможно, удивительные результаты экспериментов уже получены, а поразительные наблюдения сделаны и зафиксированы в тех 97% данных, которые не осмыслены и не проанализированы. Возможно, в ближайшем будущем кардинально изменится сама профессия учёного – появится большее число исследователей, которые будут путешествовать не в космосе, а в уже созданной информационной вселенной... Не так давно среди отраслей информатики появилась область, получившая название *data mining* – раскопки данных. Возможно, в недалёком будущем она станет важнейшей.

Естественно, здесь возникает принципиальный вопрос и связанные с ответом на него ограничения – какой объём информации может хранить и использовать человечество? С каким объёмом данных может и должна работать наука?

Кроме того, существенны для развития нашего знания и продолжительность жизни учёного, и темпы социальных и технологических изменений. Сколько лет может длиться эксперимент или серия наблюдений – 10, 100, 1000 лет?

Эти рамки, которые можно назвать *ограничениями второго рода*, естественно возникающие в постнеклассической науке, могут оказаться ещё более

существенными, чем те физические и алгоритмические пределы, к которым подошло современное знание. Само сознание этого уже должно менять стратегии познающего субъекта, нормы и идеалы научной рациональности, требования к создаваемым теориям и направления модернизации науки.

Традиционное возражение при обсуждении такого будущего науки связано со ссылками на очень быстрый прогресс компьютерной техники. Действительно, с 1950-х годов степень интеграции элементов на кристалле по настоящее время удваивается примерно каждые два года (см. рис.4). В том же темпе растёт и быстродействие компьютеров. На эту замечательную закономерность в своё время обратил внимание один из создателей фирмы Intel Гордон Мур, а выявленную зависимость назвали Первым законом Мура. (Второй закон гласит, что через некоторое время Первый закон перестанет действовать). Достигнутые результаты впечатляют: за пятьдесят с лишним лет такого экспоненциального роста быстродействие компьютеров выросло в 250 миллиардов раз. Ни одна отрасль не знала таких темпов развития. И если бы первый закон Мура продолжал действовать в обозримой перспективе, то об *информационном кризисе*, к порогу которого мы подошли и который самым существенным образом влияет на нашу науку, можно было бы не беспокоиться.

