



## Модель Обижаевой–Ванга

---

Всеволод Заостровский<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Московский Государственный университет имени М. В. Ломоносова

20 января 2024 г.

### Аннотация

В нашем исследовании мы предлагаем новую методику оценки параметров в модели Обижаевой–Ванга. Кроме того, мы тестируем её на реальных данных и исследуем особенности торговли Московской биржи.

**Ключевые слова:** Модель Обижаевой–Ванга, оптимальное исполнение, market impact, resiliency

**JEL коды:** C81 · G1

**MSC (2000) коды:** 91G23

## Введение

Модель Обижаевой–Ванга - это модель торговли на финансовом рынке, которая широко используется в количественных финансах. Разработанная Анной Обижаевой и Цзян Вангом в 2013 году, модель используется для анализа динамики финансовых рынков и принятия торговых решений. Модель привлекла значительное внимание в финансовой индустрии благодаря своему вниманию к свойству упругости (resiliency) стакана, описывающему важный эмпирический факт: спрос/ предложение финансовых ценных бумаг, как правило, не является идеально эластичным. Упругость — скорость, с которой спрос/предложение восстанавливается до устойчивого состояния после совершения сделки — характеризует начало нового этапа в разработке моделей оптимального исполнения. В нашем исследовании мы разрабатываем практический способ использования этой теории.

Этот факт справедлив даже для ликвидных европейских рынков, если же мы говорим о гораздо менее ликвидных российских рынках, пренебрежение им может привести к катастрофическим последствиям. Основное отличие модели Обижаевой–Ванга от других как раз в том, что в ней ключевую роль играет устойчивость.

Мы исследуем задачу оптимального исполнения. Иными словами, если кто-то хочет продать или купить определенное количество актива достаточно большое, чтобы оказать существенное влияние на рынок, что он должен делать? Чтобы сформулировать задачу на языке математики, нам нужно будет изучить основные принципы биржевой структуры.

## 1 Основные понятия

Определим несколько понятий, которые понадобятся нам в дальнейшем.

---

<sup>\*</sup>e-mail: vsevolodzaostrovsky@mail.ru



Рис. 1: Графическое представление лимитной книги заявок

**Определение 1.** *Бид (bid) — это самая высокая цена, которую покупатель готов заплатить за актив. Далее, бид в момент времени  $t$  будет обозначаться  $B_t$ . Аск (ask) — это самая низкая цена, за которую продавец готов предоставить актив. Далее, аск в момент времени  $t$  будет обозначаться  $A_t$ . Бид-аск спрэд (bid-ask spread)  $s$ :  $s = A_t - B_t$ . Мид (mid-quote price):  $V_t = \frac{A_t + B_t}{2}$ .*

Начнем с рассмотрения структуры лимитной книги заявок (Limit Order Book – LOB). В рамках этой парадигмы организации биржевых торгов, у каждого участника есть две возможности:

- выразить желание купить или продать определённое количество единиц актива по определенной цене. В этом случае, биржа запомнит пару цена–количество. Множество этих пар составляет лимитную книгу заявок. На рисунке 1 изображено традиционное представление лимитной книги заявок.
- выразить желание купить или продать определённое количество единиц актива немедленно. В этом случае он немедленно получит запрошенное количество акций (если на бирже есть необходимое количество) по лучшей возможной цене: к примеру, в случае покупки, если на верхнем ценовом уровне не будет достаточного количества единиц актива для удовлетворения заявки, то будут взяты активы из следующего ценового уровня. Таким образом, не гарантируется, что итоговая цена одной единицы актива будет совпадать с аском.

Таким образом, если опустить некоторые подробности, существует два вида заявок:

**Определение 2.** *Лимитная заявка (ордер) (limit order) представляет собой распоряжение на покупку или продажу ценной бумаги по определенной цене или выше. Этот тип заявки гарантирует цену исполнения, но не гарантирует само исполнение.*

**Определение 3. Рыночная заявка (ордер) (market order)** представляет собой распоряжение на немедленную покупку или продажу ценной бумаги. Этот тип заявки гарантирует, что она будет исполнена, но не гарантирует цену исполнения.

Теперь ясно, что если мы хотим продать или купить актив в количестве, достаточно большом, чтобы он мог оказать существенное влияние на рынок, мы не должны делать это одной заявкой: это было бы очень дорого, поскольку крупный ордер удалил бы все верхние уровни в лимитной книге заявок. Поэтому на практике все крупные заявки разбиваются на большое количество мелких. Например, можно просто разделить ордер на  $N$  равных частей и продавать их через равные промежутки времени (это называется TWAP). Но есть ли лучшее решение?

