

# Агентное моделирование в экономике (ABM)

## Краткий экскурс в ABM

# Ограничения традиционных макромоделей

Традиционные модели (DSGE, AR, VAR):

- опираются на **репрезентативного агента**;
- предполагают **рациональные ожидания**;
- ограничивают анализ **линейными** или **почти линейными динамиками**;
- плохо отражают сетевые эффекты, внезапные дисбалансы и кризисные траектории.

Типичная структура DSGE-модели:

$$\max_{c_t, l_t} \mathbb{E}_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t U(c_t, l_t)$$

$$F(k_t, l_t) = c_t + i_t, \quad k_{t+1} = (1 - \delta)k_t + i_t$$

Такие модели слабо учитывают гетерогенность и взаимодействия между агентами.

# Почему классические подходы дают сбои

Ключевые проблемы:

- ① Игнорирование распределений доходов, активов, долга.
- ② Недооценка нелинейности и контуров обратной связи.
- ③ Неспособность моделировать эндогенные кризисы:

Шок → дисбаланс → обвальное поведение рынков.

- ④ Трудности учета сетевых связей (банковские сети, цепочки поставок).

Следствие — слабая прогностическая способность при турбулентной динамике.

# Появление АВМ как альтернативы

АВМ предлагает:

- переход от репрезентативного к **множеству гетерогенных агентов**;
- микро-основанную динамику: решения агентов → агрегаты экономики;
- отсутствие необходимости в общем равновесии;
- возможность моделировать **эмурджентные явления**.

Элементарная логика АВМ:

$$x_{i,t+1} = f_i(x_{i,t}, X_{-i,t}, \theta_i) + \varepsilon_{i,t},$$

где  $x_{i,t}$  — состояние агента  $i$ ,  $X_{-i,t}$  — состояние окружающей среды.

# Преимущества АВМ в макроэкономике

АВМ позволяет:

- ① моделировать неравновесную динамику:

$\dot{Y}_t \neq 0, \dot{p}_t \neq 0$ , кризисы возникают эндогенно;

- ② учитывать сетевые механизмы (банк–фирма–домохозяйство);
- ③ осуществлять честные контрафактические эксперименты;
- ④ анализировать макропруденциальную политику (LTV, DSTI, капитальные требования);
- ⑤ гибко интегрировать микро—макро уровни.

АВМ восполняет пробелы DSGE и VAR-моделей.

## Пример эффекта взаимодействий (иллюстрация)

Даже простая локальное правило может порождать макроэффект:

$$c_{h,t} = \alpha_h Y_{h,t}, \quad Y_{f,t} = F(L_{f,t}, K_{f,t})$$

$\Rightarrow$  рост  $\alpha_h \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow$

Цепная реакция через множество агентов  $\rightarrow$  макроэкономическое изменение.

Ранние (2000-е гг.) макро-АВМ:

- нацелены на воспроизведение стилизованных фактов;
- параметры выбирались вручную;
- начальные состояния задавались случайно;
- анализ был **качественным**, а не прогностическим.

Стандартный подход:

$$\theta \longrightarrow \{x_{i,0}\}_{i=1}^N \sim \text{i.i.d.}, \quad \{x_{i,t}\} \Rightarrow \text{стилизованные факты.}$$

Ограничение: модели не стремились к точному совпадению с эмпирическими временными рядами.

# Переход к Data-driven ABM

Современная тенденция — воспроизводить конкретную экономику:

- инициализация агентов по реальным распределениям;
- использование вход-выходных таблиц, микроданных фирм/банков;
- отказ от чистой ручной калибровки;
- ориентация на точность прогноза временных рядов.

Формальная задача:

$$\min_{\theta} \mathcal{L}(Y^{\text{sim}}(\theta), Y^{\text{data}})$$

где  $\mathcal{L}$  — метрика ошибки (RMSE, MAPE и др.).

Это позволяет оценивать количественную силу АВМ на реальных данных.

# Прорыв IIASA (Poledna et al., 2023)

IIASA-модель впервые сравнила точность ABM с DSGE и AR-моделями:

- агенты инициализированы по данным национальных счетов Австрии;
- параметры — из данных или оценены по временным рядам;
- отсутствие ручной калибровки;
- статистически подтверждённый прогноз наравне с DSGE.

Однако модель была **жестко специфицирована**:

$$\theta = \theta_{\text{fixed}}, \quad \text{низкая гибкость структуры.}$$

Ожидаемо: более гибкая модель с калибруемыми параметрами может повысить точность.