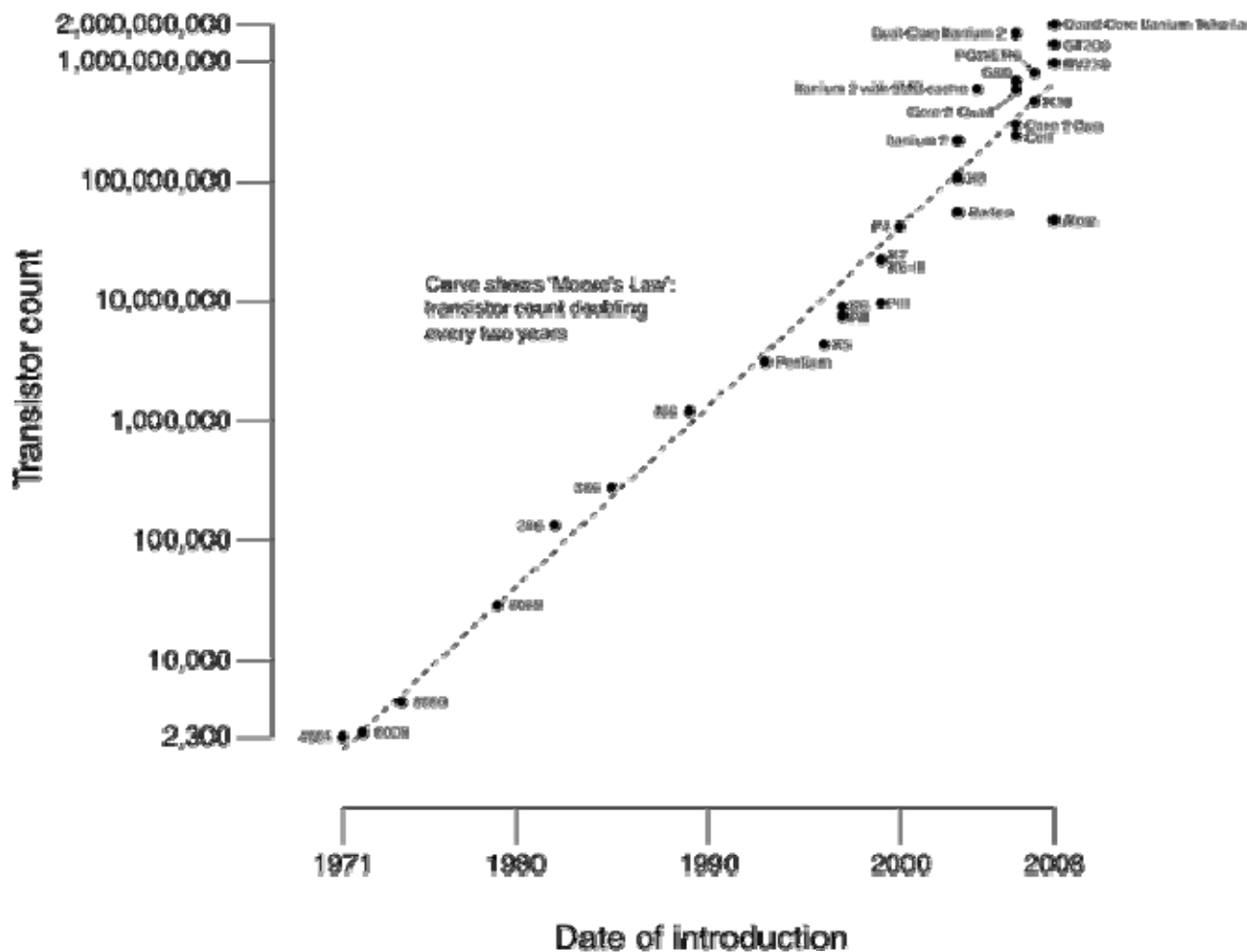


Рис. 4. Закон Мура: число транзисторов в процессоре удваивается каждые 2 года

Однако, вероятно, очень скоро начнет действовать второй закон Мура. Причин у этого много, и здесь можно обратить внимание только на две.

