

Орлов Юрий Николаевич

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, сектор кинетических уравнений
МФТИ, кафедра высшей математики

Методы
математической демографии:
современное состояние, проблемы, точные результаты

ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМАТИКУ

Цели демографического исследования

- Спрогнозировать численность людей определенной категории (возрастной, половой, социальной, этнической), которые будут находиться на некоторой территории (город, страна, мир) в заданный момент времени (год). Для этого необходимо:
 - определить вероятность смерти по всем причинам для представителей выбранной страны;
 - определить вероятности перехода из одной социальной страны в другую и миграционный поток в единицу времени (год);
 - определить вероятность рождения ребенка в данный год в данной социальной стране.

Важность знания демографического положения и тенденций

- Численность трудоспособного населения определяет уровень использования производственных мощностей, потребность в будущих рабочих местах, желаемый уровень трудовой миграции.
- Изменение соотношения между численностью трудоспособного населения и пенсионеров приводит к изменению внутреннего социально-экономического уклада.
- Численность новорожденных определяет будущую численность ВС, потребность в детских садах, школах, ВУЗах, а также необходимую численность учителей, врачей и т.п.
- Внутренняя и внешняя миграции приводят к изменению этнического состава поселений и уровня заселенности территорий.

Методы исследования

- Эмпирико-статистические методы:
 - перепись населения;
 - обработка текущих данных;
 - оценка точности проведенных измерений.
- Методы математического моделирования:
 - модель эволюции по возрасту распределения;
 - модель изменения коэффициента воспроизводства;
 - модель ассимиляции в полиэтническом сообществе;
 - модели нелинейной динамики для описания численности.

Основные определения

- Возрастная когорта – численность людей в определенном возрастном промежутке
- Когортная рождаемость – среднее число детей, рожденных женщиной определенного года рождения в течение своей жизни
- Нетто-коэффициент воспроизводства – среднее число девочек от одной матери, доживающих до среднего возраста матери
- Фертильность – число рождений на 1000 женщин данного возраста в текущий год.
- Стандартизованный коэффициент смертности – число умерших в течение года на 1000 списочного состава людей данного возраста

Демографический переход

«Демографический переход» (Ландри, Ноутстайн, 1945) – смена типа воспроизводства населения. Вместо высокой рождаемости при высокой смертности общество перешло к низкой рождаемости при низкой смертности.

Основные этапы перехода:

1. Прогресс в науках и технологиях —→ успехи медицины —→ снижение смертности во всех возрастах.
2. Т.к. рождаемость осталась прежней, численность населения резко возрастает.
3. С запаздыванием на 40-50 лет рождаемость снижается, и еще через 40-50 лет население становится стабильным.

Фактически же рождаемость снизилась так, что воспроизводство стало отрицательным.

Точность измерения в демографии

Ошибка в подсчете численности при переписи – 5%.

Искажение национальной принадлежности при самоидентификации.

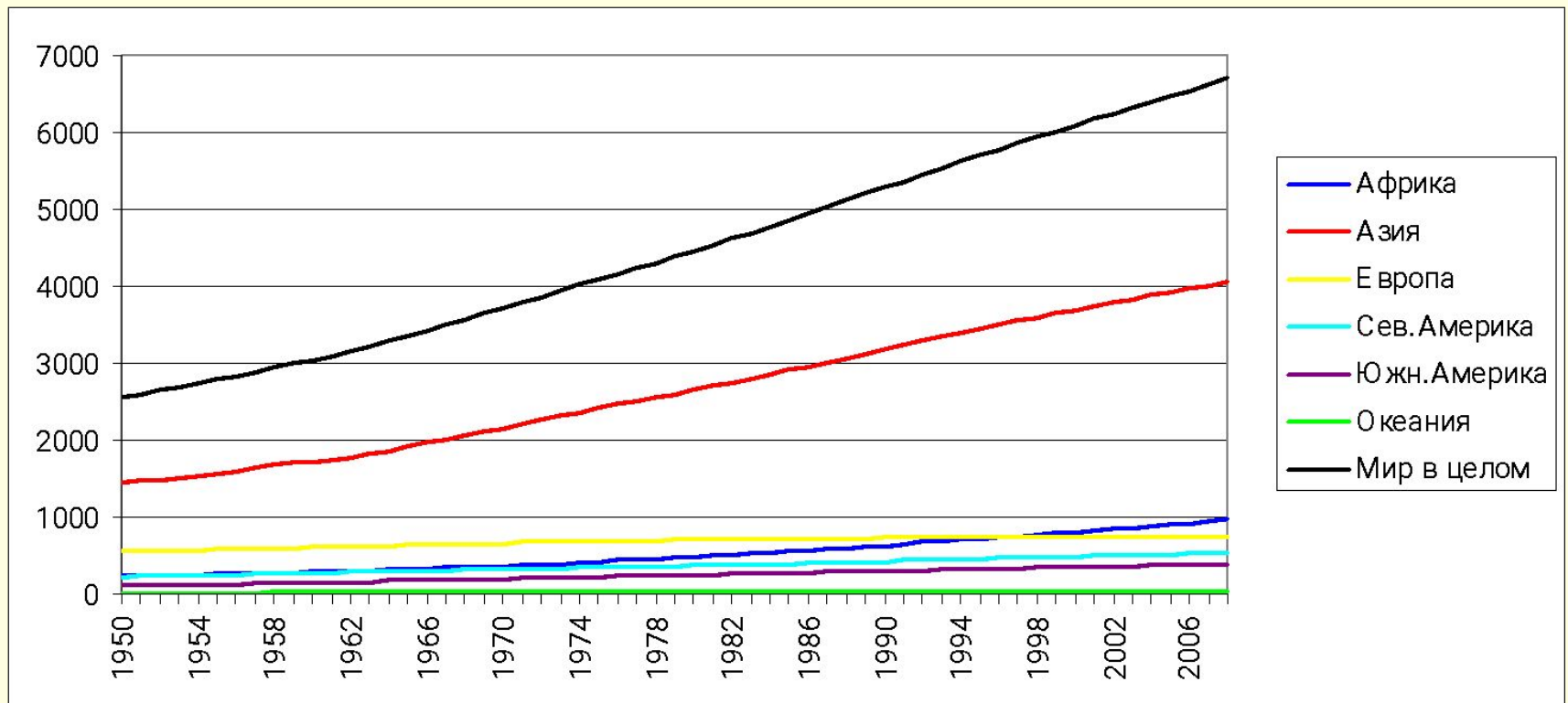
Неточность определения причины и места смерти, недоучет долгосрочной трудовой миграции.

В разных странах различные подходы к определению младенческой смертности: «кого считать живым?»

Ошибка в оценке миграции – до 500%.

ДЕМОГРАФИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ В РОССИИ И В МИРЕ

Динамика численности мирового населения

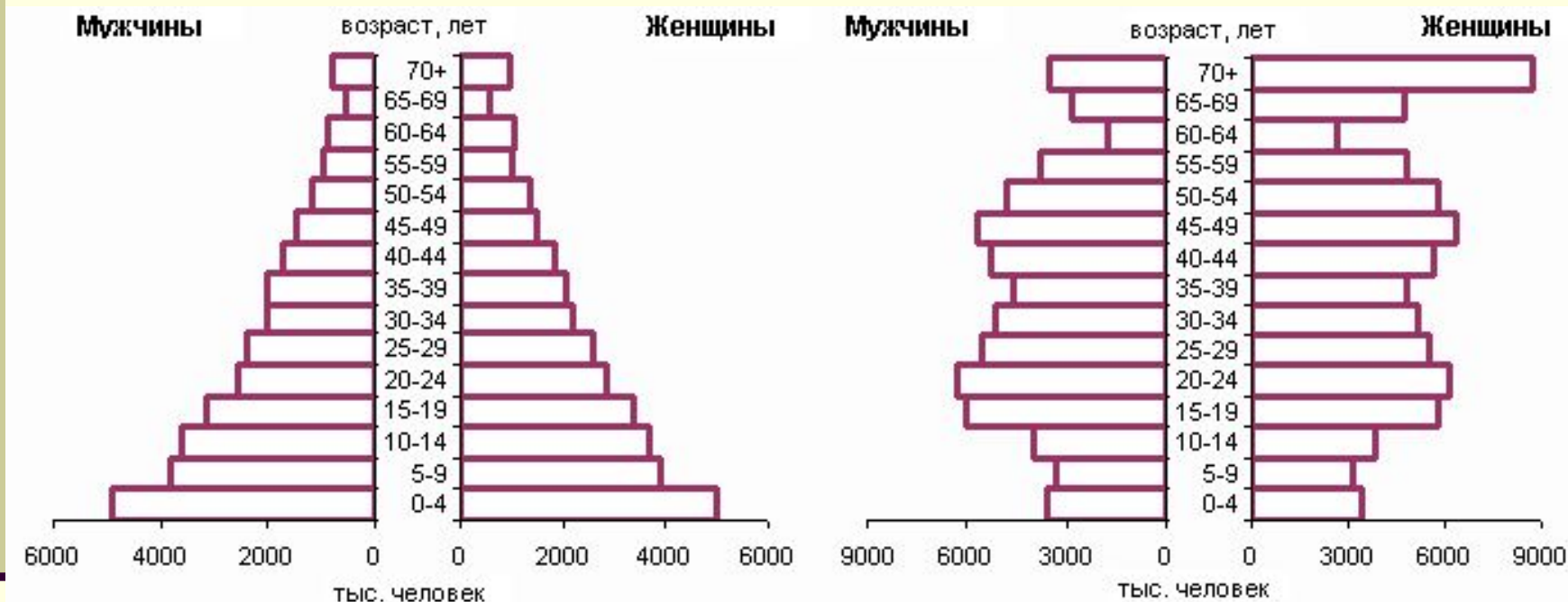


Рост населения мира по континентам, млн чел.

