Проблемы физики, математики и техники, № 4 (61), 2024 **ISSN 2077-8708**

ИНФОРМАТИКА

УДК 004.94:61 DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_4_61_82
EDN: BBUQIH

ВЕРОЯТНОСТНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА МЕДИЦИНСКОЙ СТАТИСТИКИ

Е.И. Сукач[1], **А.П. Кончиц**[2]

[1]*Гомельский государственный университет им. Ф.Скорины*
[2]*Институт леса Национальной академии наук Беларуси, Гомель*

PROBABILISTIC-ALGEBRAIC METHOD OF ANALYSIS OF MEDICAL STATISTICS

E.I. Sukach[1], **A.P. Konchits**[2]

[1]*Francisk Skorina Gomel State University*
[2]*Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus*

Аннотация. Излагается подход к исследованию взаимного влияния различных причин смертности. Вводятся понятия наблюдаемой и действующей смертности. Предлагается способ восстановления действующих значений смертности, не искаженных влиянием других причин смертности. Подход демонстрируется на примере восстановления действующих значений смертности при исключении смертности от внешних причин.

Ключевые слова: *биология продолжительности жизни*, *возрастная динамика общей смертности*, *наблюдаемая и действующая смертность*, *стратегия здравоохранения*, *расчеты изменения продолжительности жизни*, *значения смертности*, *процесс вымирания*, *компенсационный эффект*, *оценка вклада отдельных причин смертности.*

Для цитирования: *Сукач*, *Е.И.* Вероятностно-алгебраический метод анализа медицинской статистики / Е.И. Сукач, А.П. Кончиц // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 4 (61). – С. 82–88. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_4_61_82. – EDN: BBUQIH

Abstract. An approach to the study of the mutual influence of various causes of mortality is outlined. The concepts of observed and effective mortality are introduced. A method is proposed to restore the current mortality values that are not distorted by the influence of other causes of mortality. The approach is demonstrated by the example of restoring the current mortality values while excluding mortality from external causes.

Keywords: *biology of life expectancy*, *age dynamics of total mortality*, *observed and current mortality*, *health strategy*, *calculations of changes in life expectancy*, *mortality values*, *process of extinction*, *compensatory effect*, *assessment of the contribution of individual causes of mortality.*

For citation: *Sukach*, *E.I.* Probabilistic-algebraic method of analysis of medical statistics / E.I. Sukach, A.P. Konchits // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 4 (61). – P. 82–88. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_4_61_82 (in Russian). – EDN: BBUQIH

Введение

Анализ смертности и продолжительности жизни традиционно является одним из центральных в демографических исследованиях. Прогнозирование продолжительности жизни, определение мер, способствующих увеличению продолжительности жизни, является актуальной областью научных исследований, в результате развития которой сложилось целое направление, базирующееся на применении точных количественных методов и вероятностного подхода к явлениям природы, конечной целью которого является стремление выяснить механизмы процессов по их внешнему проявлению.

Изучение механизмов, определяющих продолжительность жизни, тесно связано с исследованием процессов старения организма с учетом всего наблюдаемого разнообразия конкретных болезней и оценкой возрастной динамики смертности по различным причинам.

Для прогнозирования демографических процессов и оценки результативности долгосрочных мер в области медицины используются современные технологии обработки статистических данных, базирующиеся на математических методах, значительную часть которых составляют методы математического моделирования. Все подходы, целью которых является исследование процессов старения организма, можно условно разделить на два класса.

Первый класс предполагает учет различных причин смерти в ходе моделирования возрастной динамики общей смертности [1]. Несомненное достоинство подобного подхода – возможность учета специфической медико-биологической информации о конкретных механизмах возникновения и развития каждого типа патологии. Между тем, при таком подходе практически не представляется возможным создать модель общей смертности, как следствие, оценить продолжительность жизни.