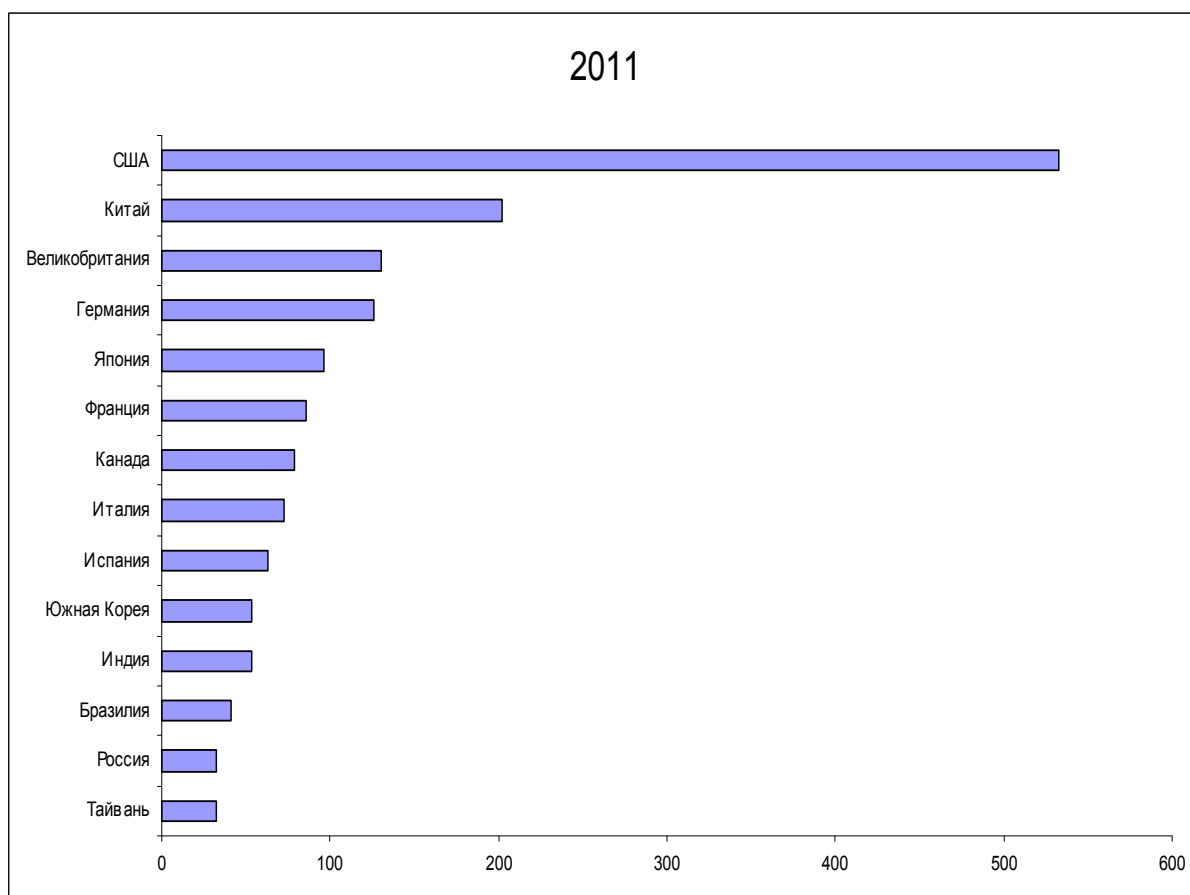
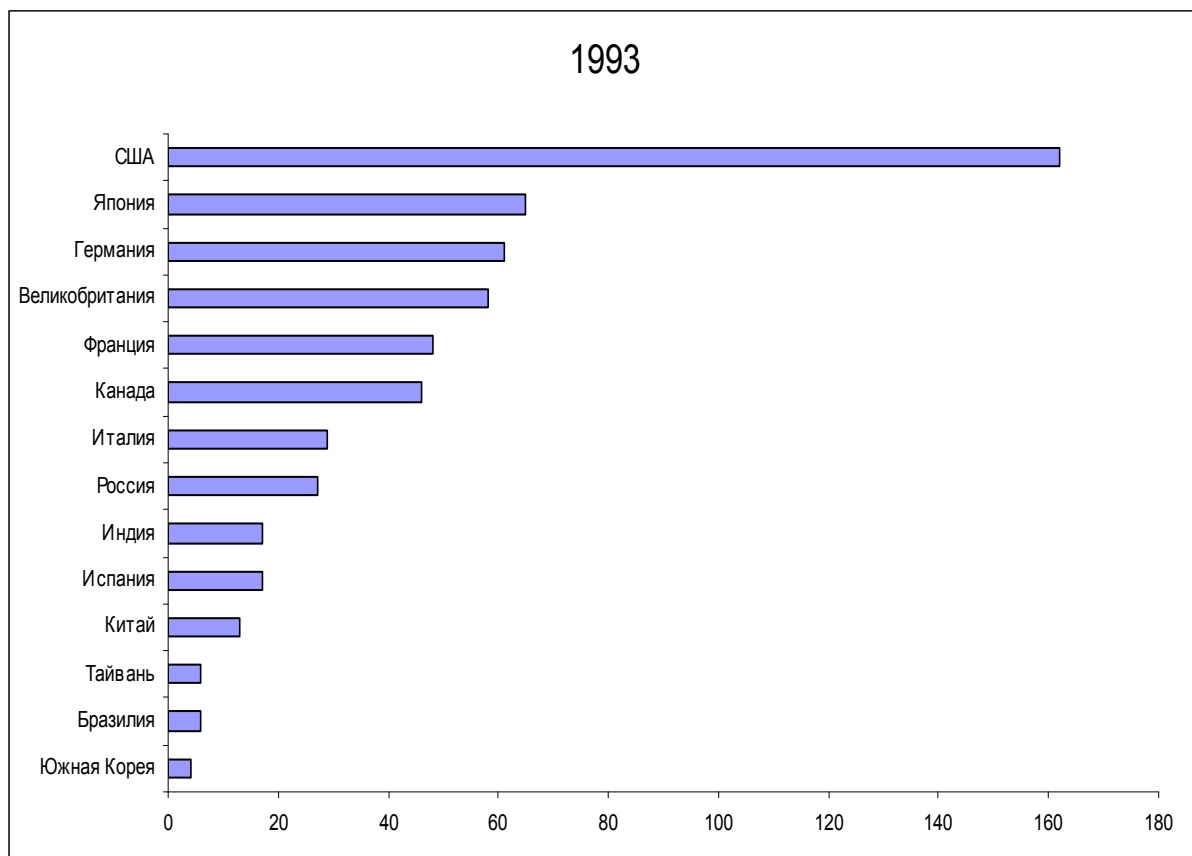