Динамика численности населения России



Изменение возрастной структуры населения России за 100 лет

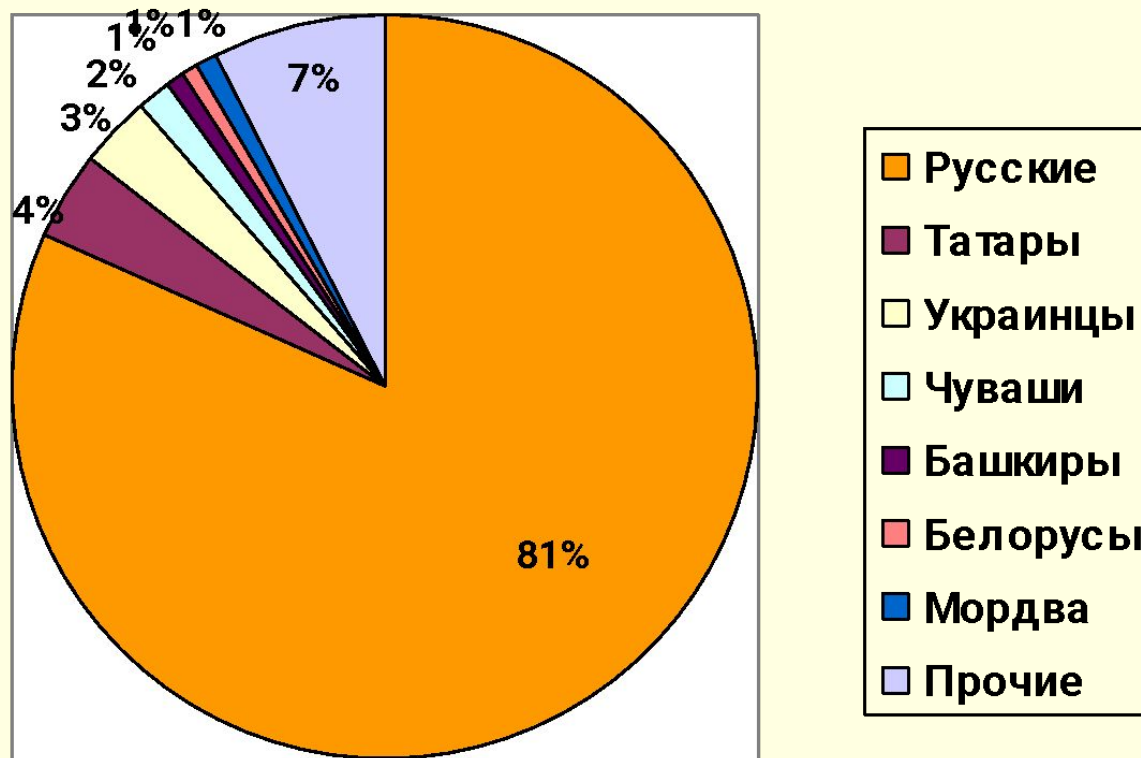


1897 г. (первая перепись)

2007 г. (расчет на основе переписи 2002 г.)

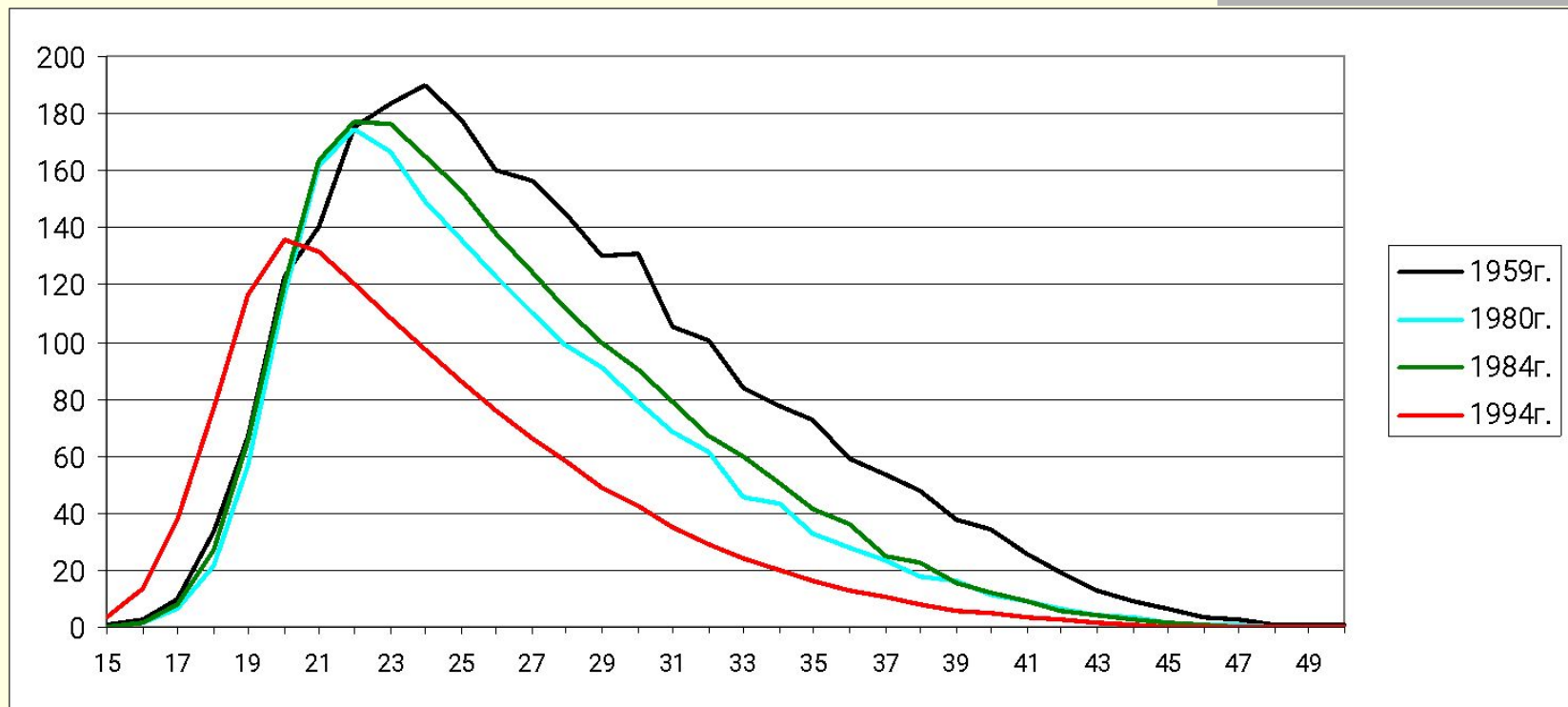
Этнический состав России

(на основе самоидентификации по переписи 2002 г.)