# Новизна текущей модели (Wiese et al.) — обзор

Модель расширяет и дополняет IIASA за счет:

- ① Введение рынка жилья.
- ② Детализированный кредитный рынок (ARDL/ECM ставки).
- ③ Синтетическая гетерогенная популяция агентов.
- ④ Более реалистичные поведенческие правила.
- ⑤ Калибровка свободных параметров байесовскими методами.
- ⑥ Применение к 38 странам OECD.

**Цель: повысить точность прогноза и увеличить реализм поведения агентов.**

## Новшество 1: Рынок жилья

Рынок недвижимости добавляет важный макро-канал — богатство домохозяйств.

$$W_{h,t} = A_{h,t}^{\text{fin}} + P_t^H H_{h,t},$$

где  $P_t^H$  — цена жилья,  $H_{h,t}$  — количество объектов.

Эффекты:

- влияние на потребление (wealth effect);
- взаимодействие с ипотечным кредитованием (DSTI, LTV);
- возможность моделировать пузыри и их последствия.

## Новшество 2: Расширенный кредитный рынок

Банковские ставки формируются по эмпирической ARDL-модели:

$$r_t^{(k)} = \alpha_0 + \sum_i \alpha_i r_{t-i}^{CB} + \sum_j \beta_j \pi_{t-j} + \gamma NPL_{t-1} + \varepsilon_t,$$

где  $k$  — тип кредита.

Особенности:

- риск-чувствительные ставки;
- кредитный *rationing* при ужесточении условий;
- влияние на инвестиции фирм и потребление.

## Новшество 3: Реалистичная популяция агентов

Синтетические микроданные строятся так, чтобы:

- совпадали распределения дохода, богатства, возраста;
- сохранялись доли занятости, участия в рабочей силе;
- была воспроизведена структура домохозяйств.

Формально распределения подбираются так, что:

$$\mathbb{P}(X_i \in A) \approx \mathbb{P}_{\text{data}}(X \in A) \quad \forall A \subset \mathbb{R}^d.$$

Это создает правильное микрооснование для макродинамики.

Новые механизмы:

- фирмы больше ориентируются на ожидаемый спрос;
- ослаблено ограничение роста из-за прошлых дефицитов;
- прогнозирование встроено в решения агентов.

Пример — целевой выпуск фирмы:

$$\hat{Y}_{f,t} = D_t^{\text{exp}} + \phi_H H_{t-1}^{\text{excess}} + \phi_K K_{t-1}^{\text{excess}} + \phi_M M_{t-1}^{\text{excess}}.$$

## Новшество 5: Широкий охват и количественная калибровка

- Модель применяется к 38 странам OECD.
- Свободные параметры ( $\theta$ ) калибруются NPE/NDRE.

Байесовский принцип:

$$p(\theta | Y^{\text{data}}) \propto p(Y^{\text{data}} | \theta) p(\theta)$$

Практический выход:

$$\theta^* = \arg \max_{\theta} p(\theta | Y^{\text{data}})$$

Это обеспечивает количественное соответствие с макрорядами.

### 3.1 Типы агентов: обзор

Модель включает следующие классы агентов:

- ① Индивиды
- ② Домохозяйства
- ③ Фирмы
- ④ Банки
- ⑤ Государство
- ⑥ Центральный банк
- ⑦ Внешний мир (агрегированный)

Каждый агент обладает состоянием:

$$x_{i,t} = (\text{доходы, активы, ожидания, обязательства, решения})$$

и действует по правилам ограниченной рациональности.

# Индивиды

Индивид характеризуется:

- возрастом  $a$ ,
- доходом  $y$ ,
- статусом занятости  $s \in \{\text{Employed}, U, NA\}$ ,
- предложением труда  $h$ .

Динамика статуса:

$$s_{t+1} = f_s(s_t, w_t, v_t, \eta_t),$$

где  $v_t$  — вакансии,  $w_t$  — предлагаемые зарплаты.

Функции индивида:

- участие в рынке труда;
- формирование доходов домохозяйства;
- демографические переходы (выход из рабочей силы).

# Домохозяйства

Домохозяйство агрегирует доходы своих членов:

$$Y_{h,t} = \sum_{i \in h} y_{i,t} + T_t^{gov} + r_t^{fin}.$$

Принимаемые решения:

- потребление  $C_{h,t}$ ,
- сбережения  $S_{h,t}$ ,
- участие в рынке жилья ( $B_{h,t}, H_{h,t}$ ),
- спрос на кредиты (потребительские, ипотечные).