Основным ограничением моделей второго класса при анализе возрастной динамики общей смертности является игнорирование отдельных причин смерти [2], [3]. Следует отметить, что простота математического описания в ряде подобных случаев не гарантирует правильность получаемых результатов, неучет разнообразия возрастной патологии при математическом моделировании продолжительности жизни должно быть обосновано в любой предлагаемой модели.

Исходной посылкой известных моделей продолжительности жизни, поддерживающих две крайние позиции по данному вопросу: учет всего наблюдаемого многообразия причин смерти либо его полное игнорирование, является игнорирование взаимного влияния причин смертности.

Однако, простая трехпараметрическая модель Гомперца – Мейкема [4], описывающая с высокой точностью возрастную динамику общей смертности при самом разном соотношении отдельных причин смерти для реальных статистических данных, свидетельствует о согласованности отдельных причин смерти, их взаимодействии.

Таким образом, накопленные статистические данные смертности являются наблюдаемым результатом взаимодействия причин смертности. А известные методы не решают поставленную задачу, а позволяют получить выводы, исходя из наблюдаемых показателей смертности.

С этой целью они используют данные сервера ВОЗ и других медицинских и демографических сайтов, систематизирующих статистическую информацию, характеризующую динамику процесса вымирания, которая выражается в возрастных показателях общей смертности и возрастных показателях смертности по разным причинам. Статистические данные представляют собой наблюдаемые значения выделенных показателей, которые возникли в результате взаимодействия и взаимного влияния случайных процессов, обусловленных как внешними факторами, так и множественными биологическими процессами внутри человека. Результат этого взаимодействия проявляется в виде наблюдаемых статистических данных, классифицированных по различным причинам для различных стран и временных интервалов.

Поэтому актуальна разработка нового подхода и программных средств его реализации для выявления действующих повозрастных показателей смертности по каждой из причин, не искажённых воздействием других причин смерти и определяющих, в совокупности, наблюдаемые повозрастные показатели общей смертности.

Это позволит использовать восстановленные действующие значения смертности для уточнения выводов, полученных на основе наблюдаемых статистических данных, выявления отличительных особенностей действующих значений смертности для различных причин, различных возрастных групп и временных периодов, и воссоздания (корректировки) действующей картины динамики продолжительности жизни в целом.

В статье рассматриваются вопросы анализа медико-демографических данных с использованием аппарата вероятностно-алгебраического моделирования, позволяющего представлять случайный процесс формирования наблюдаемых показателей смертности в виде композиции случайных процессов формирования повозрастных показателей смертности по различным причинам с учетом заданных функций их взаимодействия.

В статье приводится математический аппарат вероятностно-алгебраического моделирования и описывается способ его использования для восстановления действующих значений возрастной смертности с учётом взаимодействия различных причин смертности. Применение подхода демонстрируется на примере оценки действующих значений возрастных показателей смертности по внешним причинам, использующем статистические данные CDC [5]. Приведенный пример поясняет идею предложенного подхода.

1 Формализация объекта исследования

Проводя аналогию с подходом оценки надёжности технических систем, будем рассматривать биологический объект в виде сложной системы, включающей ряд взаимосвязанных подсистем, функционирование которых подчиняется естественным законам накопления повреждений, характерных для технических систем. Учитывая согласованность причин смертностей, будем предполагать, что разрушение организма является многостадийным процессом, не зависящим от конкретных причин смерти [4].

При оценке продолжительности жизни биологических объектов будем использовать подход, основанный на выделении для взаимодействующих подсистем исследуемого объекта предельного состояния, свидетельствующего о прекращении его функционирования.

Объектом исследования является случайный процесс смертности для представителей социально-биологической группы на выбранном временном интервале.