РОЖДАЕМОСТЬ

Возрастной коэффициент рождаемости, Россия

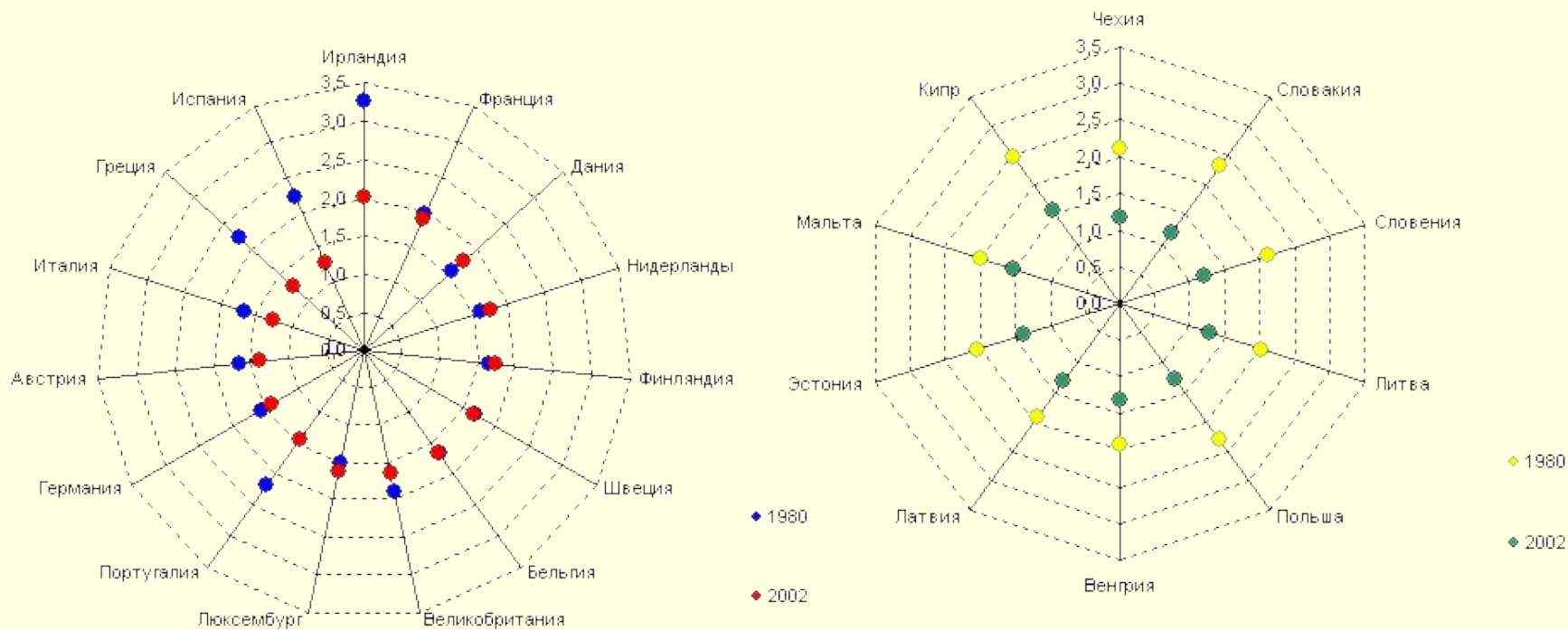


Число рождений на 1000 женщин данного возраста.

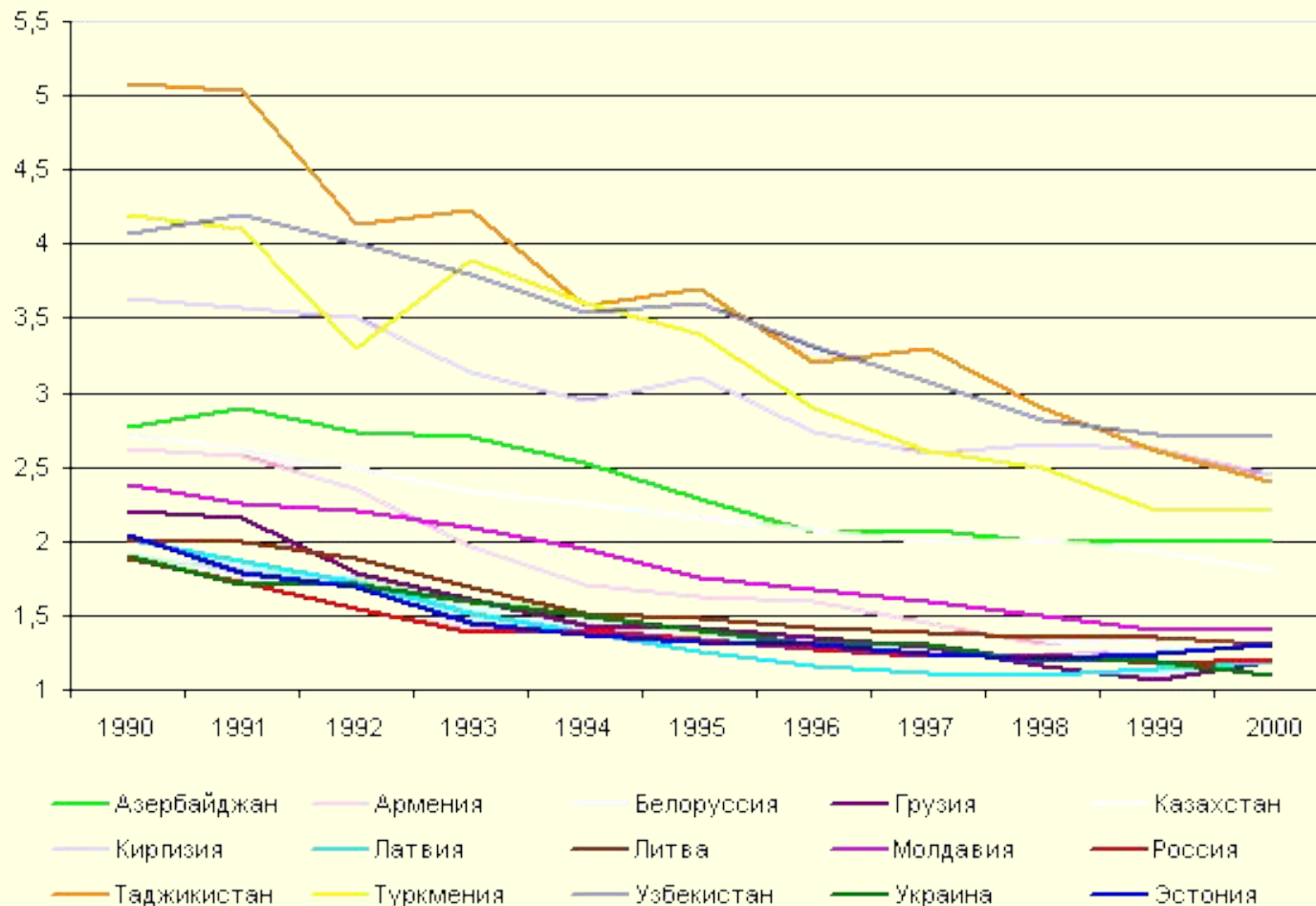
Коэффициент рождаемости (интеграл) на 1 женщину:

2,58 (1959г.), 1,86 (1980г.), 2,05 (1984г.), 1,38 (1998-2006гг.).

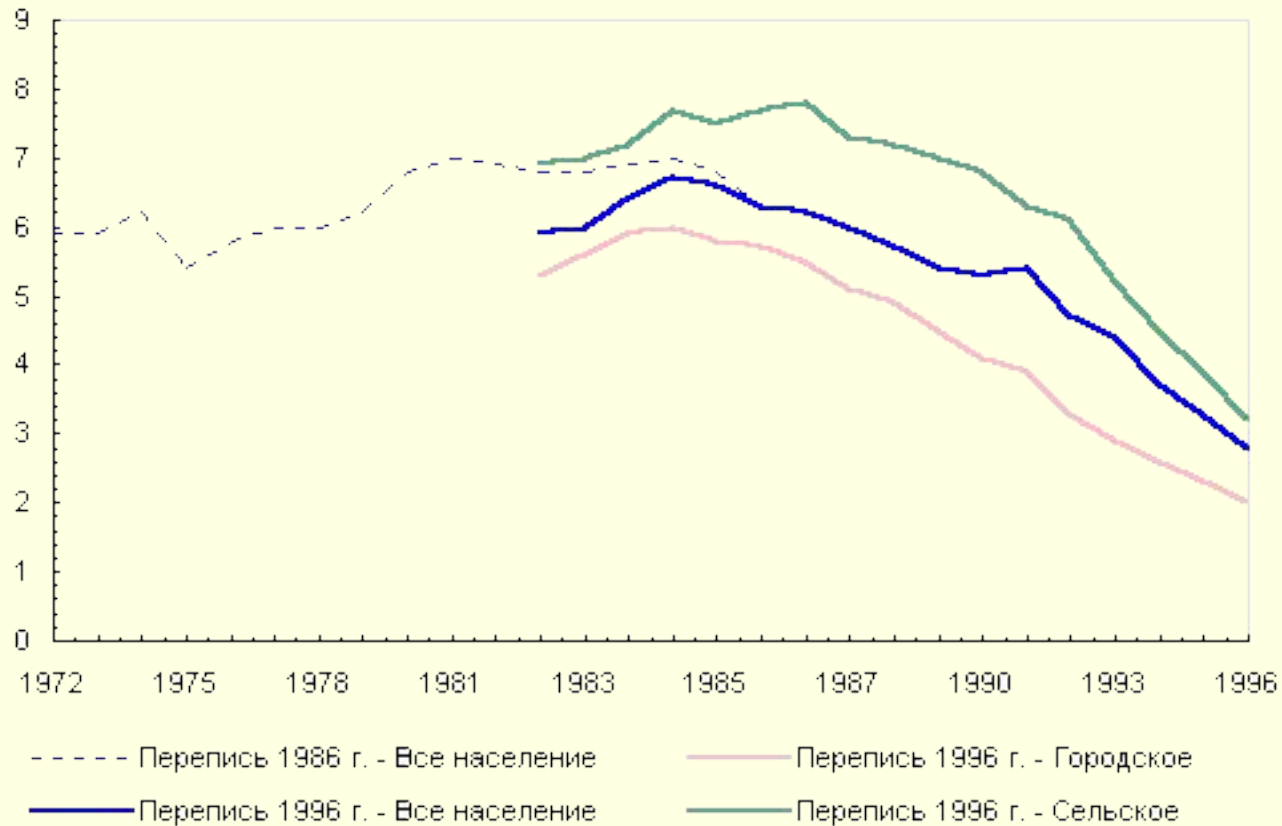
Динамика коэффициента рождаемости в странах Европы



