

# Технологический императив как основа теории глобального демографического процесса

**Подлазов Андрей Викторович**

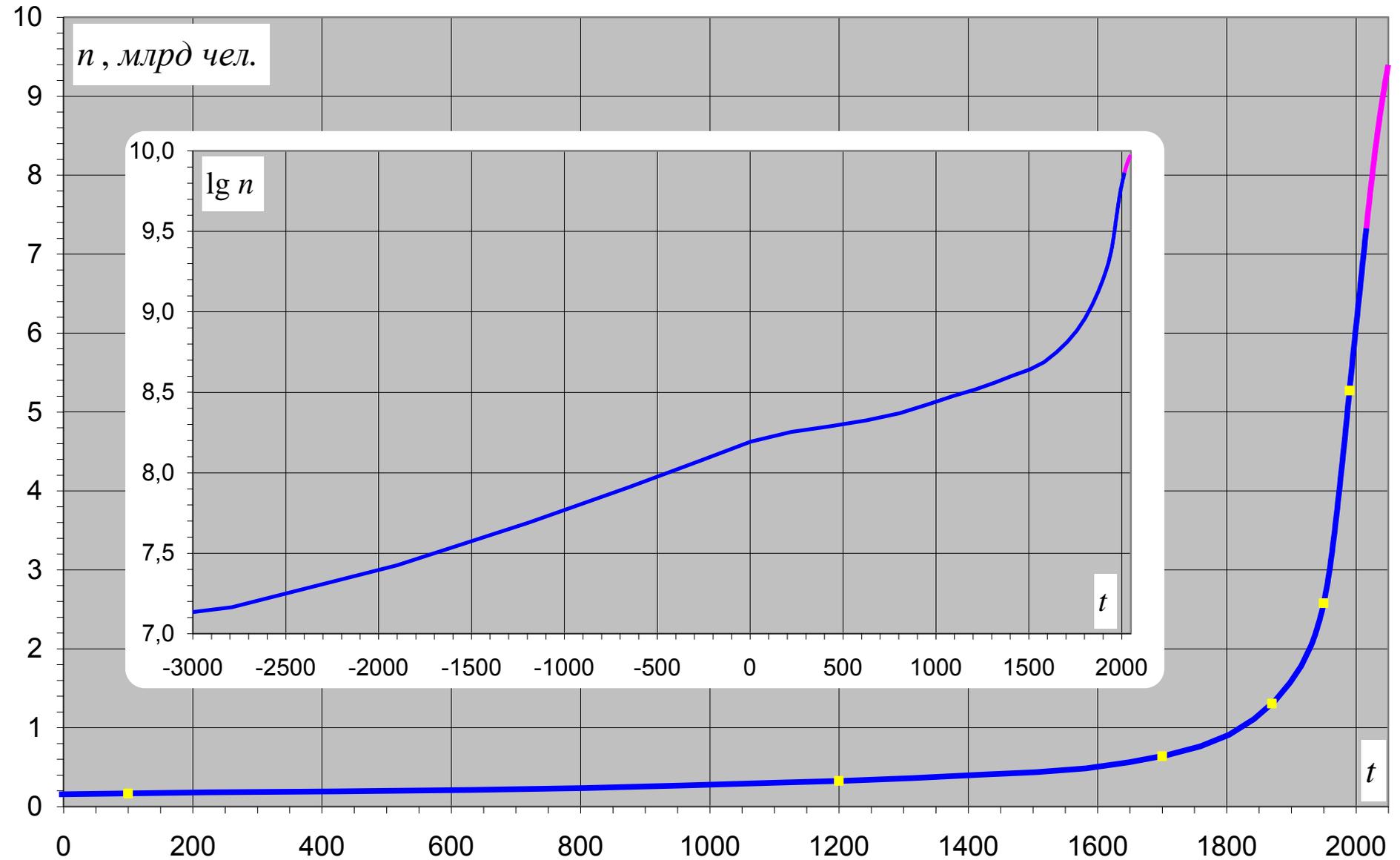
Институт прикладной математики  
им. М.В. Келдыша РАН

[Tiger@Keldysh.ru](mailto:Tiger@Keldysh.ru)

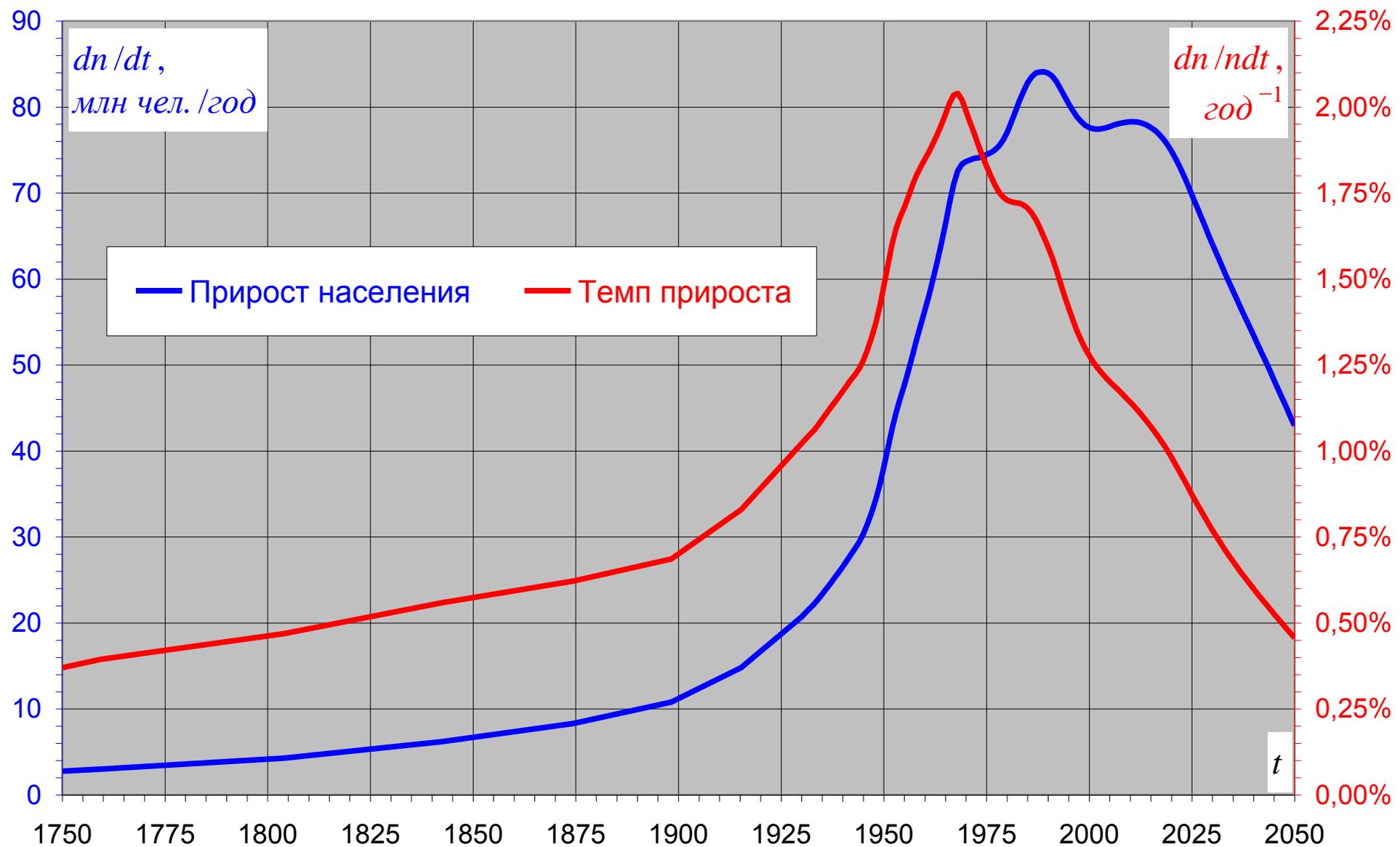
# Предмет глобальной демографии

- Рассмотрение демографической динамики всего человечества как целостной системы
- Человечество – сложная система, состоящая из разнородных частей, динамика которой может быть описана только огрублённо
- При огрублённом описании не учитывается структура населения (пространственная, возрастная, социальная, культурная и т.п.)
- Дополнительное упрощение: нет миграции
- Цель – определение физических механизмов и построение математической модели

# Рост населения мира



# Демографический взрыв



# Ключевые вопросы глобальной демографической теории

- Если вид занимает некоторую экологическую нишу, его численность постоянна. Почему растёт численность вида *Homo Sapiens*?
- Если вид осваивает новую экологическую нишу, темп прироста его численности постоянен. Почему ранее темп прироста народонаселения неуклонно увеличивался?
- Почему в настоящее время происходит замедление скорости роста человечества?
- Каковы демографические перспективы?

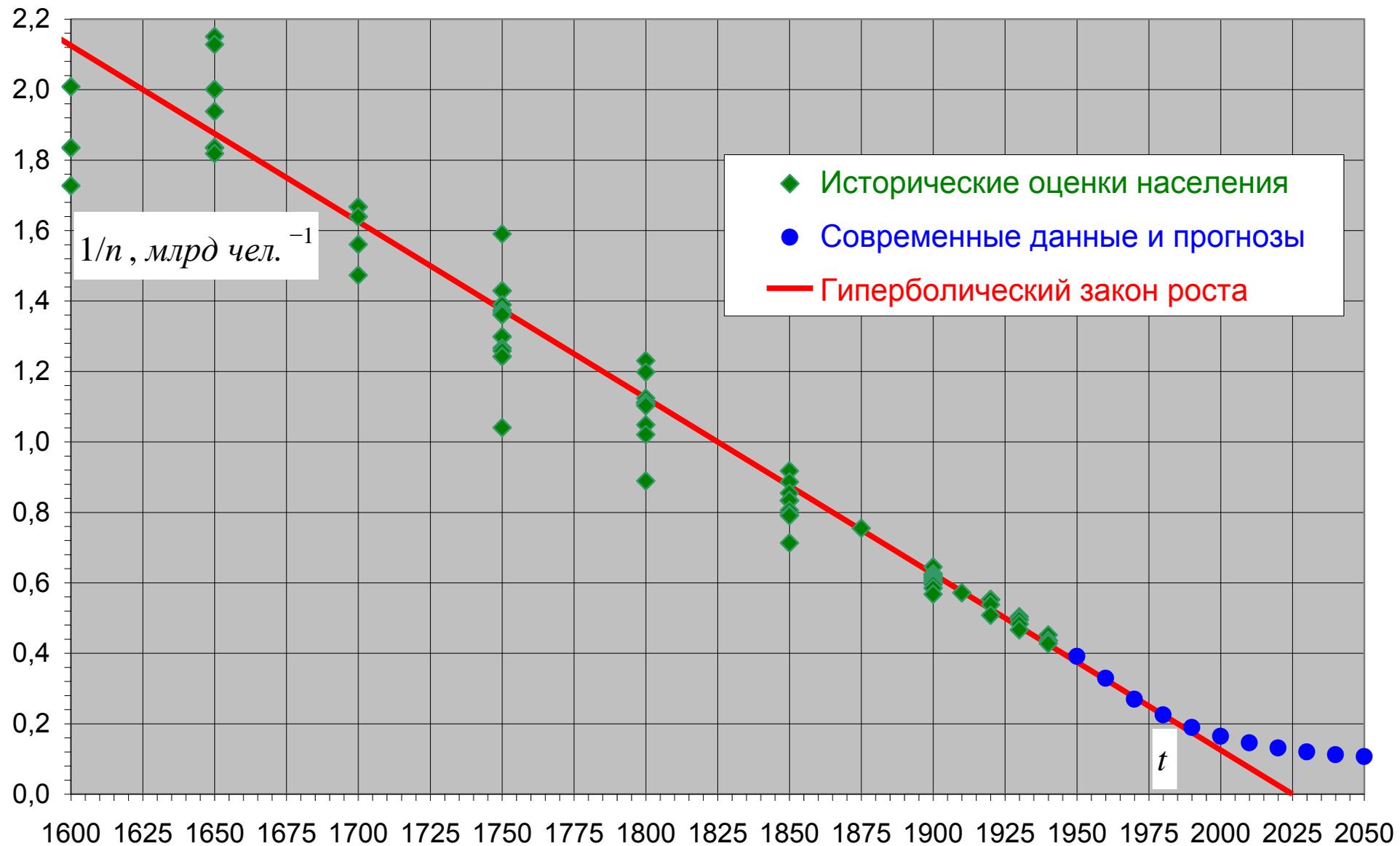
# Демографический императив

- Популяционный принцип (Т.Мальтус): рост населения определяют доступные ресурсы
- Принцип демографического императива (С.П.Капица): рост населения определяется развитием, т.е. внутренними свойствами системы, а не внешними факторами
- Развитие связывается с гипотетическим *информационным взаимодействием*, интенсивность которого пропорциональна числу парных отношений между людьми

