УДК [001.1+001.89]:004
https://doi.org/10.20913/1815-3186-2021-1-25-42

Наука о науке[1]

Санто Фортунато, Карл Т. Бергстром, Кэти Бернер, Джеймс А. Эванс, Дирк Хелбинг, Сташа Милоевич, Александр М. Петерсен, Филиппо Радикки, Роберта Синатра, Брайан Уцци, Алессандро Веспиньяни, Людо Уолтман, Дашун Ван, Альберт-Ласло Барабаши

Санто Фортунато,

Центр исследований сложных сетей и систем, Школа информатики, вычислительной техники и инженерии, Университет Индианы, Блумингтон, B 47408, США; Институт сетевых наук Университета Индианы, Университет Индианы, Блумингтон, B 47408, США

ORCID: *0000-0002-9039-4730*

e-mail: *santo@indiana.edu*

Карл Т. Бергстром,

Биологический факультет Вашингтонского университета, Сиэтл, Вашингтон 98195-1800, США

Кэти Бернер,

Институт сетевых наук Университета Индианы, Университет Индианы, Блумингтон, B 47408, США; Киберинфраструктура для Центра сетевых наук Школы информатики, вычислительной техники и инженерии Университета Индианы, Блумингтон, США, 47408

ORCID: *0000-0002-3321-6137*

Джеймс А. Эванс,

Факультет социологии Чикагского университета, Чикаго, IL 60637, США

ORCID: *0000-0001-9838-0707*

Дирк Хелбинг,

Вычислительная социология, ETH Zurich, Цюрих, Швейцария

Сташа Милоевич,

Центр исследований сложных сетей и систем, Школа информатики, вычислительной техники и инженерии, Университет Индианы, Блумингтон, B 47408, США

Предисловие

Вопросы «почему» и «зачем» науки о науке (SciSci)

Наука о науке (SciSci) основана на трансдисциплинарном подходе, который использует большие массивы данных для изучения механизмов, лежащих в основе научного исследования, – от выбора исследовательской проблемы до карьерных траекторий и прогресса в той или иной области. В обзоре Fortunato et al. объясняют, что основное обоснование заключается в том, что благодаря более глубокому пониманию предшественников того, что такое эффективная наука, можно будет разработать системы и политику, которые улучшат способности каждого ученого к успеху и повысят перспективы науки в целом.

Структурированный реферат

Предпосылки. Растущая доступность цифровых данных о ресурсах науки и ее результатах – от финансирования исследований, производительности и сотрудничества до цитирования статей и мобильности ученых – открывает беспрецедентные возможности для изучения структуры и эволюции науки. Наука о науке (SciSci) предлагает количественное понимание взаимодействий между учеными в различных географических и временных масштабах. Она дает представление об условиях, лежащих в основе творчества и генезиса научных открытий, для того, чтобы в результате разработать инструменты и политику, которые потенциально могут ускорить развитие науки. В последнее десятилетие SciSci получила пользу от того, что привлекла ученых, работающих в области естественных, вычислительных и социальных наук, которые, базируясь на больших данных (big data), вместе создали возможности для эмпирического анализа и генеративного (выводного) моделирования, которое отражает развитие науки, ее институтов и ее рабочей силы. Суть SciSci состоит в том, что с более глубоким пониманием факторов, которые движут успешной наукой, мы можем более эффективно решать экологические, социальные и технологические проблемы.

Достижения. Науку можно описать как сложную, самоорганизующуюся и развивающуюся сеть ученых, проектов, статей и идей. Это представление раскрыло закономерности, характеризующие возникновение новых научных областей, благодаря изучению сетей сотрудничества и путей впечатляющих открытий через изучение сетей цитирования. На микроскопических моделях была прослежена динамика накопления цитируемости, что позволило нам предсказать будущее влияние отдельных статей. SciSci выявила выбор ученых и компромиссы, с которыми они сталкиваются, продвигаясь как по своей собственной карьере, так и по научному горизонту. Например, измерения показывают, что ученые не склонны к риску, предпочитая изучать темы, связанные с их текущим опытом, что ограничивает

[1] Перевод обзорной статьи «Science of science», опубликованной в журнале Science 02 March 2018: Vol. 359, Issue 6379, eaao0185. DOI: 10.1126/science.aao0185.

Перевод О. Л. Лаврик.

Александр М. Петерсен,
Программа менеджмента Эрнеста и Хулио Галло, Инженерная школа Калифорнийского университета, Мерсед, Калифорния 95343, США
ORCID: *0000-0002-0955-3483*

Филиппо Радикки,
Центр исследований сложных сетей и систем, Школа информатики, вычислительной техники и инженерии, Университет Индианы, Блумингтон, B 47408, США

Роберта Синатра,
Центр сетевых наук, Центрально-Европейский университет, Будапешт 1052, Венгрия, Математический факультет Центрально-Европейского университета, Будапешт 1051, Венгрия, Институт сетевых наук Северо-Восточного университета, Бостон, Массачусетс 02115, США
ORCID: *0000-0002-7558-1028*

Брайан Уцци,
Школа менеджмента Келлога, Северо-Западный университет, Эванстон, Иллинойс 60208, США, Северо-Западный институт сложных систем, Северо-Западный университет, Эванстон, Иллинойс 60208, США

Алессандро Веспиньяни,
Институт сетевых наук, Северо-Восточный университет, Бостон, Массачусетс 02115, США; Лаборатория моделирования биологических и социально-технических систем, Северо-Восточный университет, Бостон, Массачусетс 02115, США; Фонд ИСИ 10133 Турин, Италия

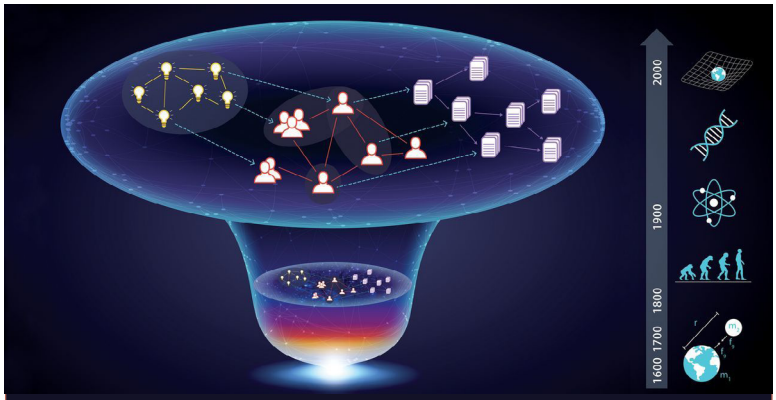
Людо Уолтман,
Центр научно-технических исследований Лейденского университета, Лейден, Нидерланды
ORCID: *0000-0001-8249-1752*

Дашун Ван,
Школа менеджмента Келлога, Северо-Западный университет, Эванстон, Иллинойс 60208, США; Северо-Западный институт сложных систем, Северо-Западный университет, Эванстон, Иллинойс 60208, США
ORCID: *0000-0002-7054-2206*

Альберт-Ласло Барабаши,
Центр сетевых наук, Центрально-Европейский университет, Будапешт 1052, Венгрия; Институт сетевых наук, Северо-Восточный университет, Бостон, Массачусетс 02115, США; Центр системной биологии рака, Институт рака Дана-Фарбер, Бостон, Массачусетс 02115, США
ORCID: *0000-0002-4028-3522*
e-mail: *barabasi@gmail.com*

потенциал будущих открытий. Те, кто готов нарушить эту модель, строят более рискованную карьеру, но с большей вероятностью совершают крупные прорывы. В целом наибольший эффект науки основан на обычных комбинациях предшествующих работ, но характеризуется и необычными комбинациями. Наконец, поскольку фокус исследований смещается на работу в команде, SciSci все больше фокусируется на влиянии командных исследований, обнаруживая, что небольшие команды, как правило, разрушают науку и технику новыми идеями, опирающимися на старые и менее распространенные идеи. И наоборот, большие команды, как правило, разрабатывают новые, популярные идеи, получая высокий, но часто недолговечный эффект.

Прогноз. SciSci предлагает глубокое количественное понимание структуры отношений между учеными, институтами и идеями, поскольку это облегчает идентификацию фундаментальных механизмов, ответственных за научные открытия. Эти междисциплинарные выводы, основанные на данных, дополняются вкладом смежных областей, таких как наукометрия, экономика и социология науки. Хотя SciSci стремится к длительным универсальным законам и механизмам, применимым в различных областях науки, основная задача заключается в учете неоспоримых различий в культуре, привычках и предпочтениях в различных странах и областях науки. Эта вариативность делает некоторые идеи трудными для понимания, а связанную с ними научную политику – трудной для реализации. Различия в вопросах, данных и навыках, специфичных для каждой дисциплины, предполагают, что дальнейшее понимание может быть получено из предметных исследований SciSci, которые моделируют и идентифицируют возможности, адаптированные к потребностям отдельных областей исследований.



Сложность науки. Науку можно рассматривать как расширяющуюся и развивающуюся сеть идей, ученых и статей. SciSci ищет универсальные и предметно-специфические законы, лежащие в основе структуры и динамики науки.

Автор иллюстрации Nicole Samay

Реферат. Определение фундаментальных движущих сил науки и разработка прогнозных моделей для отражения ее эволюции играют важную роль в разработке политики, которая может улучшить науку как сектор экономики – например, за счет расширения карьерных путей для ученых, улучшения оценки эффективности организаций, проводящих исследования, открытия новых эффективных механизмов финансирования и даже выявления перспективных фронтов вдоль научных границ. Наука о науке использует крупномасштабные данные о производстве науки для поиска универсальных и предметно-специфических закономерностей. Здесь мы рассмотрим последние достижения в этой трансдисциплинарной области.

Для цитирования: Фортунато Санто и др. Наука о науке // *Библиосфера. 2021. № 1. С. 25–42. https://doi.org/10.20913/1815-3186-2021-1-25-42*.

