

ОДИН ИЗ ЛУЧШИХ МЫСЛИТЕЛЕЙ СОВРЕМЕННОСТИ
ПО МНЕНИЮ **БИЛЛА ГЕЙТСА**

Вацлав Смил

ОТ МИКРООРГАНИЗМОВ
ДО МЕГАПОЛИСОВ

ПОИСК КОМПРОМИССА
МЕЖДУ ПРОГРЕССОМ
И БУДУЩИМ ПЛАНЕТЫ

ЦИВИЛИЗАЦИИ ВАЦЛАВА СМИЛА



Цивилизации Вацлава Смилы

Вацлав Смил

**От микроорганизмов
до мегаполисов. Поиск
компромисса между
прогрессом и будущим планеты**

«ЭКСМО»

2019

УДК 008
ББК 87

Смил В.

От микроорганизмов до мегаполисов. Поиск компромисса
между прогрессом и будущим планеты / В. Смил — «Эксмо»,
2019 — (Цивилизации Вацлава Смилы)

ISBN 978-5-04-185570-3

Книги Вацлава Смилы, одного из самых авторитетных мыслителей современности, всегда заметны и вызывают широкий общественный и научный резонанс, потому что затрагивают глобальные проблемы человечества, волнующие каждого из нас. Новая книга всемирно известного ученого и писателя посвящена исследованию роста как понятия, в природе и обществе, от крошечных организмов до империй и цивилизаций. Рост управляет жизнями микроорганизмов и галактик, нашими мозгами и экономикой; участвует в становлении ребенка и распространении раковых клеток, увеличении численности населения и городов. В формате PDF A4 сохранен издательский макет книги.

УДК 008
ББК 87

ISBN 978-5-04-185570-3

© Смил В., 2019
© Эксмо, 2019

Содержание

Предисловие	6
Глава 1	21
Временные интервалы	23
Критерии изучения	26
Линейный и экспоненциальный рост	31
Модели ограниченного роста	49
Конец ознакомительного фрагмента.	64

Вацлав Сми́л
От микроорганизмов до мегаполисов.
Поиск компромисса между
прогрессом и будущим планеты

Growth: From Microorganisms to Megacities by Vaclav Smil

© 2019 Massachusetts Institute of Technology

© Окунькова И. А., перевод на русский язык, 2020

© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2023

* * *

Предисловие

Рост является повсеместной многообразной реальностью нашей жизни – маркером эволюции, увеличения размера и способностей нашего организма с взрослением, накопления коллективных возможностей для эксплуатации земных ресурсов и организации общества для повышения качества жизни. Рост оставался и невысказанной, подразумеваемой – и явной – целью, индивидуальным и коллективным стремлением на протяжении всей эволюции человека и его короткой документированной истории. Он управляет жизнью микроорганизмов и галактик. Рост определяет размер океанической коры и использование всех артефактов, созданных для улучшения нашей жизни, а также степень ущерба, наносимого нашему организму аномально развивающимися клетками. Рост формирует возможности нашего необычайно объемного мозга, а также состояние экономики. Благодаря повсеместному распространению, рост можно изучать на самых различных уровнях – от внутриклеточного и клеточного (с целью выявления метаболических и регуляторных потребностей и процессов) до составления долгосрочных траекторий развития таких комплексных систем, как тектонические сдвиги, демография на национальном и глобальном уровне, города, экономики или империи.

Терраформирующий рост – геотектонические силы, создающие океаническую и континентальную кору, вулканы и горные хребты и формирующие водоразделы, равнины и береговые линии, – происходит очень медленно. Его основная функция, формирование новой океанической коры в срединно-океанических хребтах, реализуется со скоростью менее 55 мм в год, а скорость исключительно быстрого создания морского дна может достигать около 20 см в год (Schwartz et al., 2005). Что касается годового прироста континентальной коры, по расчетам Реймера и Шуберта (Reymer and Schubert, 1984), объем ее увеличения составляет $1,65 \text{ км}^3$ и с учетом объема субдукции (когда старая кора превращается в мантию) $0,59 \text{ км}^3$ дает чистый показатель прироста $1,06 \text{ км}^3$ в год.

Это мизерный годовой прирост, если учитывать, что континенты покрывают почти 150 Гм^2 и толщина континентальной коры составляет в основном 35–40 км, но он продолжается весь фанерозойский эон, то есть последние 542 млн лет.

И еще один пример, на этот раз вертикальный, неизбежно низких тектонических скоростей: подъем Гималаев, самого внушительного горного хребта нашей планеты составляет около 10 мм в год (Burchfiel and Wang, 2008; рис. 0.1). Тектонический рост коренным образом определяет рамки изменения климата Земли (так как влияет на циркуляцию воздуха в атмосфере всей планеты и распределение давления) и продуктивность экосистем (так как влияет на температуру и выпадение осадков) и, следовательно, жизнедеятельность человека и экономическую активность. Но мы никак не можем повлиять на его сроки, место и скорость или напрямую использовать с выгодой для себя, поэтому не будем уделять ему внимания в этой книге.

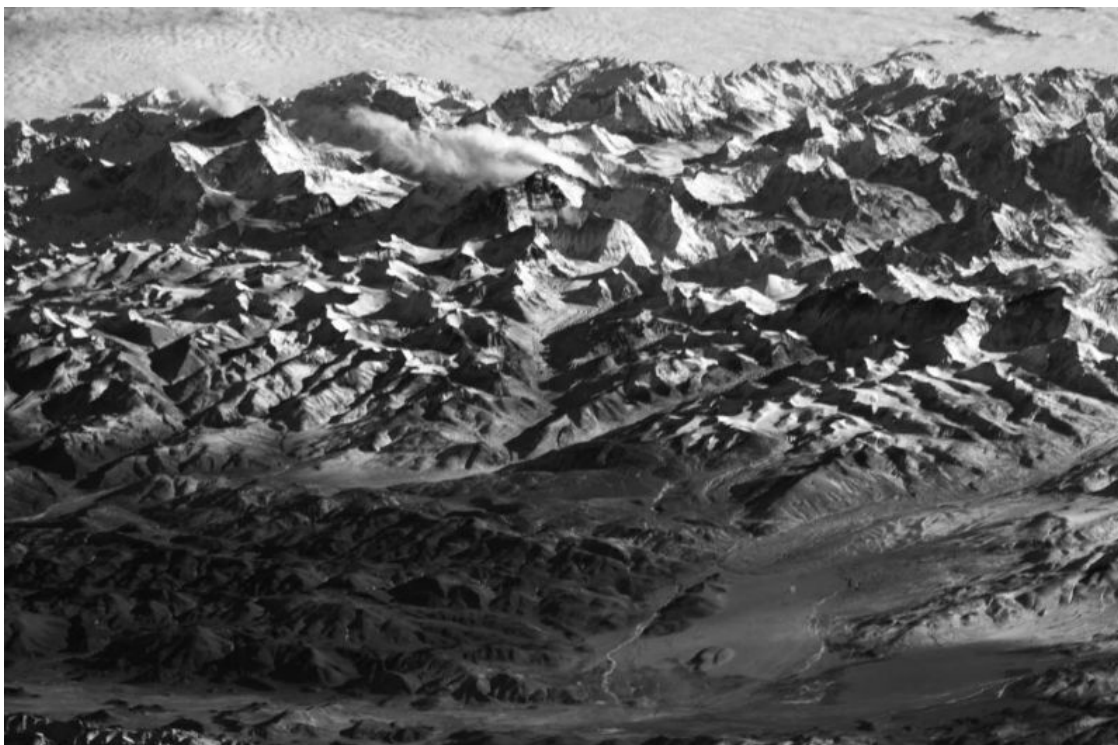


Рис. 0.1. Медленный, но упорный тектонический рост. Гималаи образовались в результате столкновения Индийской и Евразийской плит, которое началось более 50 млн лет назад и по-прежнему продолжается, благодаря чему этот горный хребет растет на 1 см в год. Фотография сделана с Международной космической станции (в южном направлении из нижней части Тибетского нагорья) в январе 2004 года. Снимок доступен на https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_152.html

Рост организмов, квинтэссенция проявления жизни, включает все процессы, посредством которых все элементы и соединения со временем трансформируются в новую живую массу (биомассу). Эволюция человека экзистенциально зависит от этого естественного роста: сначала он добывал пищу собирательством и охотой, затем стал добывать топливо и сырье и, наконец, пользоваться выращенной пищей и продукцией пищевых производств, а также в больших масштабах эксплуатировать лесную фитомассу и вылавливать рыбу и другие морепродукты. Рост вмешательства человека в биосферу вызвал крупномасштабную трансформацию многих экосистем – прежде всего превращение лесов и заболоченных земель в пахотные угодья и активное использование лугов под пастбища (Smil, 2013a).

Рост также является признаком прогресса и воплощением надежды в делах человека. Рост технических возможностей позволил освоить новые источники энергии, повысить уровень и надежность обеспечения продуктами питания, создать новые материалы и новые отрасли промышленности. Экономический рост приносит ощутимые материальные выгоды с накоплением частного имущества, обогащая нашу краткую жизнь, и создает нематериальные ценности: радость достижений и чувство удовлетворенности. Но рост также сопровождается тревогой, волнениями и страхами. Люди – будь то дети, отмечающие, насколько они выросли, на дверном косяке, бесчисленные главные экономисты, готовящие сомнительные прогнозы объемов производства и торговых показателей, или рентгенологи, изучающие магнитно-резонансные снимки, – волнуются о нем по огромному количеству поводов.

Рост часто кажется слишком медленным или слишком быстрым. Он вызывает беспокойство о пределах адаптации, страх перед личными и общественными неурядицами. В ответ люди пытаются управлять ростом, который могут контролировать, меняя его темп (ускорять, сдер-

живать или прекращать), и мечтают – и стараются – расширить контроль и распространить его на новые области. Эти попытки часто проваливаются, даже если сначала кажутся успешными (а ощущение перманентного контроля может оказаться лишь временным успехом), но никогда не кончаются: мы можем наблюдать их как в микро-, так и в макромире, когда ученые пытаются изучать новые формы жизни, расширяя генетический код и включая синтетическую ДНК в новые организмы (Malyshev et al., 2014) или предлагая контролировать климат Земли с помощью геоинжиниринга (Keith, 2013).

Рост организмов является результатом длительного эволюционного процесса, и современная наука добилась понимания его предпосылок, путей и результатов и выявила его траектории, более или менее соответствующие конкретным функциям, преимущественно S-образным (сигмоидальным) кривым. Поиск общих черт и полезные обобщения, касающиеся естественного роста, – сложная задача, но его количественное выражение выглядит относительно просто, как и оценка роста множества созданных человеком артефактов (инструментов, машин, производственных систем) путем отслеживания увеличения их мощности, производительности, эффективности или сложности. Во всех этих случаях мы имеем дело с базовыми физическими единицами измерения (длиной, массой, временем, силой тока, температурой, количеством вещества, силой света) и их многочисленными производными, от объема и скорости до энергии и силы.

Измерение феноменов роста, связанных с суждениями, ожиданиями и мирным или насильственным взаимодействием людей, представляется более проблематичным. Некоторые сложные совокупные процессы невозможно измерить, если предварительно произвольно не ограничить область исследования и не прибегнуть к более или менее сомнительным концепциям: измерение экономического роста с помощью таких переменных, как ВВП или национальный доход, является прекрасным примером подобных сложностей и неопределенностей. Но даже когда многие признаки так называемого социального роста (или общественного прогресса) легко поддаются измерению (здесь можно привести множество разнообразных примеров от среднего размера жилплощади на семью и владения бытовой техникой до разрушительной силы запасов ракетного оружия и общей площади территорий, контролируемых силами империи), их истинные траектории развития по-прежнему открыты для разнообразных интерпретаций, поскольку эти количественные представления скрывают значительные качественные отличия.

Накопление материального имущества является особенно интересным аспектом роста, так как проистекает из сочетания похвального стремления повысить качество жизни, понятного, но менее рационального желания позиционировать себя в более широкой социальной среде и сравнительно атавистического импульса владеть, даже накапливать запасы. Есть и те, кто безразличен к росту и потребностям: индийские *садху*, носящие набедренные повязки или ходящие обнаженными, и монахи, принадлежащие к сектам, призывающим к аскетичной простоте. На другой стороне спектра мы видим страстных коллекционеров (каким бы изысканным ни был их вкус) и страдающих психическим расстройством собирателей хлама, превращающих свое жилище в подобие свалки. Но между этими полюсами в любом обществе с растущими стандартами жизни мы наблюдаем менее драматичные повседневные склонности, так как большинство людей хотят сильнее ощущать рост, материальный или неосознанный, подпадающий под иллюзорное определение удовлетворенности жизнью или личного счастья, которое достигается путем накопления богатств или получения уникального жизненного опыта.

Скорость и размах этих стремлений ясно дают понять, насколько современным является этот повсеместный опыт и насколько оправдано растущее беспокойство в связи с ростом. Удвоение средних размеров стало распространенным явлением в течение жизни одного поколения: с 1950 года средняя площадь американских домов выросла в 2,5 раза (USBC, 1975; USCB, 2013), с 1970 года удвоился объем винных бокалов в Великобритании (Zupan et al., 2017), к

2002 году масса типичных европейских автомобилей выросла более чем вдвое по сравнению с послевоенными моделями (Citroen 2 CV, Fiat Topolino) – с менее 600 кг до приблизительно 1200 кг (Smil, 2014b). Многие артефакты и достижения испытали еще более значительный рост за тот же период: типичная площадь телевизионных экранов выросла приблизительно в 15 раз с послевоенных стандартов диагонали 30 см до среднего для США показателя 120 см к 2015 году, причем доля продаж телевизоров с диагональю, превышающей 150 см, продолжает расти. И даже этот впечатляющий рост выглядит ничтожным по сравнению с ростом крупнейших индивидуальных состояний: в 2017 году в мире насчитывалось 2043 миллиардера (Forbes, 2017). Сравнительное влияние этих феноменов не является беспрецедентным, но сочетания абсолютной диспропорции, возникающей в результате современного роста, и ее частоты и скорости прежде не наблюдалось.

Темпы роста

Разумеется, отдельные люди и общества всегда окружены бесчисленными проявлениями естественного роста, и стремление к материальному обогащению и расширению территорий служило движущей силой общественных процессов на совершенно разных уровнях, от племен до империй, от набегов на соседние деревни в джунглях Амазонки до подчинения крупных частей Евразии централизованной власти. Но в период Античности, Средневековья и значительной части раннего Нового времени (обычно ограниченного тремя веками между 1500 и 1800 годами), большинство людей вело натуральное крестьянское хозяйство, продукты которого давали ограниченные и нестабильные излишки, достаточные для поддержания лишь сравнительно небольшого числа лучше обеспеченных обитателей (семьи ремесленников и торговцев) в основном небольших городов и представителей светской и религиозной правящей элиты.

Ежегодные урожаи в том простом обществе периода, предшествующего Новому времени, и начала Нового времени практически не демонстрировали признаков заметного роста. Аналогично почти все фундаментальные переменные эпохи домодерна – общее население, размер городов, продолжительность жизни и грамотность, поголовье скота, домашнее имущество и производительность используемых машин – росли настолько медленно, что их прогресс был очевиден только на очень длительных отрезках времени. И часто они или находились в состоянии полного застоя, или хаотично колебались вокруг удручающих средних значений, переживая длинные периоды частых регрессий. Для многих из этих феноменов у нас имеются доказательства в виде сохранившихся артефактов и жизнеописаний, и некоторые события мы можем восстановить с помощью фрагментарных записей, охватывающих века.

Например, в Древнем Египте понадобилось более 2500 лет (со времен строительства великих пирамид до постримской эры) на то, чтобы население, способное прокормиться с 1 гектара сельскохозяйственных земель, выросло вдвое (Butzer, 1976). Очевидная причина заключалась в отсутствии роста урожаев, и эта реальность сохранялась до конца Средневековья: начиная с XIV века для повышения урожайности среднестатистического английского пшеничного поля вдвое требовалось более 400 лет, причем в первые 200 лет урожаи были крайне бедными (Stanhill, 1976; Clark, 1991). Технический прогресс также шел очень медленно. В доиндустриальных цивилизациях самыми мощными механическими источниками энергии были водяные колеса, но на то, чтобы повысить их мощность в десять раз, с 2 до 20 квт, понадобилось около 17 веков (со II века нашей эры до конца XVIII века) (Smil, 2017a). Отсутствие роста урожаев или в лучшем случае слабый их рост вкупе с медленным развитием производственных и транспортных возможностей ограничивали рост городов: с 1300 года на то, чтобы население Парижа выросло вдвое и составило 400 000 человек, ушло более трех веков, но в конце XIX века население Парижа удвоилось всего за 30 лет (1856–1886) и составило 2,3 млн человек (Atlas Historique de Paris, 2016).

Многие реалии сохранялись тысячелетиями: максимальное расстояние, покрываемое конными гонцами (самый быстрый способ сообщения на больших расстояниях по суше до появления железных дорог), было оптимизировано еще в Древней Персии царем Киром, когда он связал города Сузы и Сарды после 550 года до н. э., и оно оставалось неизменным в течение следующих 2400 лет (Minetti, 2003). Средняя скорость сменных лошадей (13–16 км/ч) и расстояние, преодолеваемое одной лошастью (18–25 км в день), оставались практически постоянными. В категорию застойных попадают многие другие показатели, включая владение хозяйственными предметами в бедных семьях и уровень грамотности среди сельского населения. Эти переменные начали заметно меняться также только во второй половине раннего Нового времени.

Когда в XIX веке множество технических и социальных изменений – рост сетей железных дорог, расширение маршрутов паровозов, увеличение выпуска стали, изобретение и применение двигателей внутреннего сгорания и электричества, быстрая урбанизация, улучшение санитарных условий, растущая средняя продолжительность жизни – начало происходить с беспрецедентной скоростью, их развитие вызвало ожидания дальнейшего неуклонного роста (Smil, 2005). И эти надежды оправдывали себя (несмотря на задержки, вызванные двумя мировыми войнами, другими конфликтами и периодическими экономическими спадами), по мере того как возможности отдельных машин, сложных промышленных процессов и экономика в целом продолжали расти в течение XX века. Этот рост выливался в улучшение физических показателей (увеличение роста людей, более высокая средняя продолжительность жизни), повышение материальной обеспеченности и комфорта (измеряемых в реальных доходах или владении устройствами, облегчающими труд) и беспрецедентное развитие коммуникаций и мобильности (Smil, 2006b).

Ничто не отражает эту реальность и надежду последних десятилетий так заметно, как рост числа транзисторов и других компонентов, которые мы можем поместить на кремниевую пластину. Этот рост, как широко известно, подтверждает закон Мура, согласно которому число элементов интегральной схемы примерно удваивается каждые два года: в результате самые мощные интегральные схемы, произведенные в 2018 году, имели более 23 млрд компонентов, на семь порядков (приблизительно в 10,2 млн раз, если быть точнее) больше, чем первое подобное устройство (Intel 4004, 4-битный процессор для японского калькулятора, имевший 2300 компонентов), разработанное в 1971 году (Moore, 1965; 1975; Intel, 2018; Graphcore, 2018). Как и во всех случаях экспоненциального роста (см. главу 1), в линейной системе координат эти показатели прироста отображаются в виде резко восходящей кривой, в то время как в полулוגарифмической они отображаются в виде прямой линии (рис. 0.2).

Такой прогресс привел к практически неограниченным ожиданиям еще больших успехов, и недавнее быстрое распространение разнообразных электронных устройств (и используемых ими приложений) особенно зачаровывает апологетов ускоренного роста, которые везде находят его признаки. Приведу лишь один из недавних ярких примеров. В отчете, подготовленном Оксфордской школой Мартина и опубликованном Citi, указаны следующие промежутки времени, которые понадобились, чтобы охватить 50 млн пользователей: телефон – 75 лет, радио – 38 лет, телевидение – 13 лет, интернет – 4 года и игра-приложение Angry Birds – 35 дней (Frey and Osborne, 2015). Эти заявления приписывают Citi Digital Strategy Team, но команда плохо подготовилась и проигнорировала здравый смысл.

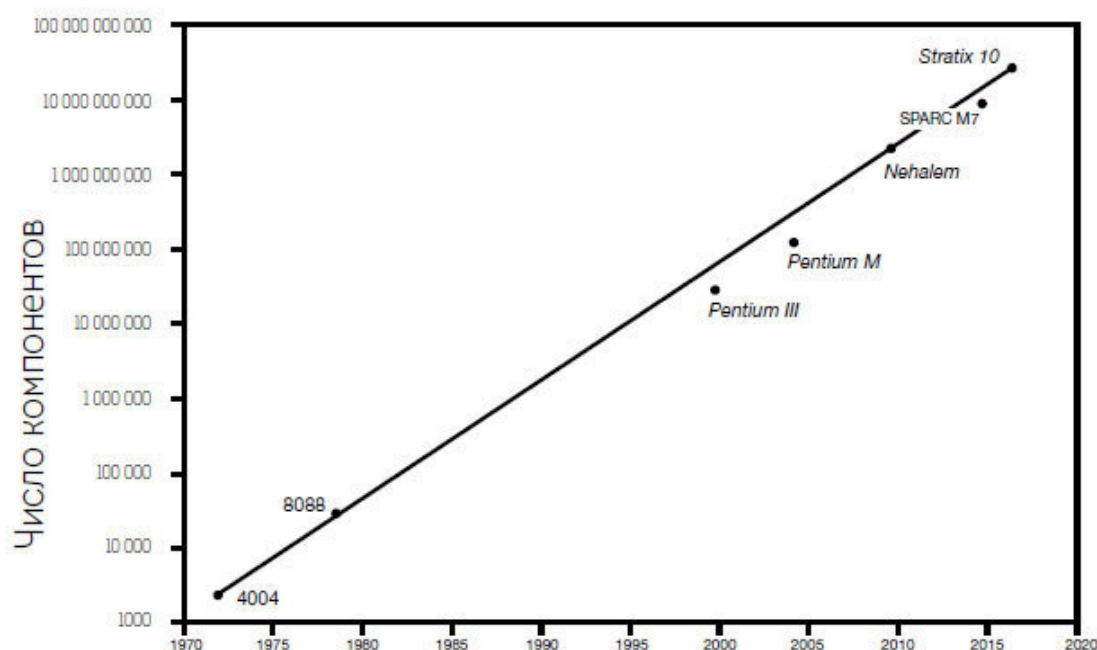


Рис. 0.2. Ключевой маркер современного роста: закон Мура, 1971–2018. График с полулогарифмическими координатами демонстрирует устойчивый экспоненциальный рост с 10^3 до 10^{10} компонентов на микросхему (Smil, 2017a; IBM, 2018b)

Эти цифры относятся к распространению по миру или по США? В отчете об этом не говорится, но 50 млн явно относится к США, где это число телефонов было достигнуто в 1953 году (1878 год + 75 лет). Но число телефонных номеров не равно числу абонентов, которое, учитывая средний размер семьи и распространение телефонов на работе, должно быть значительно выше. Началом телевизионного вещания можно считать несколько дат: вещание и продажа первых телевизоров в США начались в 1928 году, но 13 лет спустя, в 1941 году, в собственности по-прежнему находилось минимальное количество телевизоров, и их общее число (еще раз: аппаратов, а не пользователей) достигло 50 млн только в 1963 году. Та же ошибка повторяется с интернетом, доступ к которому миллионы пользователей имели в университетах, школах и на работе, прежде чем провели его домой. Кроме того, что считать «годом возникновения» интернета?

Все это лишь небрежный сбор данных в погоне за сенсацией, но, что еще важнее — непростительная категориальная ошибка: сравнение сложной системы, опирающейся на новую обширную инфраструктуру, с развлекательным программным обеспечением¹. В конце XIX века телефония была передовой системой прямых личных коммуникаций, реализация которой потребовала первой крупномасштабной электрификации общества (от добычи топлива до генерации тепловой энергии и передачи сигнала, причем значительные части американской глубинки не имели хорошей связи даже в 1920-е годы), прокладки телефонных сетей и продажи (изначально отдельных) аппаратов и трубок.

В отличие от телефонии Angry Birds или любое другое несерьезное приложение может распространяться вирусно, так как мы потратили больше века на установку последовательных компонентов физической системы, сделавшей возможным подобное распространение: ее рост начался в 1880-х годах с выработки электроэнергии и передачи сигнала и достиг кульминации в 2000-х, когда началась волна разработки и производства миллиардов мобильных теле-

¹ Иными словами, попытка сравнения несопоставимых величин, одна из которых (приложение Angry Birds) еще и находится в нелинейной зависимости от другой (интернет). — Прим. ред.