# Трудности гипотезы информационного взаимодействия

- Не ясен механизм, посредством которого информационное взаимодействие между людьми обуславливает рост их количества
- Не удаётся объяснить сокращение темпов прироста населения, т.к. по мере увеличения населения информационное взаимодействие может только усиливаться (учёт эффектов запаздывания проблемы не решает, поскольку уже возникшее информационное взаимодействие они отменить не могут)

# Динамика обратного населения



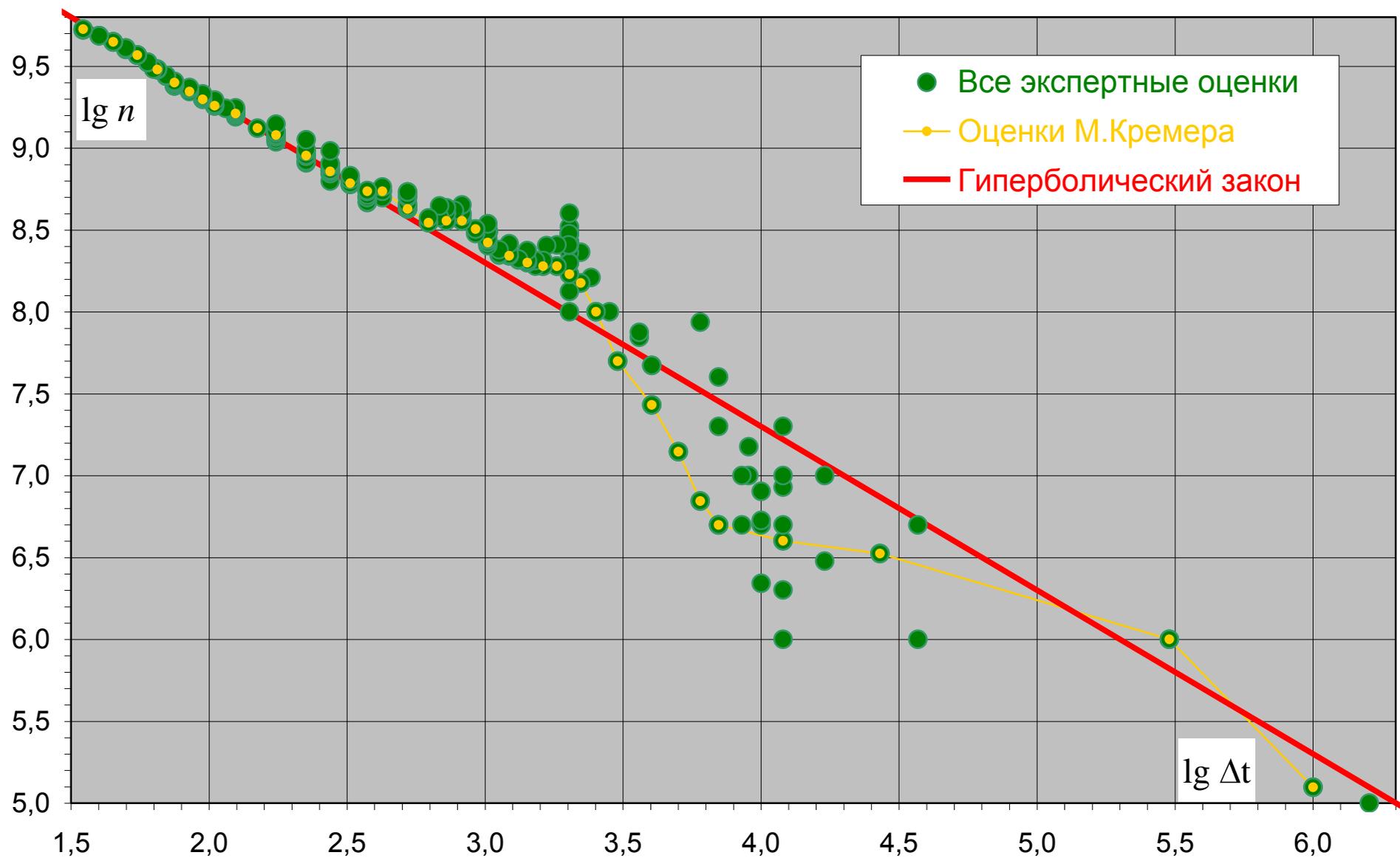
# Гиперболический закон – развитие в режиме с обострением

$$n \approx \frac{C}{\Delta t}, \quad \Delta t = t_f - t$$

$$C \approx 200 \text{ млрд чел.} \cdot \text{год}, \quad t_f \approx 2025 \text{ г.}$$

- При сохранении такого закона население мира вскоре стало бы бесконечным
- Происходит *глобальный демографический переход* – смена типа воспроизводства населения: ускоряющийся рост населения сменяется замедляющимся (с тенденцией к стабилизации численности)

# Экстраполяция гиперболического закона в прошлое



# Стадия гиперболического роста

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{C} \quad - \text{автономное представление}$$

$\tau \approx 20 \text{ лет}$  – время смены поколений

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{\min} = \frac{1}{\tau} \quad - \text{начало роста (0)}$$

$$n_0 = \sqrt{C\tau} \approx 100 \text{ тыс.чел.}$$

$$\Delta t_0 = C/n_0 \approx 2 \text{ млн лет}$$

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{\max} = \frac{n}{\tau} \quad - \text{конец роста } (\infty)$$

$$n_\infty = C/\tau \approx 10 \text{ млрд чел.}$$

# Причины роста народонаселения

- Факторы изменения численности человечества: *рождаемость* и *смертность*
- Механизм роста населения – превышение числа рождений над числом смертей
- Причина ускорения роста – увеличение зазора между рождаемостью и смертностью
- Рождаемость, лежащая ниже предельных репродуктивных возможностей человека, не может быть фактором роста
- Рост обусловлен снижением смертности

# Ограничители рождаемости

- *Социокультурные и экономические* – гасят колебания численности популяции и создают резерв для её восстановления после катастрофических событий
- *Биологические* – длительное грудное вскармливание и ранняя материнская смертность – со временем снимаются. Дети, не зачатые по этим причинам, формально считаются умершими в момент зачатия, что позволяет рассматривать снятие этих ограничителей как сокращение смертности

# Улучшение взаимопомощи как механизм снижения смертности

- Вместе выжить проще, чем одному
- Коллективное поведение (взаимопомощь) позволяет уменьшить смертность
- Коллективное поведение животных ориентировано на определённый перечень ситуаций и определённую численность
- Человек – разумен, т.е. способен расширять спектр видов взаимопомощи, адаптируя их к новым ситуациям и сокращая смертность по мере роста своей численности

# Технологии как переносчик коллективного взаимодействия

- Непосредственное взаимодействие больших групп людей затруднено или невозможно
- Необходим легко перемещающийся посредник, не расходующийся при передаче
- Технологии – знания, распространение и тиражирование которых даётся намного легче, чем их создание
- *Жизнесберегающие технологии* – любые знания и умения, которые могут быть использованы для спасения человека от смерти или продления его жизни

# Развитие технологий

- Любая информация постепенно утрачивается. Сохраняться во времени могут только жизненно-необходимые знания
- Жизнеспасающие технологии возникают, возобновляются и распространяются в ходе повседневной деятельности человека
- Технологии создаются использующими их людьми (численность  $n$ ) на основе уже имеющихся технологий (уровень  $p$ ):

$$\frac{dp}{dt} \sim pn$$

# Технологический императив

- Численность популяций животных определяется размером *экологической ниши* – количеством особей, выживание которых может **обеспечить** занимаемая территория
- Численность человечества определяется размером *технологической ниши* – числом людей, которые могут быть **востребованы** имеющимися технологиями:  $n = f(p)$
- Поселения и технологии масштабируемы, т.е. для  $n$  и  $p$  нет характерных значений и связь между ними однородна:  $f(p) \sim p^\gamma$

# Шкала измерения технологий

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp}{dt} \sim pn \\ n \sim p^\gamma \end{array} \right. \xrightarrow{p \rightarrow \mu p^\nu} \left\{ \begin{array}{l} \frac{dp}{dt} = \frac{pn}{C} \\ n = Cp \end{array} \right.$$

- Инвариантность системы уравнений относительно преобразования технологий, позволяет выбирать шкалу их измерения
- Выбрана простейшая форма записи: с линейной зависимостью населения от уровня технологий и одним параметром

# Дифференциальное уравнение для демографической динамики

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{pn}{C} \\ n = Cp \end{cases} \Rightarrow \frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{C}$$

- Уравнение получается исключением из модели технологий, т.е. рост населения – следствие технологического развития
- Уравнение выведено из первых принципов (технологический императив и создание технологий людьми на основе технологий)

# Интерпретация константы $C$

- Размерность – трудозатраты:  $[C] = \text{чел.} \cdot \text{год}$
- Значение – ёмкость технологической ниши – коэффициент пропорциональности между уровнем развития технологий и востребованной ими численностью населения:  $n = pC$
- Физический смысл – количество трудозатрат, необходимое для увеличения технологического уровня в  $e$  раз в условиях постоянной людской численности:

$$\frac{dp}{p} = \frac{ndt}{C}$$

# Интерпретация величины $p$

- Размерность – обратное время:  $[p] = \text{год}^{-1}$
- Значение – скорость течения исторического времени, ускоряющегося по мере приближения к моменту обострения:  
 $p(t) = 1/\Delta t$  (где  $\Delta t = t_f - t$ )
- Физический смысл – коэффициент в уравнении Мальтузианского роста, т.е. уменьшение коэффициента смертности в результате развития технологий:

