

АКТУАРНАЯ СКОРОСТЬ СТАРЕНИЯ В КОГОРТАХ ЧЕЛОВЕКА

© 2023 Л.А. Гаврилов^{1,2*}, Н.С. Гаврилова^{1,2}

¹ NORC at the University of Chicago, 60637 Chicago, IL, USA

² Институт демографических исследований, ФНИСЦ РАН,
109028 Москва, Россия; электронная почта: lagavril@yahoo.com

Поступила в редакцию 01.08.2023

После доработки 08.10.2023

Принята к публикации 09.10.2023

Скорость старения является важной характеристикой процесса старения человека. Попытки измерить темпы старения с помощью параметра наклона в уравнении Гомперца привели к выводу, что актуарная скорость старения оставалась стабильной на протяжении большей части XX века, но в последнее время демонстрирует рост в большинстве изученных популяций. Эти результаты были получены с использованием поперечных данных о смертности, а не путём анализа смертности реальных когорт рождения. В данном исследовании мы проанализировали исторические изменения актуарной скорости старения в когортах человека. Параметры уравнения Гомперца оценивались в возрастном интервале 50–80 лет с использованием данных о по возрастных коэффициентах смертности в одногодичных когортах из Human Mortality Database (HMD). Всего были проанализированы данные по 2294 когортам мужчин и женщин для 76 популяций. Анализ исторических трендов параметра наклона уравнения Гомперца в изученных когортах выявил две различные закономерности изменения актуарной скорости старения. В странах Восточной Европы с более высокой смертностью показатели актуарной скорости старения демонстрируют постоянное снижение, начиная с когорты рождённых в 1910 по 1940 г. В странах Западной Европы с более низкой смертностью, а также в Австралии, Канаде, Японии, Новой Зеландии и США актуарная скорость старения снижалась, начиная с когорты, рождённой в 1910 г., до когорты, рождённой приблизительно в 1930 г., а затем росла. В целом, в 50 из 76 исследованных популяций (68%) актуарная скорость старения демонстрирует тенденцию к снижению с течением времени. Впервые было проверено и подтверждено существование компенсационного эффекта смертности (КЭС) и оценена видовая продолжительность жизни в когортах человека. При этом оценки видовой продолжительности жизни человека для когорт были близки к оценкам, полученным для поперечных данных, опубликованных ранее.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: старение, смертность, компенсационный эффект смертности, видовая продолжительность жизни, скорость старения.

DOI: 10.31857/S0320972523110106, **EDN:** MLPLLP

ВВЕДЕНИЕ

Исследования по возрастных траекторий смертности и, в частности, актуарной скорости старения важны для понимания фундаментальной биологии старения и разработки реальных мер замедления старения [1]. Скорость старения часто оценивают как коэффициент наклона в уравнении Гомперца, описывающем экспоненциальный рост смертности с возрастом [2, 3]. Полученную таким образом скорость старения называют актуарной скоростью старения. Такой подход выглядит разум-

ным, поскольку гипотетические нестареющие популяции имеют коэффициент наклона, равный нулю, а также поскольку этот параметр наклона характеризует скорость увеличения смертности с возрастом.

Предыдущие исследования актуарной скорости старения человека показали тенденцию к её увеличению в течение последних 30 лет в большинстве стран [2, 3]. Эти результаты, полученные для современных популяций, выглядят неожиданными, учитывая продолжающееся снижение смертности среди взрослого населения. Надёжная теория старения указывает, что коэффициент наклона в уравнении Гомперца определяется не только скоростью потери функции с возрастом («истинная скорость старения»), но и исходными уровнями

Принятые сокращения: КЭС — компенсационный эффект смертности.

* Адресат для корреспонденции.

избыточности (начальными резервными возможностями организма) [1, 4]. Таким образом, актуарная скорость старения определяется не только внутренним ухудшением состояния органов и тканей, но и другими факторами, включая воздействие окружающей среды.

Значения актуарной скорости старения различны в разных популяциях и организованы таким образом, что более низкая исходная смертность компенсируется более быстрым её ростом с возрастом. Это означает, что высокие исходные показатели смертности в неблагополучных популяциях (внутри данного вида) компенсируются низкой величиной актуарной скорости старения (более длительным периодом удвоения смертности). В результате этой компенсации уровни смертности имеют тенденцию к сближению в старшем возрасте [1]. Это явление получило название компенсационного эффекта смертности (КЭС) [2].

Ранее мы исследовали исторические изменения актуарной скорости старения и КЭС, используя поперечные данные о смертности [2]. Однако этот подход подвергся конструктивной критике, и поступила рекомендация изучать КЭС на когортных данных [5]. В данной статье эта критика принята во внимание, и исследуются исторические изменения актуарной скорости старения и КЭС с использованием когортных данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Одной из целей данного исследования является анализ изменения актуарной скорости старения со временем и проверка существования КЭС в когортах человека. Подобный анализ когортных данных до сих пор не проводился, и все предыдущие исследования актуарной скорости старения и КЭС выполнялись с использованием поперечных данных [1–3, 6].