Science of science

Santo Fortunato, Carl T. Bergstrom, Katy Börner, James A. Evans, Dirk Helbing, Staša Milojević, Alexander M. Petersen, Filippo Radicchi, Roberta Sinatra, Brian Uzzi, Alessandro Vespignani, Ludo Waltman, Dashun Wang, Albert-László Barabási

Santo Fortunato,
Center for Complex Networks and Systems Research, School of Informatics, Computing, and Engineering, Indiana University, Bloomington, IN 47408, USA; Indiana University Network Science Institute, Indiana University, Bloomington, IN 47408, USA
ORCID: *0000-0002-9039-4730*
e-mail: *santo@indiana.edu*

Carl T. Bergstrom,
Department of Biology, University of Washington, Seattle, WA 98195-1800, USA

Katy Börner,
Indiana University Network Science Institute, Indiana University, Bloomington, IN 47408, USA; Cyberinfrastructure for Network Science Center, School of Informatics, Computing, and Engineering, Indiana University, Bloomington, IN 47408, USA
ORCID: *0000-0002-3321-6137*

James A. Evans,
Department of Sociology, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA
ORCID: *0000-0001-9838-0707*

Dirk Helbing,
Computational Social Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

Staša Milojević,
Center for Complex Networks and Systems Research, School of Informatics, Computing, and Engineering, Indiana University, Bloomington, IN 47408, USA

Alexander M. Petersen,
Ernest and Julio Gallo Management Program, School of Engineering, University of California, Merced, CA 95343, USA
ORCID: *0000-0002-0955-3483*

Filippo Radicchi,
Center for Complex Networks and Systems Research, School of Informatics, Computing, and Engineering, Indiana University, Bloomington, IN 47408, USA

Structured Abstract

BACKGROUND. The increasing availability of digital data on scholarly inputs and outputs – from research funding, productivity, and collaboration to paper citations and scientist mobility – offers unprecedented opportunities to explore the structure and evolution of science. The science of science (SciSci) offers a quantitative understanding of the interactions among scientific agents across diverse geographic and temporal scales: It provides insights into the conditions underlying creativity and the genesis of scientific discovery, with the ultimate goal of developing tools and policies that have the potential to accelerate science. In the past decade, SciSci has benefited from an influx of natural, computational, and social scientists who together have developed big data–based capabilities for empirical analysis and generative modeling that capture the unfolding of science, its institutions, and its workforce. The value proposition of SciSci is that with a deeper understanding of the factors that drive successful science, we can more effectively address environmental, societal, and technological problems.

ADVANCES. Science can be described as a complex, self-organizing, and evolving network of scholars, projects, papers, and ideas. This representation has unveiled patterns characterizing the emergence of new scientific fields through the study of collaboration networks and the path of impactful discoveries through the study of citation networks. Microscopic models have traced the dynamics of citation accumulation, allowing us to predict the future impact of individual papers. SciSci has revealed choices and trade-offs that scientists face as they advance both their own careers and the scientific horizon. For example, measurements indicate that scholars are risk-averse, preferring to study topics related to their current expertise, which constrains the potential of future discoveries. Those willing to break this pattern engage in riskier careers but become more likely to make major breakthroughs. Overall, the highest-impact science is grounded in conventional combinations of prior work but features unusual combinations. Last, as the locus of research is shifting into teams, SciSci is increasingly focused on the impact of team research, finding that small teams tend to disrupt science and technology with new ideas drawing on older and less prevalent ones. In contrast, large teams tend to develop recent, popular ideas, obtaining high, but often short-lived, impact.

OUTLOOK. SciSci offers a deep quantitative understanding of the relational structure between scientists, institutions, and ideas because it facilitates the identification of fundamental mechanisms responsible for scientific discovery. These interdisciplinary data-driven efforts complement contributions from related fields such as scientometrics and the economics and sociology of science. Although SciSci seeks long-standing universal laws and mechanisms that apply across various fields of science, a fundamental challenge going forward is accounting for undeniable differences in culture, habits, and preferences between different fields and countries. This variation makes some cross-domain insights difficult to appreciate and associated science policies difficult to implement. The differences among the questions, data, and skills specific to each discipline suggest that further insights can be gained from domain-specific SciSci studies, which model and identify opportunities adapted to the needs of individual research fields.

Abstract. Identifying fundamental drivers of science and developing predictive models to capture its evolution are instrumental for the design of policies that can improve the scientific enterprise – for example, through enhanced career paths for scientists, better performance evaluation for organizations hosting research, discovery of novel effective funding vehicles, and even identification

Roberta Sinatra,
Center for Network Science, Central European University, Budapest 1052, Hungary,
Department of Mathematics, Central European University, Budapest 1051, Hungary,
Institute for Network Science, Northeastern University, Boston, MA 02115, USA
ORCID: *0000-0002-7558-1028*

Brian Uzzi,
Kellogg School of Management, Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA,
Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA

Alessandro Vespignani,
Institute for Network Science, Northeastern University, Boston, MA 02115, USA;
Laboratory for the Modeling of Biological and Sociotechnical Systems, Northeastern University, Boston, MA 02115, USA;
ISI Foundation, Turin 10133, Italy

Ludo Waltman,
Centre for Science and Technology Studies, Leiden University, Leiden, Netherlands
ORCID: *0000-0001-8249-1752*

of promising regions along the scientific frontier. The science of science uses large-scale data on the production of science to search for universal and domain-specific patterns. Here, we review recent developments in this transdisciplinary field.

Citation: Fortunato Santo et al. Science of science. Science. 2018. Vol. 359, Issue 6379, eaao0185. DOI: *10.1126/science.aao0185*.

Dashun Wang,
Kellogg School of Management, Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA;
Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA
ORCID: *0000-0002-7054-2206*

Albert-László Barabási,
Center for Network Science, Central European University, Budapest 1052, Hungary;
Institute for Network Science, Northeastern University, Boston, MA 02115, USA;
Center for Cancer Systems Biology, Dana-Farber Cancer Institute, Boston, MA 02115, USA
ORCID: *0000-0002-4028-3522*
e-mail: *barabasi@gmail.com*

Поток цифровых данных о научных результатах открывает беспрецедентные возможности для изучения закономерностей, характеризующих структуру и эволюцию науки. SciSci помещает саму практику науки под микроскоп, приводя к количественному пониманию генезиса научных открытий, творчества и практики и разрабатывая инструменты и политику, направленные на ускорение научного прогресса.

Появление SciSci было обусловлено двумя ключевыми факторами. Во-первых, это доступность данных. В дополнение к проприетарному Web of Science (WoS), исторически первой БД с данными о цитировании (Garfield, 1955), сегодня доступны многочисленные источники данных (Scopus, PubMed, Google Scholar, Microsoft Academic, Бюро патентов и товарных знаков США и др.). Некоторые из этих источников находятся в свободном доступе, охватывая миллионы точек данных, касающихся ученых и их результатов, исследования во всем мире и все отрасли науки. Во-вторых, SciSci выиграла от увеличения коллаборации ученых, работающих в естественных, вычислительных и социальных науках, которые собрали большие данные, основываясь на возможностях и критических тестах генеративных моделей, нацеленных на понимание развития науки, ее институтов и ее рабочей силы.

Одной из отличительных особенностей этой формирующейся области является то, как она разрушает дисциплинарные границы. SciSci объединяет результаты и теории из различных дисциплин и использует широкий спектр данных и методов. Из наукометрии она берет идею измерения науки на основе крупномасштабных источников данных; из социологии науки она принимает теоретические концепции и социальные процессы; а вслед за изучением инноваций она выявляет и определяет пути, посредством которых наука вносит свой вклад в изобретения и экономические изменения. SciSci опирается на широкий набор количественных методов, от описательной статистики и визуализации данных до передовых эконометрических методов, подходов сетевой науки, алгоритмов машинного обучения, математического анализа и компьютерного моделирования, включая агентное моделирование. Ценностное предложение SciSci основывается на гипотезе о том, что при более глубоком понимании факторов, лежащих в основе успешной науки, мы можем расширить

перспективы науки в целом для более эффективного решения социальных проблем.

Сети ученых, институтов и идей

Современная наука – это динамичная система действий, движимая сложными взаимодействиями между социальными структурами, представлениями о знаниях и природным миром. Научное знание состоит из понятий и отношений, воплощенных в научных статьях, книгах, патентах, программном обеспечении и других научных артефактах, организованных в научные дисциплины и более широкие научные области. Эти социальные, концептуальные и материальные элементы связаны формальными и неформальными потоками информации, идей, исследовательских практик, инструментов и образцов. Таким образом, наука может быть описана как сложная, самоорганизующаяся и постоянно развивающаяся многомасштабная сеть.

Ранние исследования выявили экспоненциальный рост объема научной литературы (De Solla Price, 1963) – тенденцию, которая продолжается со средним периодом удвоения в 15 лет (рис. 1). Однако было бы наивно приравнивать рост объема научной литературы к росту научных идей. Изменения в издательском мире, как технологические, так и экономические, привели к повышению эффективности производства публикаций. Более того, новые научные публикации, как правило, группируются по отдельным областям знаний (Foster et al., 2015). Крупномасштабный текстовый анализ с использованием фраз, извлеченных из названий и рефератов, для измерения когнитивного объема научной литературы показал, что концептуальная территория науки линейно расширяется со временем. Иными словами, если число публикаций растет экспоненциально, то пространство идей расширяется только линейно (рис. 1) (Milojević, 2015).

Часто встречающиеся слова и фразы в названиях статей и рефератах распространяются через сети цитирования, перемежаясь всплесками, соответствующими появлению новых парадигм (Kuhn et al., 2014). Применяя методы сетевой науки к сетям цитирования, исследователи могут идентифицировать сообщества, определяемые подмножествами публикаций, которые часто цитируют друг друга (Klavans, Boyack, 2016). Эти сообщества часто соответствуют группам авторов, занимающих общую позицию по конкретным вопросам (Shwed, Bearman, 2010) или работающих над одними и теми же специализированными подтемами (Bruggeman et al., 2012). Недавняя работа, посвященная биомедицинской науке, показала, как рост литературы укрепляет эти сообщества (Shi et al., 2015). По мере публикации новых работ связи (гиперграни) между учеными, химическими веществами, болезнями и методами («вещами», которые являются узлами сети) добавляются и расширяются. Большинство новых связей возникает между вещами, находящимися всего в одном или двух шагах друг от друга. Это подразумевает, что, когда ученые выбирают новые темы, они предпочитают вещи, непосредственно связанные с их текущим опытом или опытом их коллег. Это уплотнение предполагает, что существующая структура науки может ограничивать то, что будет изучаться в будущем.

Уплотнение границ науки также является сигналом трансдисциплинарного исследования, слияния и инноваций. Анализ жизненного цикла восьми областей (Bettencourt et al., 2009) показывает, что успешные области подвергаются процессу познания и социальной унификации, что приводит к гигантскому связному компоненту в сети сотрудничества (Newman,

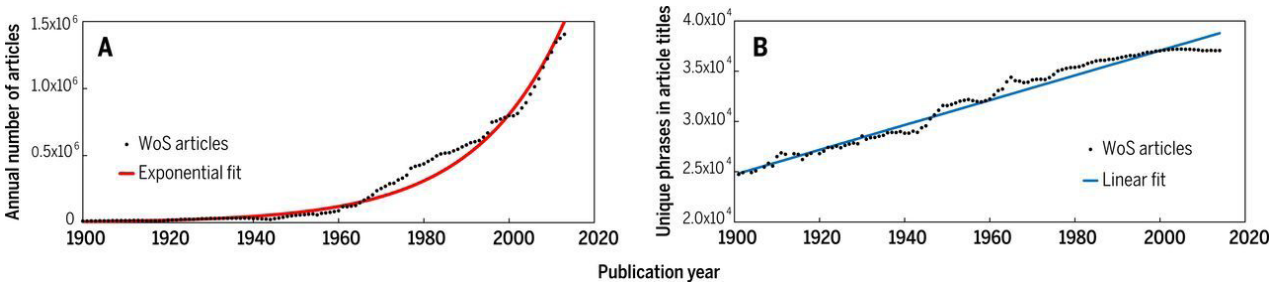


Рис. 1. Рост науки
(A) ежегодное издание научных статей, индексируемых в базе данных WoS. (B) Рост числа идей, охватываемых статьями, индексируемыми в WoS, что определялось подсчетом уникальных заглавных фраз (понятий) в фиксированном количестве статей (Milojević, 2015)
Fig. 1. Growth of science
(A) Annual production of scientific articles indexed in the WoS database. (B) Growth of ideas covered by articles indexed in the WoS. This was determined by counting unique title phrases (concepts) in a fixed number of articles (Milojević, 2015)

2001), соответствующему значительной группе постоянных соавторов. Модель, по которой ученые выбирают, с кем сотрудничать, основана на случайных блужданиях по сети соавторства и успешно воспроизводит продуктивность авторов, количество авторов в каждой дисциплине и междисциплинарность статей и авторов (Sun et al., 2013).