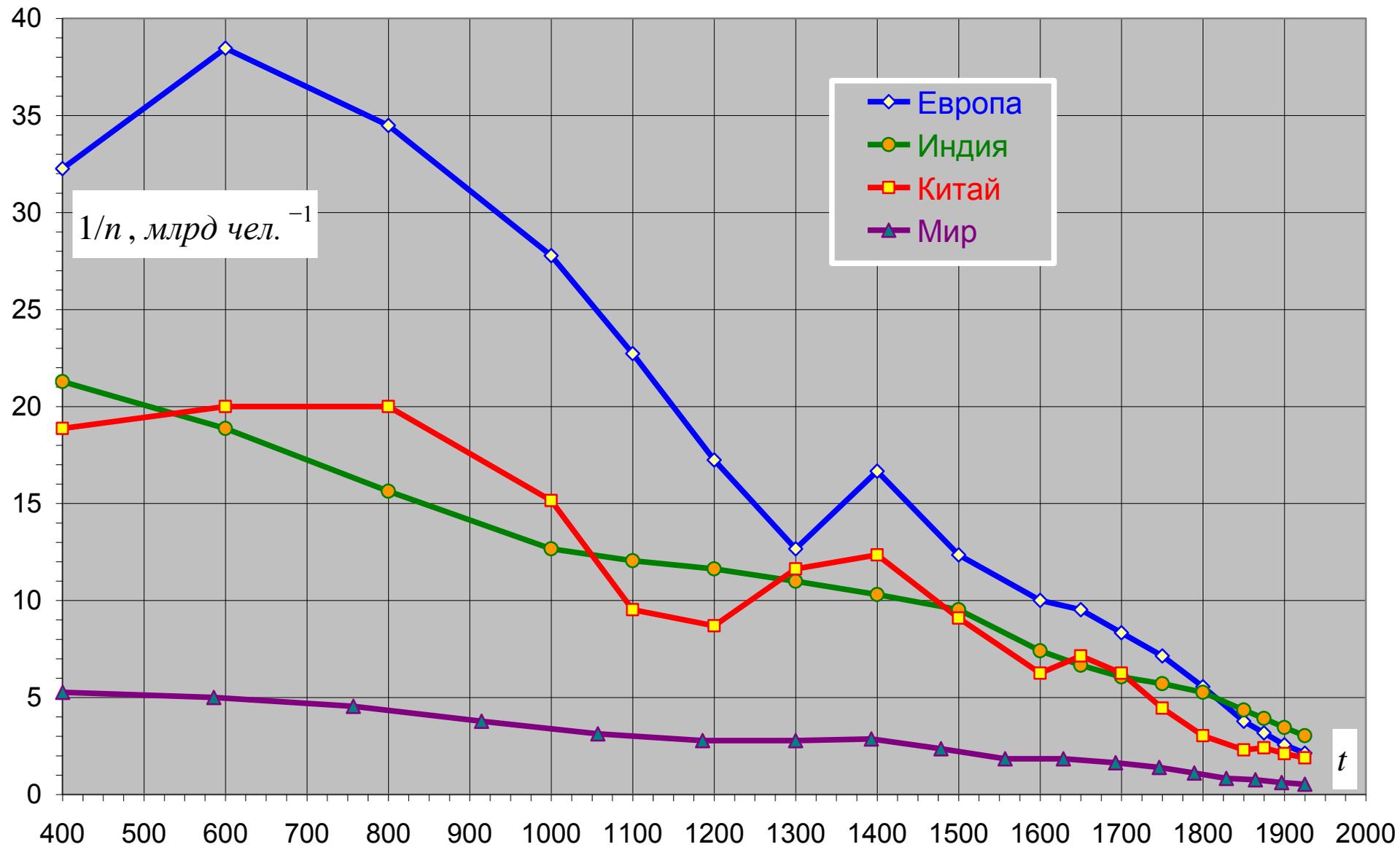
$$\frac{dn}{dt} = p \cdot n \quad \Rightarrow \quad p = k_b - k_d = k_{b,0} - k_d = k_{d,0} - k_d$$

# Дискретное развитие и непрерывное описание

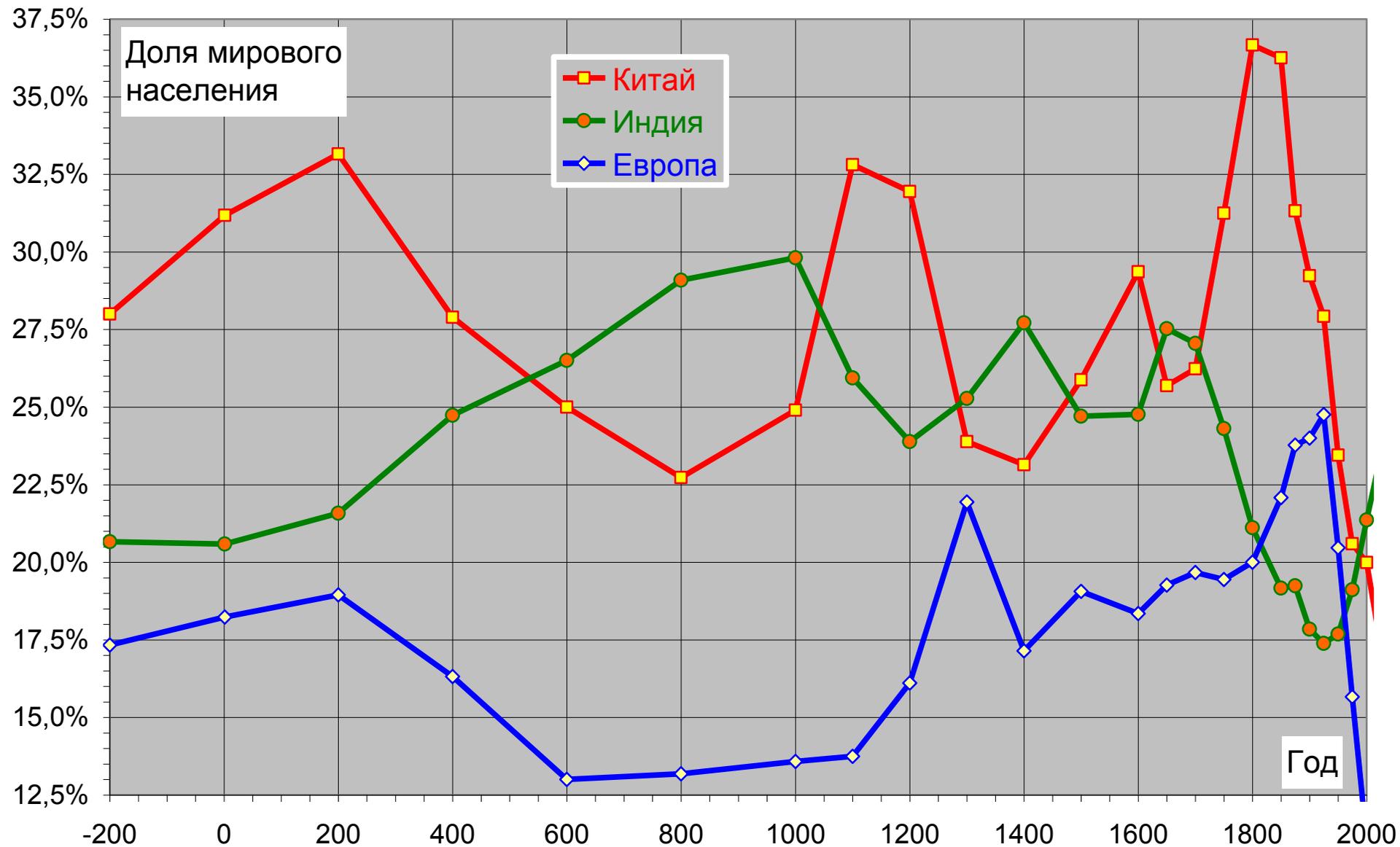
- Прогресс технологий может столкнуться с барьером, без преодоления которого дальнейшее развитие невозможно
- Характерная высота барьера:  $\delta p = \varepsilon p$ , где  $\varepsilon$  – некий фактор порядка долей единицы
- Процесс можно считать непрерывным на интервалах, превосходящих время ожидания новации, позволяющей преодолеть барьер:

$$\delta t \cong \frac{\delta p}{p^2} = \frac{\varepsilon}{p} = \varepsilon \Delta t \quad \Leftarrow \quad \frac{\delta p}{\delta t} \cong \frac{dp}{dt} = p^2$$

# Гиперболический закон для мира и его крупнейших регионов



# Равномерность развития крупнейших регионов мира



# Пределы роста

- Коэффициент смертности первобытного человека (на основе данных о шимпанзе в природных популяциях):  $k_{d,0} \approx 0,06 \text{ год}^{-1}$
- Минимальное значение коэффициента смертности определяется биологическим пределом продолжительности жизни (от зверя до бога):  $k_{d,\infty} \approx (0,01 \pm 0,01) \text{ год}^{-1}$
- Предельный уровень развития технологий:  
 $p_{\infty} = k_{d,0} - k_{d,\infty} \approx (0,05 \pm 0,01) \text{ год}^{-1}$
- Предельная численность человечества:  
 $n_{\infty} = C p_{\infty} \approx (10 \pm 2) \text{ млрд чел.}$

# На пути к описанию демографического перехода

- Мы знаем, почему и как растёт население
- Мы знаем, почему должен прекратиться рост населения, но не знаем, как это происходит
- Не известны те первые принципы, из которых можно было бы строго вывести формулы, описывающие демографический переход
- Уравнения не выводятся, а угадываются посредством учёта *ключевых факторов*
- Методологическая основа – принципы *соответствия и простоты*

# Ключевой фактор №1:

## Предел развития технологий

- Создание жизнесберегающих технологий тормозится по мере приближения к их естественному пределу
- Замедление развития описывается как результат повторного создания уже существующих технологий
- Значения параметров могут поменяться, т.к. ранее они вычислялись по формулам, утрачивающим применимость

$$\frac{dp}{dt} = \frac{pn}{C} \rightarrow \frac{dp}{dt} = \frac{pn}{C} \cdot \left(1 - \frac{p}{p_{\infty}}\right)$$

# Ключевой фактор №2:

## Изменение возрастной структуры

- При низком уровне технологий с возрастом быстро падает доля доживших до него людей – *треугольная* возрастная пирамида
- По мере развития технологий смертность смещается к старшим возрастам – *прямоугольная* возрастная пирамида
- В популяции появляются «лишние» люди, которых раньше быть не могло и потому не существует механизмов их элиминации

$$n = Cp \rightarrow n = Cp \cdot g(x), \quad g(x) = 1 + \frac{a}{1 + e^{-\alpha(x/p_\infty - \beta)}}$$

# Феноменологическая модель демографического перехода

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{pn}{C} \cdot \left(1 - \frac{p}{p_{\infty}}\right) \\ n = Cp \cdot \left(1 + \frac{a}{1 + e^{-\alpha(p/p_{\infty} - \beta)}}\right) \end{cases}$$

- Кроме принципа простоты нет причин, почему в первом уравнении нельзя возвести скобку или вычитаемое в ней в степень
- Второе уравнение содержит 3 новых параметра – необходимый минимум для описания любого переходного процесса

# Подбор параметров модели

- Эталонный график – зависимость темпа прироста населения от его численности
- Дата совсем не подходит на роль аргумента, из-за очень сильной неравномерности демографического процесса во времени
- Прирост, изменяющийся сильнее, чем его темп, хуже в качестве зависимой переменной
- В фазе роста темп пропорционален населению, поэтому зависимость между ними малочувствительна к флуктуациям, сдвигающим точки вдоль графика