Бюджетное ограничение:

$$C_{h,t} + I_{h,t}^H + \Delta A_{h,t} = Y_{h,t} + L_{h,t}.$$

# Фирмы

Фирмы выпускают продукцию и нанимают труд.

Производство:

$$Y_{f,t} = \min \left\{ \hat{Y}_{f,t}, \frac{H_{f,t}}{\alpha_H}, \frac{K_{f,t}}{\alpha_K}, \frac{M_{f,t}}{\alpha_M} \right\}$$

Решения фирмы:

- найм/увольнение работников,
- инвестиции (кредит + собственные средства),
- ценообразование:  $p_{f,t+1} = p_{f,t}(1 + \pi_t^{exp} + \mu)$ .

Цель:

$$\pi_{f,t} = p_{f,t} Y_{f,t} - W_{f,t} H_{f,t} - r_t^{loan} L_{f,t}.$$

# Банки

Банки предоставляют кредиты и несут риски невозврата.

Балансовое ограничение:

$$A_t^{loans} + A_t^{gov} = D_t + K_t^{bank}.$$

Ограничение капитала:

$$\frac{K_t^{bank}}{A_t^{loans}} \geq CAR.$$

Процентные ставки по типам кредитов:

$$r_t^{(k)} = \alpha_0 + \alpha_1 r_t^{CB} + \beta \pi_t + \gamma NPL_{t-1}.$$

# Государство и центральный банк

Государство:

- собирает налоги:  $T_t = \tau_Y Y_t + \tau_C C_t$ ,
- осуществляет трансферты  $TR_t$  и госзакупки  $G_t$ ,
- формирует бюджет:

$$Def_t = G_t + TR_t - T_t.$$

Центральный банк:

$$r_{t+1}^{CB} = r_t^{CB} + \phi_\pi (\pi_t - \pi^{target})$$

Воз действует на ставки банков, инвестиции, потребление.

### 3.2 Рынки и механизмы взаимодействия

Основные рынки:

- ① товарный,
- ② рынок труда,
- ③ кредитный рынок,
- ④ рынок жилья.

Экономика сток-флоу консистентна:

$$\sum_h C_{h,t} + G_t = \sum_f p_{f,t} Y_{f,t}$$

$\Delta$ долг домохозяйств =  $\Delta$ активов банков

Каждая транзакция одного агента — доход другого.

# Товарный рынок

Планируемый выпуск:

$$\hat{Y}_{f,t} = D_t^{exp} + \phi_H H_{t-1}^{exc} + \phi_K K_{t-1}^{exc} + \phi_M M_{t-1}^{exc}$$

Цена фирмы:

$$p_{f,t+1} = p_{f,t}(1 + \pi_t^{exp} + \mu_f)$$

Спрос домохозяйств:

$$C_{h,t} = \max \left\{ C_t^{min}, (1 - \phi^{SR}) Y_{h,t}, \phi^{CO} \bar{C}_{h,t} \right\}$$

# Рынок труда

Фирмы объявляют вакансии:

$$V_{f,t} = \max\{0, \hat{H}_{f,t} - H_{f,t}\}$$

Индивид принимает оффер, если:

$$w_{f,t} \geq w_{i,t}^{res}$$

Равновесные показатели:

$$U_t = 1 - \frac{\sum_f H_{f,t}}{\sum_i h_i^{offer}}$$

# Кредитный рынок

Кредиты фирмам:

$$L_{f,t}^F \leq \min\{\lambda_K K_{f,t}, \lambda_\pi \pi_{f,t}^{exp}, \lambda_D D_{f,t}\}$$

Потребительский и ипотечный кредит домохозяйств:

$$L_{h,t}^H \leq \min\{LTV \cdot P_t^H H_{h,t}, DSTI \cdot Y_{h,t}, LTI \cdot Y_{h,t}\}$$

При ужесточении условий — кредитный rationing.

# Рынок жилья

Домохозяйства принимают решения:

$$H_{h,t+1} \in \{H_{h,t}, H_{h,t} \pm 1\}$$

Цена жилья определяется спросом и предложением:

$$P_{t+1}^H = P_t^H \left(1 + \kappa(D_t^H - S_t^H)\right)$$

Жильё влияет на богатство:

$$W_{h,t} = A_{h,t}^{fin} + P_t^H H_{h,t}$$

и на потребление.