Выбор проблемы

Как ученые решают, над какими исследовательскими проблемами работать? Социологи науки давно выдвинули гипотезу, что этот выбор формируется постоянным напряжением между продуктивной традицией и рискованной инновацией (Bourdieu, 1975; Kuhn, 1977). Ученые, которые придерживаются исследовательской традиции в своей области, часто оказываются продуктивными, публикуя постоянный поток материалов, которые продвигают избранную исследовательскую программу. Но избранная повестка дня может ограничить способность исследователя чувствовать и использовать возможности для разработки новых идей, необходимых для расширения знаний в данной области. Например, тематическое исследование, посвященное биомедицине, в котором выбираются новые химические вещества и химические связи, показывает, что по мере развития области исследования ученые все больше сосредотачиваются на принятых (устоявшихся) знаниях (Foster et al., 2015). Хотя инновационная публикация, как правило, приводит к более высокому эффекту, чем консервативная; высокорисковые инновационные стратегии встречаются редко, поскольку дополнительное вознаграждение не компенсирует риск отказа от публикации вообще. Научные награды и звания, по-видимому, функционируют как первичные стимулы для сопротивления консервативным тенденциям и поощряют исследования нового и неожиданных идей (Foster et al., 2015). Несмотря на множество факторов, определяющих дальнейшую работу ученых, макроскопические модели, управляющие изменениями в исследовательских интересах на протяжении научной карьеры, весьма воспроизводимы, что подтверждается высокой степенью регулярности, лежащей в основе научных исследований и индивидуальной карьеры (Jia, 2017).

Выбор исследовательских задач учеными влияет в первую очередь на их индивидуальную карьеру и карьеру тех, кто от них зависит. Однако коллективный выбор ученых определяет направление научных открытий в более широком смысле (рис. 2). Консервативные стратегии (Rzhetsky et al., 2015) хорошо служат индивидуальной карьере, но менее эффективны для науки в целом. Такие стратегии усиливаются проблемой «работы в стол» (Rosenthal, 1979): отрицательные результаты, противоречащие установленным гипотезам, редко публикуются, что приводит к системному смещению опубликованных исследований и канонизации слабых, а иногда и ложных фактов (Nissen et al., 2016). Более рискованные гипотезы, возможно, были проверены поколениями ученых, но нам известны только те, которые достаточно успешны, чтобы привести к публикациям. Один из способов ослабить эту консервативную ловушку – побудить финансирующие агентства активно спонсировать рискованные проекты, которые проверяют действительно неисследованные гипотезы и берут на себя ответственность за особые заинтересованные группы, фокусирующиеся на конкретных заболеваниях. Измерения показывают, что распределение биомедицинских ресурсов в Соединенных Штатах сильнее коррелирует с предыдущими распределениями и исследованиями, чем с фактическим набором болезней (Yao et al., 2015), что подчеркивает системное несоответствие между биомедицинскими потребностями и ресурсами. Это несоответствие ставит под сомнение степень влияния финансирующих агентств, часто управляемых учеными, опирающимися на устоявшиеся парадигмы, на эволюцию науки без введения дополнительного надзора, стимулов и обратной связи.

Новизна

Анализ публикаций и патентов последовательно показывает, что редкие комбинации научных открытий и изобретений, как правило, приводят к более высоким процентам цитирования (Foster et al., 2015). Междисциплинарные исследования – это символический рекомбинантный процесс (Wagner et al., 2011), следовательно, успешное сочетание ранее не связанных идей и ресурсов, которое является фундаментальным для междисциплинарных исследований, часто нарушает ожидания и приводит к новым идеям с высокой отдачей (Larivière et al., 2015). Тем не менее данные из заявок на гранты показывают, что, сталкиваясь с новыми идеями, эксперты-оценщики систематически дают более низкие оценки действительно новым (Boudreau et al., 2016; Leahey, Moody, 2014; Yegros-Yegros et al., 2015) или междисциплинарным (Bromham et al., 2016) исследовательским проектам.

Высокоэффективная наука основана прежде всего на традиционных комбинациях предшествующих работ, но одновременно и на необычных комбинациях (Kim et al., 2016; Uzzi et al., 2013; Wang et al., 2016). Статьи такого типа в два раза чаще получают высокое цитирование (Uzzi et al., 2013). Другими словами,

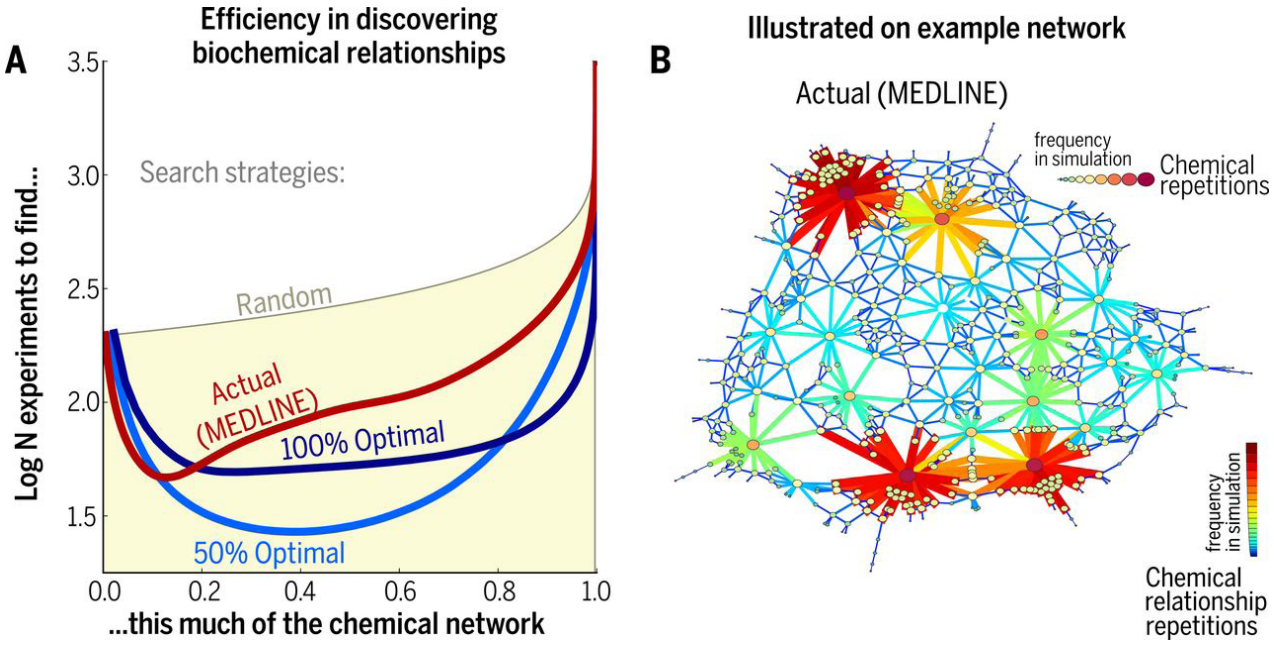


Рис. 2. Выбор экспериментов для ускорения коллективного открытия
(A) Средний показатель эффективности глобальных стратегий по обнаружению новых, пригодных для публикации химических взаимосвязей, рассчитанный по всем индексируемым MEDLINE статьям, опубликованным в 2010 г. Эта модель не учитывает различия в сложности или в затратах на конкретные эксперименты. Эффективность глобальной научной стратегии выражается средним числом проведенных экспериментов (вертикальная ось) относительно числа новых опубликованных биохимических связей (горизонтальная ось), которые соответствуют новым связям в опубликованной сети биохимических соединений, встречающихся в индексируемых MEDLINE статьях. Сравниваемые стратегии включают случайный выбор пар биохимических веществ, глобальную («фактическую») стратегию, выведенную из статей всех ученых, публикующихся в MEDLINE, и оптимальные стратегии для обнаружения 50 и 100% сети. Более низкие значения на вертикальной оси указывают на более эффективные стратегии, показывая, что фактическая стратегия науки не оптимальна для обнаружения того, что было опубликовано. Фактическая стратегия лучше всего подходит для раскрытия 13% химической сети, а пятидесятипроцентная оптимальная стратегия наиболее эффективна для обнаружения ее 50%, но ни одна из них не хороша так, как стопроцентная оптимальная стратегия для раскрытия всей сети. (B) Фактический, оценочный процесс поиска, проиллюстрированный на гипотетической сети химических связей, усредненный по 500 моделируемым прогонам этой стратегии. Стратегия строится вокруг нескольких «важных», тесно связанных химических веществ, в то время как оптимальные стратегии гораздо более равномерны и, скорее всего, менее склонны «следовать за толпой» в своих поисках в пространстве научных возможностей.
[На основе (Rzhetsky et al., 2015)]

Fig. 2. Choosing experiments to accelerate collective discovery
(A) The average efficiency rate for global strategies to discover new, publishable chemical relationships, estimated from all MEDLINE-indexed articles published in 2010. This model does not take into account differences in the difficulty or expense of particular experiments. The efficiency of a global scientific strategy is expressed by the average number of experiments performed (vertical axis) relative to the number of new, published biochemical relationships (horizontal axis), which correspond to new connections in the published network of biochemicals co-occurring in MEDLINE-indexed articles. Compared strategies include randomly choosing pairs of biochemicals, the global ("actual") strategy inferred from all scientists publishing MEDLINE articles, and optimal strategies for discovering 50 and 100% of the network. Lower values on the vertical axis indicate more efficient strategies, showing that the actual strategy of science is suboptimal for discovering what has been published. The actual strategy is best for uncovering 13% of the chemical network, and the 50% optimal strategy is most efficient for discovering 50% of it, but neither are as good as the 100% optimal strategy for revealing the whole network. (B) The actual, estimated search process illustrated on a hypothetical network of chemical relationships, averaged from 500 simulated runs of that strategy. The strategy swarms around a few "important", highly connected chemicals, whereas optimal strategies are much more even and less likely to "follow the crowd" in their search across the space of scientific possibilities.
[Adapted from (Rzhetsky et al., 2015)]

сбалансированное сочетание новых и устоявшихся элементов – самый безопасный путь к успешному восприятию научных достижений.

