

СМЕРТНОСТЬ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СТАРЕНИЯ: ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

© 2020 г. В.Н. Крутько, В.И. Донцов

*Институт системного анализа Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН,
117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 9*

E-mail: dontsovi@mail.ru

Поступила в редакцию 04.05.2019 г.

После доработки 26.11.2019 г.

Принята к публикации 28.11.2019 г.

С использованием данных по 40 странам в исторический период за два с половиной века изучены особенности возрастных изменений скорости старения для стран мира, а также возможности и ограничения метода количественной оценки старения по показателям, связанным с анализом смертности популяций. Интенсивность смертности и ее производные показатели – коэффициенты формулы Гомперца ($m(t) = R_0 \exp(k \times t)$), где m – интенсивность смертности для возраста t , R_0 – начальный уровень смертности, k – скорость нарастания смертности; считается, что оба компонента связаны со старением), и формулы Гомперца–Мейкема (дополняется коэффициентом A , отражающим неизменяемый уровень смертности, зависимый от внешних условий), в реальности испытывают на себе все внешние влияния на смертность, поэтому они лишь косвенно отражают старение. Компоненты A и R_0 не обязательно равномерны для разных возрастов и влияют друг на друга, изменяясь в противофазе, как и компоненты R_0 и k . Для характеристики внешних влияний на смертность лучше использовать компонент R_0 формулы Гомперца, а для оценки собственно старения – ее компонент k для высоких значений внешних влияний на смертность; в то же время для низких значений A лучше использовать компонент k формулы Гомперца–Мейкема. При этом абсолютное сравнение компонентов формул Гомперца и Гомперца–Мейкема часто не правомерно, так как они могут различаться в разы. Приращение смертности $d(m)$ – наилучший показатель, отражающий собственно биологическую природу старения и отражающий изменения ее для данного возраста, но он может отражать и частные изменения общей смертности для определенных возрастов. Использование последнего показателя позволяет видеть, что основные закономерности процесса старения сохраняются на протяжении всех исторических периодов и для всех стран. Цикличность и изломанность кривых смертности в ранние периоды истории – недостаток методов регистрации первичных данных, а не действительное явление. В целом следует заключить, что придание компонентам формул биологического значения следует проводить осторожно, проверяя математические выводы собственно биологическими данными и методами.

Ключевые слова: старение, смертность, формула Гомперца–Мейкема, скорость старения, изменение смертности в истории, изменение скорости старения.

DOI: 10.31857/S0006302920010214

Резкое и продолжающееся постарение населения в XX веке на фоне снижающейся рождаемости создает выраженные социально-экономические трудности, что определяет возрастающий интерес к проблемам старения во всем мире и возможностям влияния на него [1]. При этом возрастает значение методов количественной оценки процесса старения, особенно на уровне популяций – стран. Анализ возрастной смертности является таким общепризнанным методом оценки старения на уровне популяций [2] еще со времени исследований Б. Гомперца [3] (экспоненциальное нарастание интенсивности смертности с возрастом как основной закон старения). Однако

использование этого метода до сих пор не позволило ответить на ряд вопросов: о природе старения, интерпретации самого метода, о биологическом пределе продолжительности жизни [4, 5], изменении скорости старения на протяжении жизни, изменении в истории и для разных стран скорости старения, о наличии снижения скорости старения долгожителей, об увеличении максимальной продолжительности жизни в истории [6, 7], сохраняется ли экспоненциальное и равномерное увеличение смертности в течение жизни или в возрасте долгожителей снижается вплоть до и выхода на плато [7] и ряд других.

Цель исследования — изучить особенности возрастных изменений скорости старения для стран мира в истории и определить возможности и ограничения метода оценки старения по показателям, связанным с оценкой смертности популяций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучали изменения возрастной смертности для 40 стран мира за период 1750–2014 гг. по данным Human Mortality Database [8]: таблицам выживаемости для когорты в 100000 человек с доживанием за каждый год с 1 до 110 лет для исторических периодов в 10 лет.

По данным таблиц дожития рассчитывали показатели формулы Гомперца и Гомперца–Мейкема (в последнем случае формула Гомперца дополнена коэффициентом Мейкема A), используя известные методы [2, 9]: $m = A + R_0 \exp(k \cdot t)$, где A — константа, показатель внешних влияний на смертность; R_0 и k — коэффициенты, которые, как принято считать, отражают биологическую природу смертности, т. е. скорость старения. Строили графики изменения общей возрастной интенсивности смертности m и ее приращения $d(m)$, а также графики разницы общей смертности и внешних влияний на нее ($m - A$).