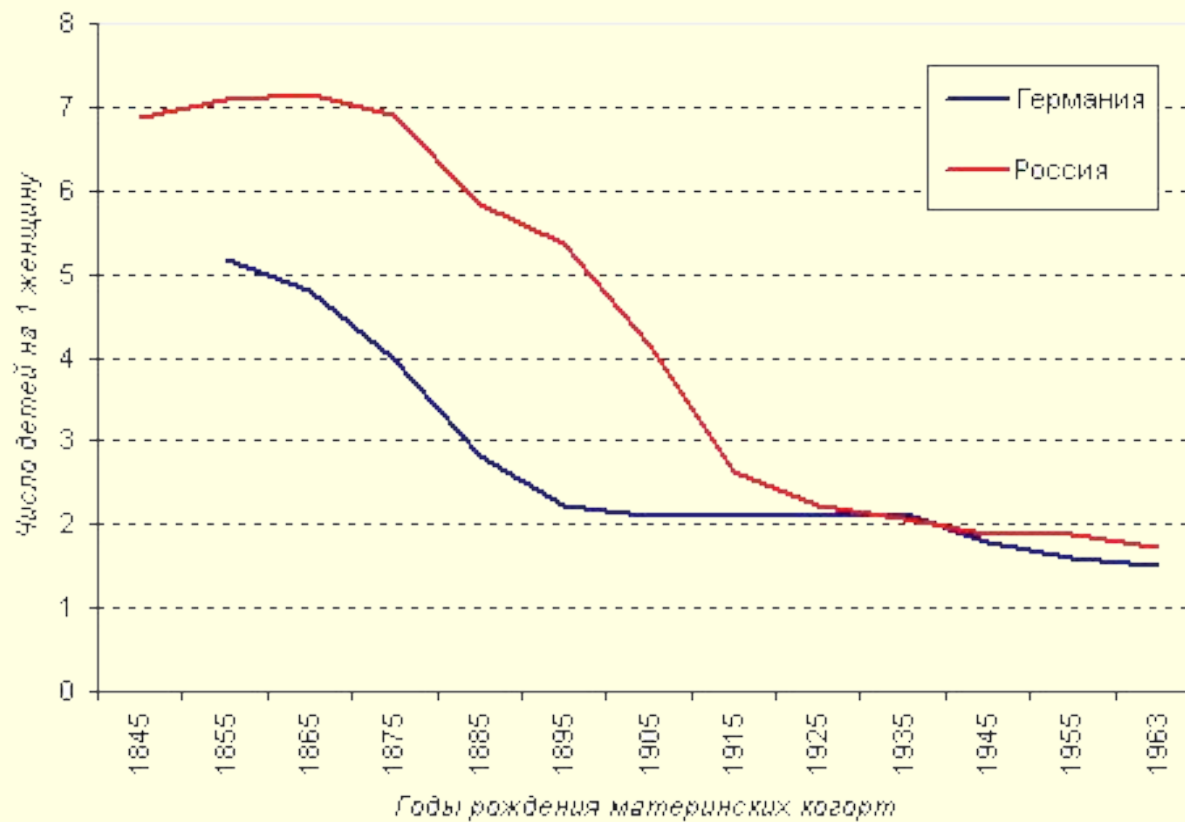
Динамика коэффициента рождаемости в странах СНГ



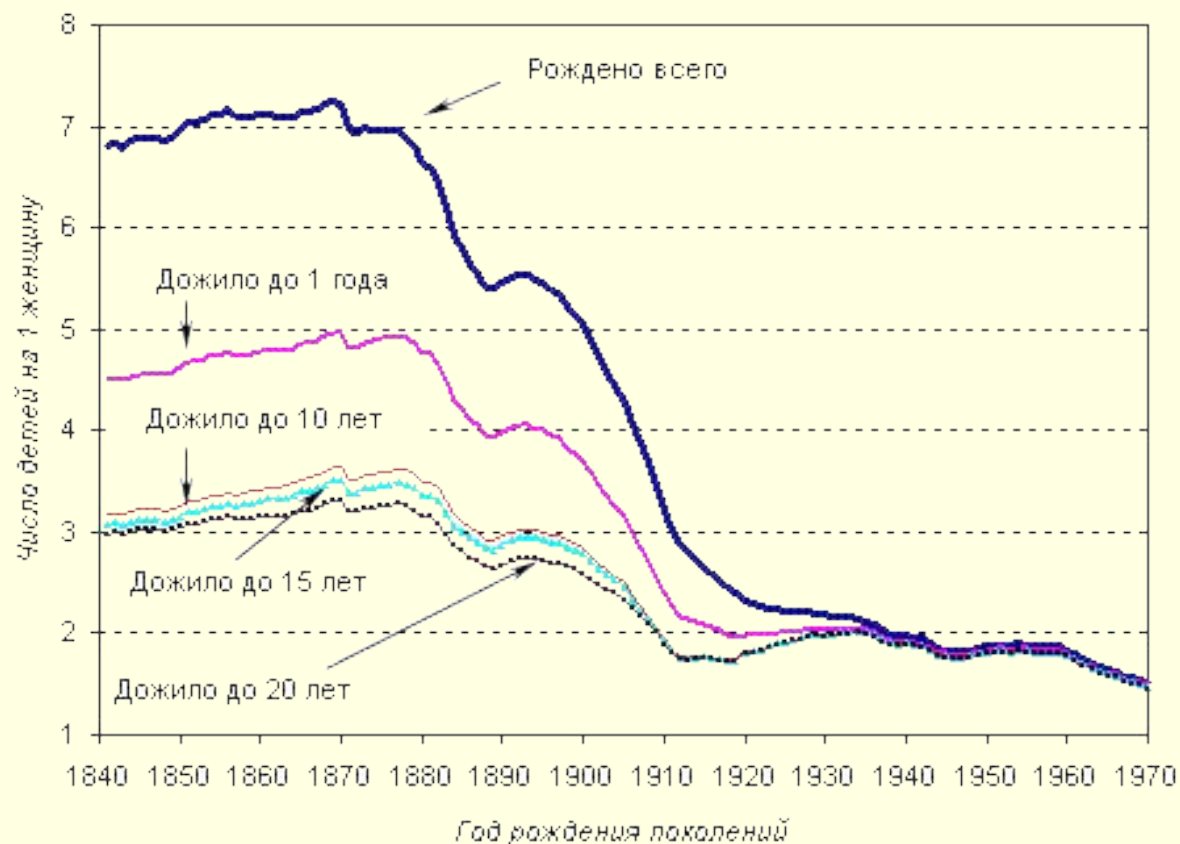
Динамика коэффициента рождаемости в Иране