### 3.3 Источники данных

Используются:

- OECD ICIO — структура производства, межотраслевые связи;
- Compustat — балансы фирм и банков;
- Household Finance Surveys — богатство и доходы населения;
- World Bank — госфинансы;
- BIS — процентные ставки.

Инициализация:

$$x_{i,0} = x_i^{data}, \quad \sum_i x_{i,0}^{model} \approx \sum_i x_i^{data}.$$

### 3.4 Правила поведения агентов

Модель работает поквартально:

- ① формирование ожиданий,
- ② постановка целей,
- ③ взаимодействия на рынках,
- ④ обновление балансов.

Общая форма решений агента:

$$d_{i,t} = f_i(x_{i,t}, E_{i,t}, \theta_i)$$

Ожидания — адаптивные:

$$E_{t+1}(z) = z_t + \rho(z_t - z_{t-1})$$

# Примеры правил поведения

Потребление домохозяйства:

$$C_{h,t} = \max \left\{ C^{min}, (1 - \phi^{SR}) Y_{h,t}, \phi^{CO} \bar{C}_{h,t} \right\}$$

Найм фирмой:

$$w_{f,t} = w_{f,t-1}(1 + \pi_{t-1}^{PPI}) + \mu^W \mathbf{1}_{v_{f,t-1} > 0}$$

Производственный план:

$$\hat{Y}_{f,t} = D_t^{exp} + \sum_{k \in \{H, K, M\}} \chi_k excess_{k,t-1}$$

### 3.5 Байесовская калибровка

Используются методы:

- Neural Posterior Estimation (NPE),
- Neural Density Ratio Estimation (NDRE).

Цель — подобрать параметры  $\theta$ :

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \mathcal{L}(Y^{sim}(\theta), Y^{data})$$

Байесовская логика:

$$p(\theta|Y) = \frac{p(Y|\theta)p(\theta)}{p(Y)}$$

NPE обучает нейросеть аппроксимировать  $p(\theta|Y)$ .

# Цель сравнительного анализа

Задача авторов:

- оценить прогностическую способность новой ABM;
- сравнить её с:
  - ① базовой IIASA-моделью,
  - ② статистической AR(1).
- протестировать 38 стран OECD, несколько стартовых периодов.

Критерий:

$$\text{RMSE}(\theta) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Y_t^{sim}(\theta) - Y_t^{data})^2}$$

# Улучшение точности прогнозов

Новая АВМ показала существенное снижение ошибок прогноза:

- снижение RMSE на **40–60%** относительно базовой IIASA;
- устойчивое превосходство по ВВП, инфляции, потреблению;
- лучший прогноз по инвестициям в среднем (несмотря на их волатильность);
- улучшение прогноза госрасходов и ряда других агрегатов.

Оценка эффекта:

$$\Delta \text{RMSE} = \frac{\text{RMSE}^{\text{IIASA}} - \text{RMSE}^{\text{New}}}{\text{RMSE}^{\text{IIASA}}} \in [0.4, 0.6]$$

Практически во всех странах модель дала более точный прогноз.

# Сравнение с AR(1)

AR(1):

$$y_{t+1} = \alpha + \rho y_t + \varepsilon_t$$

Ограничения AR(1):

- не учитывает структуры экономики;
- не ловит развороты трендов;
- не отражает взаимодействий в сетях агентов.

Результат:

$\text{RMSE}^{ABM} < \text{RMSE}^{AR(1)}$  в подавляющем большинстве стран и показателей

Особенно сильное превосходство по:

- инфляции,
- ВВП,
- инвестициям.

# Сравнение с базовой IIASA-моделью

IIASA-модель использовала фиксированные параметры:

$$\theta = \theta_{fixed}$$

Новая модель калибрует поведенческие параметры:

$$\theta^* = \arg \max p(\theta | Y^{data})$$

Следствие:

- улучшенная адаптация к структуре экономики,
- более реалистичная реакция фирм/домохозяйств/банков,
- лучшая динамическая устойчивость.

Факт:

В 33 из 38 стран модель дала меньшую ошибку.

# Байесовский фактор: формальная проверка

Байесовский фактор:

$$BF = \frac{p(Y|\text{New ABM})}{p(Y|\text{IIASA})}$$

Интерпретация:

$BF > 1 \Rightarrow$  новая модель предпочтительнее

Результат:

- в 65% случаев  $BF$  уверенно предпочитает новую АВМ;
- статистически значимое превосходство;
- подтверждение количественного скачка качества модели.