Методы. На первом этапе анализа были рассчитаны параметры R_0 и α уравнения Гомперца (1):

$$\mu(x) = R_0 \exp(\alpha x), \quad (1)$$

где $\mu(x)$ – повозрастная когортная смертность в возрасте x , а R_0 и α – параметры Гомперца. Для поперечных данных актуарная скорость старения обычно оценивается с использованием уравнения Гомперца–Мейкема, имеющего дополнительное независимое от возраста слагаемое (параметр Мейкема). В случае когортных данных (в отличие от поперечных) параметр Мейкема (или фоновая смертность)

не является постоянным и зависит от возраста, поскольку он меняется с течением времени. Было также показано, что в современных популяциях фоновая смертность очень низка [1, 7] и, следовательно, не оказывает заметного влияния на оценки параметров уравнения Гомперца. В данном случае мы используем тот факт, что после 60-х годов XX века фоновая смертность снизилась до очень низких уровней, близких к нулю [2, 8]. Таким образом, при оценке параметров в возрастах старше 50 лет и в когортах, рождённых в 1910 г. и позже, параметр Мейкема можно проигнорировать. Бонгаартс оценивал фоновую и возрастную (senescent) смертность, используя данные о причинах смерти, и обнаружил, что после 50–60 лет смертность почти полностью определяется возрастной смертностью [7].

Параметры модели Гомперца оценивались методом нелинейной регрессии в возрастном интервале 50–80 лет (процедура *nlin* в пакете Stata, версия 14), как это было предложено ранее для поперечных данных [6]. Возрастной интервал 50–80 лет характеризуется увеличением темпов роста смертности с возрастом (life table aging rate) у женщин, тогда как для мужских когорт эта закономерность не столь очевидна [9, 10]. Считается, что этот возрастной интервал характеризует изменения возрастной компоненты смертности [10]. Некоторые исследователи используют логистическую модель для изучения смертности в поперечных данных, чтобы отразить замедление смертности (mortality deceleration) после возраста 85 лет [6, 7]. В нашем исследовании анализируется смертность в возрасте до 85 лет, поэтому применение модели Гомперца в данном случае оправдано.

Известно о следующей проблеме: использование метода наименьших квадратов часто приводит к плохо определяемой задаче нелинейной оптимизации, которая чрезвычайно чувствительна к ошибкам выборки и малейшим систематическим демографическим изменениям [11]. Эта проблема обсуждалась в нашей предыдущей публикации [2].

Исторические тренды актуарной скорости старения для каждой популяции мужчин и женщин (с 1910 по 1940 г. рождения) оценивались с использованием модели линейной регрессии и анализа знака и статистической значимости параметра наклона регрессии.

КЭС можно определить количественно, используя обратную зависимость между параметрами Гомперца (2):

$$\ln R_0 = \ln M - B\alpha. \quad (2)$$

Видовая продолжительность жизни (параметр B в уравнении 2) была получена с помощью линейной регрессии между параметрами Гомперца ($\ln R_0$ и α) в виде, представленном в уравнении 2. Таким образом оценивались видовая продолжительность жизни (параметр наклона, B) и отсекаемый отрезок (параметр $\ln M$).

Данные. В настоящем исследовании в качестве источника данных о смертности использовалась Human Mortality Database (HMD), www.mortality.org [12]. Эта база данных содержит информацию о смертности в 42 странах с достаточно хорошим качеством демографической статистики. В общей сложности использовались повозрастные когортные коэффициенты смертности для 3304 когорт, доступных в HMD (что охватывает данные для когорт 1900–1940 гг. рождения). Исследование исторических изменений актуарной скорости старения было сосредоточено на более поздних трендах для когорт с 1910 по 1940 г. рождения и включало 2294 когорты. В базе данных доступны повозрастные когортные показатели смертности мужчин и женщин в возрасте от 0 до 110 лет и старше. Однако данные о когортной смертности часто недоступны для всего возрастного диапазона, поскольку многие когорты ещё не закончили своё дожитие. Использовались данные за каждый год возраста и за каждый календарный год рождения.

Исторические изменения актуарной скорости старения в когортах человека. Исторические изменения актуарной скорости старения в демографических когортах ранее не изучались. Данные о когортной смертности не так многочисленны и доступны, как поперечные данные, и требуют наличия длинных временных рядов смертности для реконструкции когортной смертности. Для этого исследования мы выбрали однолетние когорты людей, родившихся с 1900 по 1940 г., чтобы охватить максимальное количество стран.

Исторические тренды актуарной скорости старения для когорт анализировались за период с 1910 по 1940 г. (годы рождения соответствующих когорт). Для каждой страны/пола мы рассчитывали линейную регрессию параметра наклона Гомперца (оценки актуарной скорости старения) по году рождения для соответствующей когорты. В табл. 1 представлены параметры наклона этой линейной регрессии вместе с соответствующими значениями r . Можно заметить, что в отличие от поперечных данных, актуарная скорость старения для когортных данных имеет тенденцию к снижению с течением времени в большинстве изучен-

ных популяций. Актуарная скорость старения снизилась в 22 регионах для обоих полов, в 7 регионах — только для мужчин и в одном регионе — только для женщин. В 10 случаях для мужчин и в 15 случаях для женщин показатели актуарного старения не показали статистически значимых изменений. Таким образом, 68% изученных популяций продемонстрировали тенденцию к снижению актуарной скорости старения.