Рис. 5. Число выполненных в различных странах научных работ, тыс. (Web of Science)

Микроэлектроника подошла к своим технологическим пределам. Основным параметром, характеризующим технологии в этой области, является *ширина линии* – минимальный размер элемента интегральной схемы. Ведущие мировые фирмы уже подошли к рубежу 20 нм (нм – нанометр -10^{-9} м), характерный размер кристаллической решетки – 0,1 нм. Меньшей толщина линии не может быть в принципе. Казалось бы, есть надежды на параллельную работу сети компьютеров, на возможность решать большую, сложную задачу «по частям», однако опыт такой деятельности, связанный с криптографией, анализом данных космических экспедиций, поиском лекарств против рака, сейсморазведкой, физикой плазмы, работой ускорителей, показывает уникальность и научных задач, и алгоритмов, и проектов, в рамках которых сегодня можно действовать подобным образом.

Квантовые компьютеры, на которые сейчас возлагают большие надежды, действительно позволяют сделать несколько вычислительно сложных задач (допускающих очень высокую степень распараллеливания) простыми [18]. Однако сейчас это не правило, а счастливое исключение на общем фоне вычислительных проблем. Вероятно, таковым оно и останется.

Второе ограничение ещё более серьёзно и непосредственно касается человека. Опыт анализа особо ответственных и многократно протестированных компьютерных программ показывает, что достичь уровня менее одной ошибки на 1000 команд пока не удастся. (Исходя из этого, можно сказать, что в последней версии Windows более 50 тысяч ошибок). Это очень существенно снижает надежность многих технических систем, тормозит использование компьютеров во многих ответственных технологиях и существенно влияет на стратегии реализации многих крупных научно-технических проектов. Пока не ясно, преодолим ли в принципе этот барьер.

Рассмотренный подход к прогнозу развития науки, опирающийся на теорию научных революций и смену типов рациональности, имеет не только академический интерес, но и большое прикладное значение. Он непосредственно связан с обоснованием научной стратегии России.

Место российской науки в мире существенно изменилось за прошедшие два десятилетия (см. рис. 5). Произошел стремительный откат назад. В настоящее время прикладываются огромные усилия, чтобы изменить ситуацию к лучшему. Финансирование научных исследований за последние годы было увеличено почти в 20 раз (см. рис. 6). Однако это не дало заметных результатов. В чем же дело?

По-видимому, ситуация близка развитию промышленности. В этом случае важно не только количество инвестиций, а то, к какому технологическому укладу относится предприятие, которое предполагается создать или модернизировать. Вложение в производства, относящиеся к VI технологическому укладу, например, могут давать огромный выигрыш при небольших затратах, а в заводы III уклада – скромные доходы при гигантских инвестициях.