фонов и установки плотной сети вышек сотовой связи. А с учетом одновременного повышения надежности работы этой сети любые темпы распространения контента по ней становятся не такими уж и примечательными. Эту ошибку сравнения можно проиллюстрировать массой аналогий. Например, вместо телефонов можно взять распространение микроволновых печей, а вместо приложения – массовое производство попкорна для приготовления в микроволновых печах: очевидно, что скорость распространения самого популярного бренда попкорна будет быстрее, чем скорость приобретения микроволновых печей. США понадобилось около 30 лет, чтобы настольные микроволновые печи, впервые представленные в 1967 году, появились в 90 % домохозяйств.

Рост информации кажется не менее впечатляющим, хотя ее накопление – вовсе не новость. Экспоненциальный рост в книгоиздании начался с изобретения наборного шрифта (в 1450 году), и количество книг в XVIII веке достигло приблизительно 1 млн томов по сравнению с примерно 200 000 томов в XVI веке. Сегодня в среднем каждый год выходят более 2 млн книг (лидерами являются Китай, США и Великобритания) (UNESCO, 2018). Добавьте сюда графическую информацию, рост которой стал возможен сначала с помощью литографии, затем – ротогравюры, а сегодня она преимущественно распространяется с помощью электронных дисплеев мобильных устройств. Звукозапись началась с хрупкого фонографа Эдисона в 1878 году (Smil, 2018a; рис. 0.3), а сегодня миллиардам пользователей мобильных телефонов легко доступен огромный выбор звуковых файлов. Но объем изображений, постоянно собираемых целыми флотилиями разведывательных, метеорологических спутников и спутников наблюдения Земли, превосходит поток информации во всех этих категориях. Неудивительно, что совокупный рост информации напоминает гиперболическую кривую развития, характерную для глобального роста населения до 1960 года.



Рис. 0.3. Томас Эдисон со своим фонографом на фотографии Мэтью Брэди, сделанной в апреле 1878 года. Фотография из коллекции Брэди-Хэнди Библиотеки Конгресса США

Недавно появилась возможность сказать, что 90 % или более всей дошедшей до нашего времени информации было создано за предыдущие два года. Компания Seagate в 2005 году оценила объем всей информации, созданной в мире, в 0,1 зеттабайта (10^{21} Зб), в 2010 году – в 2 Зб, в 2016 году – 16,1 Зб и прогнозировала, что к 2025 году годовой объем информации составит 163 Зб (Seagate, 2017). Год спустя компания подняла предварительную оценку глобальной информационной сферы к 2025 году до 175 Зб и заявила, что рост общего объема будет продолжать ускоряться (Reinsel et al., 2018). Но если принять во внимание ключевые компоненты этого потока новых данных, то заявления об ускорении не производят особого

впечатления. Приток новых, высокоцентрализованных данных включает постоянное движение электронных денег и инвестиций между крупными банками и инвестиционными компаниями, а также широкомасштабный мониторинг телефонных и интернет-коммуникаций правительственными ведомствами.

В то же время миллиарды пользователей мобильных телефонов, общающихся в социальных сетях, добровольно отказываются от неприкосновенности частной жизни, позволяя шпионским программам невозбранно следить за их сообщениями и переходами по ссылкам, анализировать индивидуальные предпочтения и слабости, которые они демонстрируют, сравнивать их с другими людьми и упаковывать их для продажи рекламодателям, желающим всучить им ненужный хлам – и сохранить в неприкосновенности экономический рост. И, конечно, потоки данных постоянно создаются людьми, носящими мобильные телефоны с включенной функцией GPS. Добавьте сюда поток бессодержательных изображений, включая несметное число селфи и видео с котиками (даже фото очень «байтоёмки»: фотография, сделанная на смартфон, обычно занимает 2–3 МБ, что в два-три раза больше, чем текст этой книги), – и беспрецедентный рост «информации» начинает вызывать скорее сожаление, чем восхищение.

И вот одно из наиболее важных нежелательных последствий этого информационного потока: время, потраченное взрослым пользователем на цифровые медиа в день, удвоилось в период между 2008 и 2015 годами и составило 5,5 часа (eMarketer, 2017), создав новую форму жизни – экранных зомби. Но быстрое распространение электроники и программного обеспечения – мелочи по сравнению с ожидаемыми в конце концов достижениями ускоренного роста, и никто не выразил их эмоциональнее Рэя Курцвейла, с 2012 года занимающего должность технического директора в Google и задолго до того изобретшего такие электронные устройства, как планшетный сканер с ПЗС-сенсорами, первый коммерческий синтезатор речи из текстовой информации и первую универсальную систему оптического распознавания текста.

В 2001 году он сформулировал свой Закон ускорения отдачи (Kurzweil, 2001, 1):

Анализ истории технологий показывает, что технологические изменения носят экспоненциальный характер, что противоречит здравому «интуитивно линейному» взгляду. В XXI веке мы пройдем не через 100 лет прогресса – скорее это будет 20 000 лет прогресса (если мерять сегодняшними темпами). «Отдача», такая как скорость работы и рентабельность интегральных схем, также растет экспоненциально. Даже экспоненциальный рост растет по экспоненте. В течение нескольких десятилетий машинный интеллект превзойдет человеческий, приведя к Сингулярности – настолько быстрым и глубоким технологическим изменениям, что они разорвут саму ткань истории человечества. Возможные последствия включают слияние биологического и небиологического интеллекта, появление бессмертных киборгов и сверхвысокие уровни интеллекта, расширяющиеся во вселенную со скоростью света.

В 2005 году Курцвейл опубликовал книгу *The Singularity Is Near* («Сингулярность близко») – она должна наступить ровно в 2045 году, – и с тех пор он продвигает эти взгляды на своем веб-сайте, *Kurzweil Accelerating Intelligence* (Kurzweil, 2005, 2017). В категоричных, громких заявлениях Курцвейла нет ни сомнений, ни неуверенности, ни скромности, так как, по его мнению, состояние биосферы, чье функционирование является результатом миллиардов лет эволюции, не играет роли в нашем будущем, которое будет полностью формироваться машинным интеллектом, превосходящим человеческий. Но как бы ни отличалась наша цивилизация от предыдущих, она действует в рамках тех же ограничений: она является всего лишь частью биосферы, той относительно тонкой и одновременно очень прочной и очень хрупкой оболочки, внутри которой могут существовать живые существа на углеродной основе

(Vernadsky, 1929; Smil, 2002). Их рост, а для высших организмов также когнитивное и поведенческое развитие фундаментально и неизбежно ограничены физическими условиями биосферы и пределами диапазона метаболических возможностей (каким бы широким тот ни казался при сравнении крайних его точек).

Исследования роста

Даже если ограничиться нашей планетой, масштаб исследований роста – от мельчайших клеток до цивилизации в целом, предположительно стремящейся к сингулярности, – слишком широк, чтобы всесторонне осветить их в одной книге. Неудивительно, что опубликованные обзоры процессов роста и их результатов ограничиваются ключевыми дисциплинами или темами. Классическая работа Дарси Томпсона на тему роста «О росте и форме» (оригинальное издание которой вышло в 1917 году, а исправленное и расширенное – в 1942 году) касается почти исключительно клеток и тканей, а также множества частей (скелеты, раковины, рога, зубы, бивни) организмов животных (Thompson, 1917; 1942). Единственный раз, когда Томпсон упоминает небиогенные материалы или созданные человеком структуры (металлы, балки, мосты), – когда рассматривает формы и механические свойства таких сильных биогенных тканей, как минерализованные ткани раковин моллюсков и костей.

Содержание работы «Химическая основа роста и старения» Т. Б. Робертсона, опубликованной в 1923 году, ограничено ее названием (Robertson, 1923). В 1945 году на свет появился еще один объемный обзор роста организмов, «Биоэнергетика и рост» Самюэля Броди, посвященный конкретно эффективному разведению домашних животных (Brody 1945). В 1994 году Роберт Бэнкс опубликовал подробное исследование под названием «Феномены роста и распространения». В этой прекрасной работе, являющейся образцом системного подхода, содержатся многочисленные примеры конкретного применения индивидуальных траекторий роста и моделей распространения в естественных и социальных науках, а также инжиниринге. Но ее основная тема отражена в подзаголовке («Математические модели и их применение») и связана преимущественно с математическими структурами и применением математических методов при описании моделей роста (Banks, 1994).

Подзаголовок работы, отдающей дань уважения Томпсону (с одноименным названием «О росте и форме»), также определяет границы исследования: «Пространственно-временная модель формирования структур в биологии» (Chaplain et al., 1999). При всем разнообразии ее глав (включая образование рисунка на крыльях бабочки, модели развития рака, формирование кожи и волос, а также модели роста сети капилляров и заживления ран) эта книга также была посвящена росту живых форм. В 2017 году Джеффри Уэст обобщил свои многолетние исследования, сформулировав универсальные законы роста – не только организмов, но и городов, экономики и компаний – в книге, озаглавленной «Масштаб», в длинном подзаголовке которой перечислены все рассматриваемые в ней темы и цель которой заключалась в том, чтобы рассмотреть общие тенденции и даже предложить единую теорию устойчивого роста (West, 2017).

Компонентам органического роста, функциональным или таксономическим, уделяется много внимания: всестороннее рассмотрение получил клеточный рост (Studzinski, 2000; Morgan, 2007; Verbelen and Vissenberg, 2007; Golitsin and Krylov, 2010), рост растений (Morrison and Morecroft, 2006; Vaganov et al., 2006; Burkhardt and Tomé, 2012; Gregory and Nortcliff, 2013) и животных (Batt, 1980; Champion et al., 1989; Gerrard and Grant, 2007; Parks, 2011). Вполне ожидаемо, что огромный объем знаний накоплен на тему роста человека (Ulijaszek et al., 1998; Bogin, 1999; Hoppa and Fitzgerald, 1999; Roche and Sun, 2003; Hauspie et al., 2004; Tanner, 2010; Floud et al., 2011; Fogel, 2012).

Особого внимания заслуживает тема здорового роста и питания детей и такие ее аспекты, как антропометрия и диетология, педиатрия, психология и здравоохранение (Martorell and

Haschke, 2001; Hochberg, 2011; Hassan, 2017). Мальтус (Malthus, 1798) и Ферхюльст (Verhulst, 1845, 1847) опубликовали первые исследования природы роста населения, и эти оценки упоминаются многочисленными авторами, от Перла и Рида (Pearl and Reed, 1920) и Карра-Сондерса (Carr-Saunders, 1936) до Медоуза и др. (Meadows et al., 1972), Кейфица и Флигера (Keyfitz and Flieger, 1991), Хардина (Hardin, 1992), Коэна (Cohen, 1995), Стэнтон (Stanton, 2003), Луца и др. (Lutz et al., 2004), а также в многочисленных обзорах и прогнозах, публикуемых ООН.

Современная экономика поглощена показателями объема выпускаемой продукции, прибыли, инвестиций и роста потребления. Следовательно, нет недостатка в исследованиях, рассматривающих одновременно экономический рост и доходы (Kuznets, 1955; Zhang, 2006; Piketty, 2014), рост и технические инновации (Ruttan, 2000; Mokyr, 2002; 2009; 2017; van Geenhuizen et al. 2009), рост и международную торговлю (Rodriguez and Rodrik, 2000; Busse and Königer, 2012; European Commission, 2014) и рост и здравоохранение (Bloom and Canning, 2008; Barro, 2013). Многие последние исследования посвящены связям между ростом и коррупцией (Mo, 2001; Méndez and Sepúlveda, 2006; Bai et al., 2014) и ростом и управлением (Kurtz and Schrank, 2007; OECD, 2016).

В публикациях также раздаются советы о том, как сделать весь экономический рост устойчивым (WCED, 1987; Schmandt and Ward, 2000; Daly and Farley, 2010; Enders and Remig, 2014) и «равным» (то есть соразмерным и справедливым) (Mehrotra and Delamonica, 2007; Lavoie and Stockhammer, 2013). Как уже отмечалось, давно сформулированный закон Мура посвящен исключительно росту вычислительных возможностей, но почему-то совсем нет книг, описывающих исследования роста современных технических и инженерных систем; посвященных, например, долгосрочному анализу мощностей и роста производительности добывающей и энергетической отраслей. И даже с учетом научных статей найдется лишь немного публикаций, относящихся к росту государств, империй и цивилизаций (Taagepera, 1978; 1979; Turchin, 2009; Marchetti and Ausubel, 2012).

Что есть (и чего нет) в этой книге

Невозможность всестороннего описания роста в природе и обществе не должна быть отговоркой для малого числа исследований способов роста. Я намерен исправить это упущение, изучив множество форм природного, социального и технического роста. Чтобы охватить такой большой спектр вопросов, книга должна быть ограничена как масштабом, так и глубиной исследований. Я сосредоточусь на жизни на Земле и достижениях человеческого общества. В рамках этой задачи мы пройдем путь от бактериальной инвазии и вирусных инфекций через лес и обмен веществ у животных к росту преобразования энергии и мегагородов, а также основам глобальной экономики, исключив самые крупные и мелкие по масштабу явления.

Мы обойдем вниманием рост (инфляционное расширение) вселенной, галактик, сверхновых или звезд. Я уже говорил о медленном темпе терраформирующих процессов, подчиняющемся образованию новой океанической коры, колеблющемся между менее чем 2 см и не более чем 20 см в год. И хотя некоторые кратковременные и пространственно ограниченные стихийные бедствия (извержения вулканов, массовые оползни, цунами, масштабные наводнения) могут вести к быстрым и значительным переносам масс и энергии за короткие периоды времени, постоянная геоморфологическая деятельность (эрозия и ее противоположность, отложение, осадка) происходит медленно или значительно медленнее геотектонических процессов: скорость эрозии в Гималаях может достигать 1 см в год, но процесс смыва Британских островов происходит со скоростью 2–10 см за 1000 лет (Smil, 2008). Мы не будем более подробно рассматривать в этой книге терраформирующий рост.

И поскольку основное внимание в книге посвящено росту организмов, артефактов и комплексных систем, в ней не будет идти речь о росте на внутриклеточном уровне. Невероятная

интенсификация исследований в области биологии помогла нам значительно продвинуться в понимании клеточного роста в целом и в частности роста раковых клеток. Мультидисциплинарный характер, растущий охват и ускоряющийся темп этих исследований означают, что о новых открытиях теперь все чаще сообщают в электронных публикациях, а рецензии и обзоры, написанные на эти темы, устаревают практически мгновенно. Однако в последних книгах за авторством Масиейры-Коэльо (Macieira-Coelho, 2005), Гевирца и др. (Gewirtz et al., 2007), Кимуры (Kimura, 2008) и Крайкивски (Kraikivski, 2013) предлагаются обзоры нормального и аномального роста и гибели клеток.

Соответственно, в этой книге не будет фундаментальным образом рассматриваться генетика, эпигенетика и биохимия роста, и я коснусь клеточного роста только при описании траекторий роста одноклеточных организмов и жизни скоплений микроорганизмов, чье присутствие составляет значительные и даже преобладающие доли биомассы в некоторых экосистемах. Аналогично, говоря о растениях, животных и людях, я собираюсь заострить внимание не на биохимической специфике и сложностях роста на внутриклеточном, клеточном уровне и уровне органов – существуют интереснейшие исследования развития мозга (Brazier, 1975; Kretschmann, 1986; Schneider, 2014; Lagercrantz, 2016) или сердца (Rosenthal and Harvey, 2010; Bruneau, 2012), – а на организмах в целом, включая экологический фон и результаты роста, и я также отмечу некоторые ключевые факторы окружающей среды (от питательных микроэлементов до инфекций), часто ограничивающие рост организмов или препятствующие ему.

Физический рост человека будет рассмотрен довольно подробно с акцентом как на индивидуальные (и зависящие от пола) траектории увеличения роста и веса (а также нежелательный рост ожирения), так и на коллективный рост населения. Я представлю исторические взгляды на рост населения, оценю текущие тенденции роста и изучу возможные будущие глобальные или некоторые национальные траектории. Но я не стану касаться социально-психологического роста (стадий развития, личности, стремлений, самоактуализации) или роста сознания: эти темы подробно рассмотрены в психологической и социологической литературе.

Прежде чем перейти к систематическому исследованию роста в природе и обществе, я кратко представлю единицы измерения и варианты траекторий роста. Эти траектории включают беспорядочное движение, в котором трудно выявить общие тенденции (что часто наблюдается на рынке ценных бумаг), простой линейный рост (когда в песочных часах каждую секунду сыплется одинаковое количество песка), временно экспоненциальный рост (обычно демонстрируемый в таких разнообразных феноменах, как организмы на ранней стадии развития, наиболее интенсивные фазы внедрения технических инноваций и создание биржевых пузырей) и прирост, соответствующий разнообразным изолированным (ограниченным) кривым роста (как, например, размеры всех организмов), чью форму можно выразить с помощью математических функций.

Большинство процессов роста – будь то организмы, артефакты или комплексные системы – подчиняются S-образным (сигмоидальным) кривым роста, соответствующим логистической функции (или уравнению Ферхюльста) (Verhulst, 1838, 1845, 1847), предшествовавшей ей (Gompertz, 1825) или одной из их производных, чаще всего сформулированных Берталанффи (von Bertalanffy, 1938; 1957), Ричардсом (Richards, 1959), Блумбергом (Blumberg, 1968) и Тернером и др. (Turner et al., 1976). Но естественная изменчивость, а также неожиданные вмешательства часто ведут к значительным отклонениям от прогнозируемого курса. Вот почему начинающим исследователям роста лучше начинать с более или менее полного набора данных и посмотреть, какая из доступных функций роста наиболее точно описывает ее.

Если двигаться в обратном направлении – взять несколько первых точек на разворачивающейся траектории роста и использовать их для построения кривой стабильного роста, соответствующей конкретной выбранной функции роста, – то вероятность успеха велика, только если пытаться прогнозировать рост, который, скорее всего, будет происходить по известной,

многократно продемонстрированной модели, например многими видами хвойных деревьев или пресноводной рыбы. Но выбор случайной S-образной кривой в качестве прогностического фактора роста для организма, не принадлежащего к хорошо изученным группам, выглядит сомнительным, поскольку конкретная функция может оказаться не слишком точным (чувствительным) прогностическим инструментом для феноменов, рассматриваемых только на ранней стадии роста.

Структура и цели книги

Текст развивается в естественной, эволюционной последовательности, от природы к обществу, от простых, непосредственно наблюдаемых свойств роста (числа размножающихся клеток, диаметра деревьев, массы тел животных, развития человеческой фигуры) до более сложных единиц измерения, отмечающих развитие и прогресс общества и экономики (динамики населения, разрушительных сил, создания благосостояния). Но последовательность не может быть исключительно линейной, поскольку существует множество взаимосвязей, взаимозависимостей и обратные связи и эти реалии требуют возвращаться и искать обходные пути, повторяться, чтобы подчеркнуть связи, заметные с других (энергетической, демографической, экономической) точек зрения.

Я начну систематическое рассмотрение роста с организмов, которые в зрелом возрасте имеют размер от микробов (крошечные, если брать отдельные клетки, массивные, если рассматривать их совокупное присутствие в биосфере) до величественных хвойных деревьев и огромных китов. Я подробнее остановлюсь на росте некоторых болезнетворных бактерий, выращивании основных сельскохозяйственных культур и росте человека с детского до взрослого возраста. Затем мы исследуем рост в области преобразования энергии и рукотворных объектов, позволяющих производить продукты питания и заниматься всей прочей экономической деятельностью. Я также рассмотрю, как этот рост изменил многочисленные показатели, эффективность и надежность, так как эти достижения лежат в основе создания нашей цивилизации.

И, наконец, я сосредоточусь на росте комплексных систем. Я начну с роста населения и продолжу ростом городов – наиболее очевидного концентрированного проявления человеческого материала и социальных достижений – и экономики. В конце этих систематических исследований я выделю проблемы оценки траекторий роста империй и цивилизаций и закончу глобальным многообразием, характеризующимся своеобразным сплавом планетарных и локальных проблем, обеспеченной жизни и бедности, уверенных и неопределенных перспектив. Книга завершается размышлениями о том, что наступает после роста. Когда речь идет об организмах, результатом может быть или смерть, или увековечение видов в эволюционные периоды. Если говорить об обществе и экономике, результаты могут включать как упадок (постепенный или быстрый) и прекращение существования, так и примечательное возрождение. Траектория современной цивилизации, сталкивающаяся с противоречащими друг другу требованиями материального роста и ограничениями биосферы, остается неопределенной.

Моя задача – осветить разнообразные варианты роста с эволюционной и исторической точки зрения и, таким образом, оценить как достижения, так и ограничения роста в современной цивилизации. Для этого требуется количественный подход, так как истинного понимания можно достичь, только начертив реальные траектории роста, оценив распространенные и исключительные темпы роста и поместив полученные успехи и повысившиеся (часто – на несколько порядков!) результаты в подходящий (исторический и сравнительный) контекст. Биологи изучают рост многочисленных организмов, и я рассмотрю результаты этого роста для всевозможных видов от бактерий до птиц и от водорослей до основных сельскохозяйственных

культур. Дам я и подобный обзор легко доступных данных о человеческом росте с детства до зрелого возраста.

В отличие от исследований роста организмов, количественный анализ траекторий долгосрочного роста продуктов деятельности человека (от простых инструментов до сложных машин) и комплексных систем (от городов до цивилизаций) гораздо менее систематизирован и распространен. Простого обзора опубликованных моделей роста будет недостаточно, чтобы обеспечить всестороннюю трактовку этих категорий роста. Поэтому, чтобы найти самые подходящие модели для множества видов антропогенного роста, я собрал данные за максимальные периоды из лучших доступных источников и подверг их количественному анализу. Так я подготовил более 100 оригинальных графиков роста, и вместе они составляют, на мой взгляд, уникальную коллекцию. Учитывая схожесть моделей роста, этот процесс неизбежно будет повторяться, но для ясного понимания реалий (общих черт и исключений), ограничений и будущих возможностей в каждом случае надо системно представлять конкретные результаты.

Систематическая презентация траекторий роста является необходимым предварительным условием, но не конечной целью изучения роста. Поэтому я также объясняю обстоятельства и ограничения графического отображения роста, описываю эволюционные и исторические условия анализируемых явлений и предлагаю критические комментарии на тему последних тенденций и перспектив. Я также хочу предостеречь от упрощенного применения даже максимальных статистических соответствий для долгосрочных прогнозов, и цель этой книги состоит не в том, чтобы обеспечить расширенную платформу для прогнозирования роста в конкретных временных рамках. Тем не менее представленный анализ содержит ряд выводов, позволяющих реалистично оценить будущие события.

В этом смысле части этой книги вполне предсказуемы. Если урожаи кукурузы в течение ста лет демонстрировали только линейный рост, вряд ли в ближайшие десятилетия можно ожидать их экспоненциального роста. Если способность к росту цыплят-бройлеров поколениями превосходила показатели для всех других животных мясных пород, трудно будет доказать, что лучшим выбором для обеспечения белком миллиардов новых потребителей является свинина. Если мощность единицы оборудования, производительность (добыча или генерируемая мощность) и передача всех результатов преобразования энергии растут по логистической прогрессии, то у нас есть все основания заключить, что предстоящий переход от ископаемого топлива к возобновляемым источникам энергии будет не слишком быстрым. Если мировое население будет неумолимо урбанизироваться, его энергетические (в пище, топливе, электричестве) и материальные потребности будут формироваться, исходя из этих ограничивающих реалий, диктующих потребность в постоянных и надежных, массовых потоках, которые невозможно удовлетворить из местных или близлежащих источников.

Попросту говоря, в этой книге речь идет о реалиях, задающих рост всего в долгосрочной эволюционной и исторической перспективе и делающих это в строгом количественном выражении. Сначала идут задокументированные, исторически зафиксированные факты, затем осторожные выводы. Конечно, это отличается от множества недавних антиисторических прогнозов и заявлений, игнорирующих долгосрочные траектории роста (то есть необходимые энергетические и материальные потребности беспрецедентных процессов масштабирования) и цитирующих модные «подрывные» инновации, которые ускоренным образом изменяют мир. Можно привести множество подобных примеров, начиная с того, что весь мировой парк автомобилей (составляющий более 1 млрд единиц) станет электрическим к 2025 году, и заканчивая началом терраформирования Марса в 2022 году, от создания растений и животных с заданными свойствами (синтетическая биология), снимающего ограничения эволюции организмов, до предсказаний неминуемого господства искусственного интеллекта над нашей цивилизацией.

В этой книге вы не найдете подобных радикальных заявлений: я избегал их и старался делать только тщательно обоснованные обобщения. Это было принципиальным решением,

опирающимся на уважение к сложной и неуправляемой реальности (для которой характерны сбои и исключения из правил) и хорошо известный факт, что грандиозные предсказания часто оказываются неверными. Печально известные примеры, касающиеся роста, включают прогнозы безудержного увеличения мирового населения и беспрецедентного голода, который должен был случиться в последние десятилетия XX века; быстрого и повсеместного перехода мировой энергогенерации на недорогую ядерную энергию, а также в корне ошибочное убеждение, что темпы роста, лежащие в основе закона Мура (двукратное увеличение каждые два года), можно легко применить в других областях человеческой деятельности.