Анализируя отдельные тренды для каждой страны, мы обнаружили две различных закономерности изменения актуарной скорости старения. В странах с более низкой смертностью, к которым относятся страны Западной Европы (Австрия, Германия, Дания, Испания, Финляндия, Франция, Англия и Уэльс, Северная Ирландия, Италия, Шотландия, Великобритания, Ирландия, Нидерланды, Норвегия, Португалия, Швеция), а также Австралия, Канада, Япония, Новая Зеландия и США, актуарная скорость старения снижались примерно до когорты 1930-х гг. рождения, а затем увеличивались (рис. 1, Италия).

В странах с более высокой смертностью (Болгария, Беларусь, Чехия, Эстония, Венгрия, Литва, Латвия, Польша, Россия, Словакия, Украина) актуарная скорость старения всегда снижались (рис. 1, Литва). Рис. 1 является лишь иллюстрацией, но те же две закономерности наблюдаются и в других странах. Есть несколько исключений. В Бельгии показатели актуарного старения оставались неизменными как для мужчин, так и для женщин. В Швейцарии актуарная скорость старения увеличилась для когорт более позднего года рождения только для женщин и осталась неизменной для мужчин. На Тайване актуарная скорость старения увеличилась у мужчин и продолжала снижаться у женщин.

На рис. 2 показана повозрастная смертность в когортах 1920, 1930 и 1940 г. рождения у шведских и польских мужчин. Можно заметить, что у мужчин Польши траектории смертности расходятся для всех трёх когорт, что соответствует снижению актуарной скорости старения в более поздних когортах рождения. С другой стороны, у мужчин Швеции расхождение траекторий смертности наблюдается только в когортах 1920 и 1930 г. рождения, что соответствует графику, представленному на рис. 1 для западноевропейской страны с более низкой смертностью.

Данные о смертности в когортах человека дают возможность изучить временные тенденции актуарной скорости старения когорт в разных странах. В целом, актуарная скорость

Таблица 1. Исторические тренды актуарной скорости старения для когорт человека с 1910 по 1940 г. рождения*

Страна/регион	Мужчины		Женщины	
	Параметр наклона линейной регрессии $\times 10^3$	<i>p</i> -значение	Параметр наклона линейной регрессии $\times 10^3$	<i>p</i> -значение
Австралия	0,2194	0,001	0,1387	0,019
Австрия	−0,3734	<0,001	−0,1755	0,004
Бельгия	−0,0585	0,031	−0,0137	0,721
Болгария	−1,1383	<0,001	−0,7642	<0,001
Беларусь	−1,3228	<0,001	−1,3422	<0,001
Канада	−0,0321	0,415	−0,0740	0,076
Швейцария	−0,1837	0,001	−0,0882	0,033
Чехия	−0,0871	<0,001	−0,6300	<0,001
Германия	−0,2687	<0,001	0,0352	0,347
Дания	−0,7425	<0,001	−0,8647	<0,001
Испания	−0,3475	<0,001	0,0445	0,346
Эстония	−1,4662	<0,001	−1,5405	<0,001
Финляндия	−0,0140	0,750	−0,2237	0,008
Франция	−0,3126	<0,001	−0,1574	<0,001
Англия и Уэльс	−0,1505	0,032	−0,1443	0,030
Северная Ирландия	−0,000006	0,892	0,0960	0,283
Великобритания	−0,1622	0,020	−0,1272	0,053
Шотландия	−0,2686	<0,001	0,0398	0,541
Венгрия	−1,2918	<0,001	−0,7143	<0,001
Ирландия	−0,5714	<0,001	−0,2981	0,001
Исландия	−0,1458	0,435	0,3480	0,195
Италия	0,0291	0,614	0,0944	0,039
Япония	−0,2001	<0,001	0,0812	0,003
Литва	−1,1191	<0,001	−1,0182	<0,001
Люксембург	−0,3288	0,001	−0,0594	0,668
Латвия	−1,2239	<0,001	−1,2308	<0,001
Нидерланды	−0,4269	<0,001	−0,5814	<0,001
Норвегия	−0,4545	<0,001	−0,5405	<0,001
Новая Зеландия	0,0900	0,335	0,0643	0,401
Польша	−1,3398	<0,001	−1,1047	<0,001
Португалия	−0,5002	<0,001	−0,5316	<0,001
Россия	−1,0891	<0,001	−1,3581	<0,001
Словакия	−1,0837	<0,001	−0,6272	<0,001
Словения	2,1571	<0,001	2,9576	<0,001
Швеция	−0,2394	<0,001	−0,2537	<0,001
Тайвань	−0,1583	<0,001	−0,4012	<0,001
Украина	−1,0314	<0,001	−1,1605	<0,001
США	0,1323	0,003	0,0343	0,400

Примечание. Коэффициенты наклона линейной регрессии для зависимости актуарной скорости старения от когорты рождения.

* Параметры Гомперца оценивались в возрастном интервале 50–80 лет. Линейная регрессия коэффициента наклона уравнения Гомперца по времени (когорте) была проведена для 31 когорты для каждого региона/пола. Жирным шрифтом выделены случаи со статистически значимыми ($p < 0,05$) изменениями актуарной скорости старения.