Сравнивали истинную интенсивность смертности с расчетной, вычисленной по параметрам формулы Гомперца–Мейкема, и оценивали коэффициент корреляции r . Для нивелирования случайных выбросов значений кривой приращения интенсивности смертности использовали линейное сглаживание по трем-пяти точкам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Хотя формула Гомперца (В. Gompertz, 1825) первоначально была получена чисто эмпирически, исходя из статистики смертности [3], в настоящее время она может быть выведена теоретически. Из общепринятого определения «старение — это снижение общей жизнеспособности с возрастом» и представления о том, что это является самопроизвольным, вероятностным процессом, можно рассматривать снижение жизнеспособности X с возрастом как процесс, аналогичный процессу радиоактивного распада, когда количество элементов уменьшается с течением времени и зависит только от их присутствия в данный момент: $dX/dt = -k \cdot X$, где k — коэффициент пропорциональности. Соответственно для времени t количество оставшихся жизнеспособных элементов будет следующим: $X(t) = X_0 \exp(-k \cdot t)$.

В то же время общая уязвимость и в конечном счете общая смертность для популяции обратно пропорциональна жизнеспособности: $m = 1/X$,

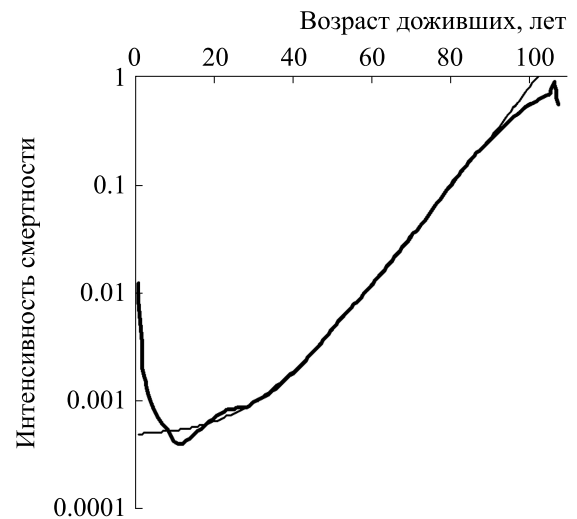


Рис. 1. Изменения интенсивности смертности с возрастом (Нидерланды, 1950–59 гг.). По оси ординат — интенсивность смертности (логарифмический масштаб), по оси абсцисс — возраст доживших. Реальная кривая — жирная линия, расчетная кривая при обработке данных по формуле Гомперца–Мейкема — тонкая линия.

что приводит нас к известной формуле Гомперца–Мейкема с общепринятыми коэффициентами и поправкой — коэффициентом Мейкема: $m(t) = R_0 \exp(k \cdot t) + A$.

Для оценки скорости старения используют показатель $m - A$ (интенсивность смертности без фонового внешнего компонента A), коэффициент возрастной смертности k , определяющий скорость нарастания смертности, зависящей от старения, и коэффициент R_0 , определяющий начальный уровень смертности и характеризующий «начальный уровень старения». Также можно использовать приращение интенсивности смертности $d(m)$, которое нивелирует константу A ; при этом показатель $d(m)$ лучше отражает собственно скорость старения, чем $m - A$, так как в последнем случае используется среднее значение коэффициента A , который в реальности может значительно меняться для различных возрастных периодов.

Наконец, снижение скорости старения позволяет дожить до более поздних возрастов, что позволяет для оценки старения использовать возраст полного вымирания для стандартной когорты (100000 человек) — максимальную продолжительность жизни.

Идеальным примером графика Гомперца–Мейкема можно считать график для Нидерландов за 1950 г. (рис. 1): близкий к прямой график, совпадающий с реальной кривой интенсивности смертности m для 20–90 лет и с отклонением вниз от расчетной кривой Гомперца–Мейкема для ре-

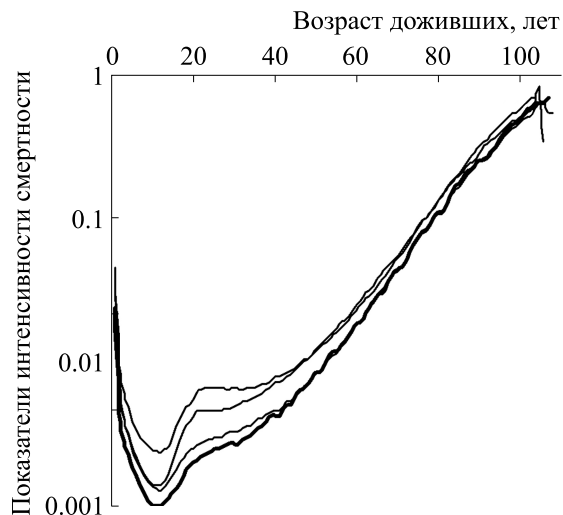


Рис. 2. Изменения интенсивности смертности с возрастом для разных стран в 1930–39 гг. По оси ординат – интенсивность смертности (логарифмический масштаб), по оси абсцисс – возраст доживших. Снизу вверх: Австралия (жирная линия), Канада, Франция, Финляндия.