Карьерная динамика

Индивидуальные академические карьеры разворачиваются в контексте огромного рынка производства и потребления знаний (Walsh, Lee, 2015). Следовательно, научная карьера рассматривалась с точки зрения не только индивидуальных стимулов и предельной производительности (то есть соотношения выгоды и усилий) (Petersen et al., 2012), но и институциональных стимулов (Azoulay et al., 2011; Stephan, 2012) и конкуренции (Freeman et al., 2001). Это требует объединения больших хранилищ индивидуальных, географических и временных метаданных высокого разрешения (Evans, Foster, 2011), чтобы составить представление о карьерных траекториях, которые могут быть проанализированы с разных точек зрения. Например, одно исследование показало, что схемы финансирования, толерантные к предыдущим неудачам и вознаграждающие долгосрочный успех, поддерживают работы, результаты которых с большей вероятностью будут описаны в публикациях с высокой отдачей, чем гранты, которые поддерживают исследования с коротким циклом (Azoulay et al., 2011). Взаимодействие систем с конкурирующими временными шкалами является классической проблемой в науке о сложных системах. Многогранная природа науки является мотивацией для генеративных моделей, которые подчеркивают непреднамеренные последствия политики. Например, модели карьерного роста показывают, что краткосрочные контракты часто приводят к внезапному окончанию карьеры (Petersen et al., 2012).

Вопрос гендерного неравенства в науке остается превалирующим и проблематичным (Larivière et al., 2013). Женщины имеют меньше публикаций (Duch et al., 2012; Way et al., 2016; West et al., 2013), коллабораторов (Zeng et al., 2016) и меньше финансирования (Ley, Hamilton, 2008), и они «наказываются» при найме, по сравнению с равными по квалификации мужчинами (Moss-Racusin et al., 2012). Причины этих явлений до сих пор не ясны. Внутренние различия в показателях производительности и продолжительности карьеры могут объяснить различия в моделях сотрудничества (Zeng et al., 2016) и коэффициентах найма (Way et al., 2016) между учеными-мужчинами и женщинами. С другой стороны, экспериментальные данные показывают, что предубеждения в отношении женщин возникают на очень ранних этапах карьеры. Когда среди биографий кандидатов случайным образом распределялся пол, комитет по найму систематически «наказывал» кандидатов-женщин (Moss-Racusin et al., 2012). Большинство исследований до сих пор было сосредоточено на относительно небольших выборках. Улучшения в составлении крупномасштабных наборов данных о научной карьере, использующих информацию из различных источников (например, отчеты о публикациях, заявки на гранты и награды), помогут нам глубже понять причины неравенства и мотивировать использовать модели, которые могут служить основой для политических решений.

Мобильность ученых – еще один важный фактор, открывающий разнообразные возможности для карьерного роста. Большинство исследований мобильности были сосредоточены на количественной оценке утечки мозгов и выигрыша страны или региона (Doria Arrieta et al., 2017; Van Noorden, 2012), особенно после изменения политики. Однако исследования индивидуальной мобильности и ее (мобильности) влияния на карьеру остаются скудными, главным образом из-за трудностей получения информации за значительный период времени о передвижениях многих ученых и выявления причин, лежащих в основе решений о мобильности. Ученые, покинувшие родную страну, превзошли ученых, которые не переехали, в соответствии с их оценками цитирования, что может быть связано с предвзятостью отбора, который предлагает лучшие возможности для карьерного роста лучшим ученым (Franzoni et al., 2014; Sugimoto et al., 2017). Более того, ученые склонны переходить из одного престижного учреждения в другое (Clauset et al., 2015). Тем не менее при изучении воздействия изменений, связанных с каждым шагом на основе количества цитирований, не было обнаружено никакого систематического увеличения или уменьшения изменений, даже когда ученые переходили в учреждение значительно более высокого или более низкого ранга (Deville et al., 2014). Другими словами, не институт создает эффект, а отдельные исследователи создают институт.

Другим потенциально важным фактором карьеры является репутация и дилемма, которую она ставит перед рецензированием рукописей, оценкой предложений и принятием решений о продвижении. Репутация авторов статей, измеряемая общим количеством цитирований их предыдущих работ, заметно увеличивает число цитирований, собранных этой статьей в первые годы после публикации (Petersen et al., 2014). Однако после этой начальной фазы количество цитирований зависит от того, как будет воспринята работа научным сообществом. Это открытие, наряду с исследованием, описанным в (Deville et al., 2014), предполагает, что для

продуктивной научной карьеры репутация является менее важным фактором успеха, чем талант, трудолюбие и значимость.

К политике относится и вопрос о том, зависят ли креативность и инновации от возраста или стадии карьеры. Десятилетия изучения выдающихся исследователей и новаторов привели к выводу, что крупные прорывы в карьере происходят относительно рано, в среднем в возрасте 35 лет (Simonton, 1997). Напротив, недавние работы показывают, что эта хорошо подтвержденная склонность к открытиям на ранних этапах карьеры полностью объясняется продуктивностью, которая высока в начале карьеры ученого и позже падает (Sinatra et al., 2016). Другими словами, в инновациях нет возрастных закономерностей: наиболее цитируемой работой ученого может быть любая из его работ, независимо от возраста или стадии карьеры, на которой она была опубликована (рис. 3). Стохастическая модель эволюции воздействия также указывает на то, что прорывы являются результатом сочетания способностей ученого и удачи в выборе проблемы с высоким потенциалом (Sinatra et al., 2016).

Командная наука

В течение последних десятилетий возросла зависимость от командной работы, что представляет собой фундаментальный сдвиг в том, как делается наука. Исследование авторства 19,9 млн научных статей и 2,1 млн патентов показывает почти всеобщий сдвиг в сторону коллективов во всех отраслях науки (Wuchty et al., 2007) (рис. 4). Например, в 1955 г. научные и инженерные коллективы написали примерно столько же работ, сколько и отдельные авторы. Однако к 2013 г. доля работ, написанных коллективом авторов, возросла до 90% (Cooke, Hilton, 2015).

В настоящее время коллективная публикация в области науки и техники скорее в 6,3 раза получит 1000 цитирований или более, чем публикация одного автора, и это различие не может быть объяснено самоцитированием (Larivière et al., 2015; Wuchty et al., 2007). Одна из возможных причин – способность команды придумывать новые комбинации идей (Uzzi et al., 2013) или производить ресурсы, которые впоследствии используются другими (например, геномика). Измерения показывают, что команды на 38% чаще, чем одиночные авторы, вставляют новые комбинации в знакомые области знаний, поддерживая предположение о том, что команды могут объединять ученых различных специальностей, которые эффективно комбинируют знания для быстрого научного прорыва. Наличие большего количества коллабораций означает бóльшую видимость через большее число соавторов,

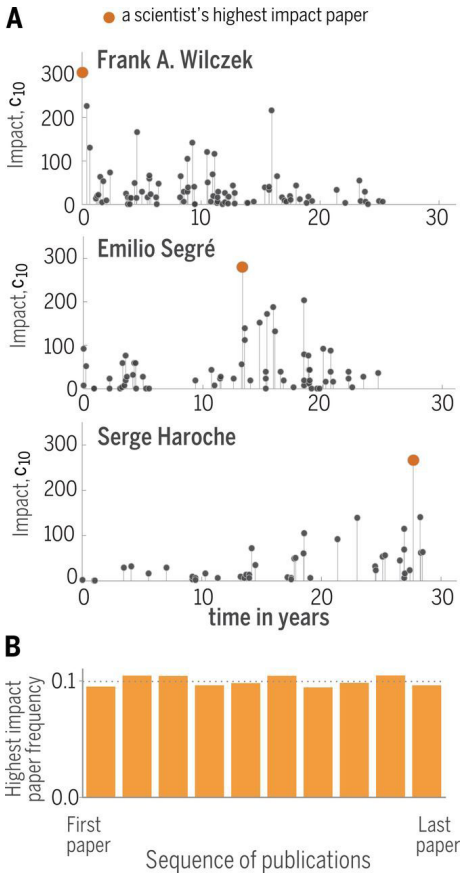


Рис. 3. Влияние на научную карьеру
(A) Списки публикаций трех нобелевских лауреатов по физике. Горизонтальная ось показывает количество лет после первой публикации лауреата, каждый круг соответствует исследовательской статье, а высота круга представляет влияние статьи, количественно выраженное C10, количество цитирований через 10 лет. Наиболее значимая статья лауреата обозначается оранжевым кружком. (B) Гистограмма встречаемости самой высокоэффективной статьи в последовательности публикаций ученого, рассчитанная на 10 000 ученых. Плоскостность гистограммы указывает на то, что наиболее результативная работа может быть с одинаковой вероятностью в любом месте последовательности работ, опубликованных ученым (Sinatra et al., 2016)

Fig. 3. Impact in scientific careers.
(A) Publication record of three Nobel laureates in physics. The horizontal axis indicates the number of years after a laureate's first publication, each circle corresponds to a research paper, and the height of the circle represents the paper's impact, quantified by c10, the number of citations after 10 years. The highest-impact paper of a laureate is denoted with an orange circle. (B) Histogram of the occurrence of the highest-impact paper in a scientist's sequence of publications, calculated for 10,000 scientists. The flatness of the histogram indicates that the highest-impact work can be, with the same probability, anywhere in the sequence of papers published by a scientist (Sinatra et al., 2016)

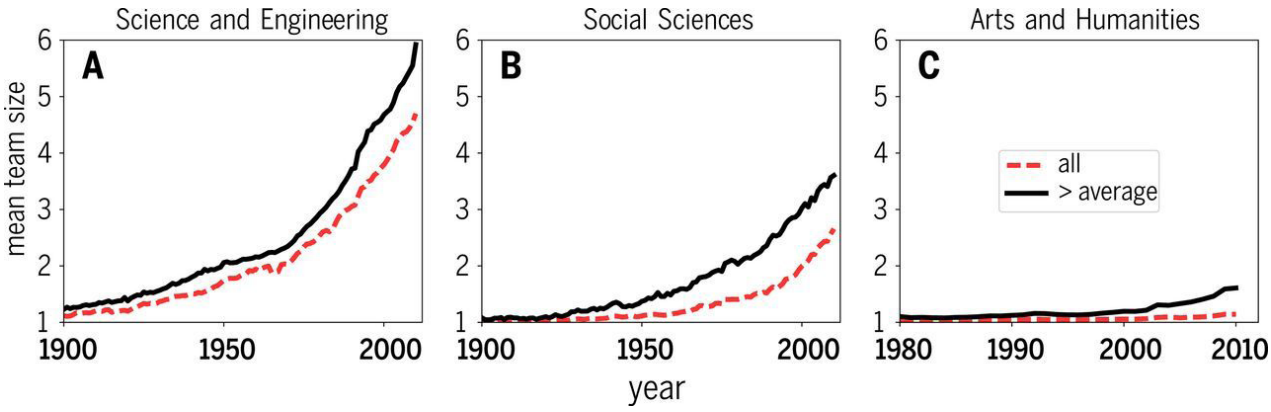


Рис. 4. Размер и влияние команд

Средний размер команды неуклонно растет на протяжении последнего столетия. Красные пунктирные кривые представляют среднее число соавторов по всем работам; черные кривые отражают только те работы, которые получили больше цитирований, чем среднее значение для данной области. Черные кривые систематически находятся над пунктирными красными, что означает, что высокоэффективная работа с большей вероятностью будет производиться большими командами, чем маленькими. Каждая группа соответствует одной из трех основных дисциплинарных групп статей, индексируемых в WoS: (A) наука и техника, (B) социальные науки и (C) искусство и гуманитарные науки

Fig. 4. Size and impact of teams

Mean team size has been steadily growing over the past century. The red dashed curves represent the mean number of coauthors over all papers; the black curves consider just those papers receiving more citations than the average for the field. Black curves are systematically above the dashed red ones, meaning that high-impact work is more likely to be produced by large teams than by small ones. Each panel corresponds to one of the three main disciplinary groups of papers indexed in the WoS: (A) science and engineering, (B) social sciences, and (C) arts and humanities.