Книга должна работать в нескольких плоскостях. Основная цель – обеспечить всесторонний аналитический обзор траекторий роста в природе и обществе: в биосфере, где рост является результатом не просто эволюции, но, все чаще, результатом вмешательства человека, и в мире, созданном человеком, где рост был ключевым фактором в истории населения и экономики и в развитии технических возможностей. Учитывая размах, книгу можно читать выборочно, комбинируя отдельные части, выбирая живые организмы (растения, животные, людей или население) или результаты человеческого труда (инструменты, способы преобразования энергии или транспортные средства). И, несомненно, некоторых читателей больше заинтересуют условия, необходимые для роста: предпосылки, факторы, эволюционные и исторические обстоятельства роста в природе, населении, экономике и империях, – а не конкретные траектории роста.

Еще один вариант – сосредоточиться на противоположных масштабах роста. Книга содержит массу информации о росте отдельных организмов, инструментов, машин и инфраструктур, а также о росте наиболее обширных и сложных систем, завершаясь размышлениями о росте цивилизаций. В книге также суммируются универсальные уроки, касающиеся роста организмов, артефактов и комплексных систем, и ее можно рассматривать как анализ результатов эволюции в природе и как историю технического и социального развития, то есть оценку прогресса цивилизации (*развитие*, возможно, будет более удачным и нейтральным обозначением, чем прогресс).

Как всегда в своих книгах, я воздержусь от советов, но надеюсь, что, внимательно читая эту книгу, вы придете к ключевому выводу: пока не поздно, мы должны всерьез взяться за экзистенциальную (а также действительно революционную) задачу, стоящую перед современной цивилизацией: совместить будущий рост с сохранением единственной биосферы, которая у нас есть.

Глава 1

Траектории, или Распространенные модели роста

Слово «рост» требует определяющих его прилагательных. Наиболее распространенными являются (в алфавитном порядке) активный, арифметический, быстрый, взрывной, внезапный, вялый, геометрический, задержанный, здоровый, злокачественный, линейный, логистический, медленный, неожиданный, неравномерный, неутешительный, низкий, прерывистый, слабый, сдержанный, S-образный, стремительный, уверенный, умеренный, хаотичный, экспоненциальный, энергичный. В последнее время к ним добавились прилагательные «устойчивый» и «неустойчивый». Выражение «устойчивый рост», конечно, явный оксюморон, если говорить о действительно долгосрочном материальном росте (я не рассматриваю возможность миграции на другие планеты после истощения земных ресурсов), и весьма сомнительно, что мы можем постоянно повышать такие нематериальные факторы, как счастье или удовлетворенность. Большинство прилагательных, описывающих рост, касаются его скорости: часто нас волнует не рост как таковой, а его темп, слишком быстрый или слишком медленный.

Даже человек, не очень внимательно следящий за новостями, знает о постоянных тревогах разнообразных ведущих экономистов, составителей прогнозов и правительственных чиновников о том, удастся ли сохранить «энергичный» или «здоровый» рост валового внутреннего продукта (ВВП). Эти требования высоких темпов роста опираются на крайне упрощенные ожидания – ожидания бесконечного повторения прошлого опыта, как будто текущий рост ВВП никак не связан с будущими темпами его роста. Иначе выражаясь, экономисты рассчитывают на бесконечный и предпочтительно довольно быстрый, экспоненциальный рост.

Но они выбирают неподходящие метрики для сравнения результатов. Например, в первой половине 1950-х годов рост ВВП США в среднем составлял около 5 % в год, что приблизительно можно выразить как дополнительные \$3500 на душу населения (в размере около 160 млн человек) в течение пяти лет. С другой стороны «медленный» рост ВВП в период между 2011 и 2015 годами (в среднем 2 % в год) добавлял около \$4800 на душу населения (в размере около 317 млн человек) в течение пяти лет, или почти на 40 % больше, чем 60 лет назад (все цифры в современном денежном эквиваленте для устранения эффекта инфляции). Следовательно, в значениях среднего индивидуального роста благосостояния недавний рост 2 % превосходит более ранний, превышающий его в 2,5 раза. Это простая алгебра, но ее постоянно игнорируют те, кто сокрушается о «низком» росте экономики США или Европейского союза (ЕС) после 2000 года.

Результаты британского референдума 23 июня 2016 года, на котором решалось, оставаться в составе ЕС или выходить из него, являются еще одной прекрасной иллюстрацией того, что скорость изменений имеет большее значение, чем результаты. В 94 % районов, где в период с 2001 по 2014 год совокупность лиц иностранного происхождения увеличилась более чем на 200 %, люди голосовали за выход из Европейского союза, даже если доля мигрантов в этих районах осталась сравнительно низкой, в основном менее 20 %. С другой стороны, большинство районов, где совокупность лиц иностранного происхождения составляла более 30 %, проголосовали за сохранение членства в ЕС. Как заключил журнал *Economist*, «Британцев волнует не большое количество мигрантов, а высокие темпы перемен» (*Economist*, 2016).

Прочие прилагательные, используемые для описания роста, являются точными терминами, характеризующими его конкретные траектории, соответствующие (иногда почти идеально, часто довольно точно) различным математическим функциям. Такие точные, даже идеальные, совпадения возможны, потому что большинство процессов роста являются в высшей степени упорядоченными и развиваются в соответствии с ограниченным числом моделей.

Естественно, эти траектории имеют множество индивидуальных межвидовых и внутривидовых вариаций для организмов и отмечены исторически, технически и экономически обусловленными отклонениями для инженерных систем, экономики и общества. Три базовые траектории включают линейный, экспоненциальный рост и различные модели ограниченного роста. Линейный рост легко понять и рассчитать. Экспоненциальный рост легко понять, но лучший способ его рассчитать – использовать натуральные логарифмы, для многих являющиеся загадкой. Принцип моделей ограниченного роста, включая логистическую функцию, функцию Гомпертца и функцию ограниченного экспоненциального роста, также легко понять, но их математические решения требуют применения дифференциального исчисления.

Но прежде, чем более подробно рассмотреть отдельные функции роста, их решения и кривые роста, я посвящу два небольших раздела временным интервалам и критериям изучения роста. В кратких обзорах я представлю как распространенные, так и реже встречающиеся переменные, рост которых нас интересует как родителей, сотрудников или налогоплательщиков, ученых, инженеров и экономистов или историков, политиков и специалистов по планированию. Их спектр включает такие универсальные вопросы, как вес и рост растущих младенцев и детей и рост национальной экономики. Кроме того, существуют нечастые, но пугающие вопросы, касающиеся распространения потенциально пандемических инфекций, риск которых повышается благодаря массовым авиаперелетам.

Временные интервалы

Рост – это всегда функция от времени, и в процессе современных научных и инженерных исследований их авторы прослеживают траектории с помощью бесчисленных графиков, где время обычно наносится на ось абсцисс (горизонтальную или ось x), а растущая переменная измеряется на оси ординат (вертикальной или оси y). Конечно, мы можем отслеживать рост (и делаем это) физических или нематериальных феноменов в зависимости от изменений других подобных переменных: мы строим графики зависимости роста детей от изменения их веса или роста реального дохода от роста ВВП, но большинство кривых роста (и в более простых случаях прямых) являются, по определению Джеймса Максвелла, диаграммами перемещений и, по определению Томпсона, диаграммами временной зависимости: «У каждой есть начало и конец; и одна и та же кривая может иллюстрировать и жизнь человека, и экономическую историю королевства... Она демонстрирует работу “механизма” и помогает нам видеть аналогичные механизмы в разных областях, поскольку Природа “закольцовывает” свои многочисленные изменения на нескольких простых темах» (Thompson, 1942, 139).

Рост океанической коры или горных хребтов, результат которого обусловлен геотектоническими силами и изучение которого лежит за пределами этой и без того объемной книги, разворачивается на протяжении сотен миллионов лет. Если мы имеем дело с организмами, протяженность рассматриваемого временного интервала является функцией конкретных темпов роста, определяемых длительными периодами эволюции и, в случае одомашненных видов растений и животных, часто ускоренных или усиленных с помощью традиционной селекции и в последнее время также трансгенных вмешательств. Если говорить о росте устройств, машин, структур или любых других продуктов деятельности человека, рассматриваемые временные интервалы зависят как от их долговечности, так и от их адаптивности, способности к усовершенствованию и применению их новых, улучшенных версий в изменившихся обстоятельствах.

В результате рост некоторых артефактов, использовавшихся со времен Античности, сегодня интересен лишь с исторической точки зрения. Хороший пример – парусные корабли. Их развитие и эксплуатация (за исключением тех, что созданы для яхтенного спорта) завершились довольно резко во второй половине XIX века, всего через несколько десятков лет после внедрения паровых двигателей и после более чем пяти тысяч лет совершенствования конструкций. Но другие древние разработки продемонстрировали выдающееся развитие и способность приспосабливаться к требованиям индустриальной эры: строительные и доковые краны являются, пожалуй, лучшими примерами продолжившейся эволюции. Невероятный рост мощности этих древних машин за последние два века позволил использовать их для строительства все более высоких зданий и погрузки-разгрузки все более грузоподъемных кораблей.

Большую часть организмов биосферы составляют микроорганизмы, грибы и насекомые, и самые распространенные интервалы наблюдения в микробиологии и биологии беспозвоночных животных исчисляются минутами, днями и неделями. Образование бактерий часто происходит быстрее, чем за час. Кокколитофоры, одноклеточные известняк-продуцирующие водоросли, преобладающие в океанической фитомассе, достигают максимальной плотности клеток в среде с пониженным содержанием азота за одну неделю (Perrin et al., 2016). Выращиваемые в коммерческих целях шампиньоны достигают зрелости всего за 15–25 дней после заполнения субстрата (соломы или другого органического вещества) мицелием. Бабочки обычно проводят не более недели на стадии яйца, от двух до пяти недель на стадии гусениц (стадии личинки) и одну-две недели в виде куколки, из которой появляется взрослое насекомое.

У однолетних растений интерес представляют интервалы в несколько дней, недель и месяцев. Урожай самых быстрорастущих растений (зеленого лука, салата-латука, редиса) можно собирать менее чем через месяц после посева; самый короткий период получения зре-

лого зерна (яровой пшеницы, ячменя и овса) составляет около 90 дней, но озимой пшенице для достижения зрелости требуется более 200 дней; виноградник начнет приносить урожаи только на третий год после посадки. Рост деревьев легко определить по ежегодно образующимся кольцам (вторичный рост за счет камбиальных латеральных меристем): самые быстро растущие виды (эвкалипты, тополя, сосны) можно заготавливать через десять лет (или даже раньше), но в естественных условиях рост может продолжаться десятки лет, и для большинства деревьев его продолжительность может быть неопределенной.

Рост плода в период беременности у крупных позвоночных длится долгие месяцы (от 270 дней у человека до 645 дней у африканского слона), однако с точки зрения наблюдения за самыми быстрыми периодами постнатального роста наибольший интерес представляют всего несколько месяцев или даже дней. Особенно это касается случаев, когда питание мясных пород кур, свиней и скота оптимизировано так, чтобы максимизировать ежедневную прибавку в весе и нарастить необходимую убойную массу за минимально возможный срок. Периоды наблюдения за ростом младенцев и детей составляют месяцы и даже годы, и педиатры сравнивают данные для конкретного возраста и пола, взятые из таблиц, с реальными показателями и определяют, соответствуют ли они вехам развития, или ребенок отстает.

Рост некоторых артефактов – например, парусных кораблей или строительных кранов – можно отследить в течение нескольких тысячелетий, однако большинство результатов сконцентрировано в сравнительно коротких скачках роста, разделенных длительными периодами застоя или несущественных изменений. Преобразователи энергии (двигатели, турбины, моторы), машины и устройства, характерные для современной индустриальной цивилизации, имеют гораздо более короткую историю жизни. Рост паровых двигателей продолжался 200 лет, с начала XVIII до начала XX века. Рост паровых турбин (и электромоторов) начался с 1880-х годов, а газовых – только с конца 1930-х. Рост современной твердотельной электроники начался с ее первым коммерческим применением в 1950-х, но пошел в гору только с появлением в 1970-х годах разработок с использованием микропроцессоров.

Изучение коллективного роста человечества в его эволюционной целостности можно начать 200 000 лет назад, но воссоздать рост населения Земли с достаточной степенью точности реально только с начала Нового времени (1500–1800), а суммарные величины с небольшими диапазонами неопределенности доступны только за прошлый век. В нескольких странах, имеющих историю проведения переписи населения (хотя и неполную, так как в ней учитывались только взрослые мужчины) или другие массивы подтверждающих документов (например, метрических или приходских книг), мы можем воссоздать траектории роста населения до времен Средневековья.

В области экономики развивающийся рост (ВВП, занятости, производительности, выпуска конкретных товаров) часто отслеживается поквартально, но их статистический учет ведется в годовых суммарных показателях или приросте. Календарный год является стандартным временным интервалом, но двумя наиболее распространенными отклонениями от этого стандарта является финансовый и сельскохозяйственный год (начинающиеся в разные месяцы), используемые для отчетности по финансовым результатам и урожаю. В некоторых исследованиях предпринимались попытки воссоздать национальный экономический рост за несколько предыдущих веков и даже тысячелетий, но (как я подчеркну позже) их скорее можно отнести к разряду качественных, чем к категории истинных количественных оценок. Надежная историческая реконструкция общества с адекватными статистическими данными возможна только на 150–200 лет назад.

Темпы роста отражают изменения переменной в течение конкретного временного интервала и, как правило, измеряются в процентах в год. К сожалению, эти часто цитируемые значения нередко вводят в заблуждение. Оговорки не нужны только в тех случаях, когда эти темпы относятся к линейному росту, то есть за каждый указанный период прибавляется оди-

наковое значение. Но когда темпы относятся к периодам экспоненциального роста, их можно правильно оценить, только понимая, что это временные значения, так как наиболее распространенные разновидности роста, встречающиеся в природе и цивилизациях, соответствующие различным S-образным кривым, постоянно меняют темп роста с очень низкого до пикового и снова на очень низкий по мере приближения процесса роста к концу.

Критерии изучения

Обязательной классификации критериев, используемых для количественного анализа роста, не существует. Наиболее очевидный базовый способ их структурирования – разделение на переменные, отслеживающие физические изменения, и нематериальные, но поддающиеся количественному измерению (хотя бы опосредованно, если не напрямую) тенденции. Самым простым элементом в первой категории является приращение изучаемой переменной по часам, дням или годам. Когда статистики говорят о количественном выражении роста разнообразных популяций, они используют термин шире его строгого латинского значения, в отношении скопленных микроорганизмов, растений и животных, любых количественно измеримых единиц, чей рост они хотят изучить.

Что касается основных величин, чей рост определяет материальный мир, Международная система единиц (СИ) признает семь основных единиц: длина (метры, м), масса (килограмм, кг), время (секунда, с), сила электрического тока (ампер, А), термодинамическая (или абсолютная) температура (кельвин, К), количество вещества (моль) и сила света (кандела, кд). Многие единицы роста относятся к количествам, полученным на основе семи основных единиц, в том числе площадь (м^2), объем (м^3), скорость (м/с), плотность (кг/м^3) и удельный объем ($\text{м}^3/\text{кг}$). Более сложные уравнения связи между физическими величинами дают такие распространенные меры роста, как мощность, давление, энергия, сила или сила света.

Большинство этих единиц измерения будет часто встречаться на страницах книги (их полный список, а также список кратных им величин и дольных единиц см. в разделах «Единицы измерения» и «Аббревиатуры»). Две базовые единицы, длина и масса, будут использоваться для оценки роста организмов (будь то деревья, беспозвоночные или младенцы), структур и машин. Среди линейных переменных наибольшее восхищение и чувство соперничества всегда вызывала высота. Ее важность подтверждают и корреляция между ростом и силой в корпоративном мире (Adams et al., 2016), и навязчивое желание архитекторов и девелоперов строить все более высокие здания. Международной организации, которая следила бы за ростом зданий, имеющих наибольшую площадь застройки или внутреннего пространства, не существует, но есть Совет по высотным зданиям и жилой среде, имеющий свои критерии определения и измерения высотных зданий (CTBUH, 2018).

Рекордные значения высоты выросли с 42 м Home Insurance Building, первого в мире небоскреба, построенного в Чикаго в 1884 году, до 828 м Burj Khalifa в Дубае, завершеного в 2009 году. Высота небоскреба Jeddah Tower (основным подрядчиком на строительство которого выступает компания Saudi Binladin, чье название всегда будет ассоциироваться с событиями 11 сентября 2001 года) к 2019 году должно было достичь 1008 м (CTBUH, 2018)². Длина, как и высота, в отличие от массы, также постоянно всплывает при сравнительных антропометрических исследованиях, и Clio Infra (2017) и Розер (Roser, 2017) обеспечивают удобные справочники измерений высоты от древних скелетов до современных людей (рис. 1.1). Рост европейских новобранцев служит надежным подтверждением его увеличения в новое время (Ulijaszek et al., 1998; Floud et al., 2011).

Площадь довольно часто возникает в исследованиях роста в таких разнообразных примерах, как средний размер ферм, расширение империй и ежегодная установка солнечных батарей для выработки электроэнергии. Изменения в области строительства жилья (средняя площадь домов или квартир) измеряются в квадратных метрах (м^2), за исключением США, использующих неметрическую систему, где по-прежнему пользуются квадратными футами. Квадратные

² В 2018 г. строительство приостановилось и с тех пор не возобновлялось. – Прим. ред.

километры (км^2 , $1000 \times 1000 \text{ м}$) используются для отслеживания роста государств и империй. Еще чаще площадь используется в качестве единицы измерения при количественном анализе результатов фотосинтеза, то есть продуктов лесоводства и урожаев сельского хозяйства. Гектары ($100 \times 100 \text{ м}$, или $10\,000 \text{ м}^2$) являются наиболее распространенными единицами измерения площади в статистике сельского хозяйства (снова за исключением США, где используются акры).

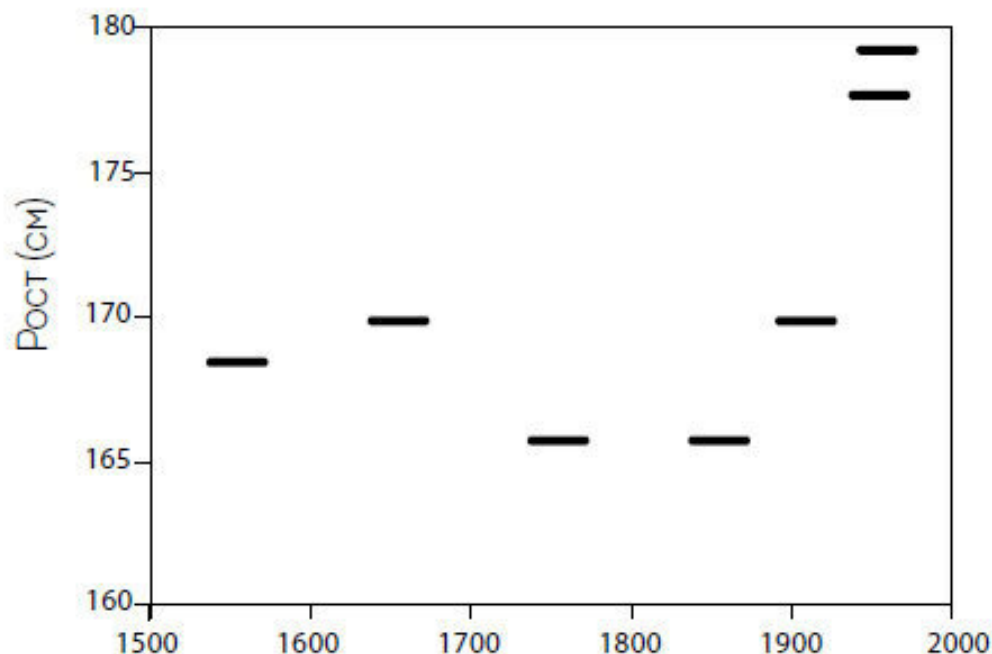


Рис. 1.1. Эволюция мужского роста в Западной Европе, 1550–1980. Данные Clio Infra (2017)

Объем предпочитают массе при обзоре роста производства и потребления алкогольных и безалкогольных напитков (обычно в литрах), оценке годовой заготовки и промышленного использования древесины и другой древесной продукции (обычно в м^3). Объем также является предпочитаемым индикатором измерения при добыче и транспортировке неочищенной нефти и, пожалуй, является лучшим примером прижившейся неметрической единицы измерения. Стальная емкость объемом 42 американских галлона (или приблизительно 159,997 литра) в 1872 году была принята Бюро переписи США за единицу измерения объема сырой нефти, и баррель остается стандартным показателем производительности в нефтяной промышленности – но конвертация объема в эквивалент массы требует знания плотности конкретного сорта нефти.

Чтобы получить одну тонну необработанной нефти, требуется немногим более шести баррелей тяжелой нефти (добываемой на Ближнем Востоке), но самой легкой нефти – из Алжира и Малайзии – понадобится уже 8,5 барреля, в то время как средним международным значением является 7,33 барреля на тонну. Аналогично перевод объема древесины в эквивалент массы требует знания плотности конкретной породы. Даже среди распространенных видов плотность отличается в два раза, от легкой сосны (400 кг/м^3) до тяжелого ясеня белого (800 кг/м^3), а крайние значения колеблются от 200 кг/м^3 у бальсы до $1,2 \text{ т/м}^3$ у черного дерева (USDA, 2010).

История вездесущих предметов материальной культуры иллюстрирует две противоположные массовые тенденции: с одной стороны, миниатюризацию широко используемых компонентов и устройств (на основе беспрецедентного распространения твердотельной электроники), а с другой – значительное увеличение средней массы двух крупнейших объектов инвестиций современных семей – автомобилей и домов. Очевидно, что уменьшение массы компьютеров обратно пропорционально их способности обрабатывать растущий объем информации на единицу собственного веса. В августе 1969 года компьютер космического корабля «Аполлон–11», использовавшийся для посадки капсулы с экипажем на Луну, весил 32 кг и имел всего 2 Кб оперативной памяти (RAM), или 62 байта на килограмм массы (Hall, 1996). Двенадцать лет спустя первый персональный компьютер, выпущенный компанией IBM, весил 11,3 кг и имел 16 Кб RAM, то есть 1,416 Кб/кг. В 2018 году ноутбук Dell, на котором была написана эта книга, весил 2,83 кг и имел 4 Гб оперативной памяти, или 1,41 Гб/кг. Не принимая во внимание компьютер с «Аполлон–11» (уникальный, некоммерческий продукт), с 1981 года соотношение памяти к массе персональных компьютеров выросло в миллион раз!

С дальнейшей миниатюризацией электронных приборов (за исключением телевизионных панелей размером в стену) дома и машины становятся больше. Люди думают о домах в первую очередь как о жилой площади, но значительный ее рост – в США с 91 м² общей площади в 1950 году до приблизительно 240 м² к 2015 году (Alexander, 2000; USCB, 2017) – привел к еще большему росту объема используемых строительных и отделочных материалов. Для строительства дома площадью 240 м² потребуется не менее 35 тонн дерева, включая пиломатериалы, предназначенные для конструкции каркаса, и прочую древесную продукцию, в том числе фанеру, клееную древесину и шпон (Smil, 2014b). С другой стороны, простой дом площадью 90 м² можно построить из 12 тонн дерева – что в три раза меньше.

Более того, современные американские дома содержат больше мебели и крупной бытовой техники (холодильники, посудомоечные, стиральные и сушильные машины): в 1950 году всего в 20 % домохозяйств имелись стиральные машины, менее чем в 10 % – сушильные и менее чем в 5 % – кондиционеры, сегодня ставшие стандартом даже в северных штатах. Кроме того, в более дорогой отделке используются более тяжелые материалы, например в плитке и камне для напольных покрытий, каменных кухонных столешницах и больших каминах. В результате новые дома, построенные в 2015 году, примерно в 2,6 раза больше построенных в 1950 году, но для многих из них масса строительных материалов увеличилась в четыре раза.

Рост массы американских легковых автомобилей вызван сочетанием расточительности и стремления к усовершенствованиям (рис. 1.2). Первый в мире серийный автомобиль, знаменитая фордовская Model T, выпущенный в октябре 1908 года, весил всего 540 кг. Увеличение веса после Первой мировой войны было связано с тем, что автомобиль получил полностью закрытую металлическую кабину, более тяжелый двигатель и более удобные сиденья: в 1938 году масса фордовской Model 74 достигала 1090 кг, почти вдвое больше, чем у Model T (Smil, 2014b). Эти тенденции (более крупные автомобили, тяжелые двигатели, больше аксессуаров) продолжились и после Второй мировой войны, а после короткой паузы и отхода от них в результате повышения цен на нефть Организацией стран – экспортеров нефти (ОПЕК) в 1970-х годах усилились в середине 1980-х с появлением внедорожников-универсалов (кроссоверов), на долю которых в США в 2019 году пришлось половина продаж новых автомобилей, и ростом популярности пикапов и автофургонов.

