

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 сбой

Ключевые проблемы:

- ❶ Игнорирование распределений доходов, активов, долга.
- ❷ Недооценка нелинейности и контуров обратной связи.
- ❸ Неспособность моделировать эндогенные кризисы:

Шок → дисбаланс → обвальное поведение рынков.

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

Следствие — слабая прогностическая способность при турбулентной динамике.

Появление ABM как альтернативы

ABM предлагает:

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

Элементарная логика ABM:

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

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

АВМ позволяет:

- 1 моделировать неравновесную динамику:

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

- 2 учитывать сетевые механизмы (банк–фирма–домохозяйство);
- 3 осуществлять честные контрфактические 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.

Первые макро-АВМ: стилизованные экономики

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 ABM на реальных данных.

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.

Модель расширяет и дополняет IIASA за счет:

- ❶ Введение рынка жилья.
- ❷ Детализированный кредитный рынок (ARDL/ECM ставки).
- ❸ Синтетическая гетерогенная популяция агентов.
- ❹ Более реалистичные поведенческие правила.
- ❺ Калибровка свободных параметров байесовскими методами.
- ❻ 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:

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

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.

Новшество 4: Улучшенные поведенческие правила

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 (θ) 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.

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).

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 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 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:

- 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:

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

Воздействует 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:

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

Δ долг домохозяйств = Δ активов банков

Каждая транзакция одного агента — доход другого.

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:

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

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:

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

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.

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:

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

3.5 Байесовская калибровка

Используются методы:

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

Цель — подобрать параметры θ :

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

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:

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

Новая ABM 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:

$RMSE^{ABM} < RMSE^{AR(1)}$ 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 ABM;
- статистически значимое превосходство;
- подтверждение количественного скачка качества модели.

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

Качественный вывод:

Калиброванные ABM 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 α домохозяйств.
- 3 **Позитивный шок / восстановление** (100-й шаг): рост α выше исходного уровня.

Параметры:

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

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

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.:

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

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.

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 α :

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

Характеристика реакции:

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

Шок спроса и восстановление