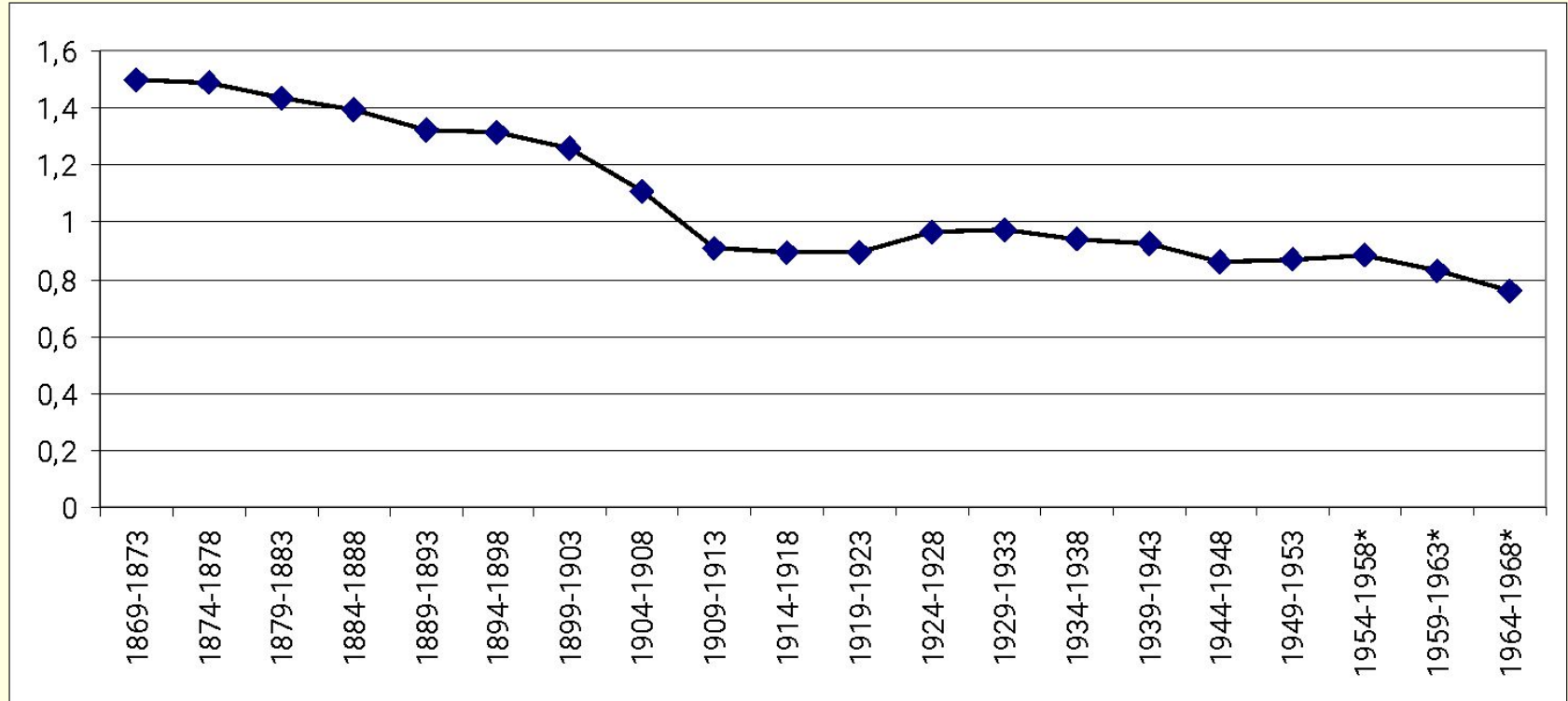
Когортная рождаемость



Детализация когортной рождаемости в России



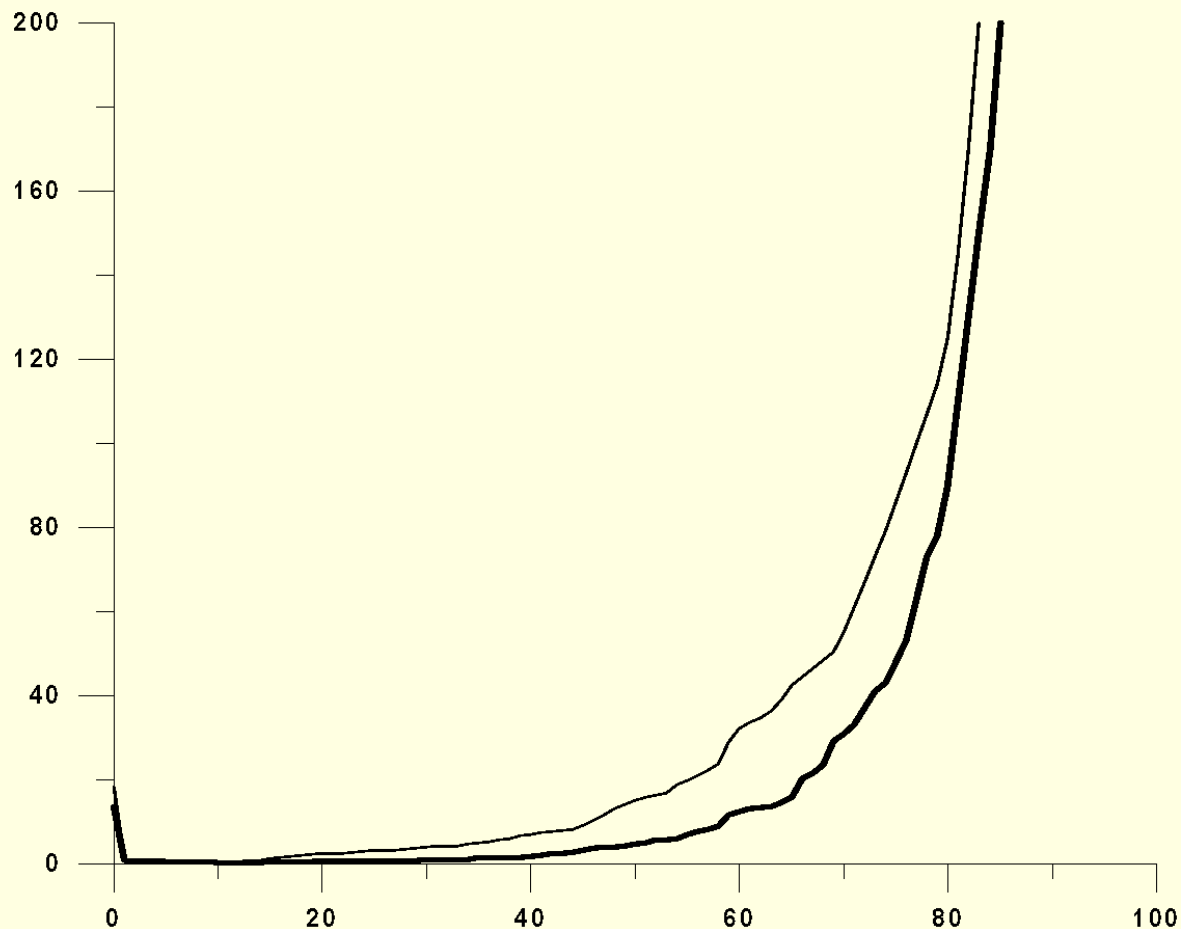
Нетто-коэффициент воспроизводства в России



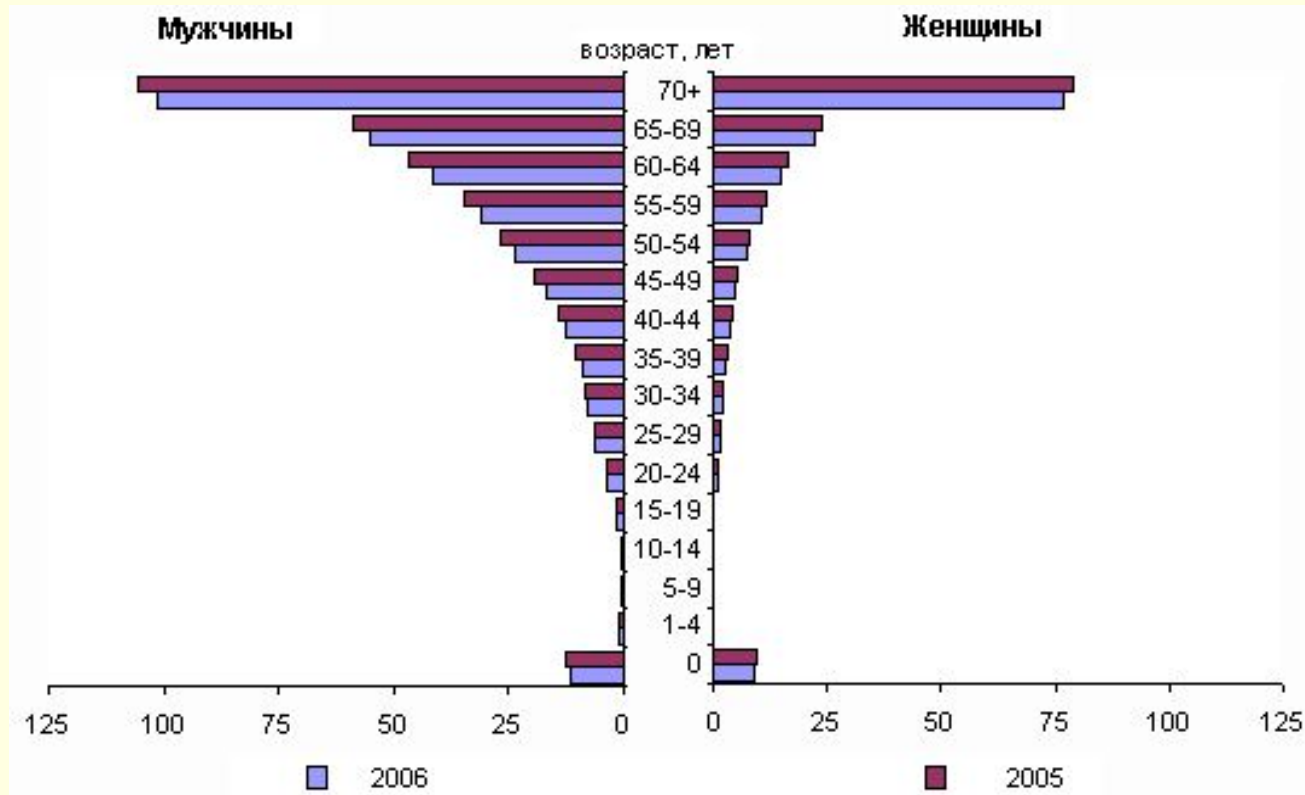
Число девочек, рожденных женщиной данной возрастной когорты в течение жизни, и доживших до среднего возраста матери