В 1981 году средняя масса американских автомобилей и легких грузовиков составляла 1452 кг, к 2000 году она достигла 1733 кг, а к 2008-му – 1852 кг (и едва изменилась к 2015 году), то есть за 100 лет средняя масса автомобиля возросла в 3,4 раза (USEPA, 2016b). Рост средней массы автомобилей в Европе и Азии был несколько меньше в абсолютных величинах, но темпы роста аналогичны американским. Мировой объем продаж автомобилей в 1908 году

составлял менее 100 000 штук, к 2017 году он достиг более 73 млн, то есть увеличился приблизительно в 700 раз. Это означает, что общая масса ежегодно продаваемых по всему миру новых автомобилей на сегодня примерно в 2500 раз больше, чем сто лет назад.

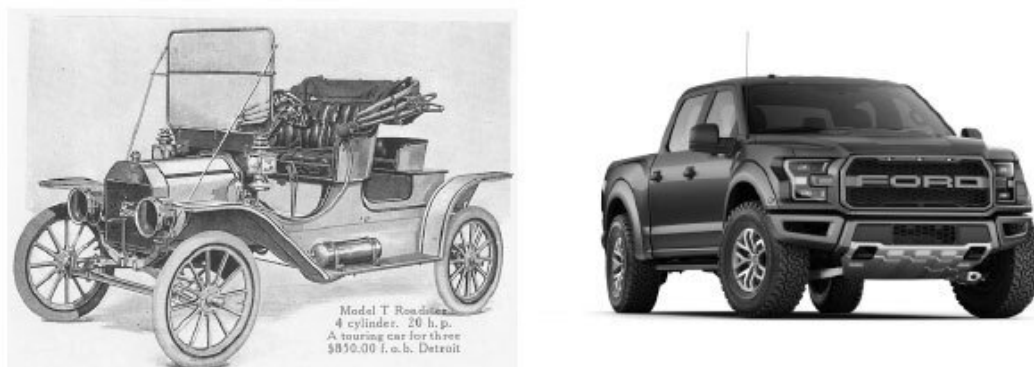


Рис. 1.2. Самым продаваемым американским автомобилем в 1908 году был Ford Model T весом 540 кг. В 2018 году самым продаваемым был не легковой автомобиль, а пикап Ford F-150 весом 2000 кг. Изображения взяты из каталога Ford Motor Company за 1909 год и с Trucktrend

Время является третьей распространенной базовой единицей измерения. Оно используется для непосредственного количественного выражения роста (от увеличившейся продолжительности жизни до длительности самых длинных перелетов или времени жизни продукта, которое информирует нас о долговечности и надежности устройств). Еще более важно то, что время используется в качестве знаменателя в таких распространенных соотношениях, как скорость (длина/время, м/с), мощность (энергия/время, Дж/с), средний доход (деньги/время, \$/час) или годовой национальный валовой внутренний продукт (общая стоимость товаров и услуг/время, \$/год). Температура реже встречается в исследованиях роста, но с ее помощью измеряется производительность турбогенераторов, а рост общей яркости освещения дает информацию о распространении и усилении проблемы светового загрязнения (Falchi et al., 2016).

Современное общество все больше волнуют нематериальные переменные, траектории роста которых описывают меняющийся уровень состояния экономики, финансового благополучия и качества жизни. Экономисты хотят видеть растущими следующие распространенные переменные: общий объем промышленной продукции, ВВП, реальный доход, производительность труда, экспорт, положительный торговый баланс, доля экономически активного населения и уровень занятости. Финансовое благополучие (ВВП, валовой доход, реальный доход, объем накоплений) обычно рассчитывается на душу населения, в то время как качество жизни оценивается с помощью комбинации социоэкономических переменных. Например, Индекс развития человеческого потенциала (разработанный и ежегодно рассчитываемый Программой развития ООН) состоит из трех индексов, количественно выражающих продолжительность жизни, уровень образования и доход (UNDP, 2016).

В 2017 году Всемирный экономический форум представил новый Индекс инклюзивного развития, основанный на ряде ключевых показателей эффективности (*KPI*) и позволяющий провести всестороннюю оценку стандартов жизни не только на текущем уровне развития, но и с учетом показателей за прошедшие пять лет (World Economic Forum, 2017). Индекс развития человеческого потенциала и Индекс инклюзивного развития во многом пересекаются: их рейтинг совпадает в шести из 10 ведущих стран (Норвегия, Швейцария, Исландия, Дания,

Нидерланды, Австралия). Пожалуй, наиболее интересными новыми расчетами является количественное выражение счастья или удовлетворенности жизнью.

О маленьком государстве Бутан, расположенном в Гималаях, заговорили в 1972 году, когда его четвертый король Джигме Сингье Вангчук предложил измерять развитие королевства с помощью индекса под названием Валовое национальное счастье (GNH Centre, 2016). Идея, конечно, привлекательная, но превратить яркий образ в математически надежный и регулярно отслеживаемый индикатор – совсем другое дело. Во всяком случае, для США периода после Второй мировой войны у нас имеются достаточно убедительные доказательства того, что счастье не является функциональной переменной роста. Институт Гэллага с 1948 года проводит нерегулярные опросы американцев о том, насколько счастливыми они себя ощущают (Carroll, 2007). В 1948 году очень счастливыми ощущали себя 43 % американцев. Пик показателя, 55 %, был достигнут в 2004 году, а самое низкое значение пришлось на опрос после событий 11 сентября 2001 года – 37 %. Но к 2006 году оно поднялось до 49 %, то есть едва изменилось по сравнению с цифрами полувековой давности (47 % в 1952 году)!

Удовлетворенность жизнью тесно связана с рядом качественных преимуществ, которые нелегко отразить с помощью простых, самых распространенных, количественных единиц. Питание и жилье являются двумя лучшими примерами этой реальности. Как бы важно ни было отслеживать рост средней ежедневной доступности пищевой энергии на душу населения, цифры могут демонстрировать обманчиво обнадеживающую картину. С улучшением питания к нему стали предъявляться повышенные требования, выходящие за рамки удовлетворения энергетических потребностей: пища может обеспечивать достаточное количество углеводов и жиров и удовлетворять минимальному уровню высококачественного белка, но быть бедной микроэлементами (витаминами и минералами). Следует отметить, что низкий уровень потребления фруктов и овощей (основных источников микроэлементов) считается основным фактором, повышающим риск хронических заболеваний, но Сигел и др. (Siegel et al., 2014) продемонстрировали, что в большинстве стран их потребление ниже рекомендуемого. В 2009 году глобальная нехватка составила 22 % с медианным соотношением между обеспечением и потребностью на уровне 0,42 в странах с низким доходом и 1,02 в обеспеченных странах.

В начале Нового времени развитие научных методов исследований и изобретение и применение новых, мощных математических и аналитических инструментов (математического анализа в середине XVII века, успехов в области теоретической физики и химии и основ современной экономики и демографии в течение XIX века) позволили анализировать рост в чисто количественной форме и использовать релевантные формулы роста для прогноза долгосрочных траекторий изучаемых феноменов. Роберт Мальтус (1766–1834), один из основоположников демографических и экономических исследований, вызвал серьезную обеспокоенность своими выводами, в которых противопоставлялся линейный рост средств к существованию и экспоненциальный рост населения (Malthus, 1798).

В отличие от Мальтуса, Пьер Франсуа Ферхюльст (1804–1849), бельгийский математик, сегодня известен только историкам науки, статистикам, демографам и биологам. Но через четыре десятка лет после публикации работы Мальтуса Ферхюльст внес существенный вклад в наше понимание роста, опубликовав первые реалистичные формулы, разработанные специально для того, чтобы выразить развитие ограниченного роста (Verhulst, 1838; 1845; 1847). Подобный рост управляет не только развитием всех организмов, но и повышением производительности новых методов организации труда, распространением множества инноваций и внедрением множества потребительских продуктов. Прежде чем начать раскрывать тему феноменов роста и их траекторий (в главе 2), я предложу краткое, но вполне исчерпывающее введение в характер этих формальных моделей роста и соответствующих им кривых.

Линейный и экспоненциальный рост

Это две распространенные, но совершенно различные формы роста, траектории которых отражают простые равенства. «Относительно медленный и устойчивый» будет лучшим качественным описанием линейного роста, а «ускоряющийся и переходящий в стремительный» – экспоненциального. Все, что подчиняется линейному росту, возрастает на одну ту же величину в течение заданного периода времени, следовательно, формула линейного роста выглядит просто:

$$N_t = N_0 + kt,$$

где новое значение величины N_t (в момент времени t) рассчитывается путем увеличения начального значения (N_0) на постоянную величину k за период времени t .

Анализ большого числа сталагмитов показывает, что эти конусообразные колонны солей кальция, образующиеся на полу пещер благодаря каплюющей воде, часто растут тысячами почти линейно (White and Culver, 2012). Даже сравнительно быстрый рост со скоростью 0,1 мм в год означает, что сталагмит высотой 1 м вырастет за тысячу лет всего на 10 см ($1000 \text{ мм} + 1000 \times 0,1$). Если нанести этот результат на график, мы увидим плавно восходящую линию (рис. 1.3). Это, конечно, означает, что темп роста как доля общей высоты сталагмита будет постоянно снижаться. Для сталагмита, растущего со скоростью 0,1 мм в год в течение 1000 лет, он будет составлять 0,01 % в течение первого года, но всего 0,009 % спустя тысячелетие.

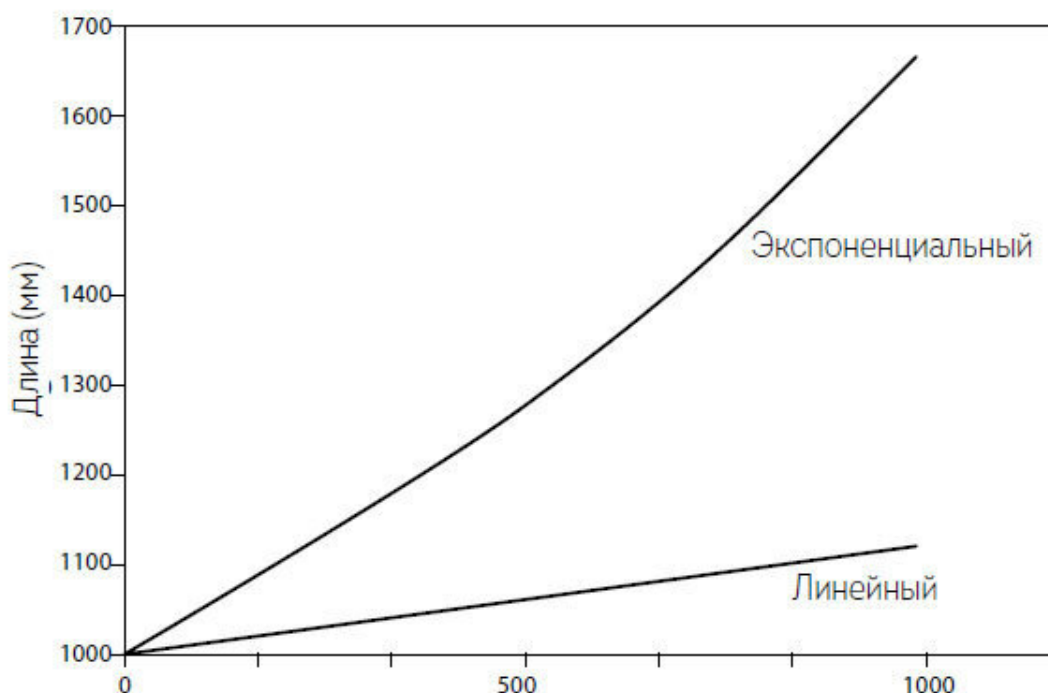


Рис. 1.3. Тысячелетие прироста сталагмитов, иллюстрирующее траектории линейного и экспоненциального роста

Для сравнения во всех случаях экспоненциального роста значение увеличивается в одинаковое число раз за каждый одинаковый период времени. Основной функциональной зависимостью является

$$N_t = N_0 (1 + r)^t,$$

где g – скорость роста, выраженная как доля единицы роста на единицу времени, например, при росте 7 % на единицу времени $g = 0,07$.

Экспоненциальный рост также можно выразить – после простой поправки на выбор единиц измерения времени – как

$$N_t = N_0 e^{gt},$$

где e ($e = 2,7183$, основа натурального логарифма) возводится в степень gt , что легко проделать с помощью любого научного калькулятора. Мы можем представить себе пещеру, где количество каплюющей воды, содержащей одинаковую долю растворенных солей, постоянно возрастает, ведя к экспоненциальному росту сталагмита.

Если предположить очень малый прирост длины в размере 0,05 % в год, то сталагмит за 1000 лет увеличился бы в длину почти на 65 см ($1,000 \text{ мм} \times 2,718^{0,0005 \times 1000} = 1648,6 \text{ мм}$ общей длины, или прирост в размере 64,86 см), что почти на 50 % больше, чем при линейном росте. Экспоненциальный рост отображается в виде восходящей кривой, крутизна подъема которой определяется скоростью роста (рис. 1.3). Через 10 000 лет линейно растущий сталагмит удвоил бы свою высоту, и она достигла бы 2 м, в то время как экспоненциально растущему сталагмиту понадобилась бы гигантская пещера, так как его высота составила бы 148,3 м. Экспонента – произведение скорости роста и времени, поэтому прирост может быть одинаково большим как в случае низкого прироста на более длинных интервалах времени, так и в случае более коротких интервалов более быстрого роста.

Еще одно простое сравнение показывает, что траектории линейного и экспоненциального роста находятся близко друг к другу на самых ранних стадиях роста, когда значения скорости роста и временного интервала невелики по сравнению с единицей: вскоре они начинают расходиться и в конце концов оказываются далеко друг от друга. Голд (Gold, 1992) считал, что колонии бактерий, живущих глубоко под землей, заполняют до 1 % всего пористого пространства в верхних 5 км земной коры, в то время как, по мнению Уитмана и др. (Whitman et al., 1998), объем, занимаемый микроорганизмами, составляет всего 0,016 % пористого пространства. Это все равно означает огромную совокупную массу микроорганизмов, но с крайне низким темпом размножения. Давайте предположим (ради простого примера), что физические и химические ограничения позволяют крошечной колонии, состоящей из 100 клеток (внезапно оказавшейся в результате сейсмического явления в новой полости скальной породы), расти на пять клеток в час. Очевидно, что к концу первого часа клеток будет 105, через 10 часов такого линейного роста колония достигнет 150 клеток, а через 50 и 100 часов – 350 и 600 соответственно.

По сравнению со многими обычными бактериями, *Mycobacterium tuberculosis* (микобактерия туберкулеза) – служившая одной из самых частых причин преждевременной смерти во времена до изобретения антибиотиков и по-прежнему остающаяся одной из основных причин смертности инфекционного генезиса, а также являющаяся причиной одной из наиболее устойчивых форм инфекционных заболеваний (Gillespie, 2002) – в большинстве обстоятельств размножается в легких человека медленно. Но в благоприятных лабораторных условиях количество ее клеток удваивается в течение 15 часов, то есть со скоростью приблизительно 5 % в час. Если мы снова начнем со 100 клеток, то к концу первого часа получим 105 – то же самое, что и при линейном росте подземных микроорганизмов. Через 10 часов экспоненциального роста в колонии будет 165 клеток (всего на 10 % больше, чем при линейном росте), но через 50 часов результат экспоненциального роста составит 1218 клеток (приблизительно в 3,5 раза больше, чем в случае линейного) и 14 841 клетку через 100 часов, то есть почти в 25 раз больше. Контраст очевиден: без априорных знаний по истечении первого часа мы не смогли бы определить разницу, но через 100 часов разница становится огромной, так как экспоненциальный рост на порядок выше.

Случаи линейного (постоянного) роста широко распространены. Расстояние (длина), которое проходит свет, излучаемый мириадами звезд, увеличивается на 300 000 000 м (299

792 458 м, если говорить точно) каждую секунду. Расстояние, преодолеваемое грузовиком, движущимся в среднем со скоростью 100 км/ч по ночному шоссе, за то же время возрастает на 27,7 м. Согласно закону Ома – напряжение (вольты, V) равно силе тока (амперы, A), умноженной на сопротивление (ом, Ω) электрической цепи, – когда сопротивление не меняется, с ростом напряжения значение силы тока в цепи растет линейно³. Фиксированная (и не облагаемая налогами) почасовая оплата дает линейное увеличение зарплаты при увеличении рабочего времени. Поминутная тарификация сотовой связи (а не безлимитный тариф) ведет к линейному увеличению ежемесячного счета при линейном увеличении продолжительности разговоров.

В природе линейный рост часто встречается в качестве временного на ранних этапах постнатального развития, будь то поросята или дети. В развитых странах уже более века средняя ожидаемая продолжительность жизни растет линейно. Линейная траектория – единственная долгосрочная траектория роста урожаев, от основных зерновых до фруктов. Совершенствование технических характеристик и возможностей машин также происходит линейно, включая рост средней мощности американских легковых автомобилей со времен Ford Model T в 1908 году, максимальную силу тяги и степень двухконтурности⁴ реактивных двигателей с момента их появления, максимальную скорость поездов, давление в котлах паровозов (с начала регулярной эксплуатации в 1830 году) и максимальное водоизмещение кораблей.

Иногда простой линейный рост является результатом сложных взаимодействий. В период между 1945 и 1978 годами потребление бензина в США представляло собой почти идеальный линейный рост, и после короткого четырехлетнего периода спада в 1983 году он возобновился и продолжался до 2007 года (USEIA, 2017b). Две линейные траектории стали результатом взаимного влияния нелинейных изменений, таких как резкий рост, более чем в семь раз в период с 1945 по 2015 год, числа владельцев автомобилей и застой в средней эффективности потребления топлива автомобильными двигателями до 1977 года, последующего значительного повышения с 1978 по 1985 год и нового застоя на следующие 25 лет (USEPA, 2015).

³ В этом примере ради строгости изложения автору стоило бы сохранить введенную зависимость напряжения от силы тока – с ростом силы тока при постоянном сопротивлении растет и напряжение (разумеется, обратное тоже верно). – *Прим. ред.*

⁴ Степень двухконтурности – параметр, показывающий отношение расхода воздуха через внешний контур двигателя к расходу воздуха через внутренний контур. – *Прим. ред.*

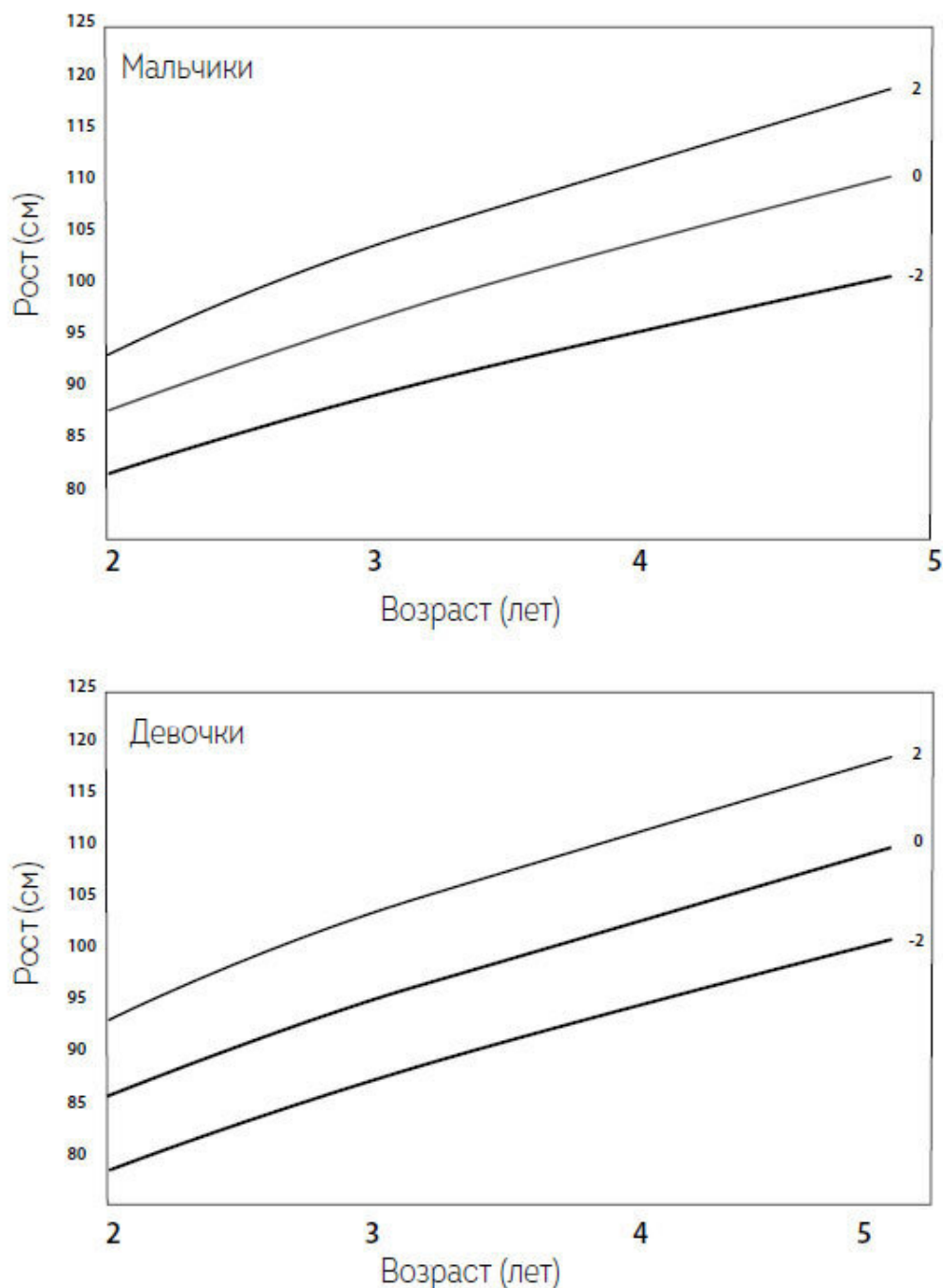


Рис. 1.4. Графики предполагаемого увеличения роста в зависимости от возраста (средние значения и величины в рамках двух стандартных отклонений) для мальчиков и девочек двух – пяти лет. Упрощено по данным ВОЗ (2006)

Некоторые организмы, включая бактерии, выращиваемые в лабораториях, и маленьких детей, испытывают периоды линейного роста, прибавляя то же число клеток или рост или массу в течение конкретных периодов времени. Бактерии развиваются этим путем, когда обеспечены ограниченным, но постоянным количеством питательных веществ. У детей наблюдаются периоды линейного увеличения как веса, так и роста. Например, американские мальчики испытывают краткие периоды линейной прибавки веса в возрасте между 21 и 36 месяцами (Kuczmarski et al., 2002), и Нормы развития детей Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) указывают на идеальное линейное увеличение роста у мальчиков в возрасте от трех до пяти лет и почти линейную траекторию у девочек того же возраста (WHO, 2006; рис. 1.4).

Экспоненциальный рост

Экспоненциальный рост, начинающийся постепенно и затем резко возрастающий, привлекает внимание. Свойства этого роста, прежде известные как геометрический коэффициент или геометрическая прогрессия, иллюстрируются сотни лет, пожалуй, даже тысячи, хотя первый письменный пример относится к 1256 году – это история об изобретателе шахмат, который попросил своего правителя-благодетеля вознаградить его, удваивая число зерен риса (или пшеницы?) на каждой следующей клетке поля. 128 зерен (2^7) в конце первого ряда – заурядное число, однако к концу среднего, четвертого, ряда оно достигло 2,1 млрд (2^{31}), а в конце последнего – около 9,2 квинтиллиона ($9,2 \times 10^{18}$) зерен.

Основной характеристикой экспоненциального роста является его стремительность, когда каждое новое увеличение значительно превосходит предыдущее: прибавки в последнем ряду шахматной доски в 256 раз больше, чем общее число, накопленное в конце предпоследнего, и составляет 99,61 % всех добавленных зерен. Очевидно, нежелательный экспоненциальный рост можно остановить – с тем или иным трудом – на ранних этапах, но по мере продолжения роста задача может быстро стать нерешаемой. Если предположить, что средняя масса рисового зернышка составляет 25 мг, их общее число (которое очевидно не сможет поместиться на шахматной доске) будет равняться 230 гигатоннам риса, что почти в 500 раз больше ежегодного мирового урожая, составившего в 2015 году немногим менее 500 мегатонн.