С использованием вероятностно-алгебраического аппарата будем моделировать сложный случайный процесс взаимодействия множества причин смертностей, классифицированных ВОЗ и определяющих в конечном итоге продолжительность жизни человека (представителей социально-биологической группы). Исходными данными для реализации моделирования служит статистическая информация, характеризующая процессы смертности, которая имеется на различных демографических и медицинских серверах, обрабатывающих, классифицирующих и хранящих данные для различных стран и временных интервалов [5], [6].

Данные, характеризующие процесс смертности, представляют собой вектор, каждый элемент которого представляет число умерших в j-ой возрастной группе:

$$W = (w_1, w_2, ..., w_N), \tag{2.1}$$

где N – число возрастных групп исследуемого объекта. Имея вектор повозрастной численности исследуемой социально-биологической группы, а именно:

$$D = (d_1, d_2, ..., d_N), \tag{2.2}$$

можно получить вектор повозрастных интенсивностей смертности:

$$P^i = (p_1^i, p_2^i, ..., p_N^i), \sum_{j=1}^{N} p_j^i = 1,\ p_j = \frac{w_j}{d_j},\ j = \overline{1, N}, \tag{2.3}$$

где i – метка причины смертности, j – номер возрастной группы.

Известные наблюдаемые статистические данные представим в виде вектора вероятностей повозрастных показателей смертности по причине A:

$$P^A = (p_1^A, ..., p_N^A), \sum_{j=1}^{N} p_j^1 = 1\ . \tag{2.4}$$

Вектор вероятностей, описывающий повозрастные показатели общей смертности обозначим:

$$P^S = (p_1^S, ..., p_N^S), \sum_{j=1}^{N} p_j^1 = 1. \tag{2.5}$$

Обозначим действующие (очищенные от влияния других причин смертности) повозрастные показатели смертности по причине A для анализируемого объекта вектором:

$$P^{VA} = (p_1^{VA}, ..., p_N^{VA}), \sum_{j=1}^{N} p_j^1 = 1, \tag{2.6}$$

где j-ый элемент вектора определяет значение вероятности смерти по причине A для j-ой возрастной группы анализируемого объекта.

Действующие вероятностные повозрастные показатели смертности по всем остальным причинам, исключая A, обозначим вектором:

$$P^{V\bar{A}} = (p_1^{V\bar{A}}, ..., p_N^{V\bar{A}}), \sum_{j=1}^{N} p_j^2 = 1, \tag{2.7}$$

где j-ый элемент вектора определяет значение вероятности смерти для j-ой возрастной группы анализируемого объекта по различным причинам смертности, исключая причину A.

Опишем процесс взаимодействия причин смертностей моделью, включающей два компонента K_1 и K_2. Будем считать, что число состояний компонентов $S = \{S_j\}, j = \overline{1, N},$ определяется числом выделенных возрастных групп, для каждой из которых известны вероятности наблюдаемой общей смертности вида (2.5) и наблюдаемые значения смертности по причине A (2.4).

В настоящем изложении в качестве компонентов будем рассматривать случайные процессы формирования вероятностных значений смертности по различным причинам, взаимодействие которых описывается некоторой функцией F.

Ставится задача аналитического расчёта вектора действующих показателей смертности по причине A вида (2.6) для анализируемого объекта по наблюдаемым значениям общей смертности (2.5) и наблюдаемым значениям смертности по причине A (2.4).

С этой целью предлагается использовать метод вероятностно-алгебраического моделирования сложных систем [5], основанный на аппарате стохастических алгебр, которые порождаются операциями, описывающими функции взаимодействия компонентов (случайных процессов смертности), выделенных в процессе формализации объекта исследования.

2 Математическая основа вероятностно-алгебраического моделирования

Для заданной функции $F : S \times S \to S$ компонент $K_3 = K_1 * K_2$ назовем F-композицией компонентов K_1 и K_2, если $K_3 = F(K_1, K_2)$.