СМЕРТНОСТЬ

Возрастные коэффициенты смертности на 1000 чел., Россия

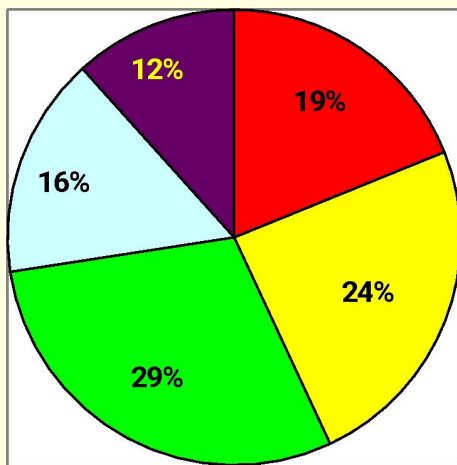


Снижение смертности в 2005/2006 гг.

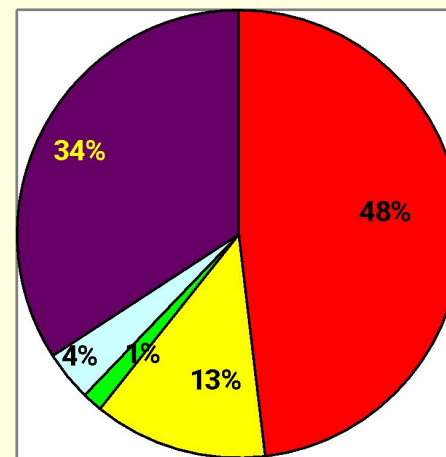


Ожидаемая продолжительность жизни (средний возраст смерти) составила: у мужчин 60,4 года (+1,5 года), у женщин 73,2 года (+0,8)

Причины смертности



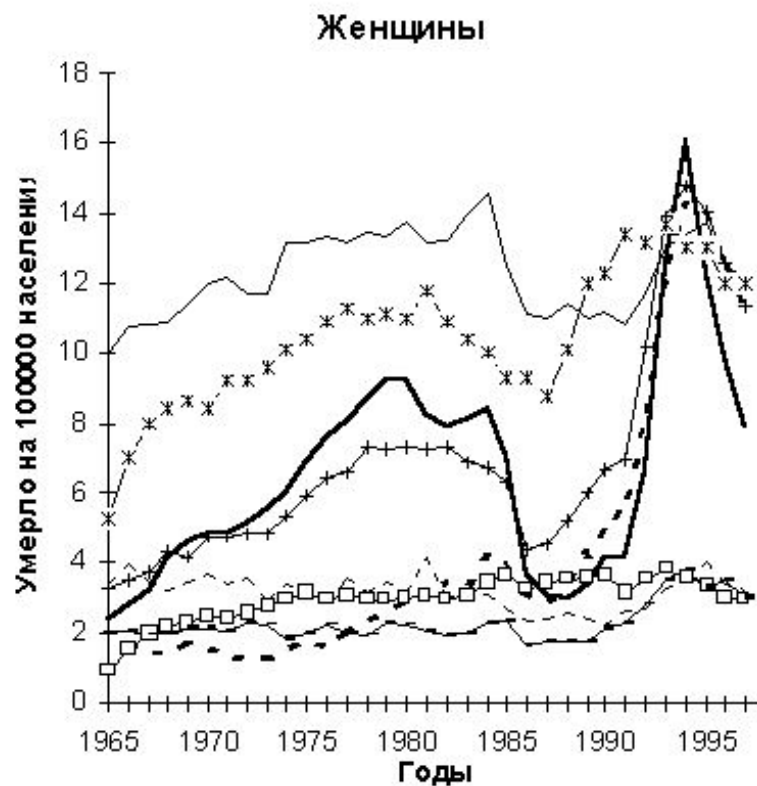
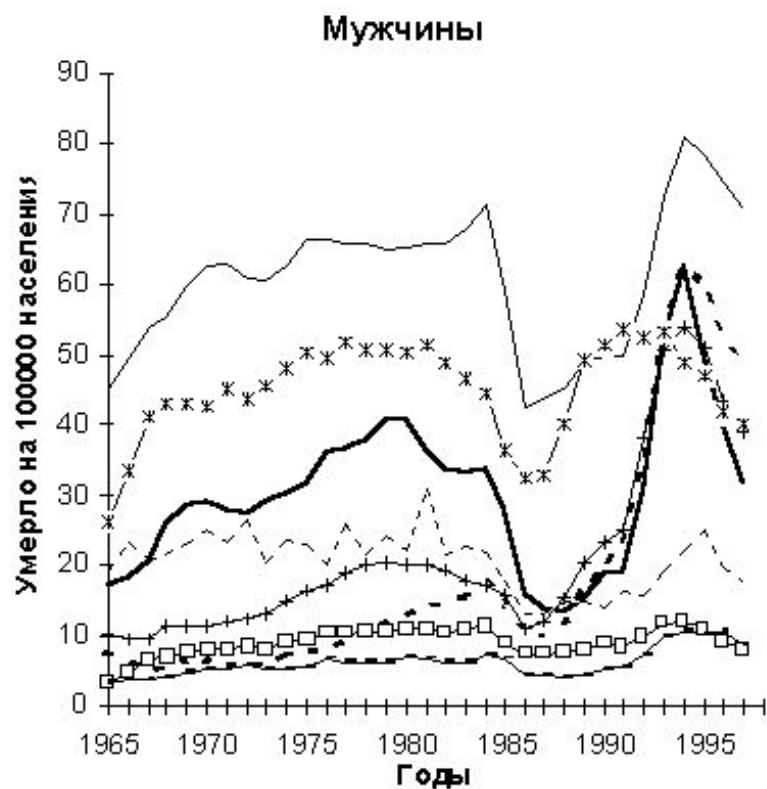
Мир



Россия

1 – болезни сердечно-сосудистой системы, 2 – новообразования, 3 – инфекции, 4 – болезни органов дыхания, 5 – внешние причины