## 2 Подход Обижаевой и Ванга к формализации проблемы

В попытке найти лучшее решение, мы рассматриваем модель Обижаевой–Ванга, в терминах которой задача имеет следующий вид:

$$J_0 = \min_{\{x_0 \dots x_N\}} E_0 \left[ \sum_{n=0}^N [A_{t_n} + x_n / (2q)] x_n \right],$$

$$A_{t_n} = F_{t_n} + \lambda(X_0 - X_{t_n}) + s/2 + \sum_{i=0}^{n-1} x_i \kappa e^{-\rho \tau(n-i)},$$

где

- трейдер должен купить  $X_0$  единиц актива за фиксированный период времени  $[0, T]$ ;
- $x_{t_n}$  размер ордера в момент времени  $t_n = \tau n$  (здесь,  $\tau = T/N$ );
- $X_{t_n} := X_0 - \sum_{t_k < t_n} x_{t_k}$ ;
- $B_{t_n}$  и  $A_{t_n}$  — бид и аск в момент времени  $t_n$ ;
- $V_{t_n} = \frac{A_{t_n} + B_{t_n}}{2}$  — мид;
- $s$  — бид-аск спрэд;
- $F_t$  — фундаментальная (справедливая) цена актива;
- $q(P)$  распределение лимитной книги заявок  $P$  (по ценам  $[a, b]$  доступно  $\int_a^b q(p) dP$  единиц актива);
- параметр  $\lambda$  — постоянный маркет импакт (справдливая цена  $V_t$  в результате исполнения ордера объема  $x$  меняется по закону:  $V_{t+} = V_t + \lambda x$ );
- $\kappa = \frac{1}{q} - \lambda$ ;
- параметр  $\rho$  — упругость стакана (resiliency).

Данная задача была решена в статье [OW13]:

**Теорема 1.** Решение проблемы оптимального исполнения:

$$x_n = -\frac{1}{2} \delta_{n+1} [D_{t_n} (1 - \beta_{n+1} e^{-\rho \tau} + 2\kappa \gamma_{n+1} e^{-2\rho \tau}) - X_{t_n} (\lambda + 2\alpha_{n+1} - \beta_{n+1} \kappa e^{-\rho \tau})],$$

где  $x_N = X_N$  и  $D_t = A_t - V_t - s/2$ . Ожидаемая цена будущих сделок в рамках стратегии оптимального исполнения меняется по закону

$$J_{t_n} = (F_{t_n} + s/2) X_{t_n} + \lambda X_0 X_{t_n} + \alpha_n X_{t_n}^2 + \beta_n D_{t_n} X_{t_n} + \gamma_n D_{t_n}^2,$$

где коэффициенты  $\alpha_{n+1}$ ,  $\beta_{n+1}$ ,  $\gamma_{n+1}$  и  $\delta_{n+1}$  определяются рекурсивно по формулам:

$$\alpha_n = \alpha_{n+1} - \frac{1}{4}\delta_{n+1}(\lambda + 2\alpha_{n+1} - \beta_{n+1}\kappa e^{-\rho\tau})^2,$$

$$\beta_n = \beta_{n+1}e^{-\rho\tau} + \frac{1}{2}\delta_{n+1}(1 - \beta_{n+1}e^{-\rho\tau} + 2\kappa\gamma_{n+1}e^{-2\rho\tau})(\lambda + 2\alpha_{n+1} - \beta_{n+1}\kappa e^{-\rho\tau}),$$

$$\gamma_n = \gamma_{n+1}e^{-2\rho\tau} - \frac{1}{4}\delta_{n+1}(1 - \beta_{n+1}e^{-\rho\tau} + 2\kappa\gamma_{n+1}e^{-2\rho\tau})^2,$$

где  $\delta_{n+1} = [1/(2q) + \alpha_{n+1} - \beta_{n+1}\kappa e^{-\rho\tau} + \gamma_{n+1}\kappa^2 e^{-2\rho\tau}]^{-1}$  и начальные условия

$$\alpha_N = 1/(2q) - \lambda, \quad \beta_N = 1, \quad \gamma_N = 0.$$

В нашем исследовании мы будем рассматривать предел этого решения.