Для независимых компонентов эта композиция определяет вектор интенсивностей общей смертности $P^3 = P^1 * P^2$ по интенсивностям смертностей по причине 1 и причине 2, соответственно P^1 и P^2:

$$P_k^3 = \sum_{k=F(i,j)} P_i^1 P_j^2. \tag{3.1}$$

Ввиду линейности и дистрибутивности, введённая соотношением (3.1) операция умножения векторов пространства R^N порождает алгебру A_F.

Векторы

$$\sigma^1 = (1, 0, 0, 0, ..., 0), \sigma^2 = (0, 1, 0, 0, ..., 0), ...,$$
$$\sigma^N = (0, 0, 0, 0, ..., N)$$

являются базисными векторами алгебры A_F .

Умножением базисных векторов определяется тензор структурных коэффициентов алгебры – $\|a_{ij}^k\|$. Структурные коэффициенты алгебры A_F задаются следующим образом:

$$\|a_{ij}^k\| = \begin{cases} a_{ij}^k = 1, & если \quad k = F(i, j); \\ a_{ij}^k = 0, & если \quad k \neq F(i, j). \end{cases} \tag{3.2}$$

Алгебру, структурные коэффициенты которой удовлетворяют условию

$$\forall i, j, k,\ a_{ij}^k \geq 0 \text{ и } \sum_{k=1}^{N} a_{ij}^k = 1, \tag{3.3}$$

будем называть стохастической, поскольку элементами множества её представлений являются стохастические матрицы $M = \|m_{jk}\|$. Элементы матриц $M = \|m_{jk}\|$ определяются по формуле:

$$m_{jk} = \sum_{i=1}^{N} a_{ij}^k p_i, \tag{3.4}$$

где a_{ij}^{k} – структурные коэффициенты алгебры, p_i – элементы произвольного вектора вида (2.3).

Например, для стохастической алгебры A_F, порождённой функцией $F(i,j)=\min(i,j)$, формируется множество представлений, элементами которых являются стохастические матрицы. Вид этих матриц определяется исходным вектором вероятностей $P=(p_1,p_2,...,p_N)$:

$$M_{\min}=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 \\ p_1 & \sum\limits_{i=2}^{n} p_i & 0 & 0 & ... & 0 & 0 \\ p_1 & p_2 & \sum\limits_{i=3}^{n} p_i & 0 & ... & 0 & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... & .. & ... \\ p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & ... & \sum\limits_{i=n-1}^{n} p_i & 0 \\ p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & ... & p_{n-1} & p_n \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

Примерами других функций, описывающими композицию изображений, могут служить следующие: $F_1(i,j)=\max(i,j)$, $F_2(i,j)=\min(i,j)$, $F(i,j)=\min(i+j,N)$, $F_3(i,j)=|i-j|$ и другие. Эти функции имеют свою семантическую окраску и однозначно определяют коэффициенты вероятностно-алгебраического моделирования a_{ij}^{k}, удовлетворяющие условию (3.3) при реализации расчётов с использованием формулы (3.2).

4 Вероятностно-алгебраическая модель взаимодействия независимых причин смертностей

Для оценки продолжительности жизни социально-биологической системы используется модель, включающая два компонента K_1 и K_2. Компоненты отражают в модели случайный процесс смертности для исследуемого объекта, а именно: K_1 – отражает повозрастную смертность, обусловленную причиной 1; K_2 – представляет повозрастную смертность по причине 2. Повозрастные показатели смертности описываются векторами, соответственно P_1 и P_2, которые имеют вид (2.3).

Используя терминологию из области надёжности технических систем, предположим, что компоненты взаимодействуют по функции $F(i,j)=\min(i,j)$. То есть, модель для определения повозрастного показателя смертности имеет вид $K_3 = K_1 * K_2$, в которой процесс взаимодействия компонентов описывается функцией $F(i,j)=\min(i,j)$. Это означает, что отказ системы (смерть представителя социально-биологической группы) наступает либо по причине 1, либо по причине 2.