альной кривой смертности для возрастов долгожителей.

В большинстве случаев, однако, имеют место графики интенсивности смертности самой разной формы для разных стран и разных возрастных периодов (рис. 2). Принято считать, что различия связаны с различием внешних влияний на

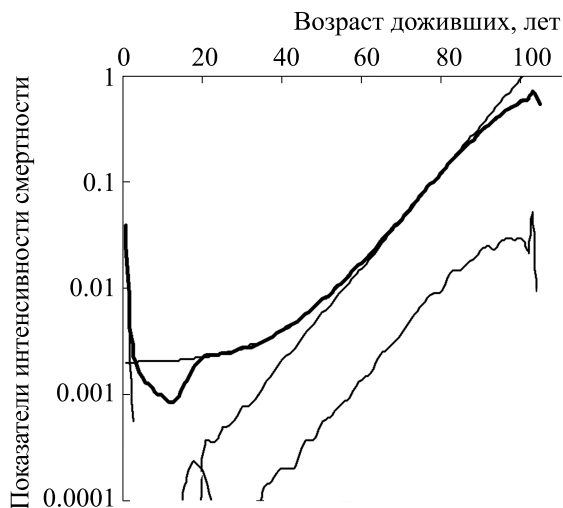


Рис. 3. Изменения различных показателей интенсивности смертности с возрастом (Дания, 1930–39 гг.). По оси ординат – параметры (логарифмический масштаб), по оси абсцисс – возраст доживших. Сверху вниз: расчетная и реальная кривые интенсивности смертности (тонкая и жирная линии); разница общей интенсивности смертности и внешней компоненты: $m - A$ (средняя линия); приращение интенсивности смертности $d(m)$ (нижняя линия).

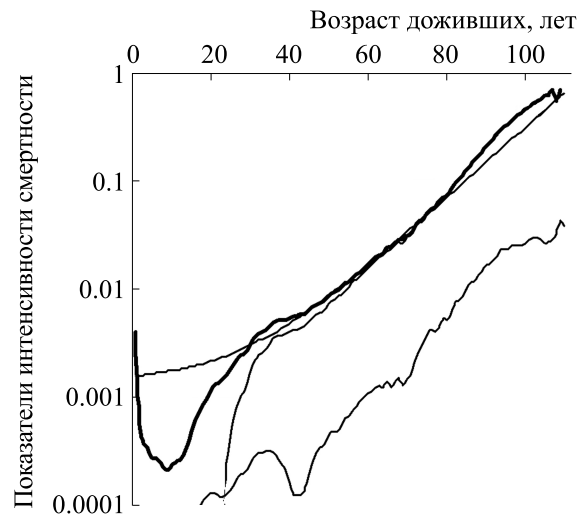


Рис. 4. Изменения различных показателей интенсивности смертности с возрастом (Россия, 2014 г.). По оси ординат – параметры, логарифмический масштаб, по оси абсцисс – возраст доживших. Сверху вниз: расчетная и реальная кривые интенсивности смертности (тонкая и жирная линии); разница общей интенсивности смертности и внешней компоненты: $m - A$ (средняя линия); приращение интенсивности смертности $d(m)$ (нижняя линия).

смертность, что отражает коэффициент A формулы Гомперца-Мейкема.

Использование показателей смертности без внешнего коэффициента $(m - A)$ и использование приращения смертности $d(m)$, также убирающего внешние влияния на смертность, показывает (рис. 3), что если для графика общей смертности m линейный участок наблюдается для 55–75 лет, то для графиков $m - A$ и $d(m)$ – для 20–90 лет.

Другие отмечаемые особенности: вклад внешнего коэффициента A в общую смертность m с возрастом резко снижается, так как она не может уже «соперничать» с экспонентой нарастания смертности по причинам собственно старения; кроме того, «ступенька» в 20–40 лет для общей смертности определяется также во многом константой A .

Графики $m - A$ и $d(m)$ параллельны, так как отражают одно и то же – собственно скорость старения и имеют прямую форму на гораздо большем возрастном периоде, чем график реальной интенсивности смертности m . Однако параллельность и прямая форма графика наблюдаются далеко не всегда (рис. 4), и «ступенька» может не нивелироваться константой A .