За длительные периоды даже ничтожная скорость роста даст невероятные результаты. Применять интервалы космического масштаба нет нужды – достаточно отсылки к Древнему миру. Когда Римская империя достигла своего апогея (во II веке н. э.), ей было необходимо собирать 12 Мт зерна (большая часть которого выращивалась в Египте и отправлялась в Италию), чтобы прокормить население размером около 60 млн человек (Garnsey, 1988; Erdkamp, 2005; Smil, 2010c). Если представить себе, что Римская империя существовала бы и по сегодняшний день, ее урожай зерна рос бы на 0,5 % в год и к 2015 году достиг бы 160 Гт, что более чем в 60 раз больше реально собранного в 2015 году мирового урожая зерна в размере 2,5 Гт, с помощью которого накормили 7 млрд человек.

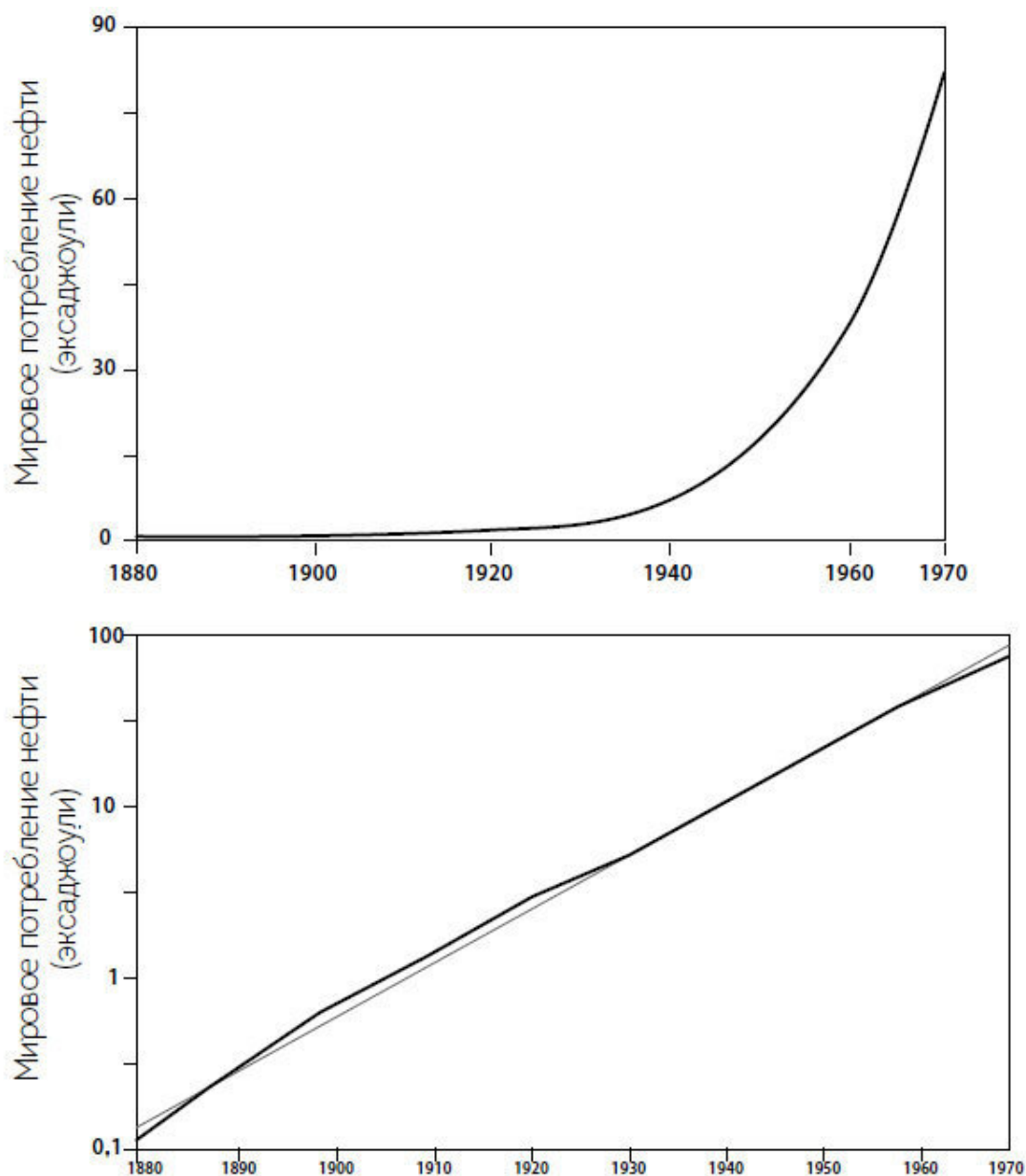


Рис. 1.5. Годовой мировой рост потребления необработанной нефти, 1880–1970-е: экспоненциальный рост, отображенный на линейной и полулогарифмической шкале. По данным (Smil, 2017b)

Линейная шкала плохо подходит для отображения экспоненциального роста, полная траектория которого часто охватывает величины в несколько порядков. Если попытаться вместить все значения на линейной оси y , их будет невозможно разобрать кроме самых больших порядков, и результатом всегда будет J-образная кривая с почти линейной частью сравнительно медленного прироста, за которым следует более или менее крутой подъем. Если же нанести значения постоянного экспоненциального роста на график в полулогарифмических координатах (с линейной осью x для времени и логарифмической осью y для растущего количественного значения), то можно получить идеально прямую линию, и значения будут легко читаться на оси y , даже когда рост охватывает значения нескольких порядков. Таким образом, составление графика в полулогарифмическом масштабе – простой способ определить, является ли некий набор данных результатом экспоненциального роста. На рис. 1.5 сравниваются два графика для подобного феномена: на нем отображается рост одной из основ современной цивилизации,

почти идеально экспоненциальный рост мирового потребления нефти в период между 1880 и 1970 годами.

Коммерческое производство топлива началось в ничтожном масштабе всего в трех странах: России (с 1846 года), Канаде (с 1858 года) и США (с 1859 года). К 1875 году его объем составлял всего около 2 Мт, но с ростом добычи в США и России и выходом на рынок новых производителей (Румынии, Индонезии, Бирмы, Ирана) производство стало расти экспоненциально и к 1930 году достигло около 170 Мт. В результате экономического кризиса 1930-х годов в отрасли произошло короткое замедление, но ее экспоненциальный рост возобновился в 1945 году, и благодаря обнаружению гигантских месторождений на Ближнем Востоке и в России к середине 1970-х добыча возросла на три порядка (немного больше чем в 1000 раз) за последние 100 лет.

Периоды экспоненциального роста встречаются и в современной экономике. Подобные явления характерны, в частности, для роста валового продукта в таких быстро развивающихся странах, как Япония, Южная Корея и Китай, после 1985 года. Они были связаны с объемом годовых продаж потребительской электроники, массовый спрос на которую создал новые глобальные рынки. На привлекательности временного экспоненциального роста воображаемых доходов строятся мошеннические инвестиционные схемы (пирамиды Понци): на ранних этапах развития таких моделей экспоненциальный рост можно остановить контролируемым образом, но внезапный коллапс роста, характерный для таких схем, всегда имеет нежелательные последствия. Развитие технического прогресса также часто бывает отмечено явными периодами экспоненциального роста, но впервые экспоненциальный рост (и его опасности) стал активно обсуждаться публикой в связи с ростом населения (Malthus, 1798).

Знаменитая работа «Очерк закона о народонаселении» Томаса Роберта Мальтуса напоминает труды Леонарда Эйлера, ведущего ученого XVIII века, покинувшего Швейцарию ради работы в России и Пруссии (Васаёр, 2011). В Берлине, после возвращения из России, Эйлер опубликовал – на латыни, в то время по-прежнему считавшейся стандартом языка научных работ, – «Введение в анализ бесконечно малых [величин]» (Euler, 1748). Одна из рассматриваемых в этой книге проблем связана с проходившей в 1747 году в Берлине переписью населения, в которой приняли участие 100 000 человек. Эйлер хотел узнать, каким будет население, растущее ежегодно на одну тридцатую (3,33 % в год), через 100 лет. Его ответ, полученный с помощью логарифмов, гласил, что оно вырастет более чем в 25 раз: поскольку $P_n = P_0(1 + r)^n$, результат за 100 лет составит $100\,000 \times (1 + 1/30)^{100}$, или 2 654 874. Затем Эйлер продемонстрировал, как рассчитывать годовой прирост населения и периоды удвоения.

Но именно Мальтус сделал вопрос экспоненциального роста основным для таких новых дисциплин, как демография и политэкономия. Его основной вывод о том, что «потенциал населения определенно больше потенциала земли, производящей пропитание для человека», так как безудержный рост населения будет происходить экспоненциально, а рост средств к существованию – линейно (Malthus 1798, 8), получил широкое хождение:

Если взять любой размер населения Земли, например, тысячу миллионов, количество людей будет увеличиваться по модели 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 и т. д., а пропитание – по модели 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 и т. д. Через два века с четвертью соотношение населения и средств пропитания будет 512 к 10, через три века – 4096 к 13, а через две тысячи лет разница будет почти неисчислимой, хотя сельскохозяйственная продукция к тому времени возрастет в огромной степени.

Чарльз Дарвин иллюстрировал процесс, ссылаясь на Мальтуса и Линнея и собственные расчеты последствий безудержного размножения слонов (Darwin, 1861, 63):

Не существует исключения из правила, что каждое органическое существо размножается с такой скоростью, что если не уничтожить его, то Земля вскоре покроется потомством одной пары. Даже число медленно размножающихся людей удвоилось за двадцать пять лет, и при такой скорости через несколько тысяч лет от их потомков будет не протолкнуться. Линней подсчитал, что если однолетнее растение дает всего два семени – а таких непродуктивных растений не существует – и выросшие из них растения снова дадут два семени и так далее, то через двадцать лет этих растений будет миллион. Слоны считаются самыми медленно размножающимися из животных, и мне было нелегко оценить вероятную минимальную скорость их естественного прироста: предположим, что они начинают размножаться в возрасте тридцати лет и продолжают до девяноста, производя на свет в этот период три пары детенышей. Если это так, то к концу пятого века будет существовать 5 млн слонов, являющихся потомками первой пары.

Как я объясню подробнее в главах, посвященных росту организмов и артефактов, эти расчеты нужно воспринимать с правильной долей внимания и скепсиса, но у них есть два общих фундаментальных свойства. Во-первых, в отличие от линейного роста, где абсолютный прирост на единицу времени не меняется, экспоненциальный рост ведет к увеличению абсолютной прибавки на единицу времени по мере расширения базы. Экономика США росла на 5,5 % в 1957-м, а также в 1970 году, но во втором случае абсолютный прирост был в 2,27 раза больше – \$56 млрд по сравнению с \$24,7 млрд (FRED, 2017). В большинстве распространенных случаев экспоненциального роста его скорость не является идеально постоянной: она или немного опережает график, или колеблется в пределах среднего значения за длительный период.

Немного сокращающаяся скорость роста даст менее ярко выраженный рост. Десятилетние значения роста ВВП США с 1970 года представляют хороший пример: они сократились с 9,5 % в течение 1970-х до 7,7 % в течение 1980-х годов, 5,3 % в течение 1990-х и до всего 4 % в течение первого десятилетия XXI века (FRED, 2017). Возрастающая скорость роста приведет к суперэкспоненциальному темпу роста: годовой темп составил 8,6 % в течение первых пяти лет, 9,8 % – в период между 2001 и 2005 годами и 11,3 % между 2006 и 2010 годами (NBS, 2016). Колеблющийся темп роста является нормой для развития экономики в долгосрочной перспективе: например, экономический рост США (выраженный в ВВП) во второй половине XX века составлял в среднем 7 % в год, но это сложное среднее значение изменений скрывает значительные годовые колебания, достигавшие таких крайних значений, как 0,3 % в 1954 году (единственный год сокращения ВВП) и 13 % в 1978 году (FRED, 2017).

Во-вторых, экспоненциальный рост, природный или антропогенный, всегда является лишь временным феноменом, заканчивающимся в результате разнообразных физических, экологических, экономических или социальных ограничений. Ядерная цепная реакция обязательно завершается (в связи с ограниченной массой расщепляющегося материала), как и схемы (пирамиды инвестиций) Понци (когда приток новых денежных средств опускается ниже выплат). Но финансовые пирамиды могут существовать довольно долго: вспомните аферу Бернарда Мейдоффа – настолько продуманную схему Понци, что надзорные органы, неоднократно (хотя определенно не настолько тщательно, как следовало) проверявшие его компанию, более 30 лет не могли ни к чему прицепиться. Мейдофф получил обманым путем около \$65 млрд от инвесторов, прежде чем его пирамида рухнула в результате крупнейшего со времен окончания Второй мировой войны экономического кризиса осенью 2008 года (Ross, 2016).

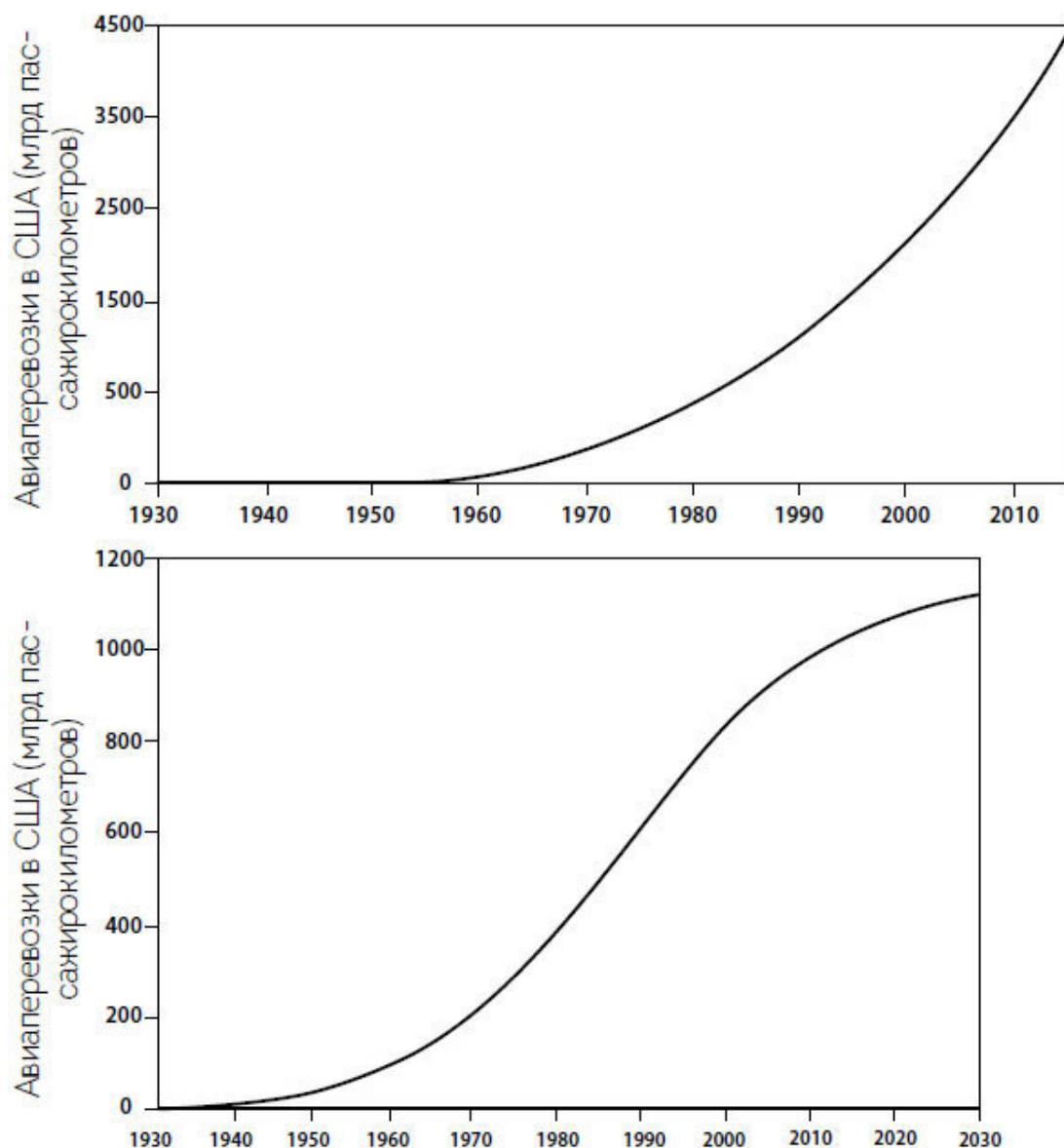


Рис. 1.6. Прогнозы роста авиаперевозок в США (в миллиардах пассажирокилометров) на основе данных за 1930–1980 годы (сверху, больше всего подходит регрессия четвертого порядка) и за 1930–2015 годы (снизу, больше всего подходит логистическая кривая с точкой перегиба в 1987 году). Данные из различных годовых отчетов Международной организации гражданской авиации

Вот почему долгосрочное прогнозирование на основе экспоненциального роста может оказаться некорректным. Эту мысль можно проиллюстрировать с помощью множества примеров, основанных на реальных историях, и я выбрал историю впечатляющего роста пассажиропотока авиакомпаний в США после 1950 года. В течение 1950-х годовой экспоненциальный рост составлял в среднем 11,1 %, а в 1960-х и 1970-х соответственно 12,4 и 9,4 %. График годовых показателей пассажирокилометров всех американских авиалиний в период между 1930 и 1980 годами представляет собой траекторию, почти идеально соответствующую регрессии четвертого порядка (полиномиальному уравнению четвертого порядка, где $r^2 = 0,9998$), и при продолжении этой модели роста показатели 1980 года к 2015 году выросли бы почти в 10 раз (рис. 1.6).

В реальности же пассажиропоток американских авиалиний пошел по траектории сокращения роста (в первом десятилетии XXI века средний годовой рост составил всего 0,9 %), а полный цикл с 1930 по 2015 год хорошо вписывается в логистическую (симметричную) кривую с четырьмя параметрами, где значение 2015 года всего в 2,3 раза выше по сравнению с 1980 годом, и дальнейший ограниченный прирост ожидается только к 2030 году (рис. 1.6). Принимать временные высокие темпы ежегодного экспоненциального роста за индикаторы будущего долгосрочного развития – фундаментальная ошибка, а также стойкая привычка, особенно свойственная тем, кто продвигает новые устройства, разработки или практики: они берут темпы роста на ранних стадиях, которые часто бывают впечатляющими, и используют их, чтобы спрогнозировать неизбежное господство развивающегося феномена.

Эту ошибку можно проиллюстрировать с помощью множества свежих примеров, и я выбрал пример роста мощности ветряных турбин Vestas, установок, ведущих к сдвигу в сторону декарбонизации глобального производства электричества. Этот датский производитель начал продавать машины мощностью 55 кВт в 1981 году, к 1989 году у него была турбина мощностью 225 кВт, в 1995 году была представлена машина мощностью 600 кВт, а в 1999 году появилась турбина мощностью 2 МВт. Наиболее подходящая кривая для траектории этого быстрого роста за последние двадцать лет XX века (логистическая кривая с пятью параметрами, где $R^2 = 0,978$) спрогнозировала бы к 2005 году модели турбин с мощностью почти 10 МВт и свыше 100 МВт к 2015 году. Но в 2018 году самый мощный агрегат Vestas для установки на суше производил всего 4,2 МВт, а самый большой, предназначенный для морских ветряных электростанций, – 8 МВт с возможностью увеличения до 9 МВт (Vestas, 2017a), а появление агрегата мощностью 100 МВт стало крайне маловероятным. Этот пример отрезвляющего контраста между быстрым ростом на ранних этапах развития технических инноваций и последующим неизбежным формированием сигмоидальных (S-образных) кривых стоит вспоминать каждый раз, когда вы слышите в новостях о том, что к 2025 году все машины будут электрическими или что к 2030 году появятся новые батареи с впечатляюще высокой энергоемкостью.

В тех случаях, когда экспоненциальный рост продолжается длительное время и ставит новые рекорды, окончательная, неотвратимая сила этой реальности может казаться неприменимой. Многим рационально мыслящим людям удавалось убедить себя – повторяя мантру «на этот раз все по-другому», – что результаты будут умножаться в течение длительного периода. Лучшие примеры этих, часто коллективных, заблуждений можно встретить в истории рыночных пузырей, и я довольно подробно опишу два особенно примечательных недавних события: рост экономики Японии до 1990 года и Новую экономику Америки 1990-х.

Экономический подъем Японии в 1980-х является одним из лучших примеров, которые нужно учитывать людям, желающим трезво воспринимать возможности экспоненциального роста. После роста в 2,6 раза в 1970-е годы Nikkei 225 (ведущий японский индекс фондового рынка и эквивалент американского Dow Jones Industrial) вырос на 184 % в период между январем 1981 и 1986 года, затем еще на 43 % в 1986 году, почти на 13 % в 1987 году, почти на 43 % в 1988 году и еще на 29 % в 1989 году (Nikkei 225, 2017). В период между январем 1981-го и декабрем 1989 года Nikkei 225 вырос более чем в пять раз, что соответствует среднегодовому экспоненциальному росту в 17 % за десять лет и 24 % за вторую половину. Одновременно ВВП Японии продолжал расти с годовым темпом более 4 %, и обменный курс йены укрепился с ¥239/US\$ в январе 1980 года до ¥143/US\$ к декабрю 1989 года.

Но должна была наступить отрезвляющая развязка, и в главе 6 я расскажу о том, что происходило после 1989 года. Но экспоненциальный рост легко вводит в заблуждение, и в 1999 году, через десять лет после того как Nikkei достиг своего пика, я размышлял об опыте, пережитом Японией, ожидая арендованную машину в аэропорту Сан-Франциско. Кремниевая долина переживала годы пузыря доткомов, и, даже зарезервировав машину заранее, приходилось ждать, пока только что возвращенные автомобили обслужат и снова выпустят в самую

гущу забитого Бэйшор-Фривей. Памятуя японский опыт, я думал, что каждый год после 1995-го мог быть последним периодом иррационального изобилия, как назвал его Алан Гринспен, но ни 1996-й, ни 1997-й, ни 1998-й не стали им. А многие экономисты заверяли американских инвесторов – даже с большей готовностью, чем десятью годами ранее, – что этот период экспоненциального роста отличается и что старые правила неприменимы к Новой экономике, в которой бесконечный быстрый рост будет продолжаться беспрепятственно.

В 1990-е Dow Jones Industrial Average – предположительно под влиянием Новой экономики – продемонстрировал самый высокий десятилетний рост в истории и поднялся со значения 2810 в начале января 1990 года до 11 497 в конце декабря 1999 года (FedPrimeRate, 2017). Эти показатели соответствуют годовому экспоненциальному росту в 14 % за десять лет с пиковыми значениями 33 % в 1995-м и 25 % в 1996 году. В продолжение этого роста к 2010 году уровень индекса достиг приблизительно 30 000. Nasdaq Composite Index, отражающий растущую мощь отрасли компьютерных технологий и коммуникаций (во главе с компаниями Кремниевой долины, стремительный рост капитализации которых был обусловлен биржевыми спекуляциями), продемонстрировал в 1990-х еще более высокие результаты: его экспоненциальный рост в среднем составил почти 26 % в год в период между апрелем 1991 года, когда он достиг отметки в 500 пунктов, и 9 марта 2000 года, когда он достиг 5046 пунктов (Nasdaq, 2017).

Даже обычно осторожные в высказываниях обозреватели были поражены. Джереми Сигел из Уортонской школы бизнеса не мог скрыть восхищения: «Это потрясает. Каждый год мы говорим, что более 20 % роста снова быть не может, – и снова получаем его. Я по-прежнему считаю, что нам нужно привыкать к более низкой, более нормальной прибыли, но кто знает, когда закончится эта полоса?» (Bebar, 1999). А энтузиасты зарабатывали деньги на оптовой продаже невозможного: один спрогнозировал, что Dow Jones достигнет отметки 40 000 (Elias, 2000), другой – что он неизбежно поднимется до 100 000 (Kadlec and Acampora, 1999). Но конец пришел, и опять-таки довольно быстро. К сентябрю 2002 года Dow Jones упал до отметки 9945 пунктов, почти на 40 % по сравнению с пиком 1999 года (FedPrimeRate, 2017), а к маю 2002 года Nasdaq Composite рухнул почти на 77 % по сравнению с пиком в марте 2000 года (Nasdaq, 2017).

Технический прогресс также иногда развивается по экспоненте и, как я покажу в главе 3, в некоторых случаях продолжается десятилетиями. Максимальная мощность паровых турбин является прекрасным примером долгосрочного экспоненциального роста. Чарльз Алджернон Парсонс запатентовал первую модель турбины в 1884 году и почти сразу же создал маленькую установку, которую можно видеть в холле Parsons Building в Trinity College в Дублине, с мощностью всего 7,5 кВт, но первая коммерческая турбина, начавшая вырабатывать электричество в 1890 году, была в 10 раз больше и имела мощность 75 кВт (Parsons, 1936).