Вероятностно-алгебраическое моделирование реализует процесс формирования вектора вероятностей состояний системы по векторам вероятностей состояний структурных элементов с учётом взаимодействия и взаимного влияния последних [5]. В процессе моделирования аналитически рассчитывается результирующий вектор вероятностей, характеризующий вероятность общей повозрастной смертности вида (2.5).

С использованием структурных коэффициентов алгебры a_{ij}^{k} вида (3.2) операция умножения $P^3 = P^1 * P^2$, определённая соотношением (3.1), может быть представлена в виде:

$$p_k^3 = \sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{N} a_{ij}^{k} p_i^1 p_j^2, \text{ где } i,j,k=\overline{1,N}. \quad (4.1)$$

Вектора вида (2.3) являются исходными для реализации вероятностно-алгебраического моделирования. Структурные коэффициенты алгебры (3.3) называются коэффициентами вероятностно-алгебраического моделирования, а процесс формирования результирующего вектора вероятностей P^3 по исходным векторам вероятностей P^1 и P^2 называется вероятностно-алгебраическим моделированием.

Результатом вероятностно-алгебраического моделирования, характеризующим процесс взаимодействия причин смертностей для исследуемого объекта, является вектор вероятностей состояний (2.5), описывающий повозрастные показатели общей смертности.

Таким образом, зная значения векторов P^1 и P^2, а также закон их композиции F, по соотношению (4.1) можно определить значения результирующего вектора P^3.

Соотношение (4.1) может быть обобщено для описания композиции большего числа исходных компонентов (случайных процессов смертей по разным причинам). Так, для композиции трех компонентов (по причинам 1, 2 и 3) значения вектора повозрастных показателей общей смертности определяются следующим образом:

$$p_k^4 = \sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{l=1}^{N} a_{ijl}^{k} p_i^1 p_j^2 p_l^3, \text{ где } i,j,l,k=\overline{1,N}. \quad (4.2)$$

Такая модель описывает случайный процесс формирования повозрастных показателей общей смертности, когда важно выделить две лидирующие причины смертности. При этом в модели в качестве исходных данных используются значения повозрастных показателей по причине 1, повозрастных показателей по причине 2 и по причине 3. По ним в соответствии с заданной операцией аналитически с использованием описанного формализма формируется результирующий вектор повозрастных показателей смертности по всем причинам.

5 Решение задачи определения действующих показателей смертностей

С использованием описанного формализма возможно решение обратной задачи, а именно: нахождение значений вектора P^1 повозрастных показателей смертности по причине 1 по вектору вероятностей общей смертности P^3 и вектору вероятностей повозрастных показателей по причине P^2 соответственно.

С этой целью матрица M_{P^2} вида (3.5) определяется следующим образом:

$$M_{P^2} = \sum_{j=1}^{N} a_{ij}^k p_j^2. \quad (5.1)$$

Тогда операция умножения $P^3 = P^1 * P^2$ может быть представлена следующим образом:

$$P^3 = M_{p^2} \cdot P^1. \quad (5.2)$$

Откуда следует:

$$P^1 = (M_{p^2})^{-1} \cdot P^3. \quad (5.3)$$

Этот способ аналитических расчетов интересен для восстановления неизвестных векторов вероятностей смертности по причине 1 по известным данным.

В целом математически обоснованные аналитические расчёты (2.1)–(5.3), реализуемые в результате построения и использования вероятностно-алгебраических моделей «конкурирующие смертности», гарантируют точность получения результирующих данных даже в условиях отсутствия статистических данных. Для этой цели могут быть использованы как прямые (4.1), так и обратные (5.3) модели взаимодействия случайных процессов смертности.

Для решения задачи оценки действующих показателей строятся вероятностно-алгебраические модели с различными функциями взаимодействия компонентов.

Опишем случайный процесс взаимодействия действующих причин смертности двумя функциями F_1 и F_2.