## Преимущества новой модели: сводка

Модель превосходит альтернативы потому что:

- ① использует реалистичную гетерогенную популяцию;
- ② включает расширенный кредитный и жилищный рынки;
- ③ калибрована по данным 38 стран (широкий охват);
- ④ применяет передовые байесовские методы (NPE/NDRE);
- ⑤ обладает гибкой структурой поведения агентов.

Комбинация микрооснований и байесовской калибровки — источник прогностической силы.

# Значение для экономического моделирования

Работа демонстрирует:

- переход АВМ от качественного анализа к количественному прогнозированию;
- возможность конкурировать и превосходить DSGE и статистические модели;
- путь к использованию АВМ для оценки политики, устойчивости, шоков;
- перспективу единых моделей для сценариев «что если» и прогнозов.

Качественный вывод:

**Калиброванные АВМ впервые доказали превосходство в прогнози**

# Сценарий: три фазы динамики

Модель запускалась в три этапа:

- ① **Базовый режим** (0–50 шагов): низкие буферы ликвидности, высокая адаптация найма.
- ② **Негативный шок спроса** (50-й шаг): резкое падение  $\alpha$  домохозяйств.
- ③ **Позитивный шок / восстановление** (100-й шаг): рост  $\alpha$  выше исходного уровня.

Параметры:

$$r = 0.08, \quad \gamma_{repay} = 0.1, \quad \text{adaptation\_rate} = 1.0,$$

$$\text{total savings} = 15, \quad \text{firm cash} = 10, \quad w = 1.2.$$

# Базовая динамика до шока (0–50 шагов)

## Ключевые механизмы:

- Зарплаты домохозяйств превышают стартовую ликвидность фирм:

$$\text{Wage Bill} > \text{Cash}_f \Rightarrow \text{FirmDebt} \uparrow$$

- Низкие сбережения  $\Rightarrow$  низкое потребление  $\Rightarrow$  низкая выручка.
- Целевой найм подстраивается по правилу:

$$L_f^{\text{target}} = L_f + \text{adapt} \cdot \left( \frac{D_f}{A_f} - L_f \right),$$

где  $D_f$  — спрос,  $A_f$  — производительность.

- Выпуск стремится к низкому равновесию:

$$Y_t \approx 10.$$

**Результат:** Employment стабилизируется на 90–100, Output падает, долг фирм нарастает.

# Негативный шок (50-й шаг)

На 50-м шаге для всех  $h$ :

$$\alpha_h \leftarrow \max(0.05, \alpha_h - 0.85)$$

Эффекты:

- Потребление:

$$C_t = \sum_h \alpha_h \cdot (\text{savings} + \text{income}) \approx 0$$

- Выручка фирм  $\rightarrow 0$
- Целевой найм резко снижается, Employment падает.
- Выпуск:

$$Y_t \rightarrow 0$$

- Долг не растёт, т.к.:

$$\text{Wage Bill} \downarrow, \quad \text{repay} = \gamma_{\text{repay}} \cdot \text{cash} \Rightarrow \text{FirmDebt} \downarrow \text{ (медленно)}$$

# Позитивный шок и восстановление (100-й шаг)

На 100-м шаге:

$$\alpha_h \leftarrow \min(0.99, \alpha_h + 0.9)$$

Эффекты:

- Спрос возвращается выше базового уровня.
- Фирмы увеличивают целевой найм:

$$L_f^{\text{target}} = \frac{D_f}{A_f}$$

- Employment растёт, но не полностью достигает начального уровня.
- Выручка восстанавливается  $\Rightarrow$  долг гасится ускоренно:

$$\Delta \text{Debt}_f = -\gamma_{\text{repay}} \cdot \text{Cash}_f$$

Общий профиль:

- Output резко падает при шоке и восстанавливается частично.
- FirmDebt достигает пика в фазе падения, затем монотонно снижается.

# Интерпретация параметров

**Ликвидность домохозяйств и фирм:** низкие буферы усиливают цикличность.

**Процентная ставка и обслуживание долга:**

$$\text{Debt}_{t+1} = \text{Debt}_t(1 + r) - \gamma_{\text{repay}} \cdot \text{Cash}_t$$

**Шоки по  $\alpha$ :**

$$C_t(\alpha) = \alpha \cdot W_t, \quad \alpha \text{ управляет мгновенным спросом.}$$

**Характеристика реакции:**

- быстрый обвал выпуска,
- медленное восстановление занятости,
- асимметричное движение долга (быстрый рост, медленное падение).

# Шок спроса и восстановление