которые, скорее всего, представят работу своим сетям и тем самым усилят влияние, что может частично компенсировать тот факт, что кредит доверия внутри команды должен быть разделен со многими коллегами (Petersen et al., 2012).

Работа в больших командах собирает в среднем больше цитирований в самых разных областях. Исследования показывают, что небольшие команды, как правило, склонны дестабилизировать науку и технику с помощью своих идей и перспектив, в то время как большие команды развивают то, что есть (Wu et al., 2017). Таким образом, для сдерживания бюрократизации науки может быть важно финансировать и поддерживать команды любой численности (Walsh, Lee, 2015).

Команды растут в размерах, увеличиваясь в среднем на 17% за десятилетие (Guimerà et al., 2005; Jones, 2009; Wuchty et al., 2007), – это тенденция, лежащая в основе фундаментального изменения состава команд. Научные команды включают в себя как небольшие, стабильные «основные» команды, так и большие, динамично меняющиеся расширенные команды (Milojević, 2014). Увеличение команды в большинстве областей обусловлено более быстрым увеличением больших команд, которые начинают как небольшие основные команды, но впоследствии привлекают новых членов через процесс кумулятивного преимущества, закрепленного производительностью. Размер является решающим фактором стратегии выживания команды: небольшие команды выживают дольше, если придерживаются стабильного ядра, но более крупные команды сохраняются дольше, если у них происходит смена кадров (Palla, 2007).

По мере того как наука усиливалась и становилась все более сложной, инструменты, необходимые для расширения границ знания, увеличивались в масштабе и точности. Инструменты исследования становятся недоступными для большинства отдельных исследователей, но также и для большинства учреждений. Сотрудничество – это важнейшее решение, объединяющее ресурсы в интересах науки. Большой адронный коллайдер в ЦЕРНе, самый большой и мощный в мире коллайдер частиц, был бы немыслим без сотрудничества, требующего более 10 000 ученых и инженеров из более чем 100 стран. Однако существует компромисс, связанный с увеличением размера команды, который влияет на ценность и риски, связанные с «большой наукой» (De Solla Price, 1963). Хотя, может быть, более крупные проблемы поддаются решению, бремя воспроизводимости может потребовать удваивания первоначальных усилий, что может быть практически или экономически невыполнимым.

Сотрудники могут иметь большое влияние на научную карьеру. Согласно недавним

исследованиям (Azoulay et al., 2010; Borjas, Doran, 2015), ученые, которые теряют своих звездных соавторов, испытывают существенное падение производительности, особенно если потерянный сотрудник был постоянным соавтором. Публикации с участием очень сильных соавторов получают в среднем на 17% больше ссылок, что указывает на ценность карьерного партнерства (Petersen, 2015).

Учитывая растущее число авторов в средней исследовательской статье, – кто должен получать и получает наибольшую значимость? Каноническая теория распределения вклада в науке – это эффект Матфея (Merton, 1968), в котором ученые более высокого статуса, участвующие в совместной работе, получают большее влияние за свой вклад. Правильно распределить индивидуальный вклад для совместной работы трудно, потому что мы не можем легко различить индивидуальные вклады (Allen et al., 2014). Можно, однако, проверить схему социтирования в публикациях соавторов, чтобы определить долю вклада, которую сообщество присваивает каждому соавтору в публикации (Shen, Barabási, 2014).

Динамика цитирования

Научное цитирование по-прежнему остается доминирующей измеримой единицей вклада в науку. Поскольку большинство показателей зависит от цитирований (Garfield, 1972; Hirsch, 2005; Moed, 2010; Waltman, 2016), то поколениями ученых была тщательно изучена динамика накопления цитирований. Из фундаментальной работы Прайса (De Solla Price, 1965) мы знаем, что распределение цитирований для научных статей сильно искажено: многие статьи никогда не цитируются, но основополагающие статьи могут накапливать до 10 000 или более цитирований. Это неравномерное распределение цитирования является устойчивым, эмерджентным свойством динамики науки, и оно сохраняется, когда статьи группируются по институциям (Zhang et al., 2013). Если число цитирований статьи разделить на среднее число цитирований, собранных статьями по одной и той же дисциплине и году, то распределение результирующего балла будет практически неразличимым для всех дисциплин (Radicchi et al., 2008; Waltman et al., 2012) (рис. 5A). Это означает, что мы можем сравнить влияние статей, опубликованных по разным дисциплинам, взглянув на их относительную цитируемость. Например, статья по математике, содержащая 100 цитат, представляет собой более высокий дисциплинарный эффект, чем статья по микробиологии с 300 цитатами.

Хвост распределения цитирований, фиксирующий количество высокоэффективных статей, проливает свет на механизмы, которые приводят к накоплению цитирований. Недавние исследования показывают, что оно следует степенному закону (Golosovsky, Solomon, 2012a; Stegehuis et al., 2015; Thelwall, 2016). Степенные хвосты могут быть сформированы с помощью процесса кумулятивного преимущества (De Solla Price, 1976), известного как преференциальная привязанность в сетевой науке (Barabási, Albert, 1999) и предполагающего, что вероятность цитирования статьи растет с увеличением числа цитирований, которые она уже собрала. Такая модель может быть дополнена другими характерными чертами динамики цитирования, такими как устаревание знаний, уменьшение вероятности цитирования с возрастом статьи (Eom, Fortunato, 2011; Golosovsky, Solomon, 2012b; Parolo et al., 2015; Stringer et al., 2008; Wang et al., 2013) и параметр пригодности, уникальный для каждой статьи, фиксирующий привлекательность работы для научного сообщества (Eom, Fortunato, 2011; Wang et al., 2013). Лишь незначительная часть статей отклоняется от паттерна, описываемого такой моделью, – некоторые из них называются «спящими красавицами», потому что они получают очень мало внимания в течение десятилетий после публикации, а затем внезапно происходит всплеск внимания и цитирований (Ke et al., 2015; Van Raan, 2004).

Описанные выше генеративные механизмы могут быть использованы для прогнозирования динамики цитирования отдельных статей. Одна прогностическая модель (Wang et al., 2013) предполагает, что вероятность цитирования статьи зависит от числа предыдущих цитирований, фактора устаревания и параметра пригодности (рис. 5, B и C). Для данной статьи можно оценить три параметра модели, подгоняя модель к начальной части истории цитирования статьи. Долгосрочное воздействие публикации можно экстраполировать (Wang et al., 2013). Другие исследования выявили предикторы влияния цитирования отдельных статей (Tahamtan et al., 2016), такие как импакт-фактор журнала (Stegehuis et al., 2015). Было высказано предположение, что будущий h-индекс (Hirsch, 2007) ученого может быть точно предсказан (Acuna et al., 2012), хотя предсказательная сила снижается при учете стадии карьеры ученого и кумулятивного, неубывающего характера h-индекса (Penner et al., 2013). Устранение несоответствий при использовании количественных показателей оценки в науке имеет решающее значение и подчеркивает важность понимания механизмов генерации, лежащих в основе широко используемых статистических данных.