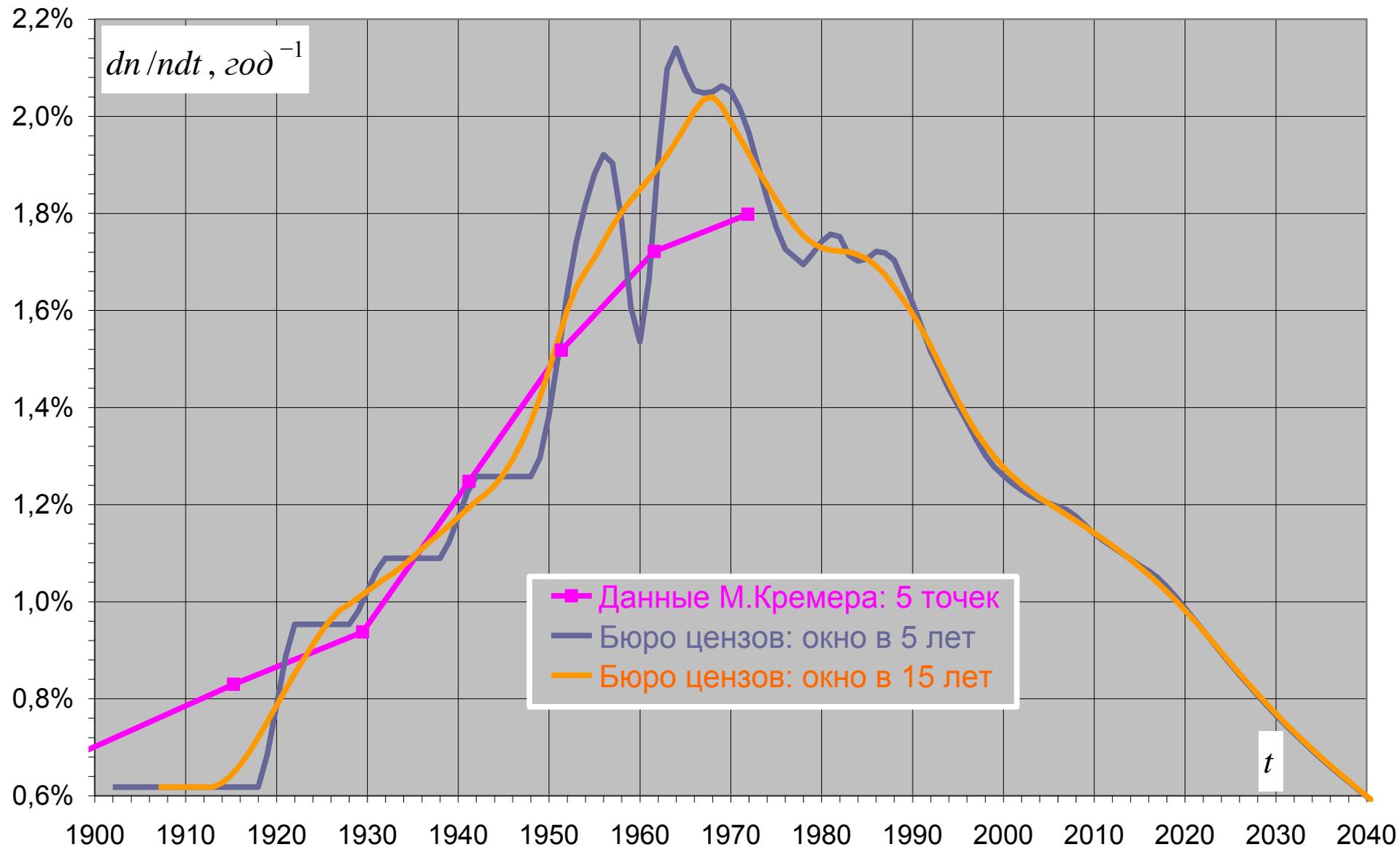
# Предобработка исторических оценок численности населения

- Зависимость населения от времени до момента обострения представляется в виде  $\ln n(t) = h(\ln \Delta t)$  с некоторой функцией  $h$
- Через её производную выражается темп прироста населения:  $dn/ndt = -h'(\ln \Delta t)/\Delta t$
- Для процесса, развивающегося в режиме с обострением, функция  $h$  примерно линейна – можно найти её производную как угловой коэффициент линейной регрессии
- Оптимальная ширина окна – 5 точек; в том же окне осредняются  $\ln n$  и  $\ln \Delta t$

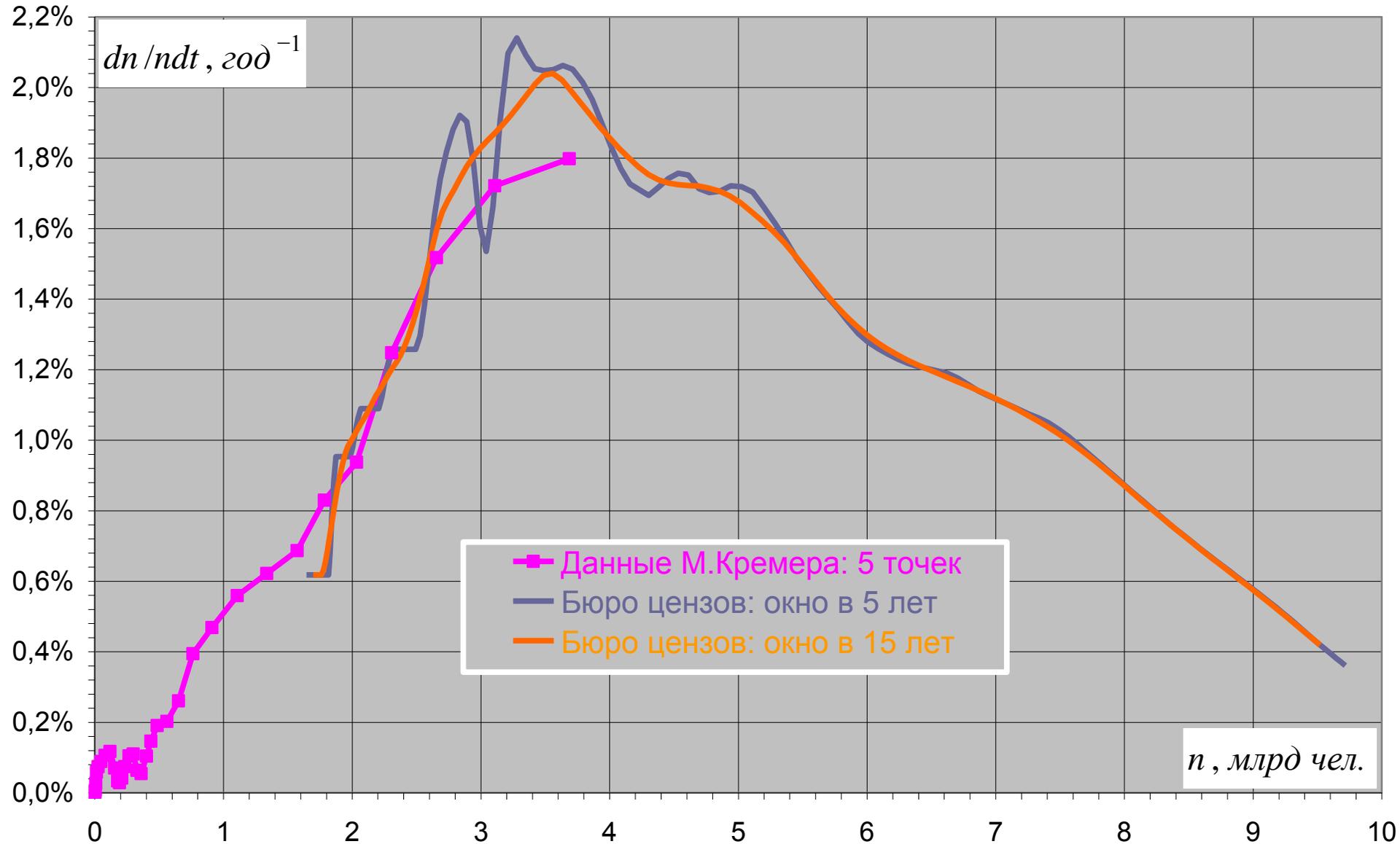
# Обработка современных данных и прогнозов численности населения

- Имеются ежегодные данные и прогнозы на временном интервале 1950–2050 г. (USCB)
- Темп прироста населения  $k = dn/ndt$  определяется как угловой коэффициент регрессионной зависимости  $\ln n(t) = kt + b$
- Регрессия строится в окнах шириной 5 и 15 лет для получения «несглаженной» и «сглаженной» (рабочей) зависимостей
- Границы интервала отодвигаются вверх линейной экстраполяцией темпов, вниз – интерполяцией по ряду данных М.Кремера

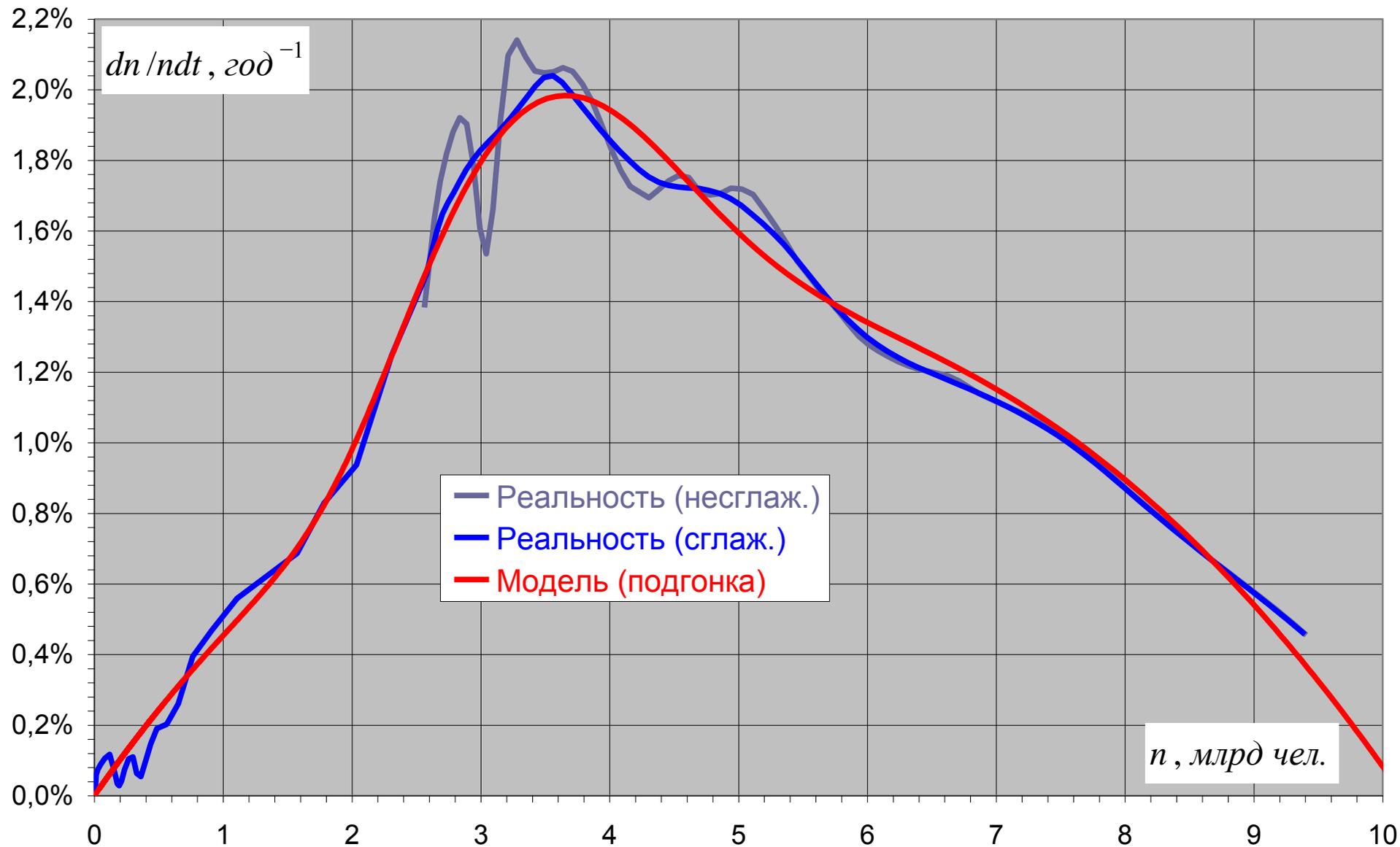
# Сшивка исторических оценок и современных данных и прогнозов