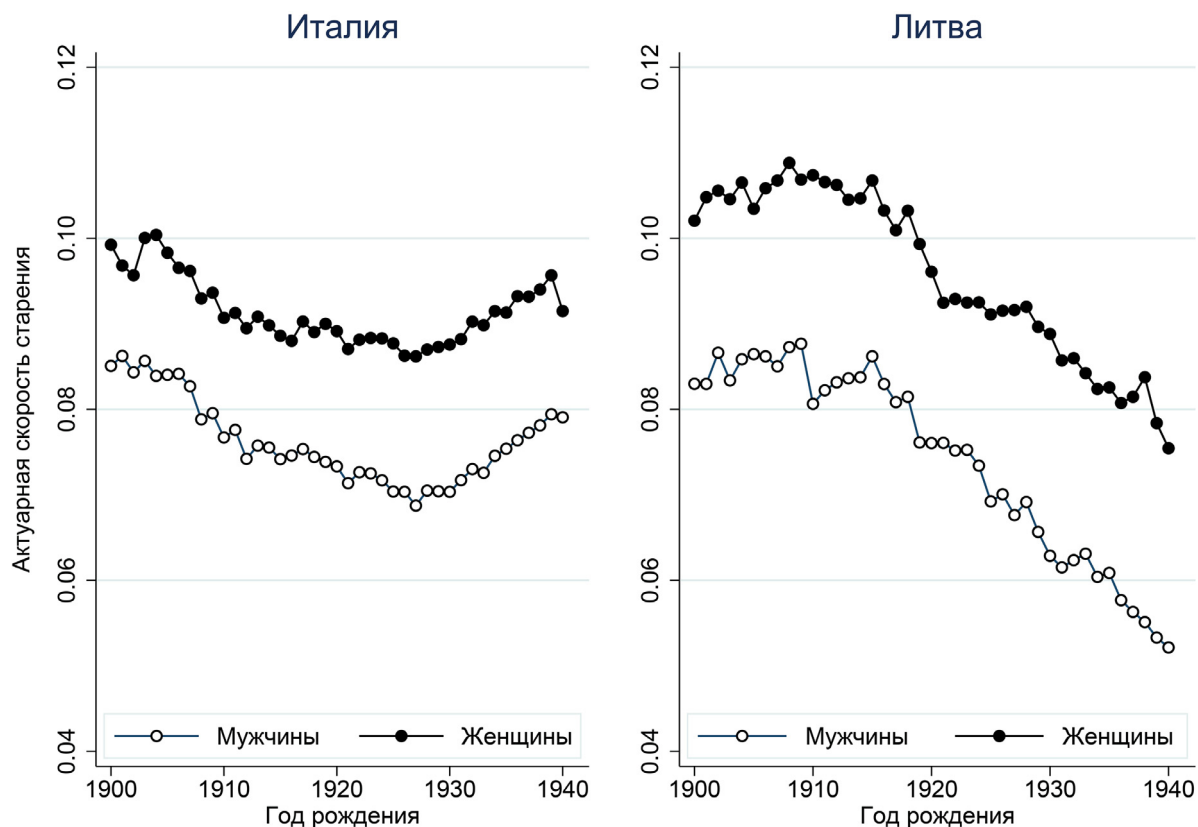


Рис. 1. Исторические изменения актуарной скорости старения в стране Западной Европы с более низкой смертностью (Италия) и в стране Балтии с более высокой смертностью (Литва)