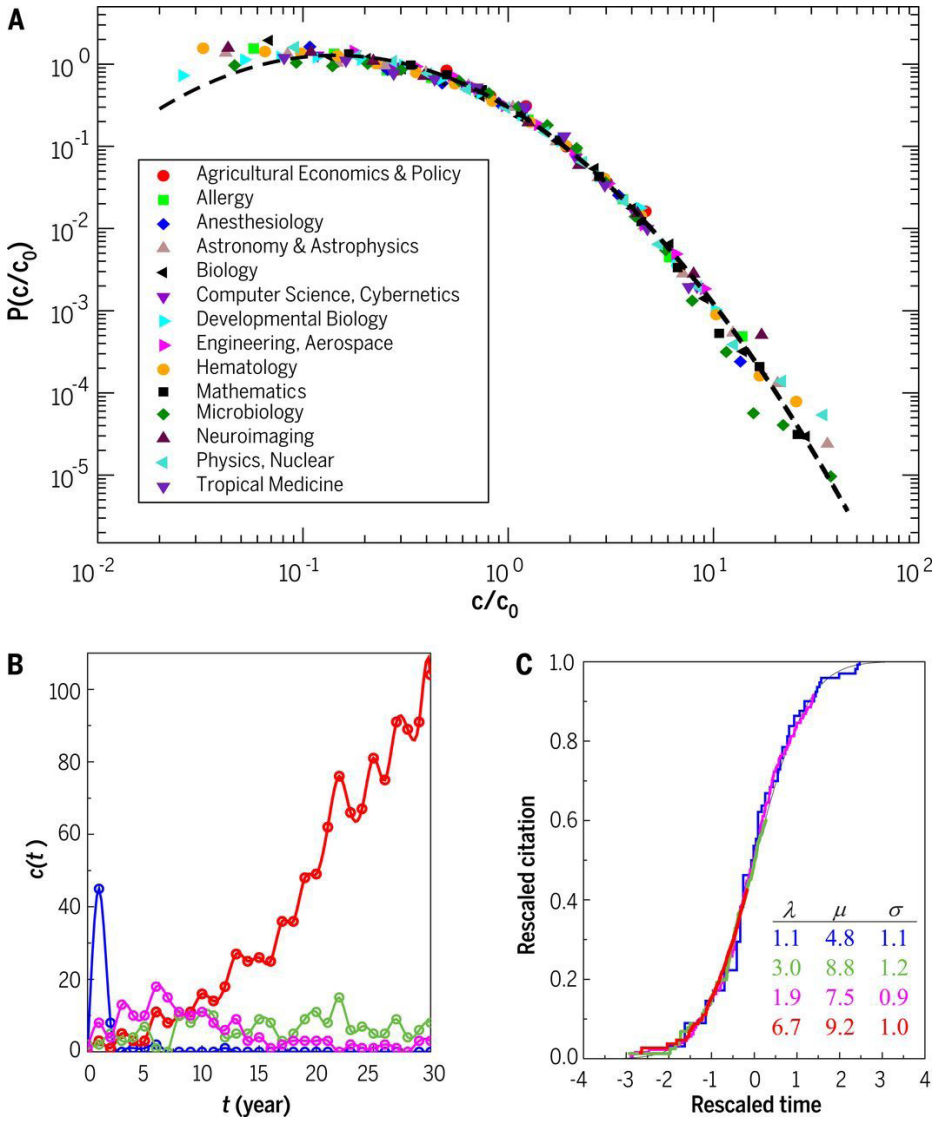


Рис. 5. Универсальность в динамике цитирования
(A) Распределение цитирований статей, опубликованных по одной и той же дисциплине и в одном году, лежит на одной и той же кривой для большинства дисциплин, если исходное число цитирований каждой статьи делится на среднее число цитирований C0 по всем работам в этой дисциплине и году. Пунктирная линия – это логнормальная подгонка [По данным (Radicchi et al., 2008)]. (B) История цитирования четырех статей, опубликованных в Physical Review в 1964 г., отобранных за их отчетливую динамику, демонстрирующую паттерн [модель] «скачок-спад» (синий), имеющих запаздывающий пик (пурпурный), привлекающих постоянное количество цитирований с течением времени (зеленый) или получающих все большее число цитирований каждый год (красный). (C) Цитируемость отдельной статьи определяется тремя параметрами: пригодностью λi, непосредственностью μi и длительностью σi. Масштабируя историю цитирования каждой статьи в (B) на соответствующие параметры (λ, μ, σ), четыре статьи сворачиваются в единую универсальную функцию, которая одинакова для всех дисциплин [По данным (Wang et al., 2013)]

Fig. 5. Universality in citation dynamics
(A) The citation distributions of papers published in the same discipline and year lie on the same curve for most disciplines, if the raw number of citations c of each paper is divided by the average number of citations c0 over all papers in that discipline and year. The dashed line is a lognormal fit. [Adapted from (Radicchi et al., 2008)] (B) Citation history of four papers published in Physical Review in 1964, selected for their distinct dynamics, displaying a “jump-decay” pattern (blue), experiencing a delayed peak (magenta), attracting a constant number of citations over time (green), or acquiring an increasing number of citations each year (red). (C) Citations of an individual paper are determined by three parameters: fitness λi, immediacy μi, and longevity σi. By rescaling the citation history of each paper in (B) by the appropriate (λ, μ, σ) parameters, the four papers collapse onto a single universal function, which is the same for all disciplines. [Adapted from (Wang et al., 2013)]

Прогноз

Несмотря на открытие универсалий в науке, существенные дисциплинарные различия в культуре, привычках и предпочтениях делают некоторые междисциплинарные идеи трудными для понимания в конкретных областях, а связанные с ними стратегии – сложными для реализации. Различия в вопросах, данных и навыках, требуемых каждой дисциплиной, предполагают, что мы можем получить дополнительную информацию из предметных исследований SciSci, которые моделируют и прогнозируют возможности, адаптированные к потребностям каждой области. Для молодых ученых результаты SciSci предлагают действенные идеи о прошлых паттернах, помогая направлять будущие исследования в рамках их дисциплин (Вставка 1).

Вставка 1. Уроки от SciSci

1. **Инновации и традиции**: оставленные без внимания, действительно инновационные и высокодисциплинарные идеи могут не достичь максимального научного эффекта. Чтобы усилить их воздействие, новые идеи должны быть помещены в контекст устоявшихся знаний (Uzzi et al., 2013).

2. **Настойчивость:** продуктивно работающий ученый никогда не бывает слишком стар, чтобы сделать важное открытие (Sinatra et al., 2016).

3. **Сотрудничество:** исследования переходят к командам, поэтому сотрудничество полезно. Работы небольших команд, как правило, склонны к большей деструкции, в то время как работы больших команд, как правило, стремятся к большей эффективности (Milojević, 2015; Wu et al., 2017; Wuchty et al., 2007).

4. **Вклад:** большая часть вклада достанется соавторам с наиболее последовательным послужным списком в области публикации (Shen, Barabási, 2014).

5. **Финансирование:** хотя эксперты признают инновации, они в конечном счете склонны их сбрасывать со счетов. Финансирующие агентства должны просить экспертов оценивать инновации, а не только ожидаемый успех (Bromham et al., 2016).

Вклад SciSci заключается в детальном понимании структуры отношений между учеными, институтами и идеями, что является важной отправной точкой, облегчающей идентификацию фундаментальных генерирующих процессов. Вместе эти усилия, основанные на данных, дополняют вклад смежных областей исследований, таких как экономика (Stephan, 2012) и социология науки (Cole, Zuckerman, 1975; Merton, 1968). Причинно-следственная оценка является ярким примером, в котором эконометрические методы сопоставления требуют и используют всеобъемлющие источники данных в попытке смоделировать контрфактические сценарии (Azoulay et al., 2011; Doria Arrieta et al., 2017). Оценка причинности является одним из наиболее необходимых в будущем достижений SciSci. Многие описательные исследования показывают сильные связи между структурой и результатами, но степень, в которой конкретная структура «вызывает» результат, остается неизученной. Вступая в более тесные партнерские отношения с экспериментаторами, SciSci сможет лучше идентифицировать связи, обнаруженные на основе моделей и крупномасштабных данных, которые имеют причинную силу, чтобы обогатить их политическую значимость. Но эксперименты над наукой могут быть самой большой проблемой, с которой SciSci еще предстоит столкнуться. Проведение рандомизированных контролируемых исследований, которые могут изменить результаты для отдельных лиц или научных учреждений, в основном поддерживаемых налоговыми деньгами, неизбежно вызовет критику и откат (Azoulay, 2012). Поэтому мы ожидаем, что в ближайшем будущем в исследованиях SciSci будут преобладать квазиэкспериментальные подходы.

Большинство исследований SciSci фокусируется на публикациях в качестве первичных источников данных, подразумевая, что идеи и выводы ограничены идеями, достаточно успешными, чтобы заслуживать публикации в первую очередь. Однако большинство попыток в науке терпят неудачу, иногда весьма впечатляющую. Учитывая, что ученые терпят неудачу чаще, чем преуспевают, знание того, когда, почему и как идея терпит неудачу, имеет важное значение в наших попытках понять и улучшить науку. Такие исследования могли бы дать содержательные рекомендации относительно кризиса воспроизводимости и помочь нам объяснить проблему «работы в стол». Они также могли бы существенно продвинуть наше понимание человеческого воображения, раскрывая общий конвейер творческой деятельности.

Наука часто ведет себя как экономическая система с одномерной «валютой» количества цитирований. Это создает иерархическую систему, в которой динамика «богатые становятся богаче» подавляет распространение новых идей, особенно тех, которые исходят от молодых ученых, и тех, кто не вписывается в парадигмы, поддерживаемые конкретными областями. Науку можно улучшить путем расширения числа и диапазона показателей эффективности. Разработка альтернативных метрик, охватывающих активность в интернете (Thelwall, Kousha, 2015a) и социальных сетях (Thelwall, Kousha, 2015b) и влияние на общество (Bornmann, 2013), является решающей в этом отношении. Другие измеримые величины включают информацию

(например, данные), которой ученые делятся с конкурентами (Haeussler et al., 2014), помощь, которую они предлагают своим коллегам (Oettl, 2012), и их надежность как рецензентов работ своих коллег (Ravindran, 2016). Но при изобилии метрик требуется больше работы для понимания того, что каждая из них дает и не дает, чтобы обеспечить содержательную интерпретацию и избежать неправильного использования. SciSci может внести существенный вклад, предоставляя модели, которые предлагают более глубокое понимание механизмов, управляющих показателями эффективности в науке. Например, модели эмпирических закономерностей, наблюдаемых при использовании альтернативных показателей (например, распределения загрузки статей), позволят нам исследовать их связь с метриками, основанными на цитировании (Costas et al., 2015), и распознать манипуляции.

Интеграция метрик, основанных на цитировании, с альтернативными показателями будет способствовать плюрализму и позволит создать новые измерения продуктивной специализации, в которых ученые могут быть успешными по-разному. Наука – это экосистема, которая требует не только публикаций, но и коммуникаторов, преподавателей и экспертов, ориентированных на детали. Нам нужны люди, которые могут задавать новые, изменяющие область вопросы, а также те, кто может на них ответить. Науке было бы полезно, если бы любопытство, творчество и интеллектуальный обмен – особенно в отношении последствий и применения науки и техники в социуме – лучше бы ценились и стимулировались в будущем. Более плюралистический подход мог бы уменьшить дублирование и сделать науку процветающей в обществе (Clauset et al., 2017).

Вопрос, который SciSci стремится решить, – это распределение финансирования науки. Нынешняя система экспертной оценки подвержена предубеждениям и неувязкам (Wessely, 1998). Было предложено несколько альтернатив, таких как случайное распределение финансирования (Geard, Noble, 2010), персональное финансирование, не связанное с подготовкой и рассмотрением предложений (Azoulay et al., 2011), открытие процесса рассмотрения предложений для всей интернет-аудитории (Lubchenko, 2010), полное устранение людей-рецензентов путем распределения средств через показатель эффективности (Roy, 1985) и краудфандинг ученых (Bollen et al., 2017).

Важнейшей областью будущих исследований SciSci является интеграция машинного обучения и искусственного интеллекта таким образом, чтобы машины и умы работали вместе. Эти новые инструменты предвещают далеко идущие последствия для науки, потому что машины могут расширить кругозор ученого больше, чем сотрудники-люди. Например, самоходное транспортное средство является результатом успешного сочетания известных навыков вождения и информации, которая была, вне человеческого сознания, предоставлена сложными методами машинного обучения. Сотрудничество между разумом и машиной улучшило процесс принятия решений на основе фактических данных по широкому кругу медицинских, экономических, социальных, правовых и деловых проблем (Kleinberg et al., 2017; Kohn et al., 2014; Liu et al., 2016). Как можно улучшить науку с помощью партнерства между разумом и машиной и какие механизмы наиболее продуктивны? Эти вопросы обещают помочь нам понять науку будущего.

http://www.sciencemag.org/about/science-licenses-journal-article-reuse

Эта статья распространяется на условиях лицензии по умолчанию для научных журналов.

References

Acuna DE, Allesina S and Kording KP (2012) Future impact: predicting scientific success. *Nature* 489 (7415): 201–202. DOI: 10.1038/489201.

Allen L, Scott J, Brand A, Hlava M and Altman M (2014) Publishing: credit where credit is due. *Nature* 508 (7496): 312–313. DOI: 10.1038/508312.

Azoulay P (2012) Research efficiency: turn the scientific method on ourselves. *Nature* 484 (7392): 31–32. DOI: 10.1038/484031.

Azoulay P, Graff Zivin JS and Manso G (2011) Incentives and creativity: Evidence from the academic life sciences. *Rand Journal of Economics* 42 (3): 527–554. DOI: 10.1111/j.1756-2171.2011.00140.x.