Колебания графика $d(m)$ также могут быть не связаны с изменениями собственно старения (рис. 4), а отражают, видимо, частные особенности изменения общей интенсивности смертности для ряда возрастов.

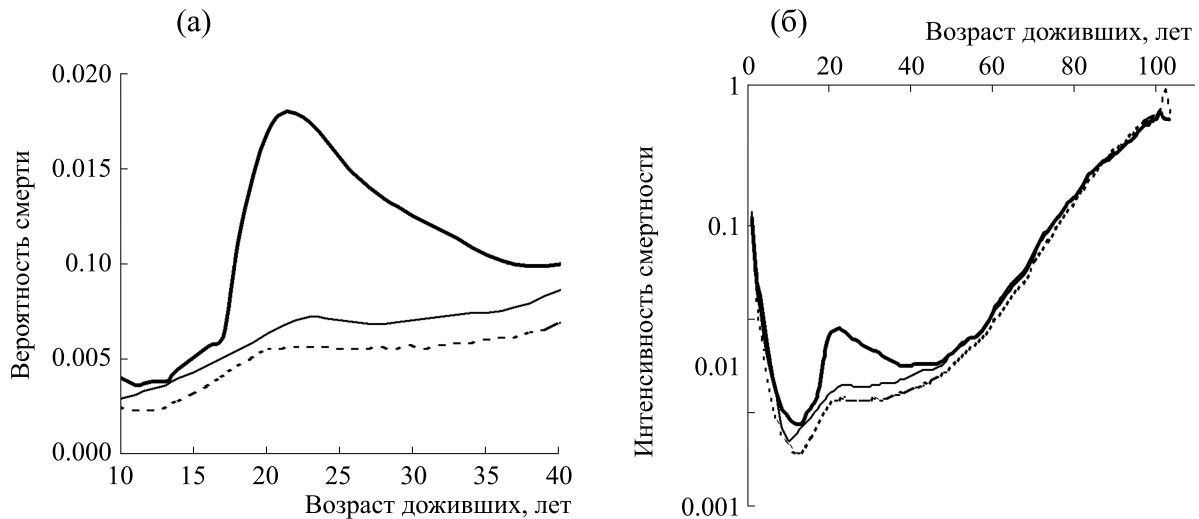


Рис. 5. Избирательное влияние внешних условий на смертность в узком диапазоне возрастов (Италия, 1910–1919 гг.). По оси ординат – возраст доживших; по оси абсцисс: (а) – вероятность смерти (за год), сверху вниз – 1910–1919 гг. (жирная кривая), 1900–1909 гг. (тонкая линия) и 1920–1929 гг. (пунктир); (б) – интенсивность смертности, логарифмический масштаб, те же обозначения кривых.

Для России в 2014 г. график $m - A$ показывает инверсию (повышение) общей смертности долгожителей, что обычно для конца XX – начала XXI веков, но график $d(m)$ показывает снижение, что указывает на сохранение отмечаемого всегда в истории для всех стран феномена замедления старения для возрастов долгожителей [10].

Также, исходя из природы показателей, одинаковая скорость старения для $m - A$ выражается горизонтальной прямой, как и для графика общей смертности m , но для графика $d(m)$ это 0, а снижение скорости старения регистрируется как отрицательные значения.

Оценка старения по компонентам формулы Гомперца–Мейкема (A , R_0 и k) также имеет свои ограничения. Так, для времен Первой мировой войны график для Италии (1910–1919 гг.) показывает «горб» смертности для молодых и средних возрастов (рис. 5а), что делает невозможным вычисление обычными методами формулы Гомперца–Мейкема (рис. 5б).

Таким образом, показатель A может резко различаться для разных возрастов, кроме того, вполне вероятно, что одинаковые влияния оказываются не одинаковыми для лиц разного возраста ввиду того же процесса старения.

Также можно видеть, что все три показателя формулы тесно связаны между собой. На примере Франции 1850–2000 гг. видно (рис. 6), что компоненты A и R_0 фактически дополняют друг друга, реагируя в противофазе на изменение другого; значительные, в разы, изменения близких значений R_0 вряд ли означают изменения в разы в ближайшие годы и начального уровня старения: это

чисто математический феномен. Аналогичным образом изменяются в противофазе коэффициенты R_0 и k .

График Гомперца в ряде случаев оказывается предпочтительнее, чем график Гомперца–Мейкема, так как его компонент k практически не реагирует на внешние влияния. Однако для низких значений A (и R_0), характерных в современности для всех развитых и большинства развивающихся стран, отмечается повышение k для графика Гомперца, чего нет для графика Гомперца–Мейкема, что также отражает, видимо, математические особенности вычисления компонентов формулы, а не собственно факт ускорения старения для современности.