В результате последующего быстрого роста к 1899 году появилась первая турбина мощностью 1 МВт, через три года – установка мощностью 2 МВт, в 1907 году – первая модель мощностью 5 МВт, и перед Первой мировой войной максимальная мощность турбины, установленной на станции Фиск-стрит Commonwealth Edison Co. в Чикаго, составила 25 МВт (Parsons, 1911). Между появлением первой коммерческой модели мощностью 75 кВт в 1890 году и установкой мощностью 25 МВт в 1912 году максимальная мощность паровых турбин Парсонса росла с экспоненциальной скоростью более 26 %, удваиваясь менее чем за три года. Это было значительно быстрее, чем рост мощности первых паровых двигателей в XVIII веке, когда Бенуа Фурнелон начал серийный выпуск первых моделей.

Иногда показатели растут экспоненциально благодаря не постоянному совершенствованию изначальной технологии, а серии инноваций, когда этап следующей инновации начинается там, где старая достигла своего предела: траектории индивидуального роста, несо-

менно, имеют S-образную форму, но огибающая кривая⁵ явно носит экспоненциальный характер. История электронно-лучевых трубок, которая кратко будет изложена в главе 4, является прекрасным примером экспоненциальной огибающей кривой, охватывающей почти век прогресса. В главе 4, посвященной росту артефактов, я подробно рассмотрю самый, пожалуй, известный случай современного экспоненциального роста, продолжавшегося 50 лет: рост числа транзисторов на кремниевой микросхеме, описанный законом Мура, согласно которому оно удваивается каждые два года.

И прежде, чем оставить тему экспоненциального роста, будет уместно упомянуть простое правило расчета периода удвоения значения, идет ли речь о раковых клетках, банковских счетах или вычислительной мощности компьютеров или, наоборот, расчете темпов роста с использованием известного времени удвоения. Точные результаты получаются путем деления натурального логарифма 2 (равного 0,693)⁶ на преобладающий темп роста (выраженный как доля от единицы, например 0,1 для 10 %), но довольно точный приблизительный результат можно получить, разделив 70 на темп роста, выраженный в процентах. Когда экономика Китая росла на 10 % в год, период удвоения составлял семь лет; и наоборот, удвоение числа компонентов на кремниевой пластине за два года предполагает годовой темп экспоненциального роста около 35 %.

Гиперболический рост

Неограниченный и, следовательно, на Земле только временный экспоненциальный рост не следует путать (как это иногда бывает) с гиперболическим ростом. Для экспоненциального роста характерно увеличение абсолютного темпа роста, однако он остается функцией по времени, приближенному к бесконечности. В отличие от него гиперболический рост достигает своей кульминации в абсурде (сингулярности), когда значение растущей переменной достигает бесконечности за конечный промежуток времени (рис. 1.7). Это конечное событие, конечно, невозможно в любых конечных пределах, и сдерживающая обратная связь в конечном счете окажет тормозящий эффект и прекратит гиперболический рост. Но, начавшись в низком темпе, гиперболические траектории могут развиваться в течение относительно длительных периодов времени, прежде чем их развитие остановится и сменится другой формой роста (или спада).

⁵ Огибающая кривая семейства кривых – линия, которая в каждой своей точке касается хотя бы одной кривой семейства и каждым своим отрезком касается бесконечного множества этих кривых. – *Прим. ред.*

⁶ На всякий случай напомним, что натуральный логарифм числа x – это показатель степени, в которую нужно возвести число e (иррациональная константа, равная приблизительно 2,72), чтобы получить x . – *Прим. ред.*

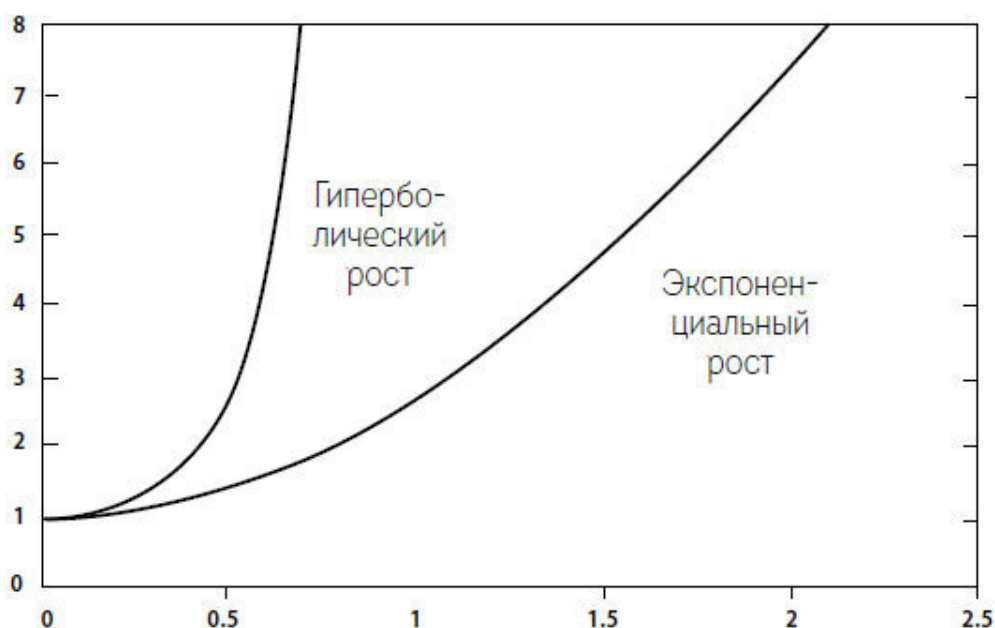


Рис. 1.7. Кривая гиперболического роста в сравнении с экспоненциальным ростом

Первым так называемую суперэкспансию – то есть ускоряющийся рост мирового населения благодаря ускоренной эволюции цивилизаций – отметил Анрэ Кайо: «... вполне естественно связывать суперэкспансию человечества с присутствием Духа?»⁷ (Cailleux, 1951, 70). Этот процесс соответствует квазигиперболическому уравнению: $P = a/(D - t)M$, где a , D и M являются константами. Мейер и Вали (Meyer and Vallee, 1975, 290) пришли к выводу, что рост населения «далек от “естественной” склонности к состоянию равновесия... демонстрирует уникальное свойство самоускорения».

Но такое возможно лишь на ограниченном временном промежутке, иначе число людей в конце концов достигло бы бесконечности. Фон Фёрстер и др. (von Foerster et al., 1960, 1291) рассчитали, что «пятница, 13 ноября 2026 года» станет Судным днем, когда «население приблизится к бесконечности, если будет расти, как росло за последние два тысячелетия». Очевидно, что это никогда не случится, и всего через несколько лет после того, как Фёрстер и его соавторы опубликовали свою работу, годовой рост мирового населения достиг пика, и начался переход к новой траектории.

Правда, Хёрн (Hern, 1999) доказывал, что рост мирового населения демонстрируют поразительные параллели с ростом раковой опухоли, так как некоторые виды рака также демонстрируют сокращение периода удвоения клеток во время самой агрессивной фазы. Начав отсчет 3 млн лет назад, он рассчитал, что к 1998 году население удваивалось 32,5 раза, а 33-й (когда оно достигнет 8,59 млрд) закончится в начале XXI века⁸. Если к антропомассе добавить биомассу домашних животных, то 33-е удвоение уже завершилось. Некоторые злокачественные опухоли вызывают смерть организма-хозяина после 37–40 удвоений, и (если предположить, что тенденция продолжится) 37-е удвоение населения будет достигнуто через несколько веков.

Анализ роста мирового населения Нильсена (Nielsen, 2015) показывает, что за последние 12 000 лет наблюдалось приблизительно три периода гиперболического роста: первый – между

⁷ В статье Кайо противопоставляет устойчивый рост популяций животных почти гиперболическому росту человеческой популяции – и если характеристики темпов роста популяций животных объяснимы рациональными причинами, то для объяснения феномена суперэкспансии Кайо понадобилось ввести иррациональный фактор – Дух. – Прим. ред.

⁸ На 2020 год население Земли достигло 7,753 млрд человек. – Прим. ред.

10 000 и 500 годами до н. э., второй – между 500 и 1200 годами н. э. и третий – между 1400 и 1950 годами. На эти три периода пришлось около 89 % всего роста за последние 12 тысяч лет. Во время первых двух переходных периодов (с 500 года до н. э. по 500 год н. э. и 1200–1400) происходило значительное замедление роста народонаселения, и кривая этого роста далеко уходила от гиперболической траектории. Траектория же сегодняшнего переходного периода еще неизвестна: увидим ли мы сравнительно быстрое выравнивание и последующее длительное плато или пик, за которым последует значительный спад? О траекториях роста населения будет сказано больше в главах 5 и 6.

Существует еще один класс примечательных примеров антропогенного гиперболического роста, который отмечают многие авторы, изучающие ускоренное развитие. У этих работ длинная история: впервые они появились во второй половине XIX века (Lubbock, 1870; Michelet, 1872), а в XX веке их дополнили работы Генри Адамса, французских историков 1940-х годов и (начиная с 1950-х) многих американских историков, физиков, специалистов в области техники и информатики. Адамс писал о законе ускорения (Adams, 1919) и «законе фазы применительно к истории», согласно которым человеческое мышление предельно и интеллект в конце концов должен достичь предела своих возможностей (Adams, 1920)⁹. Мейер (Meyer, 1947) и Галеви (Halévy, 1948) писали об *ускорении эволюции* и об *ускорении истории*. Основной вклад в американскую волну с разных точек зрения внесли Фейнман (Feynman, 1959), Мур (Moore, 1965), Пил (Piel, 1972), Моравец (Moravec, 1988), Корен (Coren, 1998) и Курцвейл (Kurzweil, 2005).

Многие из работ этих авторов или подразумевают, или явно говорят о наступлении сингулярности, когда развитие искусственного суперинтеллекта достигнет такого уровня, что превратится в беспрецедентный неконтролируемый процесс. Подразумевается, что искусственный интеллект не только превзойдет человеческие возможности (вообразимые), но также приблизится по скорости обработки информации к мгновенной скорости физических изменений. Очевидно, что подобные достижения кардинальным образом изменят нашу цивилизацию. Адамс предсказывал (как он понимал ее, то есть исключая вычислительные измерения) наступление сингулярности в период между 1921 и 2025 годами (Adams, 1920). Корен (Coren, 1998) откладывал ее до 2140 года, а последние прогнозы Курцвейла, касающиеся момента, когда машины, работающие с помощью искусственного интеллекта, возьмут верх над людьми, относятся к 2045 году (Galleon and Reedy, 2017). Пока мы (как утверждают многие из этих авторов) неумолимо движемся к этой фантастической ситуации, сторонники ускоренного, то есть гиперболического, роста приводят другие его примеры, разворачивающиеся на наших глазах. Среди них чаще всего называют способность человечества обеспечивать продовольствием растущее население, использовать еще более мощные способы преобразования энергии или путешествовать на еще более высоких скоростях. Это отображается в виде последовательности логистических кривых, феномена, хорошо описанного Дерекком Джоном де Соллой Прайсом (Derek J. de Solla Price, 1963, 21):

Каждое новое осознанное ограничение вызывает восстановительную реакцию... Если реакция успешна, ее ценность обычно настолько трансформирует измеряемое явление, что оно обретает вторую жизнь и поднимается с новой силой, пока наконец не встретит свою гибель. Поэтому встречаются два варианта традиционной логистической кривой, более частые, чем простая S-образная интегральная кривая распределения. В обоих случаях вариант возникает во время перегиба, предположительно

⁹ Адамс воспринимал историю через собственную интерпретацию второго закона термодинамики и закона энтропии применительно к общественным процессам. Он полагал, что в процессе развития общество стремится к «равновесию» как к предельному состоянию, в котором развитие останавливается, достигнув наивысшей точки. – *Прим. ред.*

в тот момент, когда лишения, связанные с потерей экспоненциального роста, становятся невыносимыми. Если небольшое изменение определения измеряемого явления позволяет считать это явление новым наравне со старым, то новая логистическая кривая, как феникс, возрождается из пепла старой...

Мейер и Валли (Meyer and Vallee, 1975) доказывали, что феномен логистического расширения или ускоренного роста недооценивается и что скорее гиперболический, чем экспоненциальный, рост довольно распространен, если рассматривать технический прогресс в долгосрочном плане. Их примеры гиперболического роста включают как число людей, которые могут прокормиться с участка земли, так и рост максимальной мощности первичных двигателей, скорости путешествий и максимальной эффективности методов преобразования энергии. Историческая траектория роста отдельных явлений описывается S-образными кривыми (логистическими или другими, с характерными для них асимптотами¹⁰), но огибающая кривая последовательных приростов делает всю последовательность роста временно гиперболической. Как и Прайс, Мейер и Валли (Meyer and Vallee, 1975, 295) рассматривали этот процесс передачи эстафеты как автоматическую последовательность: «как только машина достигает потолка производительности, другая, с качественно отличающейся технологией, подхватывает эстафету у предыдущей и превосходит ее предельный результат, в результате чего создается эффект поддержания ускорения количественной переменной».

Однако при более пристальном взгляде становится понятно, что реальность несколько сложнее.

Пищи, добытой первыми собирателями и охотниками, хватало всего на 0,0001 человека с гектара земли. В более благоприятных условиях это число достигало 0,002 человека/га. Переход к производящему сельскому хозяйству поднял плотность на два порядка, до 0,2–0,5 человека с гектара. Первые государства, где практиковалось интенсивное земледелие (Месопотамия, Египет, Китай), подняли этот показатель до 1 человека с гектара. Лучшие традиционные методы агрокультуры XIX века в таких интенсивно возделываемых регионах, как южный Китай, позволяли прокормить более 10 человек с гектара, обеспечивая в среднем гораздо лучшее питание, чем ранее (Smil, 2017a).

Но эта последовательность не описывает строго распределенное во времени универсальное эволюционное движение, так как во многих регионах собирательство тысячелетиями сосуществовало с оседлым земледелием (и существует по сегодняшний день: вспомним сбор трюфелей и охоту на кабанов в Тоскане). Переложное земледелие¹¹ практиковалось даже в некоторых частях Европы (Скандинавия, Россия) еще в XX веке и по-прежнему кормит миллионы семей в Латинской Америке, Африке и Азии, а такие гибридные методы, как агропасторализм¹², по-прежнему распространены там, где они помогают сократить риск чрезмерной зависимости от растениеводства.

И, очевидно, что даже если сажаются лучшие семена, а растения получают оптимальное питание, влагу и защиту от сорняков и вредителей, максимальный урожай по-прежнему ограничен интенсивностью освещения, продолжительностью вегетационного периода, морозостойкостью и уязвимостью перед множеством природных катаклизмов. Как я продемонстрирую в

¹⁰ Асимптота – прямая, расстояние до которой от точки описанной возле нее кривой стремится к нулю при удалении точки вдоль ветви в бесконечность. Классический пример асимптот – координатные оси (оси абсцисс и ординат) для гиперболической кривой. Асимптотический минимум – значение, максимально близкое к предельно низкому (нулю); асимптотический максимум – значение, максимально приближенное к наивысшему. – *Прим. ред.*

¹¹ Переложное земледелие – экстенсивный вид сельского хозяйства, при котором поле возделывается до тех пор, пока оно сохраняет плодородие. После этого оно забрасывается и распаивается следующий участок. Один из древнейших видов такого земледелия – подсечно-огневое. – *Прим. ред.*

¹² Агропасторализм – сочетание растениеводства и животноводства, практикуемое среди оседлых, кочевых и полукочевых сообществ. – *Прим. ред.*

главе 2 (в разделе, посвященном росту сельскохозяйственных культур), во многих регионах, где прежде наблюдался рост производительности, теперь она сократилась, несмотря на активное применение удобрений и усиленную ирригацию, а динамика урожайности отражает минимальный прирост или откровенный застой. Ясно, что универсального, суперэкспоненциального роста урожайности не существует. Человеческий гений добился множества впечатляющих результатов, когда ему не нужно было считаться со сложностями организмов, чей жизненный цикл определяется разнообразными ограничениями среды. Технический прогресс демонстрирует лучшие примеры самоускоряющегося развития, за которым следуют траектории гиперболического роста, и максимальная удельная мощность первичных двигателей и скоростей перемещения являются точно задокументированными иллюстрациями.

Максимальная удельная мощность современных первичных двигателей (первичных источников механической энергии) в начале XVII века составляла 1000 Вт у паровых двигателей. Им на смену пришли водяные турбины (между 1850 и 1900 годами), а затем показатели мощности поднялись до рекордных более 1 ГВт у паровых турбин (рис. 1.8).

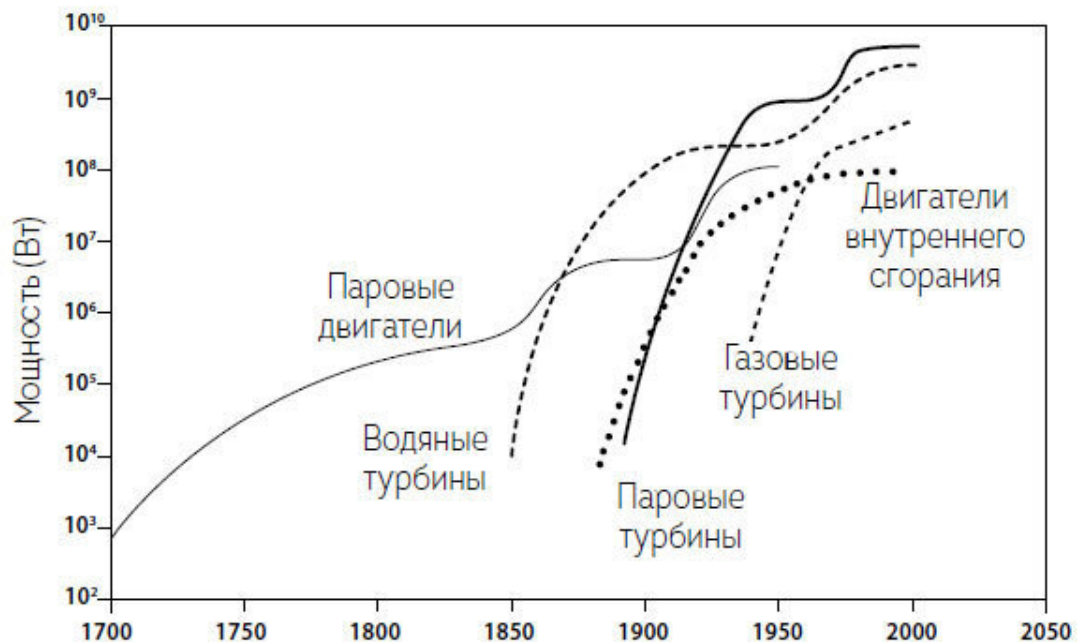


Рис. 1.8. Эстафетный рост мощности самых крупных стационарных первичных двигателей (Smil, 2017b). Пересекающийся логистический рост номинальных мощностей паровых двигателей, водяных турбин и паровых турбин дает временный гиперболический рост на семь порядков за 300 лет

Картину можно расширить, включив в нее ракетные двигатели, использовавшиеся только в течение коротких периодов времени: мощность ракеты Saturn C 5, осуществлявшей полет «Аполлона» на Луну, составляла около 2,6 ГВт (Tate, 2012). Аналогично максимальная скорость передвижения возросла со скорости человеческого бега (10–12 км/ч – скорость гонцов) и скорости всадников (средняя скорость 13–16 км/ч) до скорости парусных судов (клиперы середины XIX века в среднем развивали скорость около 20 км/ч, а максимальная достигала 30 км/ч), поездов (максимум около 100 км/ч до 1900 года) и пассажирских самолетов на поршневых двигателях (чья скорость возросла с 160 км/ч в 1919 году до 550 км/ч в 1945 году) и, наконец, реактивных самолетов (более 900 км/ч с конца 1950-х годов).

В обоих случаях ускоряющийся рост был достигнут за счет феномена эстафеты, когда накладывающиеся друг на друга логистические (самоограничивающие) кривые дают впечатля-

ющую восходящую огибающую кривую. Очевидно, что эстафета не может продолжаться бесконечно, так как в конце концов приведет к невозможно высоким темпам роста, будь то удельная мощность или скорость... Как и в случае с мировым населением, временная гиперболическая огибающая кривая в конце концов трансформируется в логистическую траекторию. Можно сказать, что это уже произошло, если рассматривать технический прогресс с практической, реалистичной точки зрения, а не как последовательность максимальных показателей.

Очевидно, что построение огибающей кривой максимальной скорости с помощью накладываемых друг на друга логистических кривых скорости лошадей, парусников, поездов, автомобилей, самолетов и ракет демонстрирует прогресс видов транспорта, которые не являются последовательно заменяемыми. Массовый городской транспорт эволюционировал от конных экипажей до моторизованных дорожных транспортных средств и подземных поездов, но мы не будем передвигаться по городу на реактивных самолетах. Верно как раз обратное, поскольку средняя скорость городского движения с 1960-х годов сократилась почти во всех крупных городах, и ее удвоение невозможно, даже если каждое транспортное средство будет частью синхронизированной, автоматизированной городской системы (если только не убрать в городах все перекрестки, что невозможно с точки зрения инфраструктуры существующих городов). Средняя скорость скоростных поездов возросла лишь незначительно с момента первого запуска в 1964 году и, опять-таки, вероятнее всего, миллиарды людей, пользующихся поездами, не будут путешествовать на сверхзвуковых скоростях.

Типичная скорость крупных контейнерных судов (30–40 км/ч) ненамного превышает типичную скорость клиперов XIX века. Конечно, их грузоподъемность на несколько порядков выше, но скорость морских перевозок не испытала гиперболического роста, и не существует реалистичных перспектив, что этот основополагающий вид транспорта, сделавший возможным современную экономическую глобализацию, войдет в новый век с радикально повысившейся скоростью. Эксплуатационная скорость последнего самолета Boeing 787 (913 км/ч) почти на 7 % ниже, чем у первого гражданского реактивного самолета Boeing 707, выпущенного в 1958 году (977 км/ч). И перспектива миллиардных авиапассажирских перевозок на сверхзвуковых скоростях также отсутствует. Кажущаяся гиперболической огибающая кривая максимальных показателей на деле мало что говорит нам о реальных траекториях скоростей, создавших современную экономику путем передвижения миллиардов людей и миллиардов тонн сырья, продуктов питания и потребительских товаров.

То же самое неизбежно верно для других огибающих кривых растущих технических возможностей. Самые большие ракеты могут производить гигаватты энергии за очень короткий период старта, но это не имеет отношения к мощности великого множества машин, работающих на благо современной цивилизации. Большинство электродвигателей в нашей технике имеет мощность меньше, чем может обеспечить хорошо взнузданная лошадь: стиральным машинам нужно 500 Вт, а откормленная лошадь легко дает 800 Вт. Типичная или условная мощность паровых турбин в крупных электростанциях остается стабильной с 1960-х годов: на новых угольных или газовых электростанциях преобладают установки мощностью 200–600 МВт, а турбогенераторы мощностью 1 Гвт используются в основном на более крупных атомных электростанциях. И мощность типичных автомобилей немного выросла лишь потому, что они стали тяжелее, а не потому, что им нужно больше мощности, чтобы доехать от одного светофора до другого или поддерживать разрешенную скорость на автострате – для равномерной езды со скоростью 100 км/ч по ровной дороге достаточно силы тяги приблизительно в 11 кВт/ч на тонну массы автомобиля (Besselink et al., 2011). И снова синтетическая восходящая траектория состоит из несопоставимых прогрессий, не подразумевающих единообразной тенденции к постоянному росту замещающих феноменов.

В истории существует достаточно примеров технических достижений, не демонстрирующих автоматического, строго последовательного ускорения показателей. Сталевары пользова-

лись мартеновскими печами почти век после того, как довели их применение до совершенства, а проводной дисковый телефон мало изменился со времен своего появления в 1920-х годах и внедрения кнопочных моделей в 1963 году (Smil, 2005; 2006b). И перспективы долгосрочной траектории любого гиперболического роста на Земле не вызывают сомнений: он должен либо прекратиться, либо перейти в ограниченную прогрессию, которая может стать частью гомеостатического сосуществования человека и биосферы, включая конечный верхний предел содержания информации во внешней памяти (Dolgonosov, 2010).

Модели ограниченного роста

В первую очередь это траектории жизни: биосферная масса перерабатываемых питательных веществ допускает невероятное разнообразие видовых генетических выражений и мутаций, но ставит фундаментальное ограничение на производительность первичной продукции (фотосинтеза) и, следовательно, на накопление вторичной продукции (гетеротрофного метаболизма разнообразных организмов от микробов до самых крупных млекопитающих). Эти ограничения проявляются в процессе внутри- и межвидовой конкуренции микроорганизмов, растений и животных за ресурсы путем хищничества и вирусной, бактериальной и грибковой инфекции, и все многоклеточные организмы имеют внутренние пределы роста, обусловленные апоптозом – запрограммированной гибелью клеток (Green, 2011).