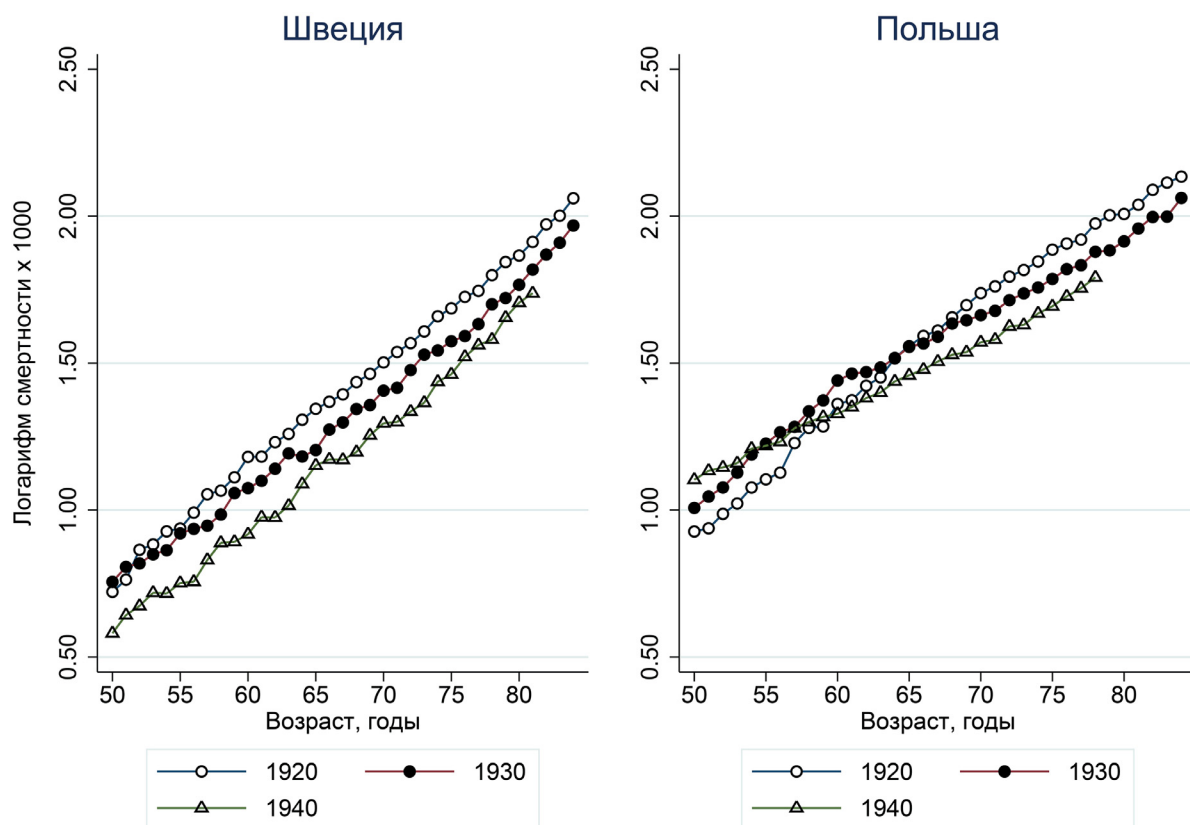


Рис. 2. Смертность (логарифмическая шкала для десятичного логарифма) в зависимости от возраста для трёх когорт шведских и польских мужчин

старения демонстрирует тенденцию к снижению. С другой стороны, в странах с более низким уровнем смертности наблюдаются V-образные изменения актуарной скорости старения.

Эти результаты отличаются от тех, которые были получены для поперечных данных о смертности. Наши более ранние исследования показали, что актуарная скорость старения относительно стабильна во времени, по крайней мере, до 60-х годов XX века [1, 8]. Исследования Бонгаартса подтвердили этот первоначальный вывод [6, 7]. Однако в дальнейшем стало ясно, что после 1960-х гг. актуарная скорость старения имеет более сложную траекторию и демонстрирует рост после 1980-х гг. [2, 3]. Эти выводы были сделаны на основании поперечных данных о смертности.

Компенсационный эффект смертности для когорт человека. КЭС определяется как сходжение (конвергенция) смертности в старших возрастах, когда более высокие значения параметра наклона в функции Гомперца (темпы роста смертности) компенсируются более низкими значениями параметра отсекаемого отрезка R_0 в разных популяциях данного биологического вида [1, 13]. КЭС можно определить количественно, используя обратную зависимость параметров Гомперца в уравнении

Гомперца–Мейкема, представленную в уравнении (2). Исходно интерес к исследованию КЭС положила публикация Стрелера и Милдвана, которые обнаружили обратную корреляцию между параметрами Гомперца [14]. Однако эти авторы не учли параметр Мейкема при использовании довольно старых данных по смертности и, как результат, получили ложную корреляцию. Термин «компенсационный эффект смертности» был введён в 1978 г., когда учёт параметра Мейкема привёл к совершенно иным оценкам параметров корреляции Стрелера–Милдвана по сравнению с первоначальной публикацией [15]. КЭС определяется как конвергенция траекторий возрастной компоненты смертности (senescent mortality) в старших возрастах [1, 15].

Координата, соответствующая возрасту пересечения всех траекторий возрастной смертности (В), получила название видовой продолжительности жизни [1]. При использовании поперечных данных установлено, что для человека значение видовой продолжительности жизни равно 95 ± 2 годам [1, 2]. Следует отметить, что КЭС можно наблюдать даже при простом визуальном осмотре траекторий смертности в полулогарифмических координатах, не прибегая к расчёту параметров Гомперца [2].

Таблица 2. Характеристики компенсационного эффекта смертности для трёх когорт рождения, полученные на основании параметров уравнения Гомперца*

Популяция	Коэффициенты регрессии		Коэффициент корреляции между $\ln R_0$ и α	Число наблюдений
	$\ln M \pm \sigma$	$B \pm \sigma$, годы		
Все одногодичные когорты рождения с 1920 по 1940 г.				
Мужчины	$-2,39 \pm 0,10$	$84,02 \pm 1,33$	$-0,9085$	850
Женщины	$-4,36 \pm 0,11$	$66,13 \pm 1,28$	$-0,8716$	850
Оба пола	$-3,29 \pm 0,09$	$75,35 \pm 1,23$	$-0,9029$	850
Все одногодичные когорты рождения с 1930 по 1940 г.				
Мужчины	$-1,57 \pm 0,09$	$97,81 \pm 1,29$	$-0,9624$	460
Женщины	$-3,36 \pm 0,15$	$79,18 \pm 1,77$	$-0,9025$	460
Оба пола	$-2,38 \pm 0,10$	$89,59 \pm 1,32$	$-0,9536$	460
Когорта 1940 г. рождения				
Мужчины	$-1,68 \pm 0,16$	$97,33 \pm 2,23$	$-0,9894$	43
Женщины	$-2,87 \pm 0,39$	$86,24 \pm 4,53$	$-0,9479$	43
Оба пола	$-2,45 \pm 0,19$	$89,89 \pm 2,53$	$-0,9842$	43

* Параметры Гомперца оценивались в интервале 50–80 лет.