Функция $F_1(i,j) = \min(i,j)$ задаёт операцию, порождающую стохастическую алгебру на множестве векторов вида (2.3) и позволяющую рассчитать коэффициенты вероятностно-алгебраического моделирования. При описании процесса взаимодействия причин смертностей указанной функцией, который реализуется вероятностно-алгебраическом умножением действующих векторов (2.6) и (2.7), номер состояния системы (результирующего элемента $К_3$) определяется состоянием с минимальным номером, характеризующим наступление смерти в более молодом возрасте.

Будем полагать, что функция F_2 имеет следующий вид:

$$F_2(i,j) = \begin{cases} i, & если\ i \le j; \\ N, & если\ i > j. \end{cases} \quad (5.4)$$

Это означает, что при расчёте коэффициентов моделирования (3.2), определяющих результат вероятностно-алгебраического умножения векторов (2.6) и (2.7), состояние системы определяет номер состояния (возрастной группы) вектора (2.6), если он меньше или равен номеру второго вектора (2.7). В противном случае результирующему состоянию присваивается номер *N*. С учётом семантики исследуемой предметной области это будет означать, что отдельно фиксируются случаи смерти по причине *A* для всех возрастных групп, а все случаи смертности по другим причинам относятся к состоянию *N*, определяющему последнюю возрастную группу.

Для восстановления действующих показателей смертности составляем две вероятностно-алгебраические модели. Первая модель имеет вид:

$$K_3 = F_1(K_1, K_2),$$

где компоненты K_1 и K_2 описываются векторами (2.6) и (2.7), а элемент K_3 описывает процесс взаимодействия этих элементов по функции. $F_1(i,j) = \min(i,j)$.

Будем считать, что значения вектора вероятностей, характеризующего элемент K_3, известны и задаются вектором (2.5), представляющим наблюдаемые повозрастные показатели общей смертности для исследуемых возрастных групп.

Вторая модель реализует вероятностно-алгебраическое умножение тех же векторов вероятностей (2.6) и (2.7), но по функции (5.4):

$$K_3 = F_2(K_1, K_2).$$

Полагаем, что результат вероятностно-алгебраического умножения описывается вектором (2.4), отражающим наблюдаемые повозрастные показатели смертности по причине *A*.

Решение системы двух уравнений (5.2) и (5.3) позволяет восстановить вероятности действующих повозрастных показателей смертности по причине *A* (2.6) и вероятности действующих повозрастных показателей смертности по всем остальным причинам (2.7) без учёта взаимодействия (конкуренции) причин в случайном процессе смертности.

6 Восстановления действующих повозрастных показателей смертности от внешних причин. Применение разработанного метода к полученным с сайта CDC [6] данным, отражающим процесс смертности для мужчин в 1999 году в США, позволило найти единственное решение задачи восстановления векторов действующих вероятностей показателей смертности, обусловленных внешними причинами и всеми остальными причинами, исключая внешние.

На рисунке 6.1 представлены зависимости логарифмических значений векторов вероятностей повозрастных показателей смертности (логарифмических значений интенсивностей смертности) от возраста для анализируемых данных, а именно: наблюдаемые значения повозрастного показателя общей смертности (2.1); наблюдаемая повозрастная смертность по внешним причинам (2.2); действующая повозрастная смертность по внешним причинам (2’); действующая повозрастная смертность по другим причинам (1’).