# Сшивка на фазовом портрете



# Результат подбора параметров

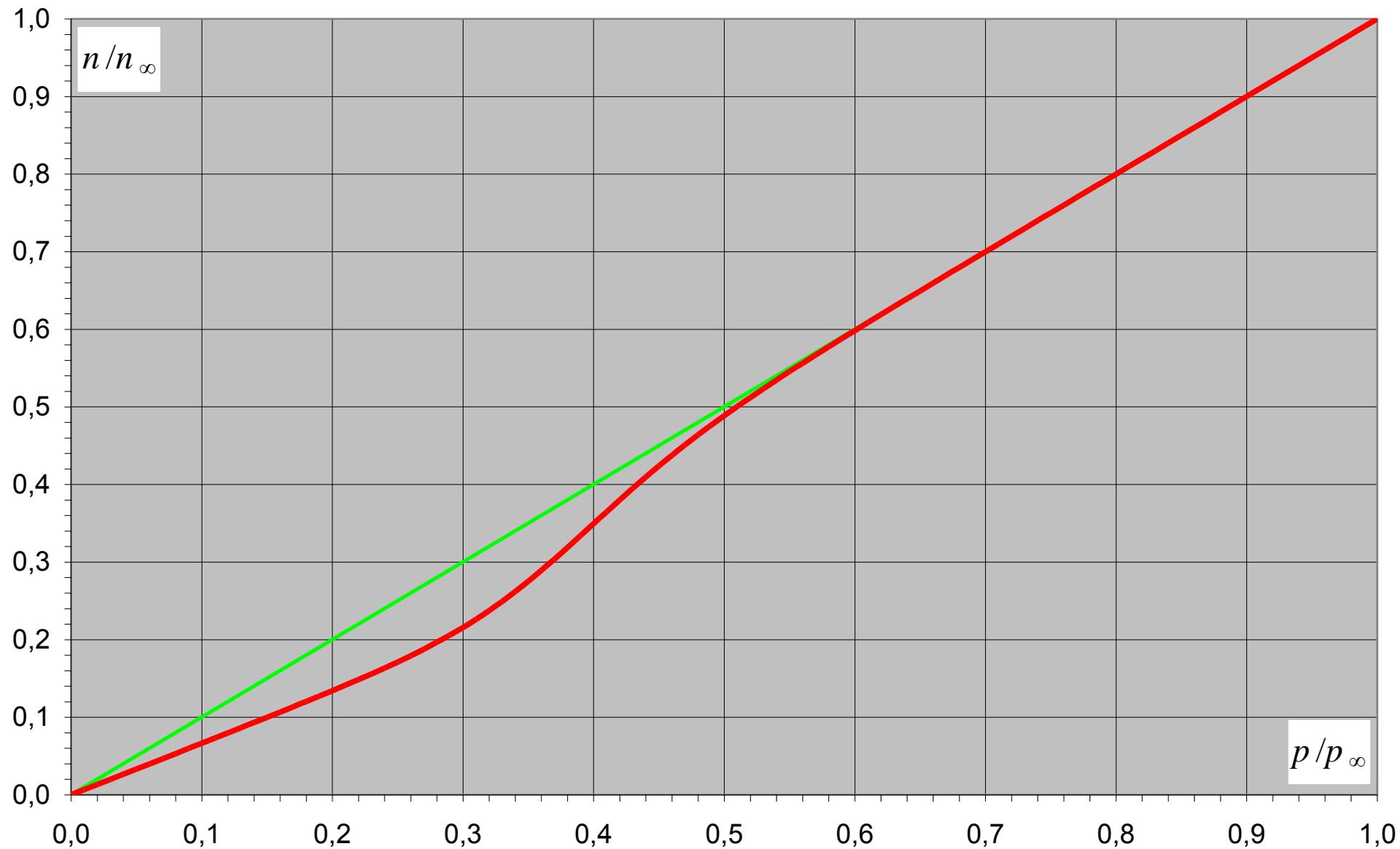


# Параметры модели

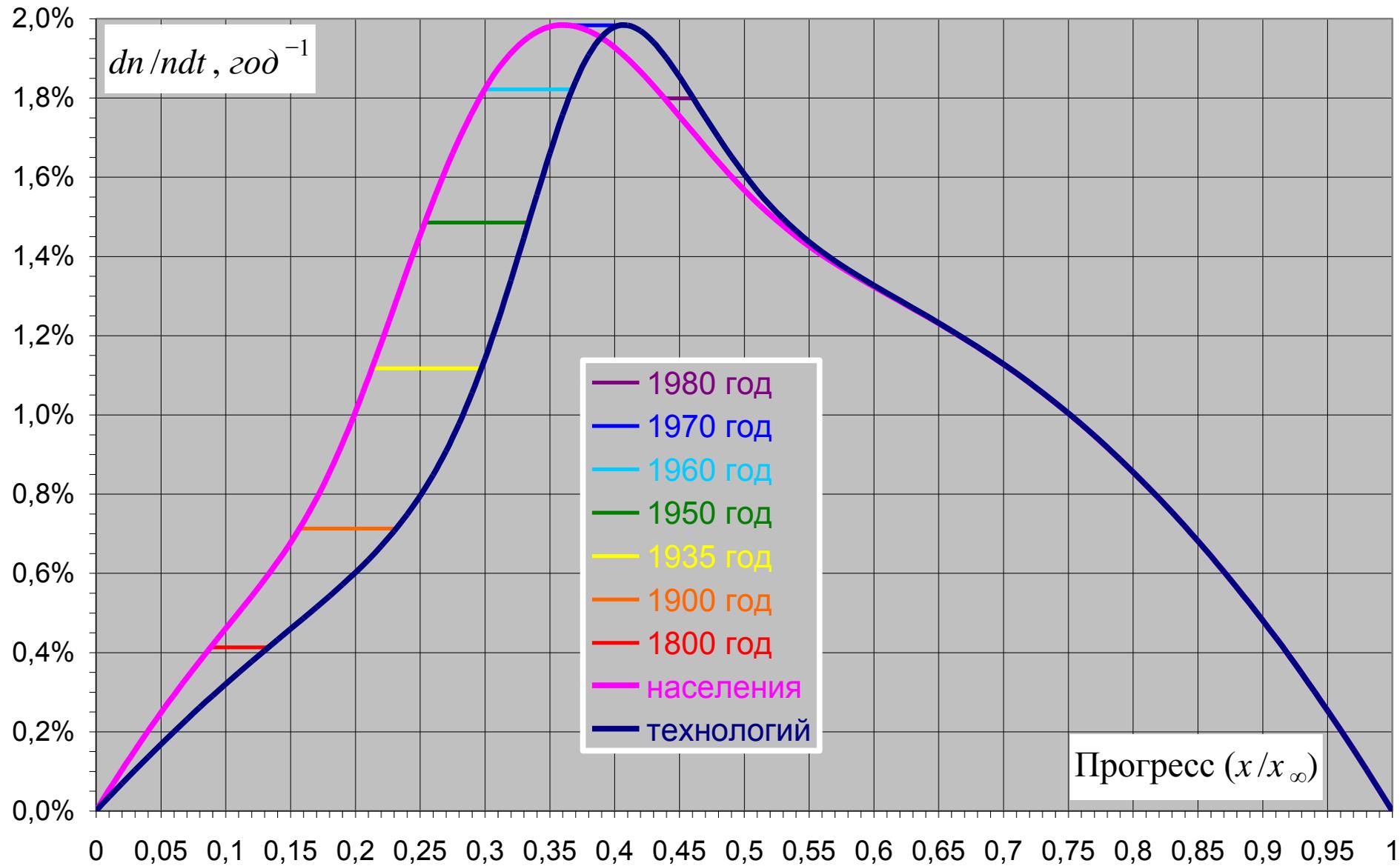
Величина	Рост	Переход	Единицы	Уст.
$C$	200	190,1	<i>млрд чел.·год</i>	+
$n_{\infty}$	10	10,16	<i>млрд чел.</i>	++
$p_{\infty}$	0,05	0,0354	$год^{-1}$	-
$n_{\infty}/C$		0,0535		+
$a$		0,510		--
$\alpha$		21,12		-
$\beta$		0,376		++
$t_f$	2025	2005	Г.	+



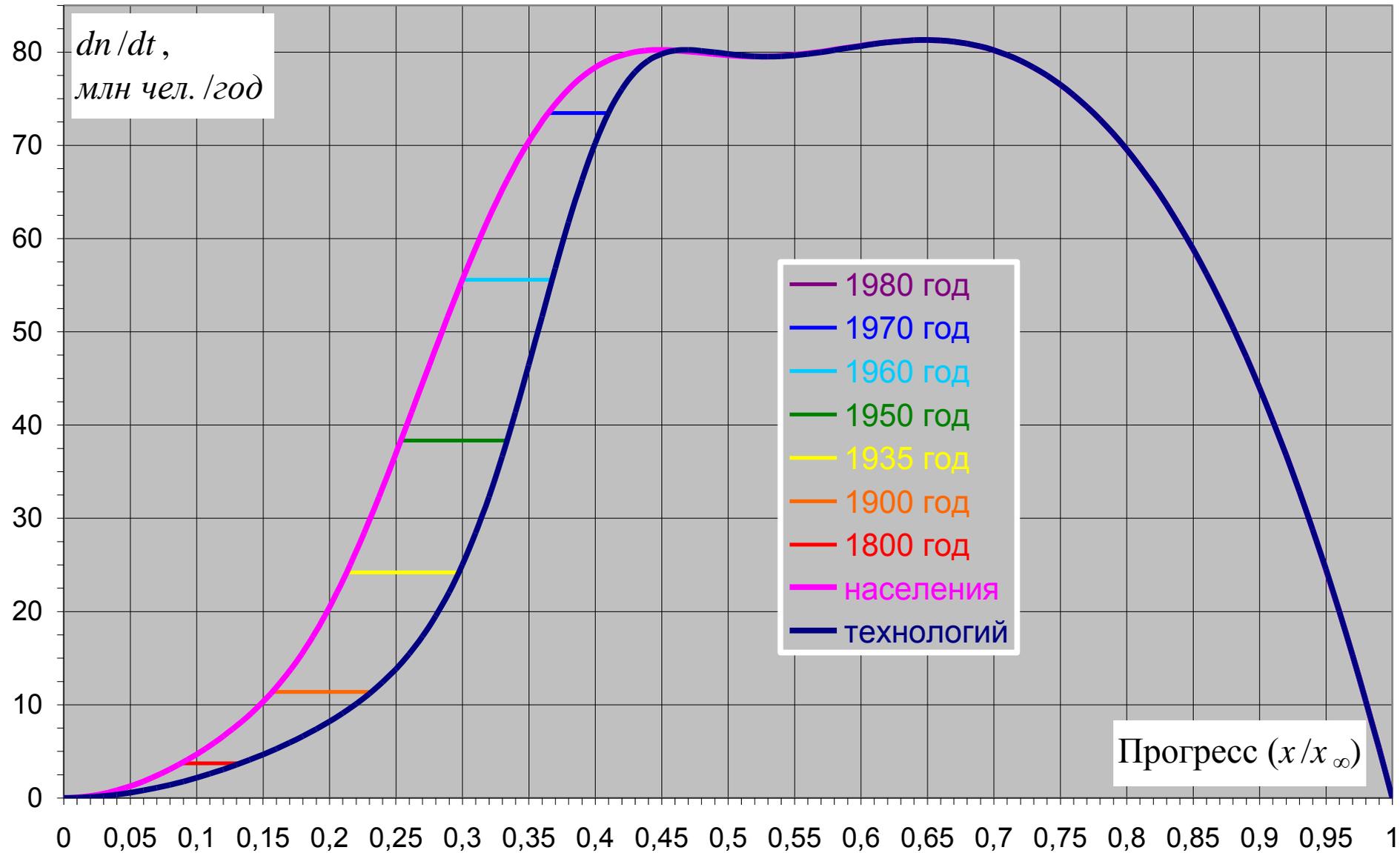
# Соотношение демографического и технологического прогресса