Таким образом, для характеристики внешних влияний на смертность лучше использовать компонент R_0 формулы Гомперца, а для оценки старения – компонент k для высоких значений внешних влияний на смертность; в то же время для низких значений внешних влияний на смертность лучше использовать компонент k формулы Гомперца–Мейкема. Следует также отметить, что прямое абсолютное сравнение компонентов формул Гомперца и Гомперца–Мейкема неправомерно, так как они могут различаться в разы.

Если все компоненты формул отражают средние значения для всего возрастного периода (1–110 лет), то показатель приращения интенсивности смертности реагирует на изменение собственно старения и для настоящего момента и поэтому является наиболее предпочтительным для оценки собственно скорости старения. На рис. 7 видно, что графики данного показателя практически

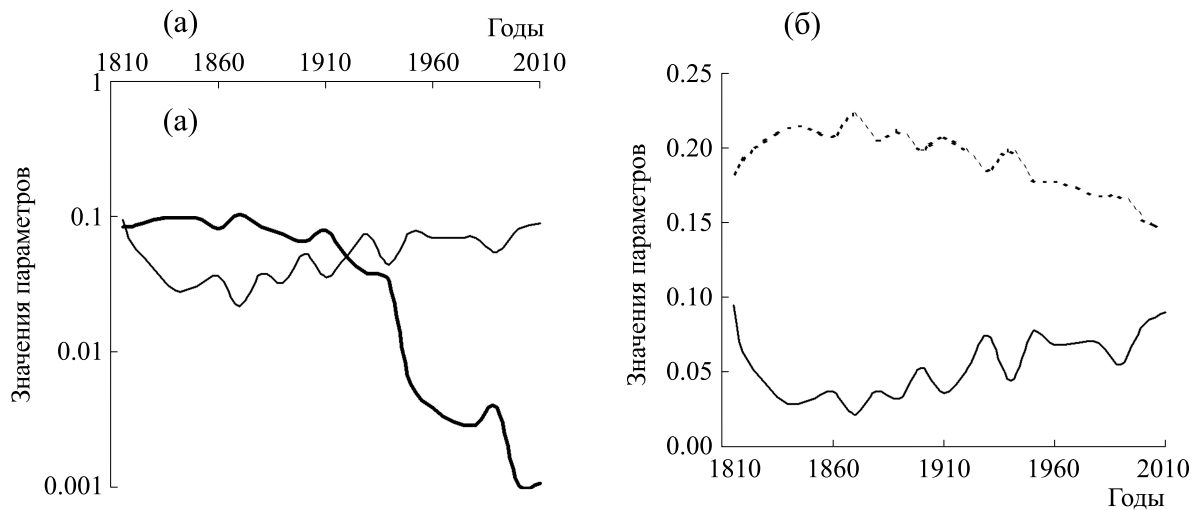


Рис. 6. Изменение компонентов формулы Гомперца–Мейкема в истории (Франция, 1850–2000 гг.). По оси ординат – значения параметров, по оси абсцисс – годы; (а) – компоненты $A*10$ и R_0*1000 , логарифмический масштаб; (б) – компоненты R_0*1000 и $k*2$, обычный масштаб.

совпадают для разных стран (рис. 6а) и разных исторических периодов для одной и той же страны (рис. 6б).

Использование этого показателя позволяет также видеть сохранение эффекта снижения скорости старения для возрастов долгожителей во все исторические периоды.

Еще одной особенностью графиков интенсивности смертности для ранних исторических периодов (до 1850-х гг.) является цикличность всех показателей; десятилетний период циклов, совпадающий с периодом представления данных, указывает, что это – феномен регистрации смерт-

ности, что резко затрудняет анализ закономерностей изменения смертности и старения для этих периодов. Аналогично затрудняет исследования изломанность графика для ряда стран, сменяющаяся к концу XX века на прямую форму графика, что также является результатом недостаточной корректности регистрации данных.