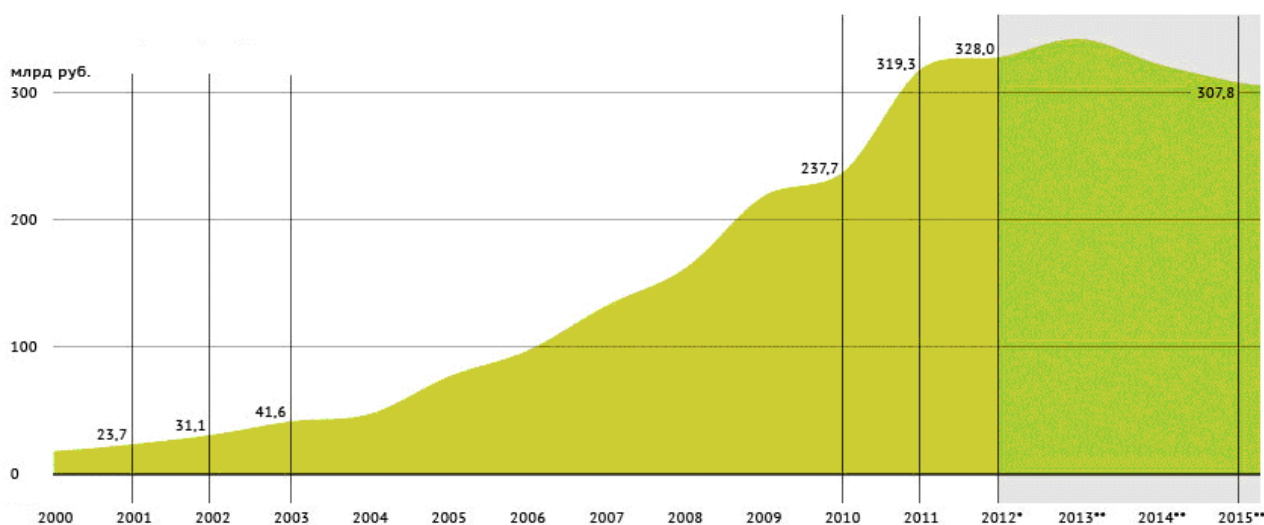


Рис. 6. Федеральные расходы на науку в России

В науке также очень важно заниматься именно тем, чем надо сегодня, из чего вырастает завтрашнее знание, а не только тем, что было нужно вчера. И в этом смысле междисциплинарные исследования и философия науки в ее проектной ипостаси могут сыграть роль компаса, определяющего точки роста и направления главных усилий в науке и в образовании.

Подводя итог, можно сказать, что развитие концепции постнеклассики, проектный подход к философии науки, самым тесным образом связанный со стратегическим прогнозом, ставят очень много интересных и важных задач перед философами, математиками, науковедами, системными аналитиками, футурологами, представителями многих других научных дисциплин. Это требует и самоорганизации научного сообщества, и междисциплинарных подходов.

Представленная траектория развития научного знания сегодня выглядит необычно и неожиданно. Однако, скорее всего, именно она и определит будущее.

БЛАГОДАРНОСТИ

Искренне признателен своему учителю – Сергею Павловичу Курдюмову – за многочисленные продолжительные беседы, в ходе которых он убедил меня, что анализ оснований науки, методологическая и философская рефлексия являются важнейшим каналом, через который результаты конкретных научных исследований могут войти в культуру, понимаемую в широком смысле. Обширная серия его совместных с сотрудницей Института философии РАН (ИФ РАН) Еленой Николаевной Князевой статей и книг показывает, насколько серьёзно он относился к решению этой задачи.

Считаю приятным долгом выразить благодарность одному из основоположников современной философии науки Вячеславу Семеновичу Стёпину за многочисленные обсуждения проблем философии, синергетики и междисциплинарных исследований и прекрасные подаренные книги, в которых раскры-

вается эта проблематика. Его концепция теоретического знания и постнеклассической науки, его проектный и прогнозный характер философской рефлексии, помогающий осмыслить не только ретроспективу, но и перспективу развития научного знания, сыграли и продолжают играть важную роль в развитии междисциплинарных подходов в России и в мире.

Большое спасибо друзьям и коллегам из Института философии РАН, активным членам Клуба инновационного развития ИФ РАН, Владимиру Ивановичу Аршинову, Владимиру Григорьевичу Буданову, Владимиру Евгеньевичу Лепскому за обсуждения, оказанную помощь и поддержку.

Признателен Андрею Викторовичу Подлазову за многолетнюю совместную работу и плодотворные обсуждения, а также участникам семинаров и школ «Будущее прикладной математики», которые способствовали формированию представленных взглядов.