Примечание. Данные Human Mortality Database.

Также КЭС можно наблюдать не только у человека, но и у некоторых других биологических видов [1, 13].

Данные о когортной смертности по разным странам позволяют проверить существование КЭС для когорт человека. Существование КЭС для когортных данных ранее не проверялось. С использованием когортных данных были получены оценки параметров линейной регрессии, представленной уравнением (2).

Анализ с использованием данной линейной регрессии был проведён для более поздних когорт 1920–1940-х гг. рождения и использовал оценки параметров Гомперца для 76 популяций мужчин и женщин, полученных в возрастном интервале 50–80 лет. В табл. 2 представлены результаты регрессионного анализа. Эти результаты подтверждают существование КЭС для когорт человека, хотя значения видовой продолжительности жизни [параметр B линейной регрессии в уравнении (2)] оказались несколько ниже по сравнению с результатами, полученными на поперечных данных [1, 2]. Эти результаты также показывают более низкие значения видовой продолжительности жизни для исторически более ранних когорт рождения, что согласуется с результатами, полученными на поперечных данных [2].

В целом, можно заключить, что оценки видовой продолжительности жизни на основе когортных данных (для когорт более позднего рождения) демонстрируют хорошее соответствие с результатами более ранних публикаций, основанных на поперечных данных [1, 2]. Эти результаты означают, что количественные показатели КЭС для людей довольно стабильны.

Рис. 3 демонстрирует схождение траекторий смертности в старших возрастах (КЭС) для когорт 1930 г. рождения для нескольких популяций. Можно заметить, что мужчины в Польше имеют более низкие показатели актуарной скорости старения по сравнению с мужчинами Швеции, а женщины имеют более высокие показатели актуарной скорости старения по сравнению с мужчинами. Также можно заметить, что повозрастные траектории смертности женщин демонстрируют несколько ускоренную тенденцию роста смертности, что подтверждает результаты предыдущих исследований темпов скорости старения (life table aging rate) [10].

Рис. 3 является ещё одной наглядной иллюстрацией существования КЭС, не требующей статистической оценки параметров уравнения Гомперца.

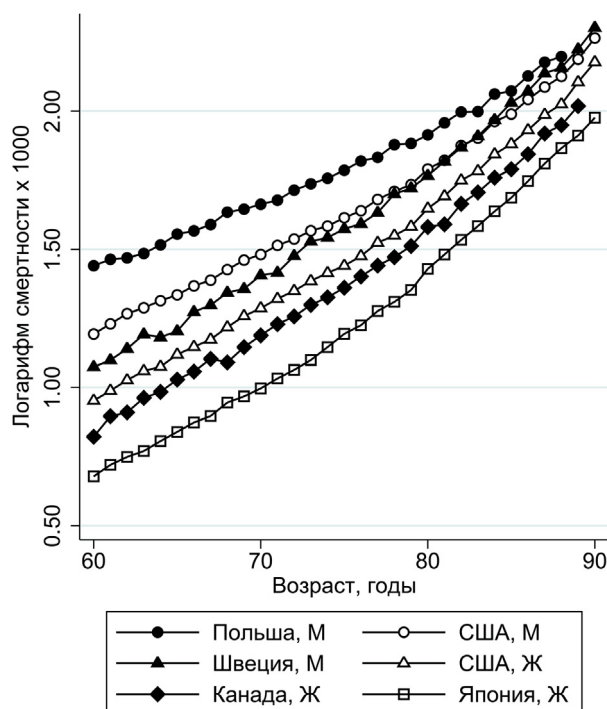


Рис. 3. Компенсационный эффект смертности для когорт человека. Логарифм смертности (логарифмическая шкала для десятичного логарифма) когорт 1930 г. рождения в шести популяциях. Обозначения: М — мужчины; Ж — женщины

ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

Было обнаружено, что КЭС для когортных данных действительно существует. Исследование количественных показателей КЭС с использованием когортных данных подтвердило, что обратная корреляция между параметром отсекаемого отрезка уравнения Гомперца, $\ln(R_0)$, и параметром наклона уравнения Гомперца (α) действительно существует и является статистически значимой, когда мы сравниваем разные популяции человека. Оценки видовой продолжительности жизни (параметр B) для когорт более позднего года рождения близки к оценкам, полученным на поперечных данных [1, 2], хотя и оказались несколько ниже. Было также обнаружено, что оценки видовой продолжительности жизни ниже для когорт исторически более ранних годов рождения. Таким образом, существование КЭС подтвердилось для когорт человека.

В этом исследовании мы также проанализировали исторические изменения актуарной скорости старения (параметр наклона уравнения Гомперца) для когорт человека. Были проанализированы временные тренды актуарной скорости старения когорт для каждой популяции отдельно, начиная с 1910 и до 1940 г. рождения. Оказалось, что большинство

популяций (52 из 76, или 68%) демонстрирует тенденцию к снижению актуарной скорости старения. Актуарная скорость старения остаётся стабильной для 23% исследованных когорт человека. Этот результат, полученный для актуарной скорости старения когорт, отличается от результата, полученного для поперечных данных. Ранее было обнаружено, что актуарная скорость старения для поперечных данных демонстрирует тенденцию к увеличению после 1980-х гг. для большинства изученных популяций [2, 3]. До периода 1980-х гг. актуарная скорость старения демонстрировала стабильность с течением времени [1, 2, 8]. С другой стороны, актуарная скорость старения, измеренная для когорт одной и той же страны и пола, имеет тенденцию к снижению с течением времени.