Смертность от внешних причин



—x— ДТП

— Алк. отравления

□ Падения

— Пожары

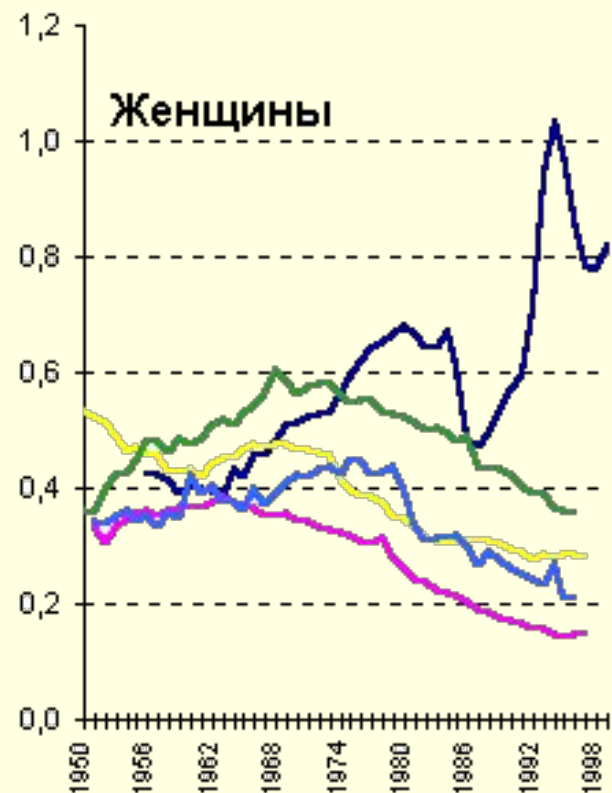
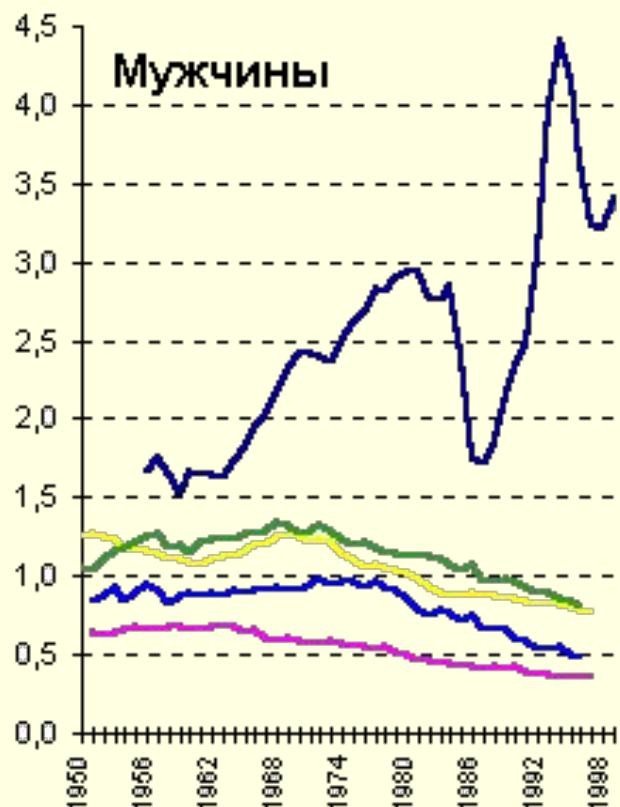
----- Утопления

— Самоубийства

+ Убийства

- - - Неуст. насилие

Сравнение смертности от внешних причин (на 1000 чел.)



— Россия — Великобритания — США — Франция — Швеция

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Обозначения

- Пусть $N^{M,F}(x,t)$ – численность мужчин « M » и женщин « F » возраста x (лет) в момент времени t .
- $B(x)$ – возрастной коэффициент рождаемости, так что $\int B(x)N^F(x,t)dx$ есть число детей, рождаемых в год t ;
- $q^{M,F}(x)$ – возрастной коэффициент смертности;
- $p^{M,F}(x,t)$ – миграционный поток.

Демографическое уравнение

$$\frac{\partial N^{M,F}(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial N^{M,F}(x,t)}{\partial x} = -q^{M,F}(x)N^{M,F}(x,t), \quad x > 0, t > 0;$$

$$N^M(0,t) = 0,512 \int_0^{\infty} B(x)N^F(x,t)dx; \quad N^F(0,t) = 0,488 \int_0^{\infty} B(x)N^F(x,t)dx;$$

$$N^{M,F}(x,0) = N_0^{M,F}(x).$$

Уравнение описывает движение вдоль оси времени и смертность, граничные условия отвечают рождению, а в начальный момент задается некоторое известное распределение.

Общее решение

Общее решение демографического уравнения имеет вид

$$N^{M,F}(x,t) = f^{M,F}(t-x)Q^{M,F}(x)$$

где f есть произвольная функция, а Q – функция дожития, которая показывает долю людей, доживших до возраста x :

$$Q^{M,F}(x) = \exp\left(-\int_0^x q^{M,F}(y)dy\right)$$

Решение уравнения для $f^F(x, t)$

Функция $f^F(x)$ определяется из начального и граничного условий демографического уравнения.

Поскольку начальное условие имеет вид $N_0^F(x) = f^F(-x)Q^F(x)$, то при отрицательных аргументах функции f ее значения определяются формулой

$$f^F(-x) = N_0^F(x) / Q^F(x).$$

При положительных аргументах из граничного условия следует

$$f^F(x) = \int_0^x K^F(x-y)f^F(y)dy + \int_{-\infty}^0 K^F(x-y)f^F(y)dy, \quad x \geq 0;$$

$$K^F(x) = Q^F(x)B^F(x).$$

Решение уравнения для $f^F(x, t)$

В результате для $f^F(x)$ получилось интегральное уравнение второго рода с разностным ядром и переменным верхним пределом (уравнение Вольтерра или уравнение восстановления):

$$f^F(x) = \varphi^F(x) + \int_0^x K^F(x-y)f^F(y)dy,$$

$$\varphi^F(x) = \int_0^{\infty} K^F(x+y) \frac{N_0^F(y)}{Q^F(y)} dy.$$

Решение этого уравнения получается с помощью преобразования Лапласа. Введем лапласовский образ ядра

$$\tilde{K}^F(s) = \int_0^{\infty} K^F(x)e^{-sx} dx.$$

Решение уравнения для $f^F(x, t)$

Решение уравнения восстановления в образах имеет вид

$$\tilde{f}^F(s) = \frac{\tilde{\varphi}^F(s)}{1 - \tilde{K}^F(s)}.$$

Тогда
$$f^F(x) = \varphi^F(x) + \int_0^x R^F(x-y)\varphi^F(y)dy = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \frac{\tilde{\varphi}^F(s)e^{sx}}{1 - \tilde{K}^F(s)} ds,$$

$$R^F(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \tilde{R}^F(s)e^{sx} ds,$$

где лапласовский образ резольвенты $\tilde{R}^F(s)$ определяется через образ ядра исходного уравнения по формуле

$$\tilde{R}^F(s) = \frac{\tilde{K}^F(s)}{1 - \tilde{K}^F(s)}.$$

Решение уравнения для $N^F(x, t)$

Собственные значения ядра уравнения восстановления являются решениями уравнения

$$\tilde{K}^F(s) = 1.$$

Пусть эти корни s_k простые. Тогда собственные функции имеют вид

$$f_k(x) = e^{s_k x},$$

и решение уравнения восстановления представляет их линейную комбинацию:

$$f^F(x) = \sum_k r_k e^{s_k x}, \quad r_k = \lim_{s \rightarrow s_k} \frac{(s - s_k) \tilde{\varphi}^F(s)}{1 - \tilde{K}^F(s)}.$$

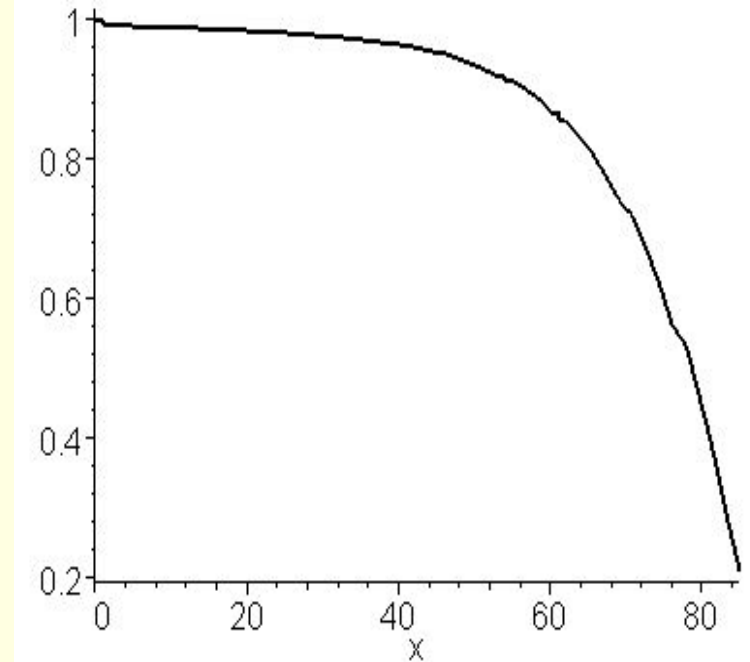
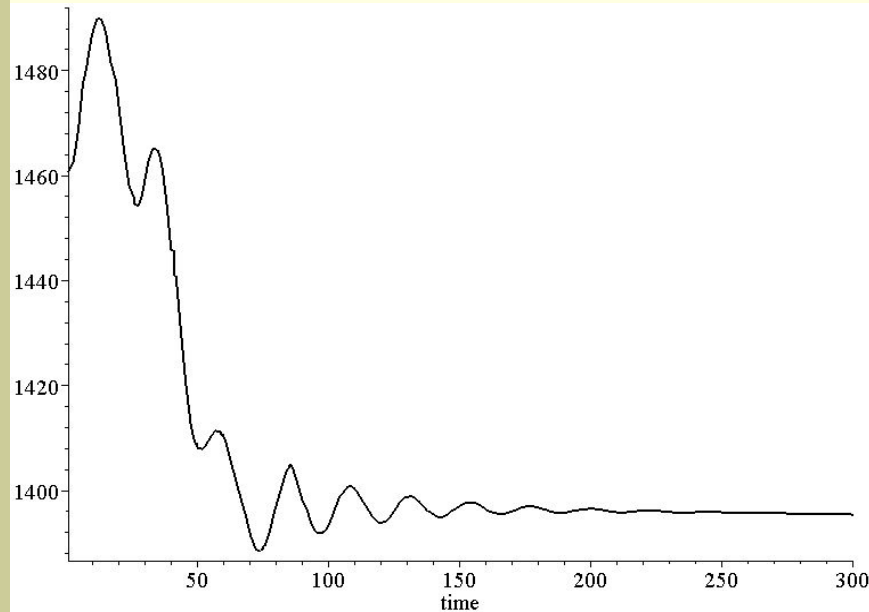
Решение исходного уравнения имеет вид:

$$N^F(x, t) = Q^F(x) \sum_k r_k e^{s_k(t-x)}.$$

Оценка корня:
$$\operatorname{Re}(s) = \frac{1}{T_{mother}} \frac{k_{netto} - 1}{k_{netto}}.$$