Выражаю искреннюю благодарность Светлане Аркадьевне Торопыгиной и Вере Григорьевне Комаровой за помощь в оформлении этого текста, а также Михаилу Михайловичу Горбунову-Посадову, благодаря активности которого препринты нашего института преобразились.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. Изд. 3-е. – М.: Едиториал УРСС, 2003 – 288 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему).
2. Бадалян Л.Г., Криворотов В.Ф. Кризисы. Перспективы: Новый взгляд на прошлое и будущее/ Под ред. и с предисл. Г.Г. Малинецкого. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 288 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему. Будущая Россия).
3. Турчин П.В. Историческая динамика. На пути к теоретической истории. Пер. с англ. / Под общ. ред. Г.Г. Малинецкого, А.В. Подлазова, С.А. Боринской. Предисл. Г.Г. Малинецкого. Изд. 2-е. – М.: Издательство ЛКИ, 2010. – 386 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему).
4. Проблемы математической истории: Основания, информационные ресурсы, анализ данных. / Отв. ред. Г.Г. Малинецкий, А.В. Коротаев. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 256 с.
5. Геловани В.А., Бритков В.Б., Дубовский С.В. СССР и Россия в глобальной системе (1985-2030): Результаты глобального моделирования / Предисл. Г.Г. Малинецкого. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009. – 320 с. – (Будущая Россия).
6. Медоуз Д.Х., Рандерс Й., Медоуз Д.Л. Пределы роста: 30 лет спустя / Под ред. Н.П. Тарасовой. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. – 358 с.
7. Стёпин В.С. Теоретическое знание. – М.: «Прогресс-традиция», 2000. – 774 с.
8. Стёпин В.С. Важно, чтобы работа не прекращалась/Человек. Наука. Цивилизация. К семидесятилетию академика В.С. Стёпина. – М.: Канон⁺, 2004. С. 11-88.
9. Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячелетие / Под. ред. Г.Г. Малинецкого, С.П. Курдюмова. – М.: Наука, 2002 – 478 с. – (Информатика: неограниченные возможности и возможные ограничения).
10. Новое в синергетике. Новая реальность, новые проблемы, новое поколение / Под. ред. Г.Г. Малинецкого. М., 2007. – 383 с. – (Информатика: неограниченные возможности и возможные ограничения)

11. Аршинов В.И., Буданов В.Г. Синергетика как инструмент формирования новой картины мира. / Человек. Наука. Цивилизация. К семидесятилетию академика В.С. Стёпина – М.: Канон⁺, 2004. С. 428-444.

12. Доклад Правительству Российской Федерации об итогах реализации в 2012 году Программы фундаментальных исследований государственных академий наук за 2008-2012 гг. – М., 2013 – 366 с.

13. Кун Т. Структура научных революций. – М.: ООО «Издательство АСТ»: ЗАО НПП «Ермак», 2003 . – 365 с. – (Философия. Психология).

14. Лакатос И. Методология исследовательских программ. – М.: ООО «Издательство АСТ»: ЗАО НПО «Ермак», 2003 –380с. – (Философия. Психология).

15. Наука России. От настоящего к будущему / Под ред. В.С.Арутюнова, Г.В.Лисичкина, Г.Г.Малинецкого. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 512 с. – (Будущая Россия).

16. Лем С. Глас Господа. – М.: АСТ, 2001. – 285 с.

17. Введение в криптографию /Под общ. ред. В.В. Яценко – 3-е изд., доп. – М.: МЦНМО : «ЧеРо», 2000. – 288 с.

18. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. –352с.

19. Сараев В. Когда данные стали большими // Эксперт, 2013, №19, с.51-54

20. Черепашук А.М., Чернин А.Д. Горизонты Вселенной. – Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005. – 372 с.

21. Смолин Л. Будущее вселенной / Будущее науки в XXI веке. Следующие пятьдесят лет / Под ред. Дж. Брокмана.- М.: АСТ: Астрель; Владимир: ВКТ, 2011.С.15-24

22. Владимиров В.А., Воробьёв Ю.Л., Малинецкий Г.Г. Управление риском. Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. – М.: Наука, 2000 – 431 с. – (Серия «Кибернетика: неограниченные возможности и возможные ограничения»).

23. Малинецкий Г.Г., Подлазов А.В., Потапов А.Б. Нелинейная динамика: Подходы, результаты, надежды. – М.: Комкнига, 2006. – 280 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему).

24. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. Изд.4-е.- М.: УРСС: Издательство ЛКИ, 2011. – 400 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему).

25. Холланд Дж.Х. Что произойдет и как это предсказать / Будущее науки в XXI веке. Следующие пятьдесят лет/ под ред. Дж. Брокмана. – М.:АСТ: Астрель; Владимир: ВКТ, 2011. С. 145-158.

26. Бродель Ф. Материальная цивилизация, экономика и капитализм, XV-XVII вв. т.1. Структуры повседневности: возможное и невозможное. – М.: Издательство «Весь Мир», 2007. – 592 с.

27. Крылов О.В. Современная наука: близкий конец или завершение очередного этапа. / Наука России. От настоящего к будущему. / Под ред. В.А. Арутюнова, Г.В. Лисичкина, Г.Г. Малинецкого. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. С. 223-248.

28. Наука как образ жизни (Памяти О.В. Крылова). – М.: Калвис, 2010 – 240 с.

29. Наука XXI века/ Малинецкий Г.Г./ Наука России. От настоящего к будущему /Под ред. В.С. Арутюнова, Г.В. Лисичкина, Г.Г. Малинецкого. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. С. 249-269 – (Будущая Россия)

30. Константинов А. Мозг из машины. Власти крупнейших стран вкладывают миллиарды в искусственный разум // Русский репортер, 2013, 21-28 марта, с. 46-50.

31. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Синергетика как новое мировидение: диалог с И. Пригожиным // Вопр. философии. 1992, № 12, с. 3-20.

32. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Интуиция как самодостраивание// Вопр. философии, 1994, № 2, с. 110-122.

33. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. – М.: Наука, 1994 – 328 с.
34. Наука. Ученые – свет // Esquire, 2011, март /Essential Science Indicators, Thompson Reuters, 2000-2010/
35. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, изд-во «Наука», 1974 – 224 с.
36. Майнцер К. Сложносистемное мышление: Материя, разум, человечество. Новый синтез/Под ред. и с предисл. Г.Г. Малинецкого.- М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009 – 464 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему).
37. Майнцер К. Вызовы сложности в XXI веке. Междисциплинарное введение / Синергетическая парадигма. «Синергетика инновационной сложности». Сборник статей, посвященный 70-летию В.И. Аршинова. - М.: Прогресс-Традиция, 2011. С. 14-30.
38. Малинецкий Г.Г. Когнитивный вызов в контексте самоорганизации / Синергетическая парадигма. «Синергетика инновационной сложности». Сборник статей, посвященный 70-летию В.И. Аршинова. - М.: Прогресс-Традиция, 2011. С. 87-113.
39. Прогноз и моделирование кризисов мировой динамики / Отв. ред. А.А. Акаев, А.В. Коротаев, Г.Г. Малинецкий – М.: Издательство ЛКИ, 2010. –352 с.
40. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / Под ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямса, П. Аливасатоса. – М.: Мир, 2002 – 292 с.
41. Асланов И. Наука через призму Google. В мире ищут Луну и математику, а в России – ЕГЭ и решебники // Русский репортер, 2011, № 34, с. 62-63.
42. Котов Ю.Б. Новые математические подходы к задачам медицинской диагностики. М.: Едиториал УРСС, 2004. –328 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему).
43. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981 – 488 с.
44. Мэрфи Э. Государству нужна ваша ДНК // В мире науки, 2013, № 6, с. 62-66
45. Чернавский Д.С. Синергетика и информация (динамическая теория информации)/Послесл. Г.Г. Малинецкого. Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 288 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему)
46. Применко Э.Л. Алгебраические основы криптографии: Учебное пособие. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013 – 288 с.
47. Бак П. Как работает природа: Теория самоорганизованной критичности. – М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 276 с. – (Синергетика от прошлого к будущему, № 66).

Содержание

Введение.....	3
Карта незнания.....	5
Конец эпохи Гулливера	7
Поле возможностей и его ограничения.....	13
Промежуточное звено.....	19
Постнеклассика и ограничения второго типа.....	26
Благодарности.....	33
Литература	34