**Теорема 2.** При  $N \rightarrow \infty$ , стратегия оптимального исполнения принимает вид:

$$\begin{aligned} \lim_{N \rightarrow \infty} x_0 = x_{t=0} &= \frac{X_0}{\rho T + 2}, \\ \lim_{N \rightarrow \infty} x_n/(T/N) &= \dot{X}_t = \frac{\rho X_0}{\rho T + 2}, \quad t \in (0, T), \\ \lim_{N \rightarrow \infty} x_0 = x_{t=0} &= \lim_{N \rightarrow \infty} x_n/(T/N) = x_{t=T} = \frac{X_0}{\rho T + 2}. \end{aligned}$$

где  $x_0$  первая сделка за отведенный период,  $x_N$  — последняя, и  $\dot{X}_t$  скорость трейдинга между ними.

Таким образом, мы имеем явную формулу для стратегии оптимального исполнения. Но нам необходимо каким-либо образом найти параметры  $\rho$ ,  $\kappa$  и  $\lambda$  для того, чтобы применить её на практике.

### 3 Как подобрать параметры?

Мы предлагаем наш метод для их нахождения: построение регрессии:

**Теорема 3.** Для упрощения записей введём обозначения:

$$A_k := A_{t_k}, \quad x_k := x_{t_k}, \quad \Delta t_{k+1} := t_{k+1} - t_k, \quad \Delta A_{k+1} := A_{k+1} - A_k.$$

В регрессии

$$\frac{\Delta A_{k+2}}{\Delta t_{k+2}} - \frac{\Delta A_{k+1}}{\Delta t_{k+1}} = -\rho \Delta A_k + \rho(\lambda + \kappa)x_{t_k} - \rho\kappa x_{t_{k+1}} + (\lambda + \kappa) \left( \frac{x_{t_{k+1}}}{\Delta t_{k+1}} - \frac{x_{t_k}}{\Delta t_k} \right),$$

где  $x_k$  и  $A_k$  глубина ордера и аск в момент времени  $t_k$ , соответственно.

коэффициенты  $\rho$ ,  $\kappa$  и  $\lambda$  те же, что в модели Обижаевой–Ванга, описывающей рынок, характеризующий временными рядами:  $A_k$ ,  $\Delta t_k$ ,  $x_k$ .

Вся требуемая информация может быть получена из 13 данных:

- $\Delta A_k$  изменение аска в следствие исполнения заявки размера  $x_k$  в момент времени  $t_k$ .
- $\Delta t_k$  время между  $k$  и  $k + 1$  заявками.

	<u>Time</u>	<u>AskBefore</u>	<u>AskAfter</u>	<u>Volume</u>
0	1.0006099849997554	61.782	61.87	40000.0
1	2.0004541379967122	61.84	61.84	48000.0
2	2.0004635579971364	61.84	61.84	48000.0
3	2.000483832001919	61.842	61.842	13000.0
4	2.0004864069996984	61.842	61.847	87000.0
5	2.0004864069996984	61.847	61.847	7000.0
6	2.0005590279979515	61.792	61.845	10000.0
7	2.00059898699692	61.79	61.842	100000.0
8	2.000793077997514	61.835	61.835	11000.0
9	2.0008411289963988	61.815	61.815	11000.0
10	3.0002688890017453	61.822	61.822	1000.0
11	3.000301476000459	61.83	61.83	16000.0
12	3.0003054539993173	61.83	61.83	1000.0

Рис. 2: Данные после первого этапа парсинга

Другая идея связана с рассмотрением уравнения, задающего динамику изменения аска после исполнения крупного ордера:

$$A_t = \bar{p}_t + \frac{s}{2} + x_1 \kappa e^{-\rho t}.$$

Она выглядит хорошо, но сопряжена с существенными численными сложностями: мы протестировали несколько подходов, связанных с этой идеей, но нам не удалось извлечь адекватные параметры.

## 4 Данные

### 4.1 Источники и обработка

Мы работали с ордерлогами ([спецификация](#)). Было написано несколько [программ](#), которые, в совокупности, распаршивали исходные записи в таблицу из четвёрок (время, аск до исполнения ордера, аск после исполнения ордера, глубина ордера). Следует обратить внимание на то, что заявки, поглощающие несколько уровней, представляются в данных в виде последовательности заявок, поэтому перед началом обработки их следует объединить: объем ордера есть сумма объемов, аск до исполнения — аск до исполнения первого ордера, аск после исполнения — аск после исполнения последнего ордера. Фрагмент таблицы изображен на рисунке [2](#).