Azoulay P, Zivin JG and Wang j (2010) Superstar extinction. *Quarterly Journal of Economics* 125 (2): 549–589. DOI: 10.1162/qjec.2010.125.2.549.

Barabási A-L and Albert R (1999) Emergence of scaling in random networks. *Science* 286 (5439): 509–512. DOI: 10.1126/science.286.5439.509.

Bettencourt LMA, Kaiser DI and Kaur J (2009) Scientific discovery and topological transitions in collaboration networks. *Journal of Informetrics* 3 (3): 210–221. DOI: 10.1016/j.joi.2009.03.001.

Bollen J, Crandall D, Junk D, Ding Y and Börner K (2017) An efficient system to fund science: from proposal review to peer-to-peer distributions. *Scientometrics* 110 (1): 521–528. DOI: 10.1007/s11192-016-2110-3.

Borjas GJ and Doran KB (2015) Which peers matter? The relative impacts of collaborators, colleagues, and competitors. *Review of Economics and Statistics* 97 (5): 1104–1117. DOI: 10.1162/REST_a_00472.

Bornmann L (2013) What is societal impact of research and how can it be assessed? A literature survey. *Journal of American Society for Information Science and Technology* 64 (2): 217–233. DOI: 10.1002/asi.22803.

Boudreau KJ, Guinan EC, Lakhani KR and Riedl C (2016) Looking across and looking beyond the knowledge frontier: intellectual distance, novelty, and resource allocation in science. *Management Science* 62 (10): 2765–2783. DOI: 10.1287/mnsc.2015.2285.

Bourdieu P (1975) The specificity of the scientific field and the social conditions of the progress of reasons. *Social Science Information* 14 (6): 19–47. DOI: 10.1177/053901847501400602.

Bromham L, Dinnage R and Hua X (2016) Interdisciplinary research has consistently lower funding success. *Nature* 534 (7609): 684–687. DOI: 10.1038/nature18315.

Bruggeman J, Traag VA and Uitermark J (2012) Detecting communities through network data. *American Sociological Review* 77 (6): 1050–1063. DOI: 10.1177/0003122412463574.

Clauset A, Arbesman S and Larremore DB (2015) Systematic inequality and hierarchy in faculty hiring networks. *Science Advances* 1 (1): e1400005. DOI: 10.1126/sciadv.1400005.

Clauset A, Larremore DB and Sinatra R (2017) Data-driven predictions in the science of science. *Science* 355 (6324): 477–480. DOI: 10.1126/science.aal4217.

Cole JR and Zuckerman H (1975) The emergence of a scientific specialty: the self-exemplifying case of the sociology of science. *The idea of social structure: papers in honor of Robert K. Merton*. New York, pp. 139–174.

Cooke NJ, Hilton ML (eds) (2015) *Enhancing the effectiveness of team science.* Washington: Nat. Acad. Press.

Costas R, Zahedi Z and Wouters P (2015) Do "altmetrics" correlate with citations? Extensive comparison of altmetric indicators with citations from a multidisciplinary perspective. *Journal of Association for Information Science and Technology* 66 (10): 2003–2019. DOI: 10.1002/asi.23309.

De Solla Price DJ (1963) *Little science, big science.* New York: Columbia Univ. Press.

De Solla Price DJ (1965) Networks of scientific papers. *Science* 149 (3683): 510–515. DOI: 10.1126/science.149.3683.510.

De Solla Price DJ (1976) A general theory of bibliometric and other cumulative advantage processes. *Journal of American Society for Information Science and Technology* 27 (5/6): 292–306. DOI: 10.1002/asi.4630270505.

Deville P, Wang D, Sinatra R, Song C, Blondel VD and Barabási AL (2014) Career on the move: geography, stratification, and scientific impact. *Scientific Reports* 4: 4770. DOI: 10.1038/srep04770.

Doria Arrieta OA, Pammolli F and Petersen AM (2017) Quantifying the negative impact of brain drain on the integration of European science. *Science Advances* 3 (4): e1602232. DOI: 10.1126/sciadv.1602232.

Duch J, Zeng XHT, Sales-Pardo M, Radicchi F, Otis S, Woodruff TK and Nunes Amaral LA (2012) The possible role of resource requirements and academic career-choice risk on gender differences in publication rate and impact. *PLoS One* 7: e51332. DOI: 10.1371/journal.pone.0051332.

Eom Y-H and Fortunato S (2011) Characterizing and modeling citation dynamics. *PLoS One* 6: e24926. DOI: 10.1371/journal.pone.0024926.

Evans JA and Foster JG (2011) Metaknowledge. *Science* 331 (6018): 721–725. DOI: 10.1126/science.1201765.

Foster JG, Rzhetsky A and Evans JA (2015) Tradition and innovation in scientists' research strategies. *American Sociological Review* 80 (5): 875–908. DOI: 10.1177/0003122415601618.

Franzoni C, Scellato G and Stephan P (2014) The mover's advantage: the superior performance of migrant scientists. *Economics Letters* 122 (1): 89–93. DOI: 10.1016/j.econlet.2013.10.040.

Freeman R, Weinstein E, Marincola E, Rosenbaum J and Solomon F (2001) Competition and careers in biosciences. *Science* 294 (5550): 2293–2294. DOI: 10.1126/science.1067477.

Garfield E (1955) Citation indexes for science; a new dimension in documentation through association of ideas. *Science* 122 (3159): 108–111. DOI: 10.1126/science.122.3159.108.

Garfield E (1972) Citation analysis as a tool in journal evaluation. *Science* 178 (4060): 471–479. DOI: 10.1126/science.178.4060.471.

Geard N and Noble J (2010) Modelling academic research funding as a resource allocation problem. *3rd World Congress on Social Simulation, Kassel, Germany, September 6–9, 2010*. URL: https://eprints.soton.ac.uk/271374/.

Golosovsky M and Solomon S (2012a) Runaway events dominate the heavy tail of citation distributions. *European Physical Journal – Special Topics 205*: 303–311. DOI: 10.1140/epjst/e2012-01576-4.

Golosovsky M and Solomon S (2012b) Stochastic dynamical model of a growing citation network based on a self-exciting point process. *Physical Review Letters* 109 (9): 098701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.098701.

Guimerà R, Uzzi B, Spiro J and Nunes Amaral LA (2005) Team assembly mechanisms determine collaboration network structure and team performance. *Science* 308 (5722): 697–702. DOI: 10.1126/science.1106340.

Haeussler C, Jiang L, Thursby J and Thursby M (2014) Specific and general information sharing among competing academic researchers. *Research Policy* 43 (3): 465–475. DOI: 10.1016/j.respol.2013.08.017.

Hirsch JE (2005) An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 102 (46): 16569–16572. DOI: 10.1073/pnas.0507655102.

Hirsch JE (2007) Does the *h* index have predictive power? *Proceedings of the National Academy of*

Sciences of USA 104 (49): 19193–19198. DOI: 10.1073/pnas.0707962104.

Jia T, Wang D and Szymanski BK (2017) Quantifying patterns of research-interest evolution. *Nature Human Behaviour* 1: 0078. DOI: 10.1038/s41562-017-0078.

Jones BF (2009) The burden of knowledge and the "death of the renaissance man": is innovation getting harder? *Review of Economic Studies* 76 (1): 283–317. DOI: 10.1111/j.1467-937X.2008.00531.x.

Ke Q, Ferrara E, Radicchi F and Flammini A (2015) Defining and identifying Sleeping Beauties in science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 112 (24): 7426–7431. DOI: 10.1073/pnas.1424329112.

Kim D, Cerigo DB, Jeong H and Youn H. (2016) Technological novelty profile and inventions future impact. *EPJ Data Science* 5: 8. DOI: 10.1140/epjds/s13688-016-0069-1.

Klavans R and Boyack KW (2016) Which type of citation analysis generates the most accurate taxonomy of scientific and technical knowledge? *Journal of Association for Information Science and Technology* 68 (4): 984–998. DOI: 10.1002/asi.23734.

Kleinberg J, Lakkaraju H, Leskovec J, Ludwig J and Mullainathan S (2017) Human decisions and machine predictions. *National Bureau of Economic Research.* URL: https://www.nber.org/papers/w23180. DOI: 10.3386/w23180.

Kohn MS, Sun J, Knoop S, Shabo A, Carmeli B, Sow D, Syed-Mahmood T and Rapp W (2014) IBM's health analytics and clinical decision support. *Yearbook of Medical Informatics* 9 (1): 154–162. DOI: 10.15265/IY-2014-0002.

Kuhn TS (1977) *The essential tension: selected studies in scientific tradition and change.* Chicago: Univ. of Chicago Press.

Kuhn T, Perc M and Helbing D (2014) Inheritance patterns in citation networks reveal scientific memes. *Physical Review X* 4 (4): 041036. DOI: 10.1103/PhysRevX.4.041036.

Larivière V, Gingras Y, Sugimoto CR and Tsou A (2015) Team size matters: collaboration and scientific impact since 1900. *Journal of Association for Information Science and Technology* 66 (7): 1323–1332. DOI: 10.1002/asi.23266.

Larivière V, Haustein S and Börner K (2015) Long-distance interdisciplinarity leads to higher scientific impact. *PLoS One* 10: e0122565. DOI: 10.1371/journal.pone.0122565.

Larivière V, Ni C, Gingras Y, Cronin B and Sugimoto CR (2013) Bibliometrics: global gender disparities in science. *Nature* 504 (7479): 211–213. DOI: 10.1038/504211.

Leahey E and Moody J (2014) Sociological innovation through subfield integration. *Social Currents* 1 (3): 228–256. DOI: 10.1177/2329496514540131.

Ley TJ and Hamilton BH (2008) The gender gap in NIH grant applications. *Science* 322 (5907): 1472–1474. DOI: 10.1126/science.1165878.

Liu B, Govindan R and Uzzi B (2016) Do emotions expressed online correlate with actual changes in decision-making?: The case of stock day traders. *PLoS One* 11 (1): e0144945. DOI: 10.1371/journal.pone.0144945.

Lubchenko J (2010) Calm in a crisis. *Nature* 468 (7327), 1002. DOI: 10.1038/4681002.

Merton RK (1968) The Matthew effect in science. *Science* 159 (3810): 56–63. DOI: 10.1126/science.159.3810.56.

Milojević S (2014) Principles of scientific research team formation and evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 111 (11): 3984–3989. DOI: 10.1073/pnas.1309723111.

Milojević S (2015) Quantifying the cognitive extent of science. *Journal of Informetrics* 9 (4): 962–973. DOI: 10.1016/j.joi.2015.10.005.

Moed HF (2010) *Citation analysis in research evaluation.* Dordrecht: Springer.

Moss-Racusin CA, Dovidio JF, Brescoll VL, Graham MJ and Handelsman J (2012) Science faculty's subtle gender biases favor male students. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 109 (41): 16474–16479. DOI: 10.1073/pnas.1211286109.