Ни одно дерево не растет до небес, как и ни один артефакт, структура или процесс; и модели ограниченного роста характеризуют развитие машин и технических возможностей так же, как описывают рост населения и расширение империй. Все процессы распространения и внедрения неизбежно должны соответствовать этой модели: не важно, быстрый или медленный рост демонстрирует траектория на начальном этапе – в конце концов за ним последует значительное замедление темпов роста по мере того, как процесс асимптотически приближается к насыщению и часто достигает его (иногда после многих десятилетий распространения) всего за несколько процентов, даже за доли процентов до максимума. В 1880 году ни в одном доме не было электричества, но сколько зданий в городах Запада не подключено к электричеству сегодня?

Учитывая распространенность феноменов, демонстрирующих ограниченный рост, неудивительно, что многие исследователи стремились вписать их в разнообразные математические функции. Два основных класса траекторий ограниченного роста включают S-образный (сигмоидальный) и ограниченный экспоненциальный рост. В десятках работ даны описания оригинальных производных и последующих модификаций этих кривых. Они рассмотрены в обширных обзорах (Banks, 1994; Tsoularis, 2001), а лучший обзор, пожалуй, приведен в таблице S1 у Мирвольда (Myhrvold, 2013), где систематически сравниваются уравнения и ограничивающие условия для более 70 нелинейных функций роста.

S-образный рост

S-образные функции описывают множество естественных процессов роста, а также внедрение и распространение инноваций, будь то новые промышленные методы или потребительские товары. Изначально медленный рост ускоряется в точке нижнего изгиба, за которым следует быстрый подъем, темп которого в конце концов замедляется, формируя второй изгиб, за которым следует замедленный подъем, так как рост становится минимальным и значения приближаются к максимальной границе конкретного параметра или к полному насыщению рынка. Наиболее известная и распространенная функция с S-образной траекторией описывает логистический рост.

В отличие от экспоненциального (неограниченного) роста, увеличение темпа которого пропорционально текущему значению, относительное приращение логистического (ограниченного) роста уменьшается по мере приближения растущего значения к максимально возможному уровню, который в экологических исследованиях обычно называют предельной нагрузкой. Подобный рост интуитивно кажется нормальным:

Обычно население медленно растет с асимптотического минимума, затем быстро множится и медленно движется к нечетко определенному

асимптотическому максимуму. Два конца кривой роста населения в целом определяют всю кривую между ними: чтобы так начаться и так закончиться, кривая должна пройти через точку перегиба, это должна быть S-образная кривая (Thompson, 1942, 145).

Формальное определение логистической функции восходит к 1835 году, когда Адольф Кетле (1796–1874; рис. 1.9), бельгийский астроном и в то время ведущий статистик Европы, опубликовал революционную работу под названием *Sur l'homme et le développement de ses facultés, ou Essai de physique sociale* («О человеке и развитии его способностей, или Эссе по социальной физике»), где отметил невозможность продолжительного экспоненциального роста любого населения (Quetelet, 1835).

Кетле предположил, что силы, противоположные неограниченному развитию и росту населения, возрастают пропорционально квадрату скорости, с которой оно возрастает, и попросил своего ученика, математика Пьера Франсуа Ферхюльста (1804–1849; рис. 1.9), дать формальное решение и затем применить его к лучшим доступным статистическим данным. Ферхюльст согласился и сформулировал первое уравнение, выражающее ограниченный рост населения в короткой публикации в альманахе *Correspondance Mathématique et Physique* («Работы по математике и физике») (Verhulst, 1838; перевод на английский язык опубликован Vogels et al., 1975). Логистическая модель описана с помощью дифференциального уравнения

$$\frac{dN}{dt} = \frac{rN(K - N)}{K}$$

где r – скорость максимального роста, а K – максимально достижимая величина, известная в исследованиях экологии и населения как предельная нагрузка.

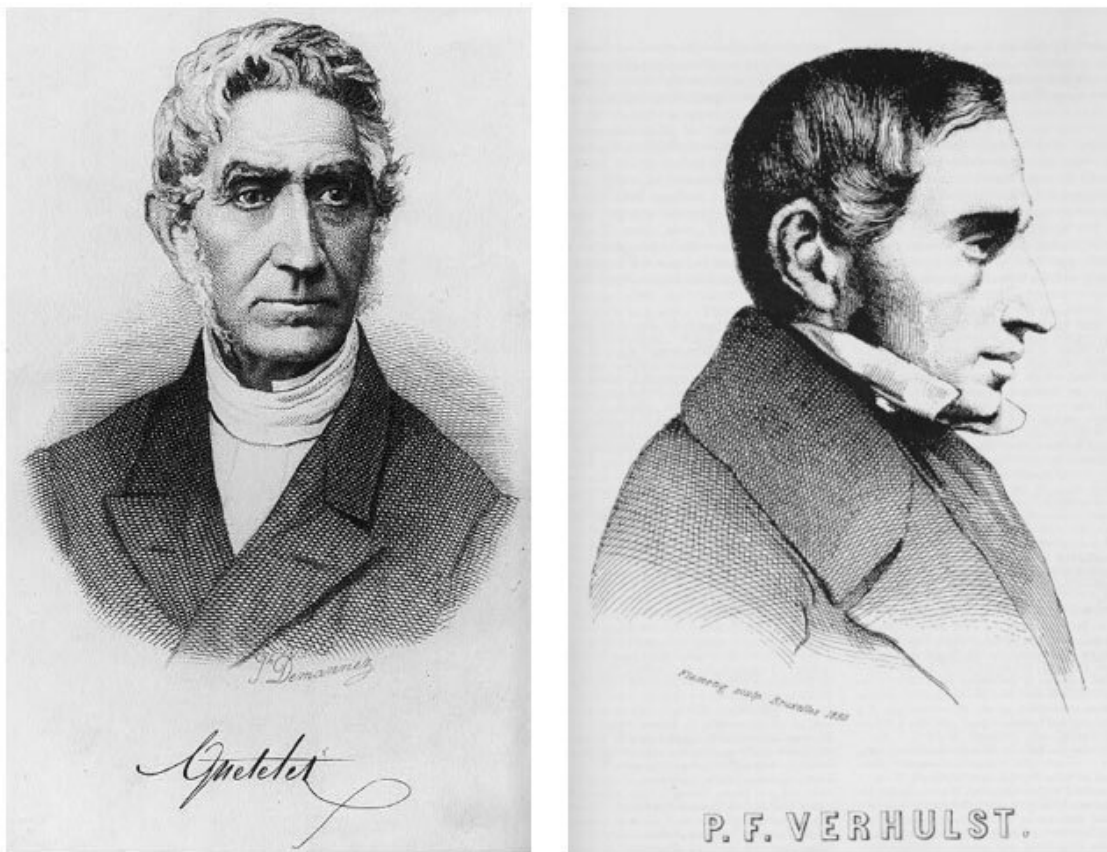


Рис. 1.9. Адольф Кетле и Пьер Франсуа Ферхюльст. Гравюра на стали из коллекции изображений XIX века, принадлежащей автору

Чтобы проверить возможность применения уравнения роста, Ферхюльст сравнил ожидаемые результаты с относительно короткими периодами данных переписей населения во Франции (1817–1831), Бельгии (1815–1833), графстве Эссекс (1811–1831) и России (1796–1827), и хотя он обнаружил «очень точное» совпадение с данными по Франции, он сделал верный вывод (учитывая малый объем данных), что «только будущее откроет нам истинный образ действий сдерживающей силы...» (Verhulst, 1838, 116). Семь лет спустя в более объемной работе он решил «назвать кривую *логистической*» (Verhulst, 1845, 9). Он никогда не объяснял, почему назвал ее именно так, но в период его жизни термин использовался во Франции для обозначения искусства вычислений в целом; возможно, также он использовал слово «логистический» в военном значении (управление резервами), подразумевая арифметическую стратегию (Pastijn, 2006).

В своей второй работе Ферхюльст иллюстрировал логистическую кривую, сравнивая ее с экспоненциальным (*логарифмическим*) ростом (рис. 1.10). В первой части логистической кривой *нормальное население* растет экспоненциально, только когда возделываются плодородные земли, а затем наступает замедление роста. Относительный темп роста сокращается с ростом населения, точка перегиба (в которой темп роста достигает своего максимума) всегда находится на полпути от верхнего предела, и в конце концов *избыточное население* достигает своего максимума. Моментальный темп роста логистической функции (ее производной относительно времени) распределяется нормально, достигая пикового значения в точке перегиба кривой (рис. 1.11). Более высокие темпы роста дадут более крутые кривые роста, достигающие максимального значения быстрее (кривая будет ограничена горизонтально), в то время как более низкие темпы роста дадут кривые, вытянутые по горизонтали.

В своей работе 1845 года Ферхюльст утверждал, что увеличение дальнейшего роста населения будет пропорционально размеру избыточного населения (*population surabondante*), и когда он использовал функцию роста для определения пределов размера населения Бельгии и Франции, то установил отметки на уровне 6,6 млн и 40 млн соответственно, которые будут достигнуты до конца XX века. Но в своей последней работе на тему роста населения он пришел к выводу, что препятствия к росту населения пропорциональны отношению между избыточным населением и общим населением (Verhulst, 1847). Это изменение дало более высокое значение конечного населения, или, как позже стали называть его асимптотическое значение, более высокий показатель *предельной нагрузки* (Schtickzelle, 1981).

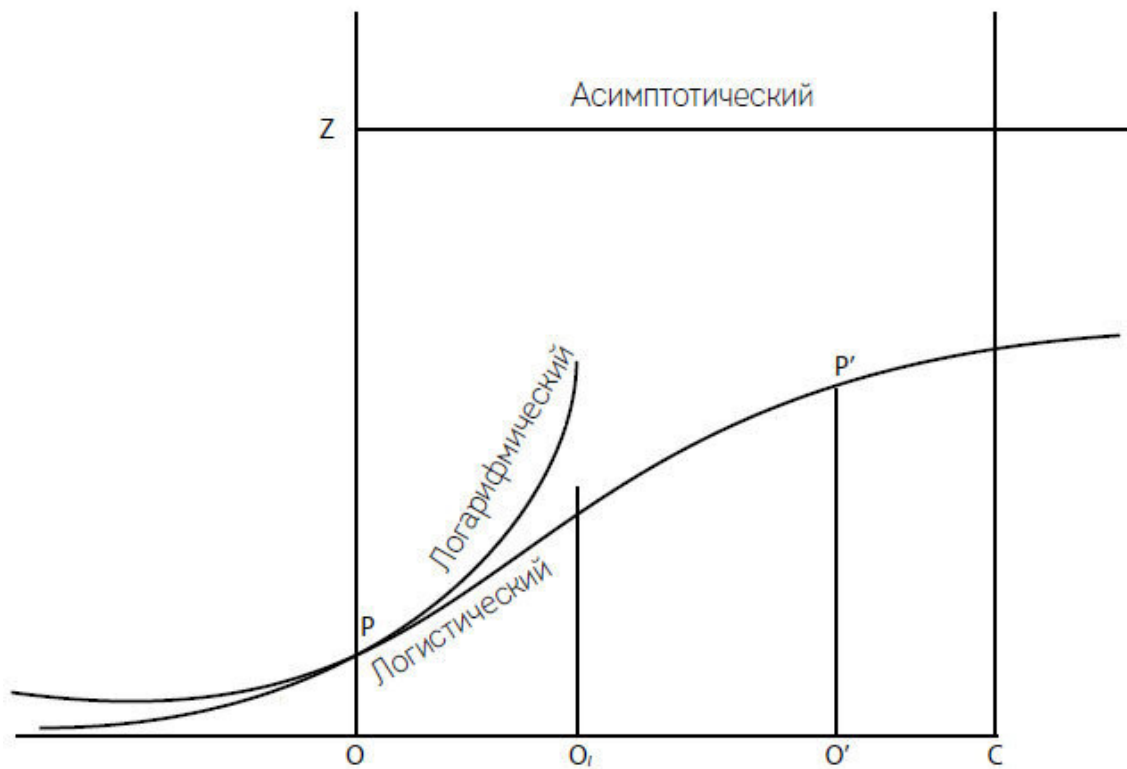


Рис. 1.10. Сравнение логистической и логарифмической (экспоненциальной) кривых Ферхюльста (1845)



Рис. 1.11. Качественные характеристики логистического роста

По сути, уравнение Ферхюльста отражает смену доминирования (или, математически говоря – мажорирования) между двумя циклами обратной связи: цикл позитивной обратной связи (FBL) инициирует рост, который в конце концов замедляется и уравнивается негативной обратной связью, отражающей пределы роста, преобладающие в ограниченном мире. Как выразился Кунш (Kunsch, 2006, 35), логистический рост «описывается как сочетание экспоненциального роста, выраженного в (+) FBL, и целенаправленного роста, выраженного в (—) FBL». В этом смысле функцию Ферхюльста с двумя циклами обратной связи, конкурирующими за доминирование, можно рассматривать как основу динамики систем, базирующихся на обратной связи, разработанную Джейм Форрестером из Массачусетского технологического института в 1950-е и 1960-е годы (Forrester, 1971) и примененную в исследовании под названием «Пределы роста», поддержанном Римским клубом (Meadows et al., 1972).

Эта ключевая систематическая концепция ограниченного роста (высокая плотность организмов является непосредственным сдерживающим фактором, а доступность ресурсов – сложной причинной движущей силой) полезна при концептуализации многих природных, социальных и экономических достижений, включая серии обратной связи, но ее механическое применение может вызывать серьезные ошибки. Оригинальные прогнозы роста населения, сделанные Ферхюльстом, представляют собой первые примеры таких ошибок, так как максимальные значения населения не предопределяются какой-либо конкретной функцией роста, а зависят от изменения производственного потенциала страны и в конечном счете всей планеты с помощью научного, технического и экономического прогресса. Сколько можно поддерживать эти максимальные значения на высоком, развивающемся уровне – другой вопрос. Ферхюльст в конце концов увеличил прогнозируемый размер населения Бельгии к 2000 году с 6,6 млн до 9,5 млн человек, но к концу XX века население Бельгии и Франции составляло 10,25 млн и 60,91 млн человек соответственно, то есть для Бельгии было приблизительно на 8 % выше скорректированного Ферхюльстом максимума, а для Франции ошибка составляла 52 %.

Во второй половине XIX века наблюдался всплеск демографических и экономических исследований, однако работу Ферхюльста игнорировали, и она была обнаружена только в 1920-е годы, а влияние приобрела в 1960-х годах (Cramer, 2003; Kint et al., 2006; Васаёг, 2011). Это не единственный пример подобного забвения: фундаментальные эксперименты Грегора Менделя в области генетики растений, проводившиеся в 1860-х годах, также игнорировались в течение почти полувека (Henig, 2001). Можно ли объяснить пренебрежение работами Ферхюльста сомнениями Кетле в ценности вклада его учеников, высказанными в надгробной речи, посвященной преждевременной смерти Ферхюльста в 1849 году? Удни Юл предлагает более правдоподобное объяснение: «Вероятно, в силу того, что Ферхюльст значительно опередил свое время и что существовавшие тогда данные не подходили для того, чтобы эффективно проверить его взгляды, они были преданы забвению, но остаются классикой в этой области» (Yule, 1925a, 4).

Следующее появление логистической функции (без использования этого названия) было связано с количественным выражением прогресса аутокаталитических реакций в химии. Если катализ обозначает повышающуюся скорость химической реакции, что вызвано присутствием дополнительного элемента (в частности, какого-либо тяжелого металла) или сложного вещества (часто в ничтожных количествах), то аутокатализ означает реакцию, ускоряющуюся за счет собственных результатов. Аутокаталитические процессы – реакции, демонстрирующие ускорение темпов роста как функцию от времени, за которым следует насыщение, – необходимы для роста и поддержания живых систем, и без них абиотические химические факторы не смогли бы привести к репродукции, обмену веществ и эволюции (Plasson et al., 2011; Virgo et al., 2014).

После того как Вильгельм Оствальд (1853–1932, ведущий химик времен до Первой мировой войны) представил данную концепцию в 1890 году (Ostwald, 1890), стало быстро понятно, что процесс развивается в соответствии с логистической функцией: концентрация одного реагента повышается по сравнению с начальным уровнем, сначала медленно, потом быстрее, но затем, с учетом ограниченного количества другого реагента, процесс замедляется, а концентрация второго реагента постепенно уменьшается до нуля. В 1908 году Брейлсфорд Робертсон (1884–1930), австралийский физиолог из Калифорнийского университета, отметил, что, если сравнить кривую мономолекулярной аутокаталитической реакции с кривой роста массы тела самцов белых крыс, «схожесть между кривой роста и кривой аутокаталитической реакции сразу становится очевидной» (рис. 1.12) – но сравнение кривой аутокаталитической мономолекулярной реакции с кривой роста массы тела мужчины показало, что вторая из этих траекторий имеет две совмещенные кривые (Robertson, 1908, 586).

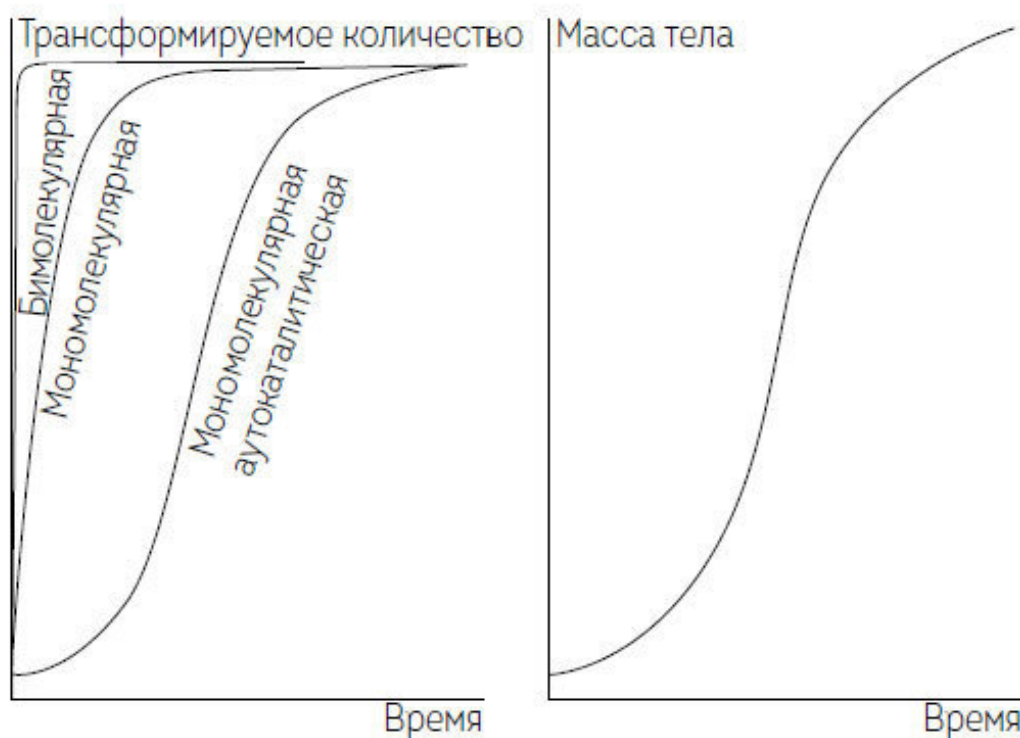


Рис 1.12. Сравнение Робертсоном (Robertson, 1908) прогресса аутокаталитической реакции и увеличения массы тела самцов белой крысы

Обе кривые являются сигмоидальными, но Робертсон не упомянул Ферхюльста. Три года спустя Маккендрик и Кесава Паи (McKendrick and Kesava Pai, 1911) использовали эту функцию, снова не называя имени Ферхюльста, для изображения роста микроорганизмов, а в 1919 году Рид и Холланд (Reed and Holland, 1919) сослались на Робертсона (Robertson, 1908), но не использовали термин «логистическая» в своей кривой роста подсолнечника. Этот пример роста растений позже стал широко цитироваться в биологической литературе, посвященной теме роста.

Наблюдаемый рост в высоту подсолнечника (*Helianthus*) в период между посадкой и 84-м днем очень близко соответствует логистической функции с четырьмя параметрами, где точка перегиба приходится на 37-й день (рис. 1.13).

В 1920 году логистическая функция снова появилась в демографии, когда Реймонд Перл и Лоуэлл Рид, профессора Университета Джонса Хопкинса, опубликовали работу, посвященную росту населения США (Pearl and Reed, 1920), но только два года спустя они кратко признали первенство Ферхюльста (Pearl and Reed, 1922). Во многом как и Ферхюльст в середине 1840-х годов, Перл и Рид использовали логистическую функцию, чтобы вычислить максимальный размер населения США, который сможет прокормить сельское хозяйство страны (Pearl and Reed, 1920, 285):

Верхняя асимптота... имеет значение приблизительно 197 274 000. Это означает, что... максимальное население, которое будут иметь континентальные США при текущем ограничении площади, будет приблизительно вдвое выше нынешнего. Мы боимся, что некоторые осудят всю теорию, потому что это число недостаточно внушительно. Рассчитать население с помощью геометрической прогрессии (и большинство авторов работ на тему населения склоняются к этому) или с помощью параболы или другой чисто эмпирической кривой и прийти к

таким изумляющим цифрам настолько легко, что спокойно осмыслить реальную вероятность этого будет крайне сложно.

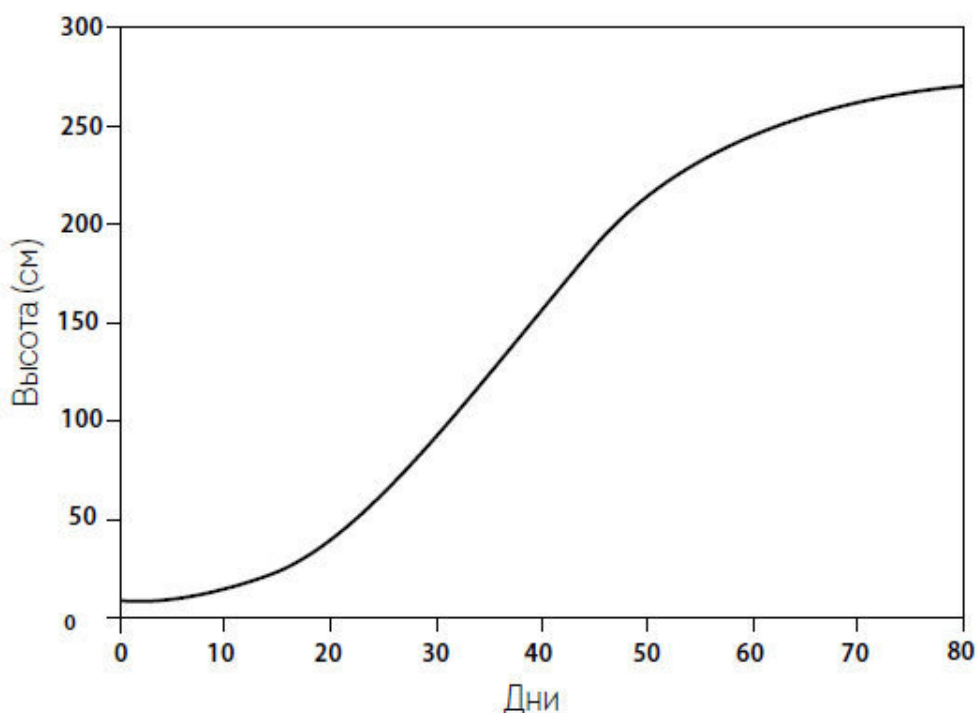


Рис. 1.13. Логистический рост (точка перегиба на 37,1-й день, асимптота на уровне 292,9 см) растения подсолнечника, изображенный Ридом и Холландом (Reed and Holland, 1919)

Как в случае с максимальными цифрами населения Ферхюльста для Бельгии и Франции, Перл и Рид также недооценили приемлемый максимум населения США. К 2018 году оно превысило 325 млн, что почти на 65 % больше их расчетов максимальной предельной нагрузки (рис. 1.14) – даже с учетом того, что 40 % урожая кукурузы, крупнейшей сельскохозяйственной культуры США, перерабатывают в этиловый спирт и страна является крупнейшим в мире экспортером продуктов питания. Но Перл не сомневался в прогностической силе своего уравнения: в 1924 году он «скромно» сравнил кривую с законом движения планет Кеплера и законом о газах Бойля (Pearl, 1924, 585).