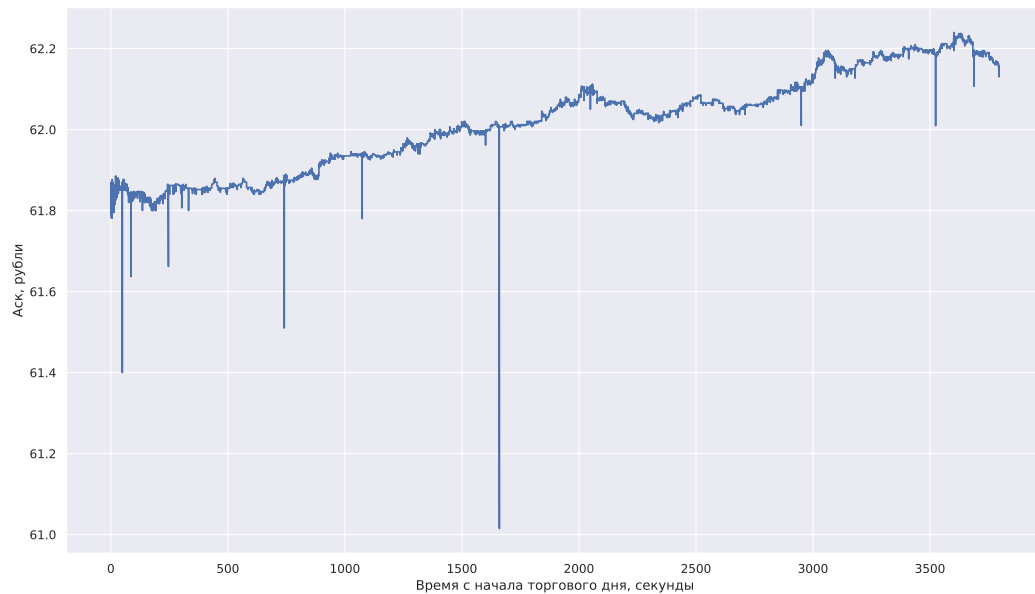


Рис. 3: График аска в первый час торгового дня

## 4.2 Выбор инструмента

Для очень существенной части активов, торгуемых на московской бирже, модель неприменима: в частности, встречается немало инструментов, по которым совершается порядка сотни сделок в день (и даже меньше), из которых подавляющее большинство не поглощает ни одного уровня (те фактическая цена совершения сделки равна аску). В целом, известно, что российский рынок характеризуется низким уровнем ликвидности и низким уровнем интенсивности торгов. Для подбора параметров и статистических исследований нам нужно относительно большое количество данных, к тому же в выводе регрессии мы пользовались малостью промежутков времени, поэтому мы остановили выбор на исследовании валютных рынков. Однако, и среди валютных пар большая часть имеет очень низкую интенсивность торгов, например, CHFRUB\_TOM, CNYRUB\_TOM, HKDRUB\_TOM, JPYRUB\_TOM, KZTRUB\_TOM. Даже в паре ликвидных валют EURUSD000TOM происходит лишь порядка пятисот сделок в день. Поэтому мы решили остановить свой выбор на паре USD000UTSTOM.

## 4.3 Аномалии

Данные характеризуются очень большим числом количеством резких односторонних скачков аска (см. график 3). В частности, пересечение множеств сотни самых больших сделок и сотни сделок, сдвинувших аск сильнее всего, пусто. В то же время, эти скачки, в целом, не характеризуют динамику рискованного актива, поэтому целесообразно исключить их из исследуемого датасета.

## Заключение

## Список литературы

- [Alm+05] Robert Almgren и др. «Direct estimation of equity market impact». В: *Risk* 18.7 (2005), с. 58–62.
- [Gre05] Robin Greenwood. «Short-and long-term demand curves for stocks: theory and evidence on the dynamics of arbitrage». В: *Journal of Financial Economics* 75.3 (2005), с. 607–649.
- [OW13] Anna A Obizhaeva и Jiang Wang. «Optimal trading strategy and supply/demand dynamics». В: *Journal of Financial markets* 16.1 (2013), с. 1–32.
- [KO18] Albert S Kyle и Anna A Obizhaeva. «The market impact puzzle». В: *Anna A., The Market Impact Puzzle (February 4, 2018)* (2018).
- [Vel20] Raja Velu. *Algorithmic trading and quantitative strategies*. CRC Press, 2020.
- [Web23] Kevin T Webster. *Handbook of Price Impact Modeling*. CRC Press, 2023.