Newman MEJ (2001) The structure of scientific collaboration networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 98 (2): 404–409. DOI: 10.1073/pnas.98.2.404.

Nissen SB, Magidson T, Gross K and Bergstrom CT (2016) Publication bias and the canonization of false facts. *eLife* 5: e21451. DOI: 10.7554/eLife.21451.

Oettl A (2012) Sociology: honour the helpful. *Nature* 489 (7417): 496–497. DOI: 10.1038/489496.

Palla G, Barabási A-L and Vicsek T (2007) Quantifying social group evolution. *Nature* 446 (7136): 664–667. DOI: 10.1038/nature05670.

Parolo PDB, Pan RK, Ghosh R, Huberman BA Kaski K and Fortunato S (2015) Attention decay in science. *Journal of Informetrics* 9 (4): 734–745. DOI: 10.1016/j.joi.2015.07.006.

Penner O, Pan RK, Petersen AM, Kaski K and Fortunato S (2013) On the predictability of future impact in science. *Scientific Reports* 3: 3052. DOI: 10.1038/srep03052.

Petersen AM (2015) Quantifying the impact of weak, strong, and super ties in scientific careers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 112 (34): E4671–E4680. DOI: 10.1073/pnas.1501444112.

Petersen AM, Fortunato S, Pan RK, Kaski K, Penner O, Rungi A, Riccaboni M, Stanley HE and Pammolli F (2014) Reputation and impact in academic careers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 111 (43): 15316–15321. DOI: 10.1073/pnas.1323111111.

Petersen AM, Riccaboni M, Stanley HE and Pammolli F (2012) Persistence and uncertainty in the academic career. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 109 (14): 5213–5218. DOI: 10.1073/pnas.1121429109.

Radicchi F, Fortunato S and Castellano C (2008) Universality of citation distributions: Toward an objective measure of scientific impact. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 105 (45): 17268–17272. DOI: 10.1073/pnas.0806977105.

Ravindran S (2016) Getting credit for peer review. *Science*. URL: www.sciencemag.org/careers/2016/02/getting-credit-peer-review.

Rosenthal R (1979) The file drawer problem and tolerance for null results. *Psychological Bulletin* 86 (3): 638–641. DOI: 10.1037/0033-2909.86.3.638.

Roy R (1985) Funding science: the real defects of peer review and an alternative to it. *Science, Technology and Human Values* 10 (3): 73–81. DOI: 10.1177/016224398501000309.

Rzhetsky A, Foster JG, Foster IT and Evans JA (2015) Choosing experiments to accelerate collective discovery. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 112 (47): 14569–14574. DOI: 10.1073/pnas.1509757112.

Shen H-W and Barabási A-L (2014) Collective credit allocation in science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA* 111 (34): 12325–12330. DOI: 10.1073/pnas.1401992111.

Shi F, Foster JG and Evans JA (2015) Weaving the fabric of science: dynamic network models of science's unfolding structure. *Social Networks* 43: 73–85. DOI: 10.1016/j.socnet.2015.02.006.

Shwed U and Bearman PS (2010) The temporal structure of scientific consensus formation. *American Sociological Review* 75 (6): 817–840. DOI: 10.1177/000312241038848.

Simonton DK (1997) Creative productivity: a predictive and explanatory model of career trajectories and landmarks. *Psychological Review* 104 (1): 66–89. DOI: 10.1037/0033-295X.104.1.66.

Sinatra R, Wang D, Deville P, Song C and Barabási A-L (2016) Quantifying the evolution of individual scientific impact. *Science* 354 (6312): aaf5239. DOI: 10.1126/science.aaf5239.

Stegehuis C, Litvak N and Waltman L (2015) Predicting the long-term citation impact of recent publications. *Journal of Informetrics* 9 (3): 642–657. DOI: 10.1016/j.joi.2015.06.005

Stephan PE (2012) *How economics shapes science*. Cambridge: Harvard Univ. Press.

Stringer MJ, Sales-Pardo M and Nunes Amaral LA (2008) Effectiveness of journal ranking schemes as a tool for locating information. *PLoS One* 3 (2): e1683. DOI: 10.1371/journal.pone.0001683.

Sugimoto CR, Robinson-Garcia N, Murray DS, Yegros-Yegros A, Costas R and Larivière V (2017) Scientists have most impact when they're free to move. *Nature* 550 (7674): 29–31. DOI: 10.1038/550029.

Sun X, Kaur J, Milojević S, Flammini A Menczer F (2013) Social dynamics of science. *Scientific Reports* 3: 1069. DOI: 10.1038/srep01069.

Tahamtan I, Safipour Afshar A and Ahamdzadeh K (2016) Factors affecting number of citations: a comprehensive review of the literature. *Scientometrics* 107 (3): 1195–1225. DOI: 10.1007/s11192-016-1889-2.

Thelwall M (2016) The discretised lognormal and hooked power law distributions for complete citation data: best options for modelling and regression. *Journal of Informetrics* 10 (2): 336–346. DOI: 10.1016/j.joi.2015.12.007.

Thelwall M and Kousha K (2015a) Web indicators for research evaluation. Part 1: Citations and links to academic articles from the Web. *Profesional de la Información* 24 (5): 587–606. DOI: 10.3145/epi.2015.sep.08.

Thelwall M and Kousha K (2015b) Web indicators for research evaluation. Part 2: Social media metrics. *Profesional de la Información* 24 (5): 607–620. DOI: 10.3145/epi.2015.sep.09.

Uzzi B, Mukherjee S, Stringer M and Jones B (2013) Atypical combinations and scientific impact. *Science* 342 (6157): 468–472. DOI: 10.1126/science.1240474pmid:24159044.

Van Noorden R (2012) Global mobility: science on the move. *Nature* 490 (7420): 326–329. DOI: 10.1038/490326.

Van Raan AFJ (2004) Sleeping Beauties in science. *Scientometrics* 59 (3): 467–472. DOI: 10.1023/B:SCIE.0000018543.82441.f1.

Wagner CS, Roessner JD, Bobb K, Klein JT, Boyack KW, Keyton J, Rafols I and Börner K (2011) Approaches to understanding and measuring interdisciplinary scientific research (IDR): a review of the literature. *Journal of Informetrics* 5 (1): 14–26. DOI: 10.1016/j.joi.2010.06.004.

Walsh JP and Lee Y-N (2015) The bureaucratization of science. *Research Policy* 44 (8): 1584–1600. DOI: 10.1016/j.respol.2015.04.010.

Waltman L (2016) A review of the literature on citation impact indicators. *Journal of Informetrics* 10 (2): 365–391. DOI: 10.1016/j.joi.2016.02.007.

Waltman L, Van Eck NJ and Van Raan AFJ (2012) Universality of citation distributions revisited. *Journal of Association for Information Science and Technology* 63 (1): 72–77. DOI: 10.1002/asi.21671.

Wang D, Song C and Barabási A-L (2013) Quantifying long-term scientific impact. *Science* 342 (6154): 127–132. DOI: 10.1126/science.1237825.

Wang J, Veugelers R and Stephan P (2016) Bias against novelty in science: a cautionary tale for users of bibliometric indicators. *SSNR*. URL: https://ssrn.com/abstract=2710572.

Way SF, Larremore DB and Clauset A (2016) Gender, productivity, and prestige in computer science faculty hiring networks. *Proceedings of the 25th International Conference on World Wide Web (WWW '16)*. Geneva, pp. 1169–1179.

Wessely S (1998) Peer review of grant applications: what do we know? *Lancet* 352 (9124): 301–305. DOI: 10.1016/S0140-6736(97)11129-1.

West JD, Jacquet J, King MM, Correll SJ and Bergstrom CT (2013) The role of gender in scholarly authorship. *PLoS One* 8: e66212. DOI: 10.1371/journal.pone.0066212.

Wu L, Wang D and Evans JA (2017) Large teams have developed science and technology; small teams have disrupted it. *SSNR*. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3034125. DOI: 10.2139/ssrn.3034125.

Wuchty S, Jones BF and Uzzi B (2007) The increasing dominance of teams in production of knowledge. *Science* 316 (5827): 1036–1039. DOI: 10.1126/science.1136099.

Yao L, Li Y, Ghosh S, Evans JA, Rzhetsky A (2015) Health ROI as a measure of misalignment of biomedical needs and resources. *Nature Biotechnology* 33 (8): 807–811. DOI: 10.1038/nbt.3276pmid:26252133.

Yegros-Yegros A, Rafols I and D'Este P (2015) Does interdisciplinary research lead to higher citation impact? The different effect of proximal and distal interdisciplinarity. *PLoS One* 10: e0135095. DOI: 10.1371/journal.pone.0135095.

Zeng XHT, Duch J, Sales-Pardo M, Moreira JAG, Radicchi F, Ribeiro HV, Woodruff TK and Amaral LAN (2016) Differences in collaboration patterns across discipline, career stage, and gender. *PLoS Biology* 14: e1002573. DOI: 10.1371/journal.pbio.1002573.

Zhang Q, Perra N, Gonçalves B, Ciulla F and Vespignani A (2013) Characterizing scientific production and consumption in physics. *Scientific Reports* 3: 1640. DOI: 10.1038/srep01640.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Исследовательской лаборатории ВВС США: гранты FA9550-15-1-0077 (Альберт-Ласло Барабаши, Роберта Синатра, Алессандро Веспиньяни), FA9550-15-1-0364 (Альберт-Ласло Барабаши и Роберта Синатра), FA9550-15-1-0162 (Джеймс А. Эванс и Дашун Ван) и FA9550-17-1-0089 (Дашун Ван); грантов Национального научного фонда NSCE 1538763, EAGER 1566393 и NCN CP supplement 1553044 (Кэти Бернер) и SBE1158803 (Джеймс А. Эванс); грантов Национального института здравоохранения P01 AG039347 и U01CA198934 (Кэти Бернер) и IIS-0910664 (Брайан Уцци); гранта Армейского исследовательского бюро W911NF-15-1-0577 и Института сложных систем Северо-Западного университета (Брайан Уцци); грантовой программы «Big Mechanism» 14145043 DARPA (Управления перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США) и гранта Фонда Джона Темплтона «Сеть метазнания» (Metaknowledge Network) (Джеймс А. Эванс); проект *Just Data* Intellectual Themes Initiative (Роберта Синатра); и Европейской комиссии «Горизонт 2020» FETPROACT-GSS CIMPLEX грант 641191 (Роберта Синатра и Альберт-Ласло Барабаши). Любые мнения, результаты и заключения или рекомендации, выраженные в этом материале, принадлежат авторам статьи и не обязательно отражают взгляды наших спонсоров.

Исправление (9 июля 2018 года): Три ссылки были непреднамеренно опущены в процессе пересмотра и редактирования. Они были добавлены в качестве ссылок (Guimerà R, Uzzi B, Spiro J and Nunes Amaral LA (2005), Newman MEJ (2001), Stringer MJ, Sales-Pardo M and Nunes Amaral LA (2008)) в PDF и HTML.