# Изменение темпов прироста населения по ходу прогресса



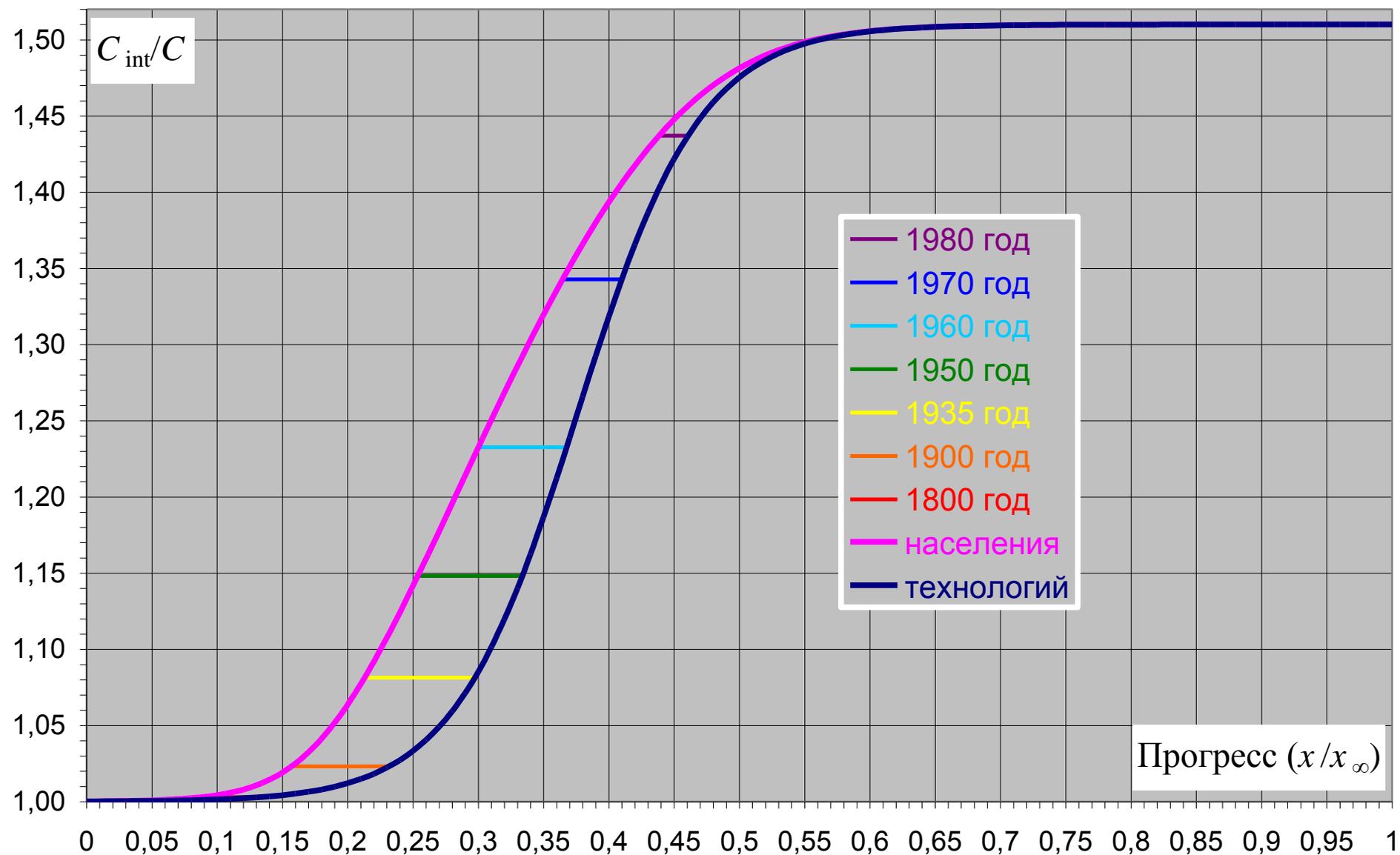
# Изменение скорости роста населения по ходу прогресса



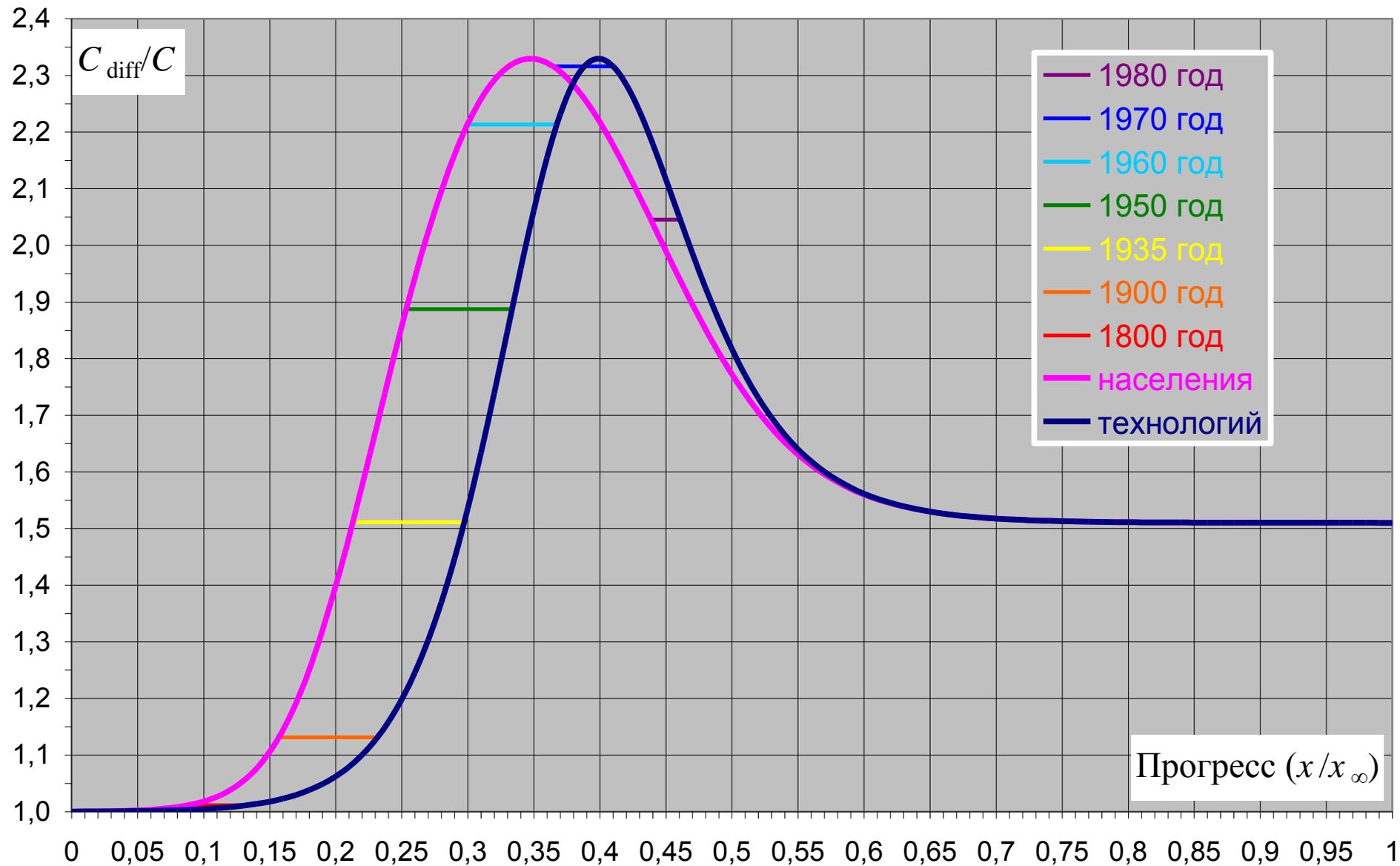
# Ёмкости технологической ниши

- Замена линейной формулы  $n = Cp$  на нелинейную  $n = Cp \cdot g(p)$  предполагает переход от постоянной ёмкости технологической ниши к переменной
- *Интегральная ёмкость*  $C_{\text{int}} = n / p = C \cdot g(p)$  описывает монотонное увеличение её размера в ходе прогресса
- *Дифференциальная ёмкость*  $C_{\text{diff}} = dn / dp = C_{\text{int}} \cdot [1 + d \ln g(p) / d \ln p]$  отслеживает перестройку возрастной структуры населения
- Обе функции изменяются от  $C$  до  $C(1+a)$

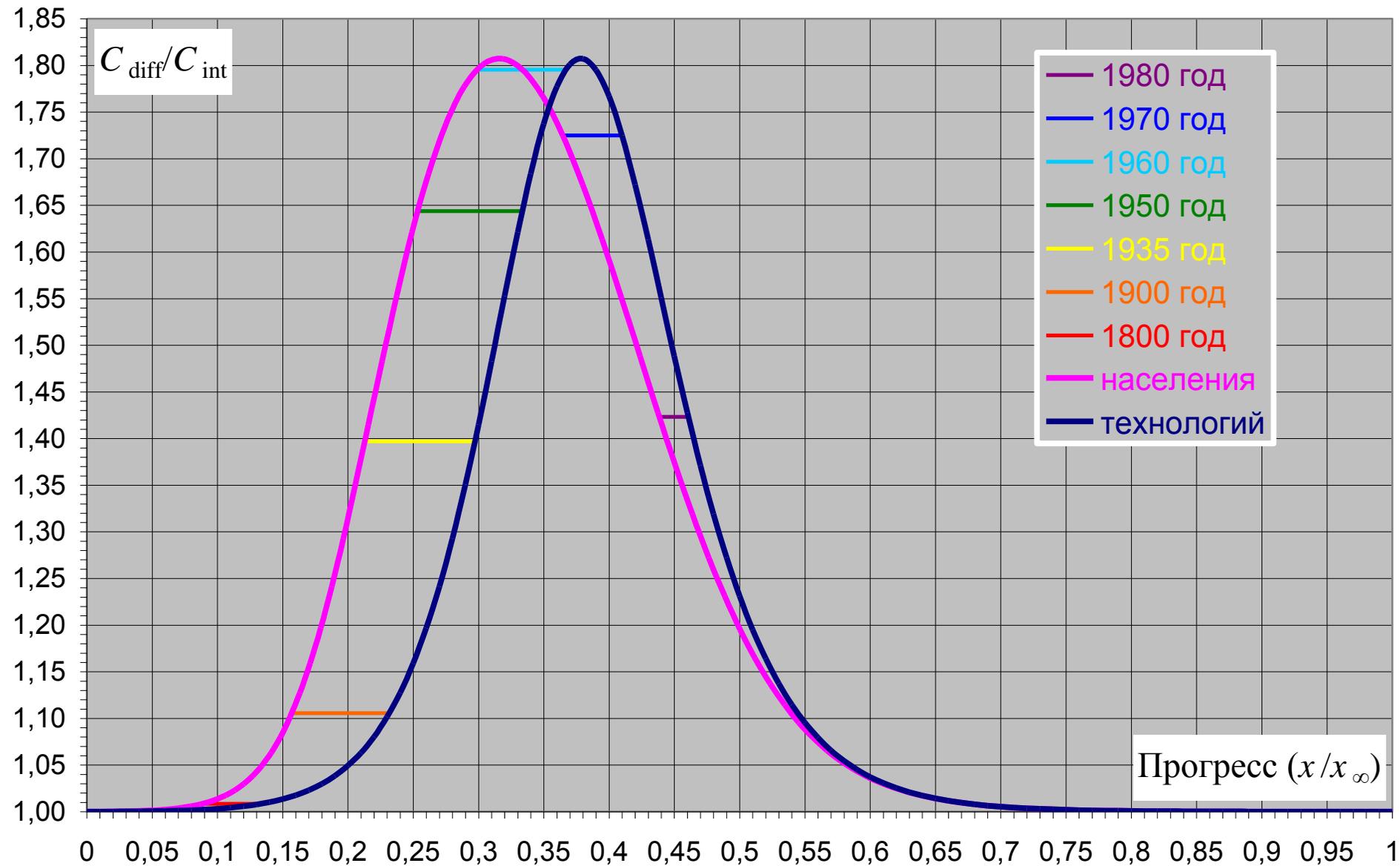
# Интегральная ёмкость технологической ниши