Резкое повышение средней продолжительности жизни на протяжении 200 лет (за 1750–1950 гг. – с 35–40 до 70–75 лет) не сопровождается повышением максимальной продолжительности жизни (она колеблется в пределах 102–105 лет для разных стран, не имея тенденции к повышению в течение

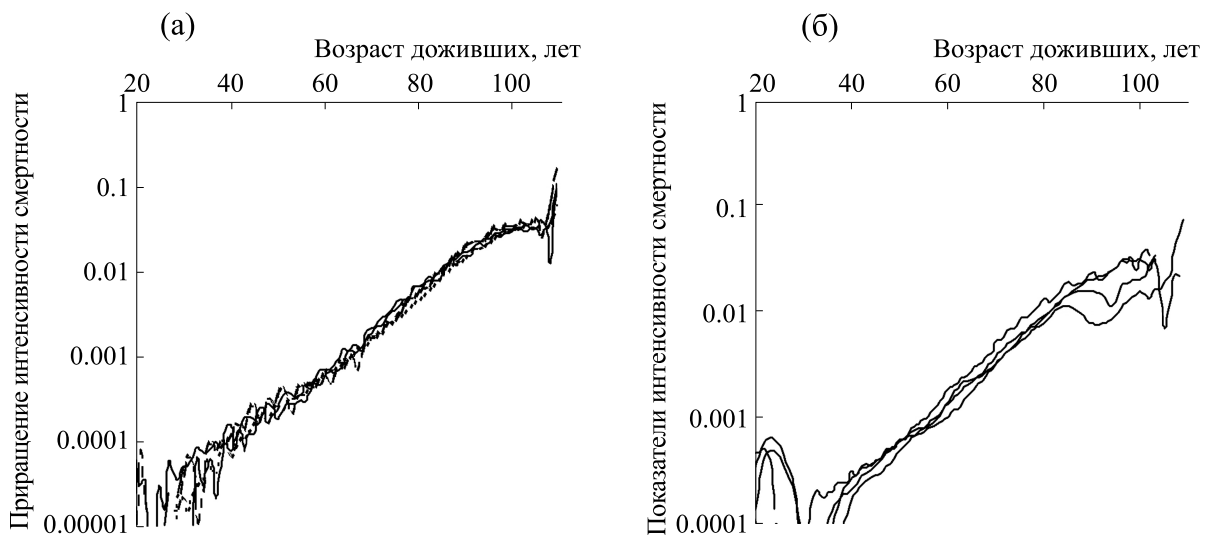


Рис. 7. Приращение интенсивности смертности для разных стран (а) и в истории одной страны (б). По оси ординат – приращение интенсивности смертности $d(m)$, логарифмический масштаб; по оси абсцисс – возраст доживших. (а) – Ирландия, Канада, Португалия, Финляндия, 2000–2010 гг.; (б) – Франция, 1816, 1850, 1900 и 1950 гг.

200 лет). Однако с середины XX века средняя продолжительность жизни выходит в область долгожителей (возраст более 80 лет). Это резко увеличивает количество доживших до возрастов долгожителей (для 1850 и 2010 гг. для Франции: до 80 лет — с 7.8% до 65.6%, до 100 лет — с 0.5% до 14.3%, до 105 лет: с 0 до 0.9%) и, видимо, чисто статистически повышает максимальную продолжительность жизни (со 105 до 114 лет соответственно для Франции 1850 и 2010 гг.).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для количественной оценки скорости старения человека оптимальными считаются демографические методы — повозрастная оценка интенсивности смертности на основании таблиц дожития; график Гомперца—Мейкема остается важнейшим, коэффициентам которого придается определенное биологическое значение: A — константа Мейкема, отражающая внешние влияния на смертность; R_0 и k , отражающие соответственно начальный уровень старения и величину его экспоненциального нарастания с возрастом [2, 3, 9].

Оценка старения по коэффициентам формулы Гомперца—Мейкема имеет, однако, свои ограничения. Так, пример времен Первой мировой войны, когда вероятность смерти для узкого диапазона возрастов была резко повышена, отражает возможную неравномерность внешних влияний на смертность разных возрастов, что не учитывает компонент A , являющийся константой. Кроме того, вполне вероятно, что одинаковые влияния оказываются не одинаковыми для лиц разного возраста ввиду того же процесса старения.

Все три показателя формулы оказываются к тому же тесно связанными между собой и фактически дополняют, влияя друг на друга и изменяясь в противофазе: A и R_0 , R_0 и k . При этом резкие и частые колебания компонентов для ближайших возрастов показывают, что это, видимо, чисто математический феномен, а не реальные изменения биологического старения. На протяжении двух с половиной веков и на примере 40 стран можно видеть, что все компоненты формулы реагируют на внешние влияния — голод, войны, эпидемии, являющиеся чисто внешними причинами изменения смертности.