Изучая когортную смертность, важно осознавать, что на протяжении жизни на когорту влияет как старение, способствующее увеличению смертности, так и улучшение условий жизни, снижающее смертность. Теоретически можно допустить, что актуарная скорость старения может в конечном итоге снизиться до очень низкого уровня, близкого к нулю, что можно рассматривать как кажущуюся остановку старения. Например, если рост смертности с возрастом составляет 8% в год, но смертность снижается со временем со скоростью 2% в год, то наблюдаемый рост смертности в когорте в конечном итоге составит всего 6% в год ($8 - 2 = 6$) [16]. Если темпы исторического снижения смертности зависят от возраста, на когортных данных это может выглядеть как снижение актуарной скорости старения в более поздних когортах людей. В любом случае, снижение актуарной скорости старения выглядит как замедление старения. До сих пор неясно, чем можно объяснить увеличение актуарной скорости старения в странах с более низкой смертностью среди когорт людей, родившихся недавно. Одним из возможных объяснений является то, что эти страны уже исчерпали большую часть ресурсов для снижения смертности, таких как снижение смертности от сердечно-сосудистых заболеваний и уменьшение числа курящих. Действительно, смертность во многих из этих стран стабилизировалась в течение последних 10–15 лет, что позволяет предположить, что основной фактор снижения актуарной скорости старения почти исчез [17]. Таким образом, в настоящее время актуарная скорость старения в странах с более низкой смертностью определяется главным образом процессом старения и зависит от возрастной компоненты смертности. В странах с более высокой смертностью, таких как страны Восточной Европы,

всё ещё остаётся некоторый потенциал для снижения смертности, и, следовательно, их актуарная скорость старения продолжает снижаться.

Нам представляется, что старение следует измерять не скоростью увеличения смертности с возрастом, а скоростью потери функциональных элементов (в основном специализированных клеток) в организме. Такой подход к измерению истинной скорости старения был предложен надёжностной теорией старения [1, 4, 18]. Согласно этой теории, приблизительную оценку истинной скорости старения можно получить путём измерения одного из параметров КЭС (обратной величины видовой продолжительности жизни в уравнении (2)). Другая теория старения (метрономическая) была предложена Алексеем Оловниковым [19]. Хотя он и рассматривал процесс старения как программу, но подчёркивал, что эта программа относится главным образом к репродуктивным аспектам этого процесса. Действительно, время начала и окончания репродукции у женщин имеет определённые признаки программы [20]. Однако общий процесс старения лучше описывать моделями теории надёжности, которые предполагают постепенное разрушение организма и утрату функциональных элементов, включая теломеры и специализированные клетки.

Благодарности. Мы очень признательны российскому теоретику Алексею Матвеевичу Оловникову (1936–2022) за многочасовые дружеские научные дискуссии на многие темы биологии старения. Данная статья является частью специального выпуска журнала, посвящённого его памяти. Мы знали Алексея Матвеевича Оловникова лично с 1978 года и многому научились в результате научных бесед с ним. Один из примеров его активного участия в обсуждении наших научных исследований и презентаций приведён здесь: <https://www.youtube.com/watch?v=3cI5M88I-NU>.

Вклад авторов. Л.Г. разрабатывал план исследований, анализировал полученные результаты, редактировал рукопись. Н.Г. проводила статистический анализ данных и подготавливала рукопись.

Финансирование. Работа частично поддержана грантом Национального института здоровья (NIH R21AG054849).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в финансовой или иной сфере.