# Дифференциальная ёмкость технологической ниши



# Отношение ёмкостей технологической ниши



# Асимптотическое решение модели при $\beta < 1$ и $\alpha \gg 1$

$$n = Cp \cdot \left( 1 + \frac{a}{1 + e^{-\alpha(p/p_\infty - \beta)}} \right) \Big|_{p \rightarrow p_\infty} \cong Cp \left( + a \right)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{C} \cdot \left( 1 - \frac{n}{n_\infty} \right), \quad n_\infty = Cp_\infty \left( + a \right)$$

$$\frac{n_\infty}{n} + \ln \left( \frac{n_\infty}{n} - 1 \right) = \frac{\Delta t}{\tau} + 1, \quad \tau = C/n_\infty, \quad \Delta t = t_f - t$$

$$n \cong n_\infty \left( - e^{\Delta t / \tau} \right)$$

# Модель С.П.Капицы

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_{\infty}}{\tau} \cdot \frac{1}{\pi} \sin^2 \pi \frac{n}{n_{\infty}}, \quad n_{\infty} = \frac{\pi C}{\tau}$$

$$n \left( \right) \equiv \frac{n_{\infty}}{\pi} \operatorname{arcsctg} \frac{\Delta t}{\tau} \cong \begin{cases} C/\Delta t & n \ll n_{\infty} \\ n_{\infty} - C/\Delta t & n_{\infty} - n \ll n_{\infty} \end{cases}$$

Величина	Автор (0)	Подгонка (1)	Единицы
$n_{\infty}$	12,92	12,34	<i>млрд чел.</i>
$\tau$	45,0	43,7	<i>год</i>
$t_f$	2005	2000	Г.

# Модель КМХ (А.В.Коротаев, А.С.Малков и Д.А.Халтурина)

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = n \cdot s \cdot \left( - \left( \frac{n}{n_\infty} \right)^z \right) \\ \frac{ds}{dt} = \frac{s}{\tau} \cdot \frac{n}{n_\infty} \end{cases} \Rightarrow \tau \cdot ds = \frac{dn/n_\infty}{1 - \left( \frac{n}{n_\infty} \right)^z}$$

$s$  — мера экономического развития

$\tau$  — постоянная времени

$z$  — нетривиальный показатель

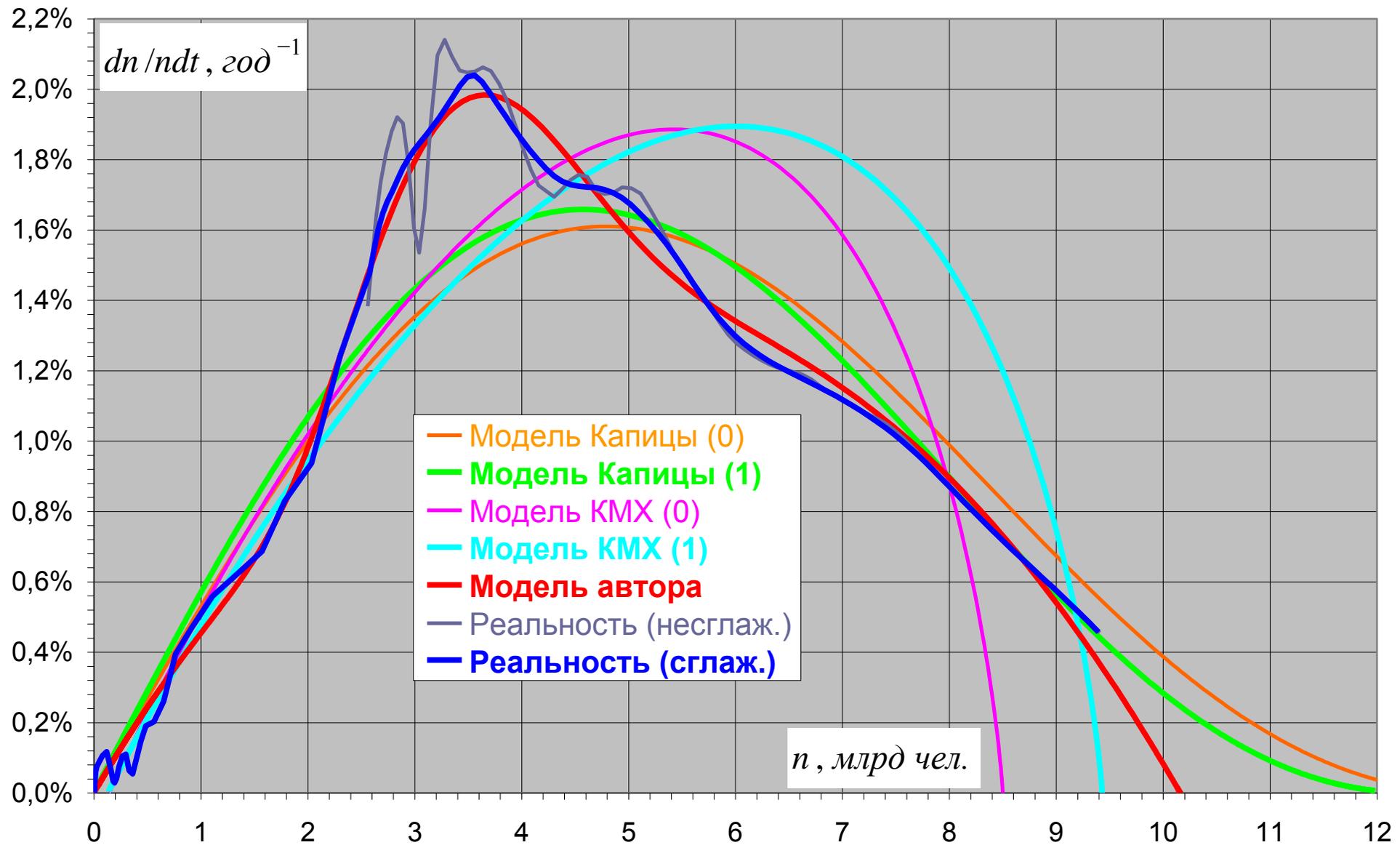
$$n \ll n_\infty \Rightarrow n \approx n_{\min} + n_\infty \tau s$$

$$n_\infty - n \sim e^{-e^{-\frac{t-t^*}{\tau}}} \quad n_\infty - n \ll n_\infty$$

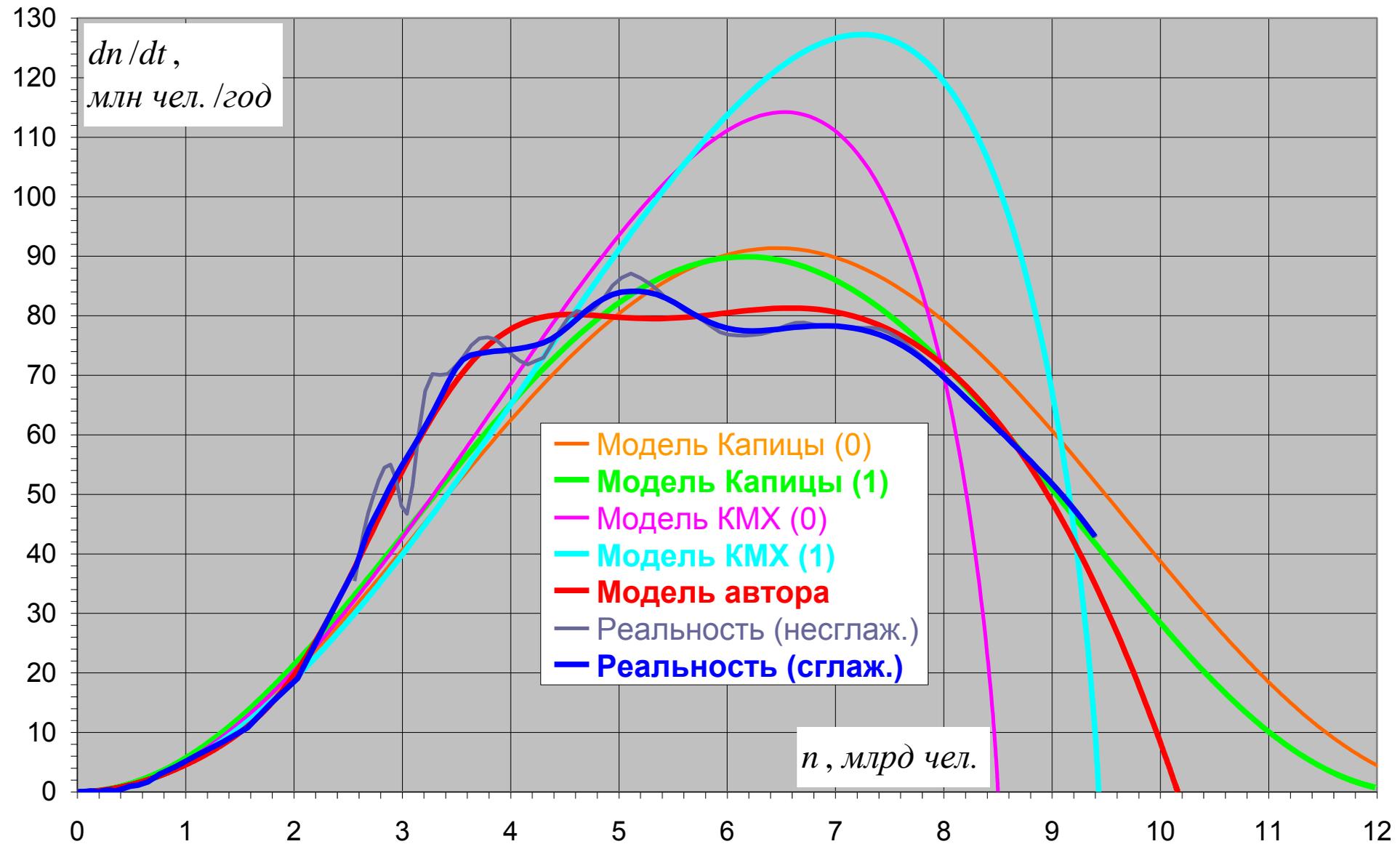
# Параметры модели КМХ

Величина	Авторы (0)	Подгонка (1)	Единицы
$n_{\infty}$	8,50	9,43	<i>млрд чел.</i>
$z$	0,755	0,695	
$\tau$	18,1	17,8	<i>год</i>
$t^*$	1999	2008	Г.
$s(t^*)$	8,78%	9,69%	<i>год<sup>-1</sup></i>
$n_{\min}$	142	129	<i>млн чел.</i>