Кроме того, компоненты формул Гомперца и Гомперца—Мейкема оказываются не идентичны и по-разному реагируют на внешние влияния на смертность. Для характеристики внешних влияний на смертность лучше использовать R_0 формулы Гомперца, а для оценки старения — k для высоких значений внешних влияний на смертность, в то же время для низких значений лучше использовать компонент k формулы Гомперца—Мейкема. При этом абсолютное сравнение компонен-

тов формул Гомперца и Гомперца—Мейкема не правомерно, так как они могут различаться в разы.

Важно, что все компоненты формул отражают средние значения для всего возрастного периода 1–110 лет, в то время как показатель приращения интенсивности смертности реагирует на изменение собственно старения и для настоящего момента; кроме того, этот показатель не требует специальных сложных вычислений, являясь просто разностью соседних значений интенсивности смертности m .

Таким образом, показатель приращения интенсивности смертности $d(m)$ является наиболее предпочтительным для оценки собственно скорости старения, что давно отмечено в литературе [9]. Интересно, что графики данного показателя практически совпадают для разных стран и разных исторических периодов для одной и той же страны вплоть до середины XX века. Этот показатель также позволяет видеть сохранение отмечаемого всегда в истории и для всех стран феномена замедления старения для возрастов долгожителей: феномен инверсии смертности для этих возрастов для современности — результат внешних влияний на смертность [10].

Для всех показателей также важна точность регистрации данных для таблиц дожития. Отмечаемая для ранних исторических периодов (до 1850-х годов) цикличность всех показателей и десятилетний период циклов, совпадающий с периодом представления данных, указывает, что это — феномен регистрации смертности, как и наблюдаемая для ряда стран изломанность графика смертности. Все это резко затрудняет анализ закономерностей изменения смертности и старения для ранних исторических периодов.

В целом, однако, можно заключить, что на протяжении всех исторических периодов и всех стран сохраняются типичные закономерности старения — линейное повышение скорости старения (в логарифмическом масштабе, отражающем экспоненциальный закон нарастания скорости старения с возрастом) с периода окончания роста и развития до возрастов долгожителей, и снижение скорости старения в возрастах долгожителей.

Снижение скорости старения для возраста долгожителей отражает неоднородность популяции, так как наследственность может вносить, видимо, до 25% изменений в длительность жизни, формируя феномен долгожителей [9, 11].

Влияние внешних условий на скорость старения также вполне вероятно и отмечается в литературе при использовании различных методов оценки старения [12–15].

Кроме того, мы предложили взгляд на старение, сближающий патологические изменения при естественном старении и изменения при воз-

растных заболеваниях [16]. Изменения общей жизнеспособности эквивалентно влиянию на биологическое старение вне зависимости от причин, поэтому можно ожидать, что профилактика возрастных заболеваний и высокий уровень медико-социальной помощи окажут значимые влияния на видимую скорость старения [16]. В то же время в более старших возрастах долгожителей выраженные изменения физиологических показателей при естественном старении нивелируют этот эффект для доживших до этих возрастов обычных лиц и ведут к инверсии сниженной смертности в возрастах долгожителей на повышенную.

Резкое повышение средней продолжительности жизни на протяжении 200 лет (1750–1950 гг.) не сопровождается повышением максимальной продолжительности жизни, однако, с середины XX века средняя продолжительность жизни выходит в область долгожителей (возраст более 80 лет), что резко увеличивает количество доживших до самых старших возрастов и чисто статистически повышает максимальную продолжительность жизни, которая, таким образом, уже не является показателем только биологического старения. Максимальная продолжительность жизни признается важнейшим показателем старения как для человека, так и в экспериментах по влиянию геропротекторов на продолжительность жизни животных, однако, как можно видеть, применять этот показатель также нужно осторожно.

В целом геронтологический анализ популяционных изменений исторической динамики продолжительности жизни и причин смерти в различных странах является в настоящее время одним из наиболее актуальных научно-практических вопросов [17], как и моделирование количественного анализа продолжительности жизни [18], однако зачастую этот метод проводится не достаточно аккуратно, не учитывая ограничения показателей старения при анализе смертности популяций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение изменений возрастной смертности является давним общепринятым методом изучения скорости старения как в эксперименте на животных при изучении влияния средств продления жизни, так и для человека. Обработка данных таблиц дожития с вычислением коэффициентов формулы Гомперца–Мейкема – важнейший метод оценки старения, так как коэффициентам формулы придается биологический смысл, связанный со старением организма.

Однако сравнение коэффициентов формулы Гомперца–Мейкема для разных стран в течение

больших исторических периодов показывает, что все компоненты формулы могут быть математически связаны между собой и отражать влияния внешних условий на смертность, что требует осторожности в интерпретации их показателей. Кроме того, следует учитывать возможность неточности регистрации первичных данных для таблиц дожития.