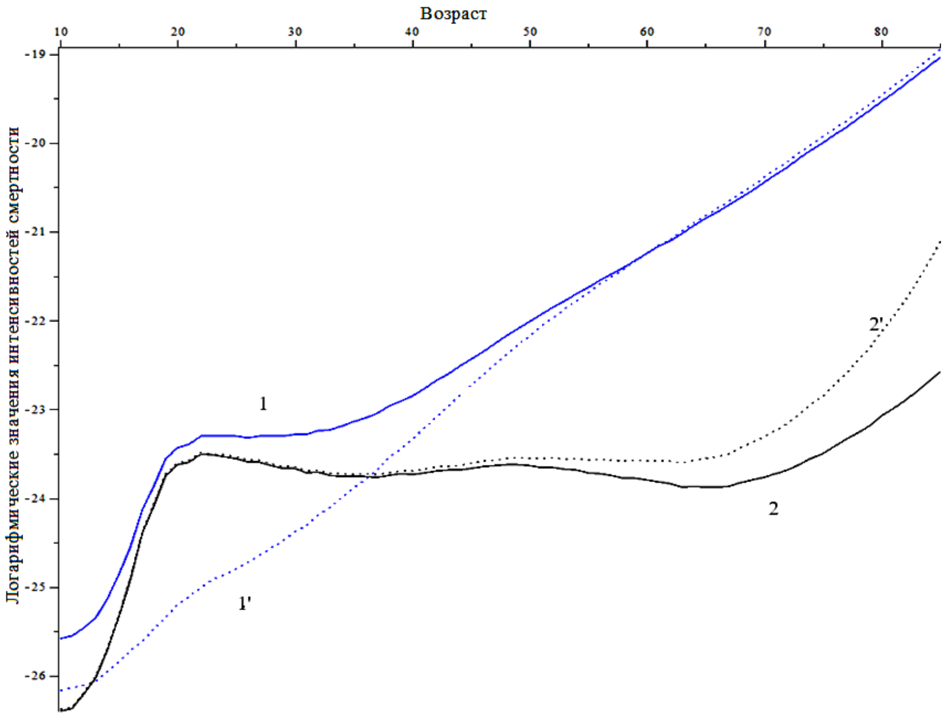
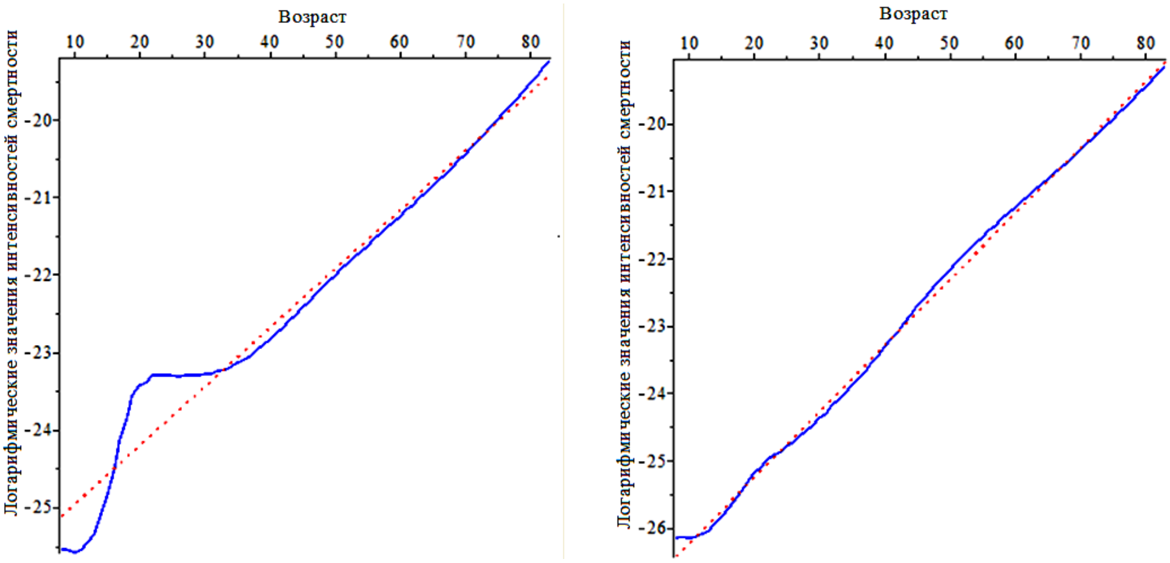