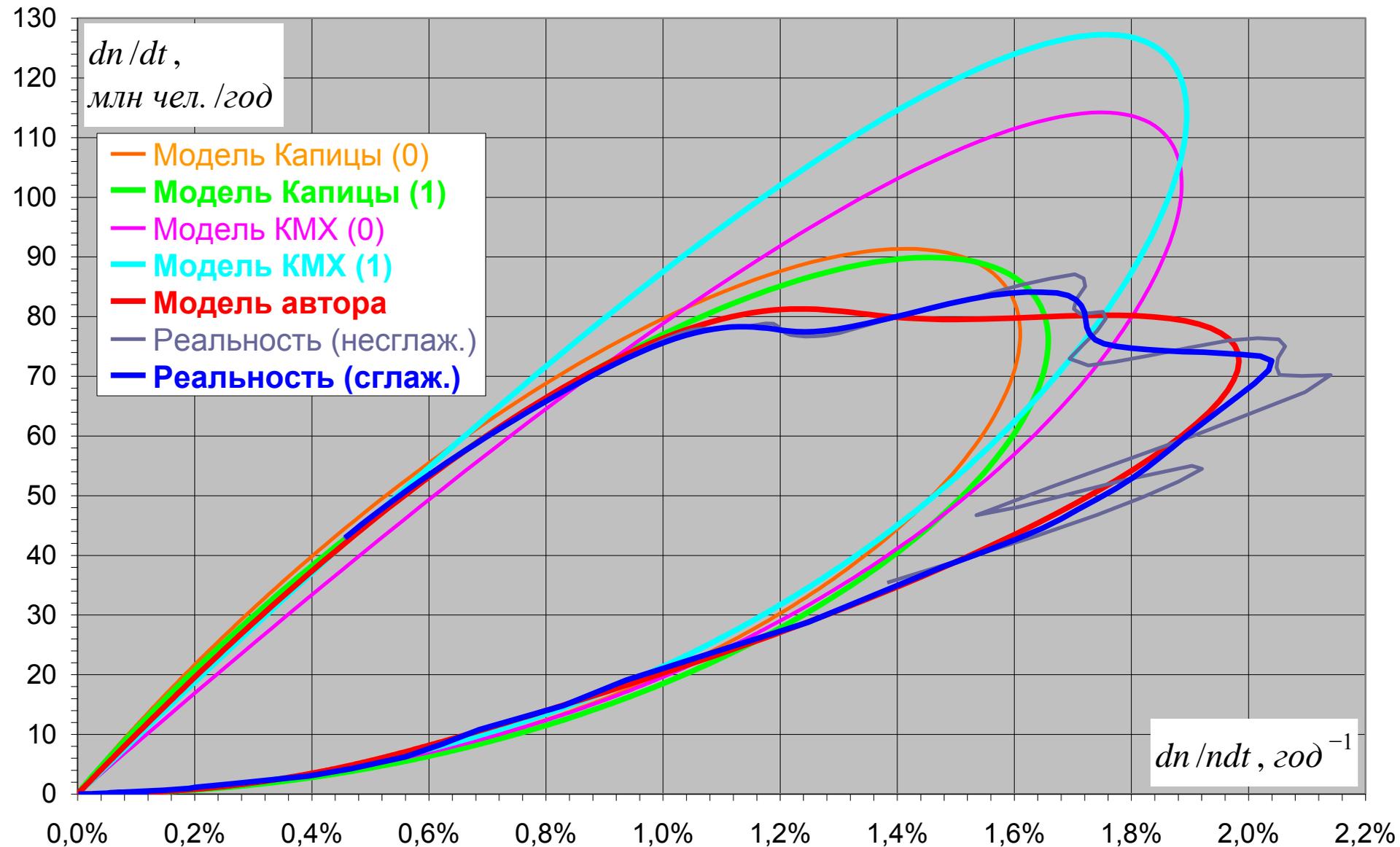
# Темповые фазовые портреты



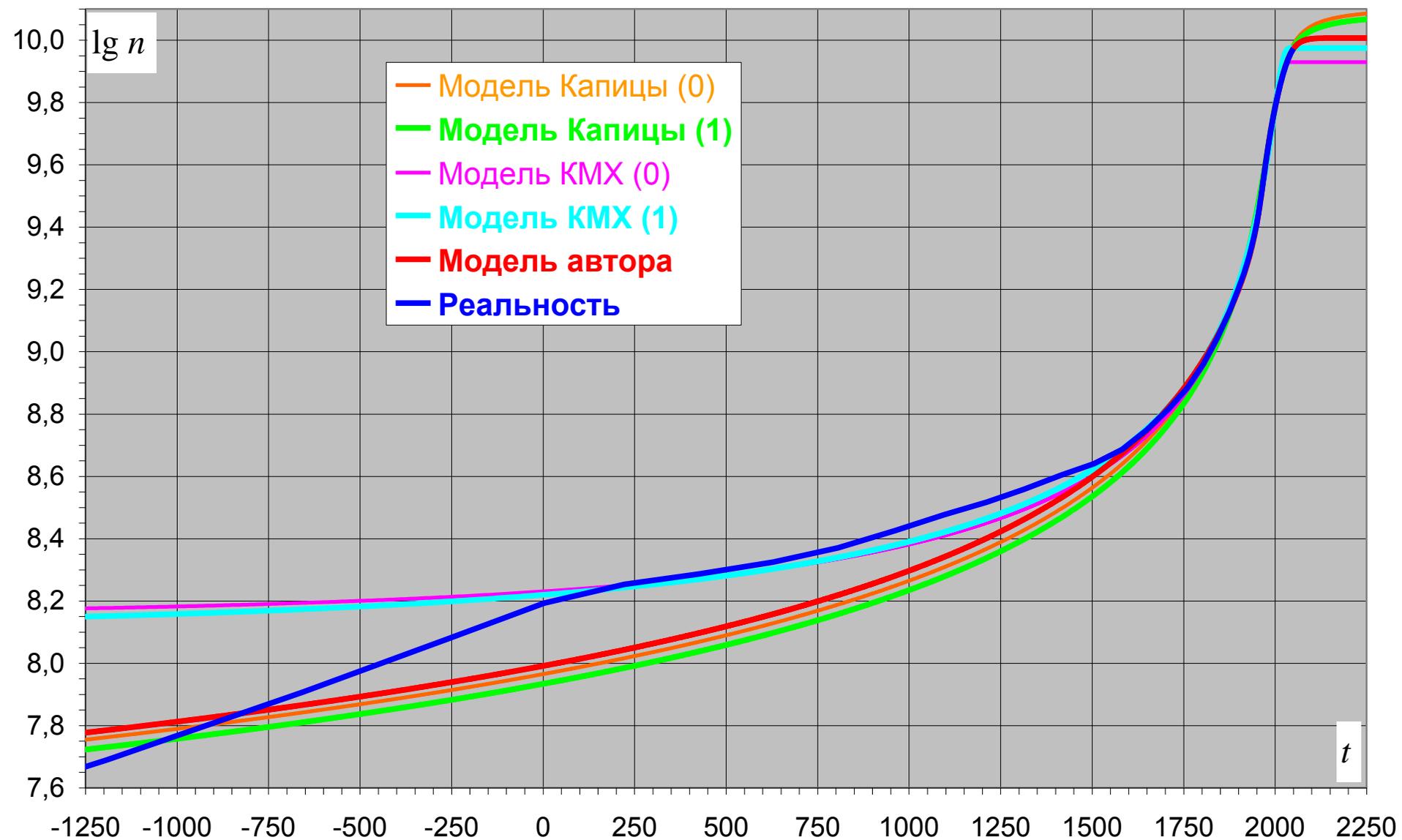
# Фазовые портреты



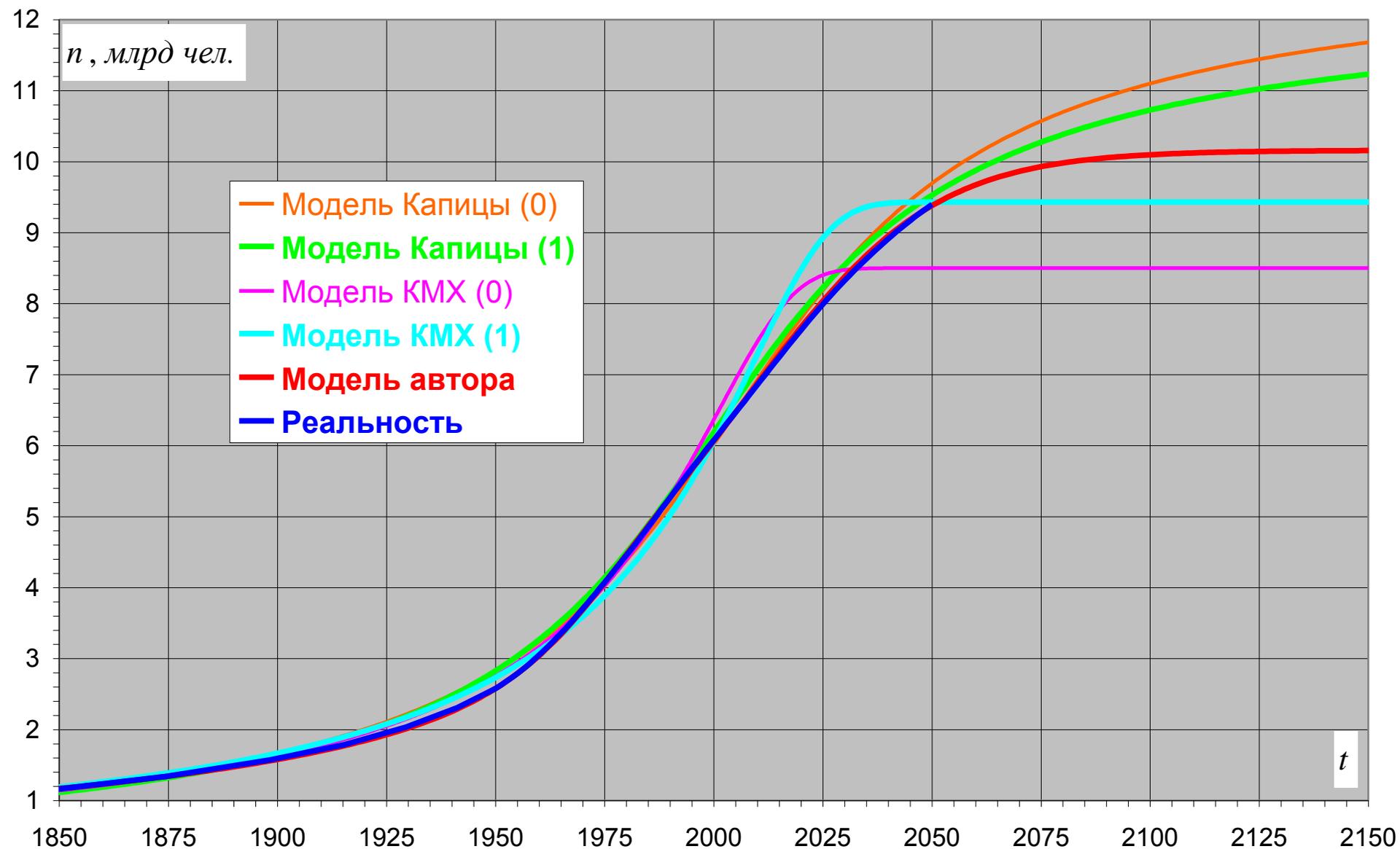
# Портреты «темп–скорость»



# Модельная динамика населения на больших временах



# Модельная динамика населения на малых временах



# Выводы – 1

- Численность человечества определяется только уровнем развития жизнесберегающих технологий (технологический императив)
- Технологии измеряются обусловленным их действием сокращением смертности
- Развитие жизнесберегающих технологий имеет биологические ограничения
- Ограничения технологического развития кладут предел и росту населения, не связанный с материальными факторами

# Выводы – 2

- С момента выхода из животного мира развитие нашего вида было связано с неуклонным увеличением его численности
- Вся история человечества – переходный процесс, который ныне близок к завершению
- Мы стоим на пороге кризиса развития даже не цивилизационного, а видового масштаба
- Можно прогнозировать скорый переход от количественного роста к качественному с элиминацией «лишних» людей

# Актуальные задачи глобальной демографической теории

- Раздельная динамика коэффициентов рождаемости и смертности на стадии демографического перехода
- Механизмы отложенной (падение рождаемости ниже уровня воспроизводства), скрытой (десоциализация) и немедленной (войны) элиминации «лишних» людей
- Демографическая и технологическая неоднородность человечества, масштабные миграционные процессы

Спасибо  
за внимание!