Наилучшим показателем скорости старения является, видимо, показатель приращения интенсивности смертности, отражающий изменения ее для данного возраста. Его использование позволяет видеть, что основные закономерности процесса старения сохраняются на протяжении всех исторических периодов и для всех стран: скорость старения изменяется линейно (в логарифмическом масштабе) в пределах 20–90 лет, с последующим снижением скорости старения долгожителей, что носит, видимо, наследственный характер.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Т. М. Смирнова и В. Н. Крутько, Клинич. геронтология **24** (9–10), 63 (2018).
2. V. Canudas-Romo, S. Mazzuco, and L. Zanotto, in *Integrated population biology and modeling*, part A, vol. 39 of Handbook of Statistics, Ed. by A. S. S. Rao and C. Rao (Elsevier, Amsterdam, 2018), pp. 405–442.
3. B. Gompertz, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A **115**, 513 (1825).
4. X. Dong, B. Milholland, and J. Vijg, Nature **538** (7624), 257 (2016).
5. A. Lenart and J. W. Vaupel, Nature **546** (7660), E13 (2107).
6. J. De Beer, A. Bardoutsos, and F. Janssen, Nature **546** (7670), E16 (2017).
7. E. Barbi, F. Lagona, M. Marsili, et al., Science **362** (6412), pii: eaav3229 (2018).
8. *The Human Mortality Database*. <http://www.mortality.org> (Last modified: Jun-2013 Year, Available 25.01.2019).
9. L. A. Gavrilov and N. S. Gavrilova, *The Biology of Life Span: A Quantitative Approach* (Harwood Acad. Publ., N.-Y., 1991).
10. В. И. Донцов, Здравоохранение Российской Федерации **63** (1), 42 (2019).

11. S. Dato, G. Rose, P. Crocco, et al., *Mech. Ageing Dev.* **165** (Pt B), 147 (2017).
12. L. Hayflick, *PLoS Genet.* **3** (12), 220 (2007).
13. A. I. Ribeiro, E. T. Krainski, M. S. Carvalho, et al., *Geospat. Health* **12** (2), 581 (2017).
14. C. E. Finch, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **107** (1), 1718 (2010).
15. А. А. Гриневич, А. В. Танканаг и Н. К. Чемерис, *Биофизика* **64** (1), 140 (2019).
16. V. N. Krut'ko, V. I. Dontsov, V. A. Khalyavkin, et al., *Frontiers Biosci., Landmark* **23**, 909 (2018).
17. В. Б. Мамаев, *Биофизика* **63** (5), 1035 (2018).
18. Н. Л. Векшин и М. С. Фролова, *Биофизика* **64** (1), 162 (2019).

Mortality as an Indicator of Aging: Possibilities and Limitations

V.N. Krut'ko and V.I. Dontsov

Institute for Systems Analysis, Federal Research Center «Computer Science and Control» of Russian Academy of Sciences, prosp. 60-letiya Oktyabrya 9, Moscow, 117312 Russia

Using data gathered on 40 countries throughout a historical period covering two and a half centuries, we studied the features of age-related changes in the rate of aging for the countries in the world and elucidated the possibilities and limitations of the method for quantitatively measuring the aging effect by the parameters related to the analysis of population mortality. Mortality rate and its derivatives are the variables of the Gompertz formula: $m(t) = R_0 \exp(k \times t)$, where m is the mortality rate at time t (age), R_0 is basic reproductive rate, k is mortality rate increase; both components are believed to be associated with aging), and of the Gompertz–Makeham formula (supplemented by the coefficient A as an immutable mortality rate dependent on external conditions). A and R_0 components are not necessarily uniform for different ages and affect each other, changing in antiphase, as components R_0 and k . To characterize the external effects on mortality, it is better to use the R_0 of the Gompertz formula, and when the values of external effects on mortality are high, the component k of the Gompertz formula can be used to evaluate aging; at the same time, when the coefficient A is low, it is better to use the component k of the Gompertz–Makeham formula. In this case, the absolute comparison of the components of the Gompertz and Gompertz–Makeham formulas is not reasonable because these components may differ considerably. Mortality increment $d(m)$ is the best indicator reflecting the biological nature of ageing. Using this indicator, it is possible to observe that the main patterns of the aging process persist throughout all historical periods and for all countries. The curves of mortality for early periods of history are discontinuous and distorted not because of a reflection of actual events but on account of the demerits of the methods for collecting primary data. Hence, it is necessary to remember that the components of the formulas may have biological meaning only when mathematical proof is supported by biological data and methods.

Keywords: aging, mortality, Gompertz–Makeham formula, aging rate, mortality change in history, aging rate change