Рисунок 6.1 – Зависимость логарифма значений векторов вероятностей наблюдаемых и действующих смертностей от возраста



а) *kf*2 = 0,98381483883829479886 *б*) *kf*1 = 0,99907157285602160981

Рисунок 6.2 – Зависимости логарифмов значений интенсивностей повозрастной общей смертности (*а*) от возраста и логарифмов значений интенсивностей повозрастной общей смертности от возраста, в предположении, что смертность по внешним причинам была корректно исключена (*б*)

На рисунке 6.2 представлены завосимости логарифмических значений интенсивностей повозрастной общей смертности (*а*) и общей смертности, в предположении, что смертность по внешним причинам была корректно исключена (*б*).

Как видно из рисунков, рисунок 6.2 согласуется с законом Гомперца (на рисунках представлен пунктирной линией). Полученная точность расчетов значительно превышает точность наблюдаемых статистических данных: *kf*1 = 0,9990715. А точность проведенных расчётов определяется точностью исходных данных.

Заключение

В статье представлен точный аналитический способ нахождения действующих значений повозрастной смертности по различным причинам по наблюдаемой повозрастной смертности.

Расчёты реализуются путем построения двух вероятностно-алгебраических моделей, использующих известные наблюдаемые значения смертности.

Полученные аналитическим способом значения действующих повозрастных показателей смертности по различным причинам позволяют провести сравнительный анализ их с аналогичными наблюдаемыми показателями смертности и оценить разницу между ними.

Практическое значение предложенного подхода: определив значения действующих повозрастных показателей смертности (не искажённые влиянием других причин смертности), можно тем самым определить их долю в общей смертности и стратегическое направление снижения смертности. При этом среди огромного многообразия причин смерти удастся выделить небольшое их число и оценить их непосредственное влияние на общую смертность. Практическая значимость полученных результатов состоит в возможности оценить ожидаемое снижение общей смертности в результате применения мер по предупреждению смертности по лидирующими причинам смертности.

Таким образом, предложен принципиально иной подход к оценке вероятностных показателей повозрастной смертности и оценке значимости причин смерти, основанный не на статистически наблюдаемой величине смертности по данной причине, а на первичной, изначальной величине смертности без учёта влияния всех остальных причин на общую смертность.

Использование предложенного подхода, описывающего процесс взаимного влияния причин смертностей в процессе вымирания социально-биологической системы, позволит уточнить выводы, вытекающие из анализа статистических медико-демографических данных для различных исследуемых объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Woodbury*, *M.A*. A theoretical model of the physiological dynamics of circulatory disease in human populations / M.A. Woodbury, K.J. Manton // Hum. Biol. – 1983. – Vol. 55. – P. 417–441.

2. *Skurnick*, *F.D*. Stochastic studies of aging and mortality in rnulticellular organisms. I. The asymptotic theory / F.D. Skurnick, G. Kemeny // Mech. Ageing and Develop. – 1978. – Vol. 7. – P. 65–80.

3. *Сукач*, *Е.И*. Имитационное моделирование продолжительности жизни биологических систем / Е.И. Сукач, В.Л. Мережа, Т.Я. Каморникова // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2003. – № 3 (54). – С. 96–100.

4. *Гаврилов*, *Л.А*. Биология продолжительности жизни / Л.А. Гаврилов, Н.С. Гаврилова. – Москва: Наука, 1991. – 280 с.

5. *Сукач*, *Е.И*. Вероятностно-алгебраическое моделирование сложных систем графовой структуры / Е.И. Сукач. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – 224 с.

6. *National Center for Health Statistics*: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cdc.gov/nchs/deaths.htm – Дата доступа: 6.04.2024.

Поступила в редакцию 07.06.2024.

Информация об авторах

Сукач Елена Ивановна – к.ф.-м.н., доцент
Кончиц Андрей Петрович – к.б.н.