ПРОГНОЗЫ И СЦЕНАРИИ

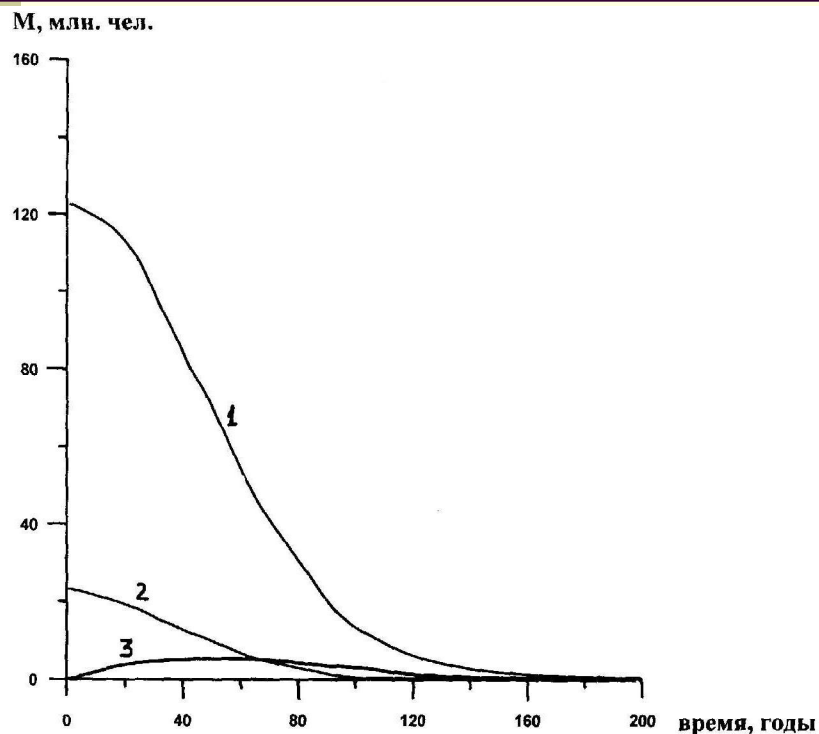
Модель стабильного населения



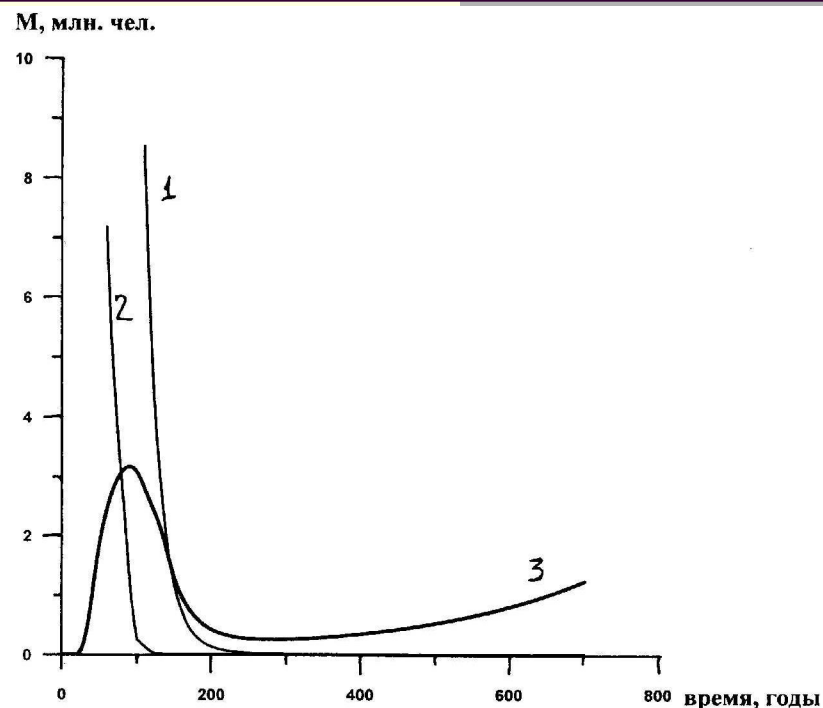
Динамика полной численности населения по годам на 100 тыс. чел. при увеличении рождаемости в когорте 19-24 года в 2,12 раз (слева) и распределение населения по возрастам для этого стационарного режима (справа).

$$\int_0^{\infty} B^{M,F}(x)Q^{M,F}(x)dx \equiv \int_0^{\infty} K^{M,F}(x)dx = 1 \Rightarrow N(x) = N(0)Q(x)$$

Сценарий выживания (1-аборигены, 2-пришельцы, 3-метисы)

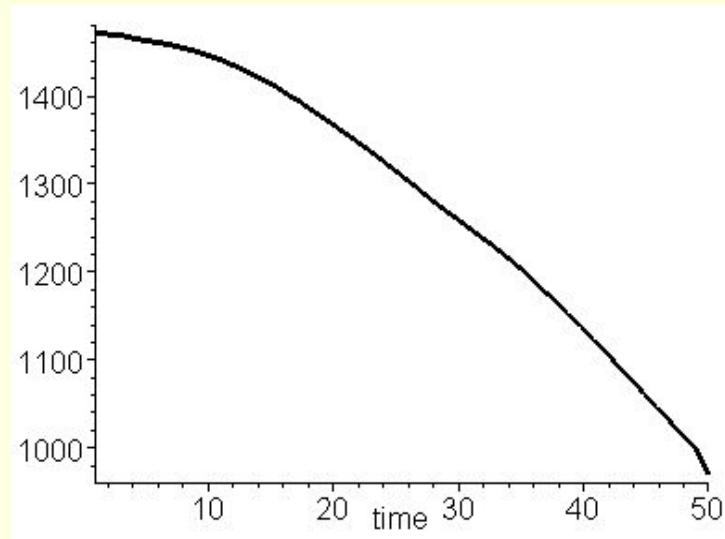
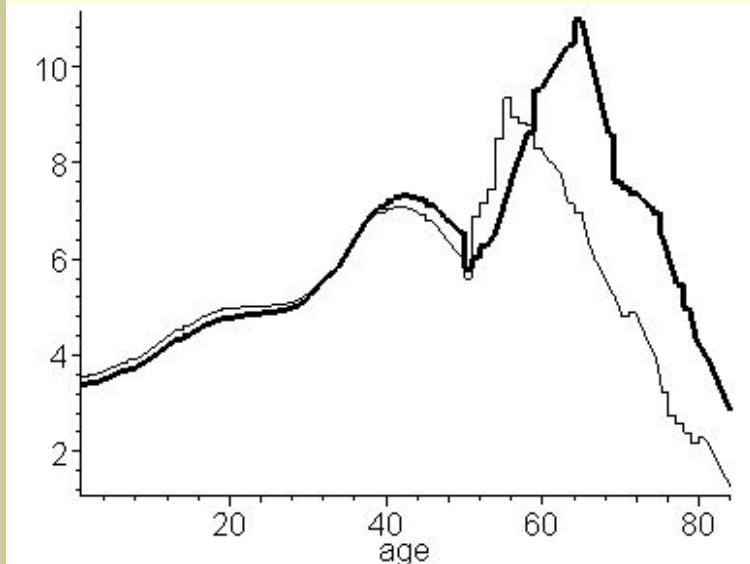


Трех-групповая модель ассимиляции без брачных предпочтений и без учета миграции.



Пяти-групповая модель ассимиляции без брачных предпочтений и без учета миграции. Выживают левые метисы, если рождаемость пришельцев повысить в 1,5 раза.

Среднесрочный прогноз численности населения России



Повозрастное распределение (слева) и полная численность (справа) населения России к 2050 г., 100 тыс. чел.
«Наивный прогноз» по состоянию на 2000 г.