## Приложение А Обоснование метода

**Теорема 4.** В регрессии

$$\frac{\Delta A_{k+1}}{\Delta t_{k+1}} - \frac{\Delta A_k}{\Delta t_k} = -\rho \Delta A_k + \rho(\lambda + \kappa)x_{t_k} - \rho\kappa x_{t_{k+1}} + (\lambda + \kappa) \left( \frac{x_{t_{k+1}}}{\Delta t_{k+1}} - \frac{x_{t_k}}{\Delta t_k} \right),$$

где  $x_k$  и  $A_k$  глубина ордера и аск в момент времени  $t_k$ , соответственно.

коэффициенты  $\rho, \kappa$  и  $\lambda$  те же, что в модели Обижаевой–Ванга, описывающей рынок, характеризующийся временными рядами:  $A_k, \Delta t_k, x_k$ .

**Доказательство.** Из определения модели имеем три уравнения:

$$A_{t_k} = V_{t_k} + \frac{s}{2} + \sum_{i=0}^{k-1} x_{t_i} \kappa e^{-\rho(t_k - t_i)} \quad (1)$$

$$V_{t_{k+1}} = V_{t_k} + \lambda x_{t_k} \rightarrow V_{t_{k+1}} - V_{t_k} = \lambda x_{t_k} \quad (2)$$

$$D_{t_k} = A_{t_k} - V_{t_k} - \frac{s}{2} \quad (3)$$

Из (1) и (3),

$$\begin{aligned} D_{t_k} &= \sum_{i=0}^{k-1} x_{t_i} \kappa e^{-\rho(t_k - t_i)} \\ \Delta D_{t_k} &= \sum_{i=0}^k x_{t_i} \kappa e^{-\rho(t_{k+1} - t_i)} - \sum_{i=0}^{k-1} x_{t_i} \kappa e^{-\rho(t_k - t_i)} = \sum_{i=0}^{k-1} x_{t_i} \kappa (e^{-\rho(t_{k+1} - t_i)} - e^{-\rho(t_k - t_i)}) + x_{t_k} \kappa e^{-\rho(t_{k+1} - t_k)} = \\ &= \sum_{i=0}^{k-1} x_{t_i} \kappa e^{-\rho(t_k - t_i)} (e^{-\rho(t_{k+1} - t_k)} - 1) + x_{t_k} \kappa e^{-\rho(t_{k+1} - t_k)} = [\text{полагая, что } e^{-\rho(t_{k+1} - t_k)} = 1 - \rho(t_{k+1} - t_k)] = \\ &= \sum_{i=0}^{k-1} x_{t_i} \kappa e^{-\rho(t_k - t_i)} ((1 - \rho(t_{k+1} - t_k)) - 1) + x_{t_k} \kappa (1 - \rho(t_{k+1} - t_k)) = -\rho \Delta t_k D_{t_k} + x_{t_k} \kappa (1 - \rho \Delta t_k). \end{aligned}$$

С другой стороны, из (2) и (3) имеем

$$\Delta D_k = D_{k+1} - D_k = A_{k+1} + V_{k+1} - A_k - V_k = \Delta A_k - \Delta V_k \rightarrow \Delta A_k = \Delta D_k + \Delta V_k.$$

Таким образом, получаем уравнение

$$\Delta A_k = -\rho \Delta t_k D_{t_k} + x_{t_k} \kappa (1 - \rho \Delta t_k) + \lambda x_{t_k}.$$

Исключим из него ряд  $D_{t_k}$ , поделив предыдущее уравнение на  $\Delta t_k$  и рассмотрим разность  $A_{t_{k+1}}$  и  $A_{t_k}$ :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta A_{k+1}}{\Delta t_{k+1}} - \frac{\Delta A_k}{\Delta t_k} &= -\rho D_{t_{k+1}} + x_{t_{k+1}} \kappa \left( \frac{1}{\Delta t_{k+1}} - \rho \right) + \lambda \frac{x_{t_{k+1}}}{\Delta t_{k+1}} + \rho D_{t_k} - x_{t_k} \kappa \left( \frac{1}{\Delta t_k} - \rho \right) - \lambda \frac{x_{t_k}}{\Delta t_k} = \\ &= -\rho (\Delta A_k - \Delta V_k) + (\lambda + \kappa) \left( \frac{x_{t_{k+1}}}{\Delta t_{k+1}} - \frac{x_{t_k}}{\Delta t_k} \right) - \rho \kappa (x_{t_{k+1}} - x_{t_k}) = \\ &= -\rho \Delta A_k + \rho (\lambda + \kappa) x_{t_k} - \rho \kappa x_{t_{k+1}} + (\lambda + \kappa) \left( \frac{x_{t_{k+1}}}{\Delta t_{k+1}} - \frac{x_{t_k}}{\Delta t_k} \right). \end{aligned}$$

□