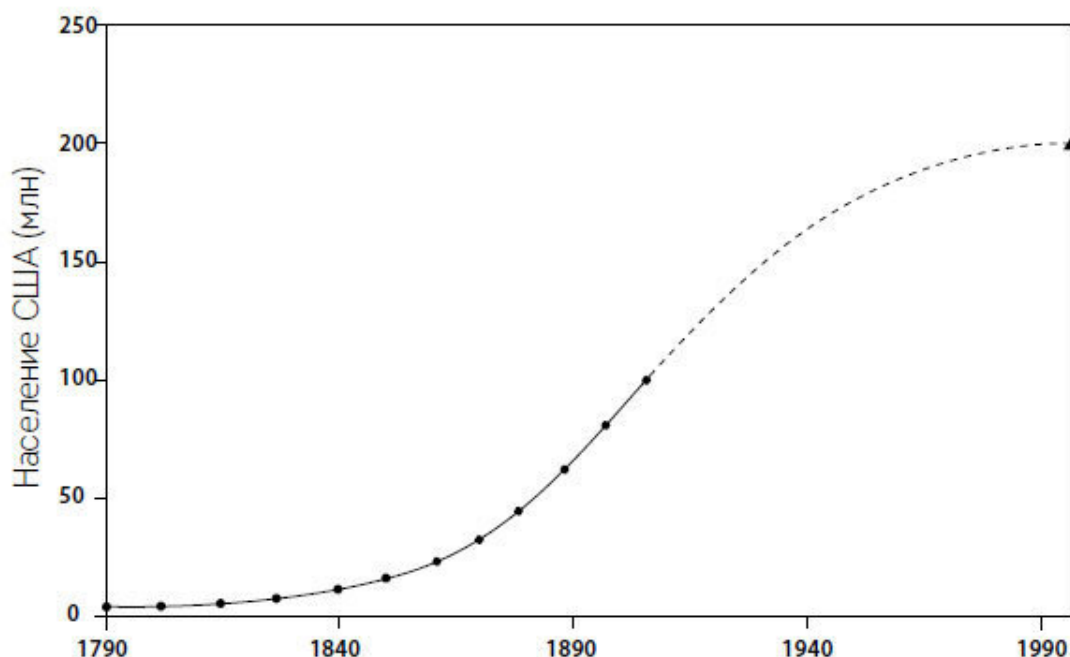


Рис. 1.14. Прогноз роста населения США на основе логистической кривой (точка перегиба в 1919 году, асимптота на уровне 197,3 млн), согласованный с переписью населения, проводившейся раз в десять лет в период между 1790 и 1910 годами (Pearl and Reed, 1920)

Применение функции логистического роста начало распространяться. Робертсон использовал информацию о росте молочных коров, домашней птицы, лягушек, однолетних растений и фруктовых деревьев в своем объемном исследовании под названием *The Chemical Basis of Growth and Senescence* («Химические основы роста и старения») (Robertson, 1923). Год спустя Спилман и Ланг (Spillman and Lang, 1924) подробно изложили Закон убывающего плодородия, приведя множество количественных описаний ограниченных темпов роста. Рид и Берксон (Reed and Berkson, 1929) применили логистическую функцию к нескольким бимолекулярным реакциям и протеолизу гелеобразования с помощью панкреатина, а Блисс (Bliss, 1935) использовал ее для расчета кривой зависимости смертности вредителей от дозировки пестицидов. И в течение двадцати лет до Второй мировой войны Перл и его коллеги применяли логистическую кривую «к популяциям почти всех живых существ от плодовых мушек до населения французских колоний в Северной Африке, а также росту дынь канталуп» (Cramer, 2003, 6).

В 1945 году Харт опубликовал всестороннее исследование логистических социальных тенденций со множеством примеров, поделенных на серии, отражающие рост конкретных социальных единиц (населения, городов, урожая, производства и потребления промышленных продуктов, выдачи патентов на изобретения, длины железных дорог), распространение конкретных культурных явлений (охват детей школьным образованием, владение автомобилями, социальные и гражданские движения) и так называемые индексы социальной эффективности, включая продолжительность жизни, рекорды скорости и доход на душу населения (Hart, 1945). В течение двадцати лет после окончания Второй мировой войны наблюдался быстрый рост населения и экономический рост, вызванный расширением технических возможностей. В тот период преобладали многочисленные примеры экспоненциального роста, но с ростом экологического сознания в конце 1960-х и 1970-х логистическая функция снова получила популярность. Неудивительно, что существует множество публикаций о том, как описать данные

с помощью логистической кривой (Cavallini, 1993; Meyer et al., 1999; Arnold, 2002; Kahm et al., 2010; Conder, 2016).

Существует еще одна довольно распространенная модель роста – кривая Гомпертца, выведенная еще раньше функции Ферхюльста. Изначально модель была предложена в 1825 году Бенджамином Гомпертцем (1779–1865), британским математиком, для оценки смертности людей (Gompertz, 1825). В ней, как и в логистической функции, имеются три константы, асимптота и фиксированная степень асимметрии, но, как уже отмечалось, логистическая функция имеет точку перегиба точно посередине между двумя асимптотами, и ее кривая радиально симметрична по отношению к этой точке перегиба. В отличие от нее функция Гомпертца дает асимметричную кривую с точкой перегиба на уровне 36,78 ($e-1$) асимптотического максимума и, следовательно, асимметрична (Tjørve and Tjørve, 2017). Эта кривая подходит лучше, чем логистическая, для моделирования процессов сигмоидального роста, которые замедляются после достижения приблизительно трети от своего максимального значения (Vieira and Hoffmann, 1977).

Более века спустя Винзор (Winsor, 1932, 1) отмечал, что «кривая Гомпертца долго интересовала только статистиков страховых учреждений. Однако в последнее время она используется различными авторами как кривая роста для оценки как биологических, так и экономических феноменов». Но он называл только три области применения: рост веса скота (но только после того как животные достигли около 70 % своей зрелой массы), рост размера раковины двусторчатого моллюска и рост гигантского Тихоокеанского моллюска, – делая вывод, что в силу практически аналогичных свойств ни логистическая кривая, ни кривая Гомпертца не имеют «значительного преимущества друг перед другом в отношении количества явлений, рост которых можно было бы описать с их помощью» (Winsor, 1932, 7).

Но это было до того, как во многих исследованиях было обнаружено, что более старая функция во многих случаях является предпочтительной. К природным явлениям, которые лучше всего описывает функция Гомпертца, относятся такие фундаментальные биохимические процессы, как рост нормальных и злокачественных клеток, кинетика ферментативных реакций и интенсивность фотосинтеза как функция концентрации CO_2 в атмосфере (Waliszewski and Konarski, 2005). Когда логистическое уравнение стало чаще использоваться для изучения роста организмов, многие исследователи отмечали ограничения функции при воспроизведении наблюдаемого роста животных и растений и ее недостаточную надежность при прогнозировании прироста на основе прошлых показателей. Нгуимке (Nguimkeu, 2014) предлагает простой дифференциальный тест для выбора между моделями Гомпертца и логистического роста.

Основным недостатком кривой логистического роста является ее симметрия: она напоминает колебания маятника, набирающего максимальную скорость в середине траектории. Точка перегиба логистической кривой приходится на 50 % максимального значения, в результате чего схема роста дает симметричную колоколообразную кривую (кривую Гаусса), которая будет рассмотрена в следующем разделе. Многие организмы демонстрируют более быстрые темпы роста на начальных стадиях, и кривые их роста достигают точки перегиба гораздо раньше, чем асимптотического максимума. Аналогично многие процессы распространения (будь то внедрение новых промышленных методов или распространение владения бытовой техникой) следуют асимметричной S-образной траектории.

И поскольку степень асимметрии также зафиксирована в асимметрической функции Гомпертца, многие попытки избавиться от этих недостатков ведут к формулированию нескольких дополнительных моделей роста логистического типа. Цуларис (Tsoularis, 2001) рассмотрел эти производные модели – главные из которых были представлены Берталанффи (von Bertalanffy, 1938), Ричардсом (Richards, 1959), Блумбергом (Blumberg, 1968), Тернером и др. (Turner et al., 1976) и Берчем (Birch, 1999), – а также предложил собственную обобщенную

логистическую функцию, из которой можно получить все эти модификации. Они не систематизированы в зависимости от практической ценности: все эти функции принадлежат к одной семье (являясь вариациями на тему S-образного роста), и ни одна из них не превосходит другие сигмоидальные кривые с тремя постоянными по степени пригодности.

Фон Берталанффи (von Bertalanffy, 1938) построил уравнение роста на аллометрическом (неравномерном) соотношении между скоростью обмена веществ и массой тела животного, где масса меняется в связи с разницей анаболических и катаболических процессов. Максимальный темп роста функции (точка перегиба) находится на уровне около 30 % ($8/27$) асимптотического значения и применяется при изучении роста и продукции лесного хозяйства, но особенно в гидробиологии, для коммерческих видов рыбы, таких как треска (Shackell et al., 1997), тунец (Hampton, 1991), а также акул (Cailliet et al., 2006) и даже белых медведей (Kingsley, 1979). Однако Рофф (Roff, 1980, 127) доказывал, что данная функция «в лучшем случае пригодна для отдельных случаев, а в худшем – лишена смысла» и от нее следует отказаться, так как она исчерпала себя в исследованиях рыболовного промысла. Дей и Тейлор (Day and Taylor, 1997) также пришли к выводу, что уравнение фон Берталанффи не следует использовать для моделирования возраста и размера организмов в период зрелости.

Ричардс (Richards, 1959) модифицировал уравнение фон Берталанффи, чтобы оно соответствовало эмпирическим данным о росте растений. Функция, также известная как модель роста Чапмана – Ричардса, имеет на один параметр больше, чем логистическая кривая (необходимый для асимметрии), и широко используется в исследованиях лесного хозяйства, а также для моделирования роста млекопитающих и птиц и для сравнения влияния ухода на рост растений, но имеются и возражения против ее использования (Birch, 1999). Ее точка перегиба колеблется на уровне от менее 40 % до почти 50 % асимптотического значения. Тернер и др. (Turner et al., 1976) называл модифицированное ими уравнение Ферхюльста универсальной функцией роста. Гиперлогистическая функция Блумберга (Blumberg, 1968) также является модификацией уравнения Ферхюльста, предназначенной для моделирования роста размеров органов, а также динамики населения.

И распределение Вейбулла, изначально разработанное для изучения вероятности отказа вследствие изменения свойств материала (Weibull, 1951) и используемое в тестах на надежность в инжиниринге, легко модифицируется для получения гибкой функции роста, которая может дать самые разнообразные сигмоидальные функции роста. Оно используется в лесном хозяйстве для моделирования высоты и объемного прироста отдельных видов деревьев, а также объема и возраста полиморфических лесных насаждений (Yang et al., 1978; Buan and Wang, 1995; Gómez-García et al., 2013). Двумя последними пополнениями по-прежнему растущего семейства сигмоидальных кривых являются новое уравнение роста, разработанное Берчем (Birch, 1999), и уже упоминавшаяся обобщенная логистическая функция Цулариса (Tsoularis, 2001). Берч модифицировал уравнение Ричардса, чтобы оно лучше подходило для универсальных имитационных моделей, особенно для представления роста различных видов растений с отличающимися вегетационными периодами, тогда как Цуларис (Tsoularis, 2001) предложил уравнение обобщенного логистического роста, включающее все прежде использовавшиеся функции в качестве особых случаев.

Логистические кривые в прогнозировании

Логистические кривые являются любимым инструментом специалистов по прогнозам благодаря их способности отражать, часто очень точно, траектории роста как живых организмов, так и антропогенных артефактов и процессов. Конечно, с их помощью можно сделать ценные открытия, но в то же время я должен предостеречь от излишнего энтузиазма при использовании логистических кривых в качестве инструментов прогнозирования отказоустойчивости.

В своем вердикте Ноэль Бонней (Noel Bonneuil, 2005, 267) вспоминал «золотой век логистической кривой, когда Перл с энтузиазмом применял одну и ту же функцию к любому случаю роста, от длины хвостов крыс до данных переписи населения США» и развенчал заявления об удивительно точном применении этой модели к историческим данным, назвав их «сомнительным триумфом: большинство процессов ограниченного роста действительно напоминают логистические, но это мало способствует пониманию исторических процессов... Подбор кривых слишком часто вводит в заблуждение по двум направлениям: его не только не следует использовать в качестве эмпирического доказательства, но он может скрывать важные детали».

Очевидно, что применение этих кривых для долгосрочного прогнозирования не гарантирует успеха. Их использование может давать новые идеи и обеспечивать представление о пределах, и в этой книге я представлю примеры из прошлого, когда прогнозы оказывались очень точными и могли служить надежным признаком ближнесрочного роста. Но в других случаях даже высокоточное логистическое соответствие прошлых траекторий приводило к обманчивым выводам о предстоящем росте, а ошибки прогнозов превосходили ожидаемые и приемлемые $\pm 10\text{--}25\%$ отклонений за период в 10–20 лет.

В один из первых обзоров логистических трендов, опубликованных в конце Второй мировой войны, Харт (Hart, 1945) включил данные о скорости самолетов в период между 1903 и 1938 годами: эта траектория очень близко соответствовала логистической кривой с точкой перегиба в 1932 году и максимальной скоростью около 350 км/ч, но за десять лет после этого технический прогресс дважды опроверг его вычисления. Во-первых, рост мощности поршневых двигателей (на которых работали самолеты в военное время) достиг практических пределов, и вскоре их стали применять в пассажирских авиаперевозках. Самолет Lockheed L-1049 Super Constellation, впервые поднявшийся в воздух в 1951 году, имел крейсерскую скорость 489 км/ч и максимальную скорость 531 км/ч, что примерно на 50 % выше предсказанной логистическим потолком Харта.



Рис. 1.15. Самолет, поднявший потолок логистического роста крейсерской скорости: Boeing 707. Изображение из wikimedia

Super Constellation стал самым быстрым трансатлантическим авиалайнером, но его господство было недолгим. Злополучный британский самолет de Havilland Comet совершил свой первый полет в январе 1951 года и был снят с производства в 1954 году, а первый рейс реактивного Boeing 707, принадлежавшего американской компании Pan Am, состоялся в октябре 1958 года (Smil, 2010b; рис. 1.15). Турбореактивные двигатели, первые газотурбинные двигатели, увеличили крейсерскую скорость пассажирских самолетов (начавших летать в 1919 году) более чем вдвое по сравнению с периодом до Второй мировой войны и создали новую логистическую кривую с точкой перегиба в 1945 году и асимптотой в районе 900 км/ч (рис. 1.16). Более мощные и эффективные турбореактивные двухконтурные двигатели впервые были представлены в 1960-х годах и позволили увеличить размер самолетов и снизить потребление топлива, но их максимальная крейсерская скорость практически не изменилась (Smil, 2010b).

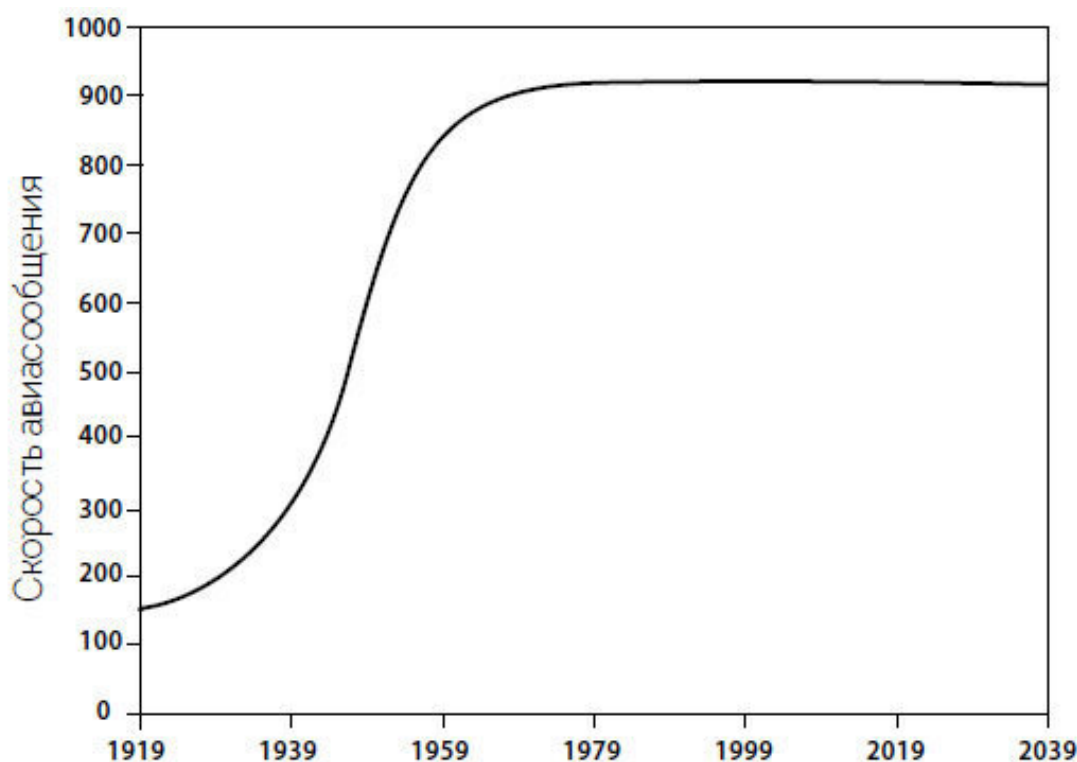


Рис. 1.16. Логистическая кривая, отражающая рост крейсерской скорости пассажирских авиалайнеров в период с 1919 по 2039 год (точка перегиба в 1945 году, асимптотическая крейсерская скорость 930,8 км/ч). Построена на основе данных о скоростях конкретных самолетов, начиная с de Havilland DH-16 компании KLM в 1919 году и заканчивая Boeing 787 в 2009 году

В 1970-е годы казалось, что траектория скорости самолетов может еще вырасти за счет сверхзвуковых самолетов, но Concorde (крейсерская скорость которого составила 2150 км/ч, что в 2,4 раза больше, чем у широкофюзеляжных лайнеров) оставался дорогостоящим исключением, пока в 2003 году от его производства не отказались (Glancey, 2016). К 2018 году несколько компаний (Spark Aerospace и Aerion Corporation для Airbus, Lockheed Martin и Boom Technology в Колорадо) работали над проектами сверхзвуковых самолетов, и, хотя любые прогнозы относительно их массового коммерческого использования крайне преждевременны, не

исключено, что в XXI веке произойдет еще одно удвоение (по крайней мере некоторых) крейсерских скоростей.

Одной из наиболее богатых иллюстраций излишнего логистического энтузиазма является книга на тему прогнозов, подзаголовком которой – «Характерные свойства общества раскрывают прошлое и предсказывают будущее» – указывает на веру автора в прогностическую силу логистической функции. Модис (Modis, 1992) использовал логистические кривые для прогнозирования траекторий развития многих современных технологий (от доли автомобилей с каталитическими конвертерами до мощности реактивных двигателей) и разнообразных экономических и социальных феноменов (от роста нефте- и газопроводов до объема пассажирских авиаперевозок). Одно из выделенных им совпадений данных и кривой касалось роста мировых авиаперевозок: согласно его прогнозу, к концу 1990-х годов он должен был достичь 90 % от предполагаемого потолка. В реальности же к 2017 году воздушные перевозки были на 80 % выше, чем в 2000 году, а количество пассажиров, перевозимых в год, более чем удвоилось (World Bank, 2018).

Кроме того, Модис представил длинную таблицу прогнозируемых уровней насыщения, взятых у Грублера (Grübler, 1990). Не прошло и 30 лет, как выяснилось, что некоторые из этих прогнозов оказались впечатляюще ошибочными. Примечательным примером такой ошибки является прогноз мирового числа автомобилей: их количество должно было достичь 90 % уровня насыщения к 1988 году.

В то время насчитывалось около 425 млн зарегистрированных автомобилей, а предполагаемый уровень насыщения составлял около 475 млн, но к 2017 году был зарегистрирован 1 млрд автомобилей, более чем вдвое больше предполагаемого максимума, и их количество в мире продолжает расти (Davis et al., 2018).

Маркетти (Marchetti, 1985; 1986b) провозгласил диктат логистического роста «одним из самых защищаемых оплотов человеческого эго, оплотом свободы, и особенно свободы творчества», сделав вывод, что «каждый из нас обладает внутренней программой, регулирующей его производительность до самой смерти... и люди умирают, исчерпав 90–95 % своего потенциала» (Marchetti, 1986b, рис. 42). Проанализировав совокупное наследие Моцарта, он пришел к выводу, что к моменту своей смерти в возрасте 35 лет «он уже сказал все, что должен был сказать» (Marchetti, 1985, 4). Модис (Modis, 1992) с энтузиазмом воспринял эту мысль и развил ее.

Изобразив все произведения Моцарта на S-образной кривой, Модис (Modis, 1992, 75–76) заявил не только, что «Моцарт сочинял с момента рождения, но его первые восемнадцать произведений не были записаны, так как он еще не умел ни писать, ни достаточно хорошо говорить, чтобы продиктовать их своему отцу». Он утверждал, что с точностью порядка 1 % его логистическая кривая также указывает, что общий потенциал Моцарта составлял 644 произведения, и поскольку к моменту смерти его творческие возможности были исчерпаны на 91 %, то, повторяя мысль Маркетти, «Моцарту мало что осталось сделать. Его работа в этом мире была практически завершена».

Интересно, что бы ответил на это Бонней! Я построил собственную кривую, используя сохранившийся каталог Кехеля, включающий 626 произведений за период с 1761 по 1791 год (Giegling et al., 1964). Нанеся на график значения за пятилетние интервалы, я получил симметричную логистическую кривую с точкой перегиба в 1780 году ($R^2 = 0,995$): уровень насыщения составил 784 произведения, и к 1806 году, когда Моцарту исполнилось бы 50 лет, он написал бы 759 из них (рис. 1.17a). Введя число произведений для каждого продуктивного года жизни Моцарта, я обнаружил, что лучше всего им соответствует асимметричная (с пятью параметрами) сигмоидальная кривая ($R^2 = 0,9982$), прогнозирующая 955 произведений к 1806 году (рис. 1.17b).

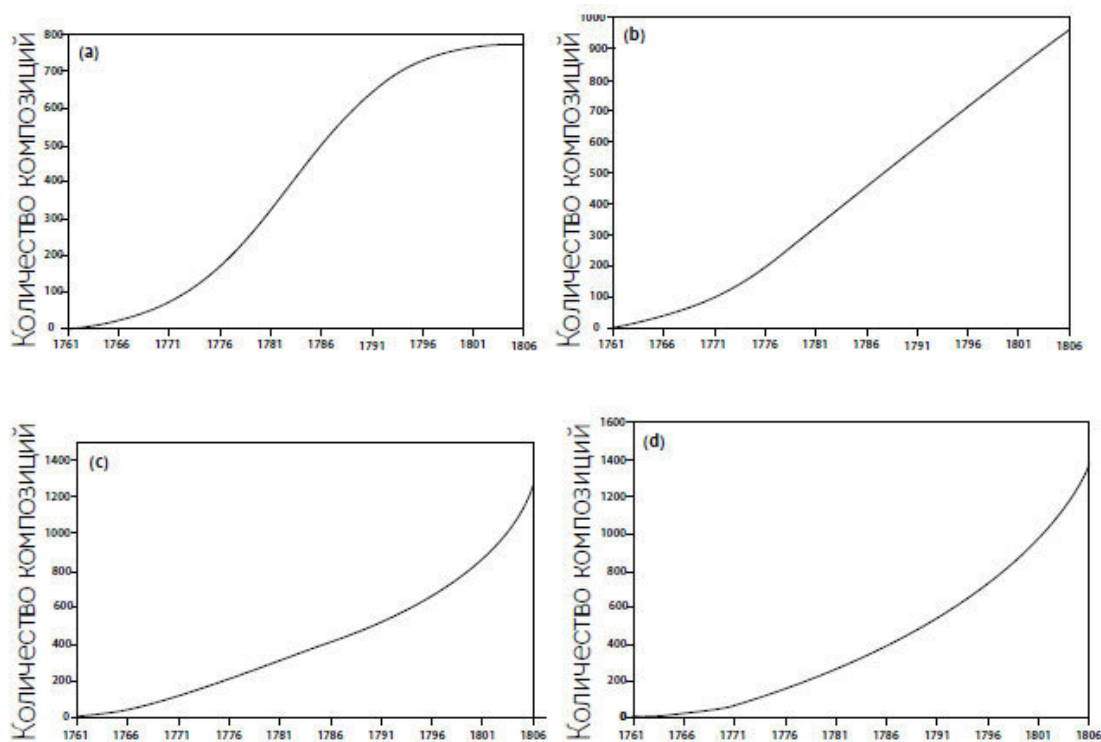


Рис. 1.17. Произведения Моцарта, вписанные в кривые роста, симметричную (а) и асимметричную (б) логистическую функцию, квадратическую регрессию (с) и регрессию четвертого порядка (д), все из которых имеют высокую степень соответствия (R^2)

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.