Соблюдение этических норм. Данная статья не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей и животных в качестве объектов изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gavrilov, L. A., and Gavrilova, N. S. (1991) *The Biology of Life Span: A Quantitative Approach*, Harwood Academic Publisher, New York.
2. Gavrilov, L. A., and Gavrilova, N. S. (2022) Trends in human species-specific lifespan and actuarial aging rate, *Biochemistry (Moscow)*, **87**, 1998-2011, doi: 10.1134/S0006297922120173.
3. Tai, T. H., and Noymer, A. (2018) Models for estimating empirical Gompertz mortality: with an application to evolution of the Gompertzian slope, *Popul. Ecol.*, **60**, 171-184, doi: 10.1007/s10144-018-0609-6.
4. Gavrilov, L. A., and Gavrilova, N. S. (2006) *Reliability Theory of Aging and Longevity* in *Handbook of the Biology of Aging* (Masoro, E. J., and Austad, S. N., eds) 6 Edn., Academic Press, San Diego, pp. 3-42, doi: 10.1016/B978-012088387-5/50004-2.
5. Mikhalsky, A. I. (2023) On the Paper by Leonid A. Gavrilov and Natalia S. Gavrilova entitled "Trends in Human Species-Specific Lifespan and Actuarial Aging Rate" Published in *Biochemistry (Moscow)*, Vol. 87, Nos. 12-13, pp. 1622-1633 (2022), *Biochemistry (Moscow)*, **88**, 162-163, doi: 10.1134/S0006297923010145.
6. Bongaarts, J. (2005) Long-range trends in adult mortality: Models and projection methods, *Demography*, **42**, 23-49, doi: 10.1353/dem.2005.0003.
7. Bongaarts, J. (2009) Trends in senescent life expectancy, *Popul. Stud. (Camb)*, **63**, 203-213, doi: 10.1080/00324720903165456.
8. Gavrilov, L. A., Gavrilova, N. S., and Nosov, V. N. (1983) Human life span stopped increasing: why? *Gerontology*, **29**, 176-180, doi: 10.1159/000213111.
9. Horiuchi, S. (1997) Postmenopausal acceleration of age-related mortality increase, *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, **52**, B78-B92, doi: 10.1093/gerona/52A.1.B78.
10. Li, T., Yang, Y. C., and Anderson, J. J. (2013) Mortality increase in late-middle and early-old age: heterogeneity in death processes as a new explanation, *Demography*, **50**, 1563-1591, doi: 10.1007/s13524-013-0222-4.
11. Tarkhov, A. E., Menshikov, L. I., and Fedichev, P. O. (2017) Strehler-Mildvan correlation is a degenerate manifold of Gompertz fit, *J. Theor. Biol.*, **416**, 180-189, doi: 10.1016/j.jtbi.2017.01.017.
12. Human Mortality Database. University of California, Berkeley (USA), and Max Planck Institute for Demographic Research (Germany), URL: <https://www.mortality.org> (accessed on 6.5.2022).
13. Golubev, A. (2019) A 2D analysis of correlations between the parameters of the Gompertz-Makeham model (or law?) of relationships between aging, mortality, and longevity, *Biogerontology*, **20**, 799-821, doi: 10.1007/s10522-019-09828-z.
14. Strehler, B. L., and Mildvan, A. S. (1960) General theory of mortality and aging, *Science*, **132**, 14-21, doi: 10.1126/science.132.3418.14.
15. Gavrilov, L. A., Gavrilova, N. S., and Yaguzhinsky, L. S. (1978) The main patterns of aging and death of animals from the point of view of the theory of reliability [in Russian], *J. Gen. Biol.*, **39**, 734-742.
16. Gavrilov, L. A., and Gavrilova, N. S. (2023) On the Commentary by Anatoly I. Mikhalsky Published in *Biochemistry (Moscow)*, Vol. 88, No. 1, pp. 162-163 (2023), *Biochemistry (Moscow)*, **88**, 289, doi: 10.1134/S0006297923020116.
17. Ho, J. Y., and Hendi, A. S. (2018) Recent trends in life expectancy across high income countries: retrospective observational study, *Br. Med. J.*, **362**, k2562, doi: 10.1136/bmj.k2562.
18. Gavrilov, L. A., and Gavrilova, N. S. (2001) The reliability theory of aging and longevity, *J. Theor. Biol.*, **213**, 527-545, doi: 10.1006/jtbi.2001.2430.
19. Olovnikov, A. M. (2022) Planetary metronome as a regulator of lifespan and aging rate: the metronomic hypothesis, *Biochemistry (Moscow)*, **87**, 1640-1650, doi: 10.1134/S0006297922120197.
20. Gavrilova, N. S., Gavrilov, L. A., Severin, F. F., and Skulachev, V. P. (2012) Testing predictions of the programmed and stochastic theories of aging: comparison of variation in age at death, menopause, and sexual maturation, *Biochemistry (Moscow)*, **77**, 754-760, doi: 10.1134/S0006297912070085.

ACTUARIAL AGING RATES IN HUMAN COHORTS

L. A. Gavrilov^{1,2*} and N. S. Gavrilova^{1,2}¹ NORC at the University of Chicago, 60637 Chicago, IL, USA² Institute for Demographic Research, Federal Center of Theoretical and Applied Sociology, Russian Academy of Sciences, 109028 Moscow, Russia; e-mail: lagavril@yahoo.com

Aging rate is an important characteristic of human aging. Attempts to measure aging rates through the Gompertz slope parameter lead to a conclusion that actuarial aging rates were stable during the most of the 20th century, but recently demonstrate an increase over time in the majority of studied populations. These findings were made using cross-sectional mortality data rather than by the analysis of mortality of real birth cohorts. In this study we analyzed historical changes of actuarial aging rates in human cohorts. The Gompertz parameters were estimated in the age interval 50-80 years using data on one-year cohort age-specific death rates from the Human Mortality Database (HMD). Totally, data for 2,294 cohorts of men and women from 76 populations were analyzed. Changes of the Gompertz slope parameter in the studied cohorts revealed two distinct patterns for actuarial aging rate. In higher mortality Eastern European countries actuarial aging rates showed continuous decline from the 1910 to 1940 birth cohort. In lower mortality Western European countries, Australia, Canada, Japan, New Zealand, and USA actuarial aging rates declined from the 1910th to approximately 1930th cohort and then increased. Overall, in 50 out of 76 populations (68%) actuarial aging rate demonstrated decreasing pattern of change over time. Compensation effect of mortality (CEM) was tested for the first time in human cohorts and the cohort species-specific lifespan was estimated. CEM was confirmed using cohort data and human cohort species-specific lifespan estimates were similar to the estimates obtained for the cross-sectional data published earlier.

Keywords: aging, mortality, compensation effect of mortality, species-specific lifespan, aging rate