

АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНЯТИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ

С. В. СОЛОДУХИН¹⁾, Е. С. ШАЙТАНОВА¹⁾

¹⁾*Инженерный институт Запорожского национального университета,
пр. Соборный, 226, 69006, г. Запорожье, Украина*

Проведен анализ современного финансового рынка. Выявлена зависимость между поведенческими особенностями участников рынка и реакцией рыночных индикаторов. Обоснована необходимость внимания к поведенческому аспекту принятия решений в управлении экономическими объектами. Методология экономико-математического моделирования, положенная в основу концепции формирования экономико-математической модели управления инвестиционными ресурсами предприятия, позволяет осуществить анализ процессов функционирования инвестиционной деятельности предприятия, а также формализовать процессы оптимизации и планирования инвестиционных ресурсов на предприятии.

Ключевые слова: инвестиционная деятельность; агентно-ориентированная модель; финансовый рынок; принятие решений; массовое поведение; поведенческая экономика.

AGENT-BASED MODELING OF ADOPTION INVESTING DECISIONS

S. V. SOLODUKHIN^a, E. S. SHAITANOVA^a

^a*Engineering Institute of Zaporizhzhia National University,
226 Soborniy Avenue, Zaporizhzhia 69006, Ukraine
Corresponding author: E. S. Shaitanova (shaitanovaes@gmail.com)*

The analysis of the current financial market is held. The addiction between behavioral characteristics of market participants and the reaction of market indicators is revealed. The necessity of attention to the behavioral aspect of decision making in the management of economic objects is substantiated. The methodology of economics and mathematical modeling, which is the basis of the concept of forming an economic-mathematical model of management of investment resources of the enterprise, allows us to carry out an analysis of the processes of functioning of the investment activity of the enterprise, as well as to formalize the processes of optimization and planning of investment resources at the enterprise.

Keywords: investment operation; agent-oriented model; financial market; decision making; herding behavior; behavioral economics.

Образец цитирования:

Солодухин СВ, Шайтанова ЕС. Агентное моделирование принятия инвестиционных решений. *Журнал Белорусского государственного университета. Экономика.* 2019;1:46–57.

For citation:

Solodukhin SV, Shaitanova ES. Agent-based modeling of adoption investing decisions. *Journal of the Belarusian State University. Economics.* 2019;1:46–57. Russian.

Авторы:

Станислав Владимирович Солодухин – кандидат экономических наук, доцент, декан факультета экономики и менеджмента.

Евгения Сергеевна Шайтанова – аспирантка кафедры экономики и информационных технологий. Научный руководитель – С. В. Солодухин.

Authors:

Stanislav V. Solodukhin, PhD (economics), docent; dean of the Institute of economics and management.

soloduhin.s@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4015-3349

Eugenia S. Shaitanova, postgraduate student at the department of economics and information technology.

shaitanovaes@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0553-9411

Введение

Финансовые рынки являются неотъемлемой частью любой экономической системы, без которой невозможно эффективное распределение ресурсов. Концепции классической теории рынка капитала, которые рассматривают фундаментальные факторы, часто не принимают во внимание поведенческие аспекты принятия решений экономическими агентами. При этом преимуществами классической теории финансов остаются внутренне согласованная методологическая основа и непротиворечивость взаимосвязанного комплекса выводов, методик и рекомендаций, альтернативы которым еще не разработаны, что в значительной степени объясняет широкое использование классических моделей на практике.

Сейчас наблюдается усложнение основ функционирования финансовых рынков, что проявляется в уменьшении значимости технического анализа рынка. Для агентов, принимающих решения на финансовых рынках, становится характерным массовое (стадное, подражательное) поведение, связанное с ограниченной информированностью экономических агентов, что может приводить к негативным последствиям: образованию финансовых «пузырей», падению индексов финансовых рынков, банкротству компаний [1].

Исследованию моделирования экономических процессов посвящены труды таких ученых, как Г. Марковиц [2], Т. Ким [3], Р. Аксельрод, Дж. Холланд, М. Леви [4], Г. Леви, Дж. Х. Миллер, С. Солломон [4], Т. Люкс [5], М. Марчези [6], С. Чен, Е. Зицанг, М. Грубер, А. Бахтызин, В. Гужва, О. Шаропов и др. [7]. На протяжении последних десятилетий активно проводятся исследования, применяющие агентно-ориентированный подход [8] к построению моделей.

Аспекты коллективного поведения агентов проанализированы в работах Х. Лебенстайна, Л. Фестингера, И. Джаниса, М. Грановеттера, нобелевских лауреатов Г. Саймона, Д. Акерлофа, Д. Стиглица [9], Т. Шеллинга, которые изучают информационное и психологическое влияние на принятие решений экономическими агентами [10].

Цель данного исследования – агентно-ориентированное моделирование принятия инвестиционных решений с учетом поведенческих факторов для повышения эффективности управления инвестиционными ресурсами.

Задачи данной статьи: провести анализ влияния массового поведения агентов рынка на эффективность функционирования фондового рынка; усовершенствовать модель искусственного фондового рынка; осуществить моделирование виртуального фондового рынка для исследования процесса принятия решений агентами фондового рынка в современных условиях.

Теоретические основы исследования

Традиционно экономическая теория, описывающая принятие инвестиционных решений, использует гипотезу рациональных ожиданий, в соответствии с которой инвесторы ведут себя рационально, любыми своими действиями стремятся к максимизации своего благосостояния, разумно ограничивают свои риски и принимают исключительно правильные с инвестиционной точки зрения решения. Следствием подобного поведения инвесторов является эффективность финансового рынка, однако известны факты поведения отдельных агентов и финансового рынка в целом, которые не поддаются объяснению с помощью рациональной модели.

В последние годы сформировался новый подход к анализу поведения инвесторов и финансового рынка, получивший название «поведенческие финансы», который позволяет преодолеть рамки рационального подхода. Многие феномены финансового рынка можно объяснить с помощью моделей, в которых некоторые агенты не полностью рациональны.

Эмпирические данные, полученные американскими учеными [9], подтверждают факт феномена «стадного поведения» на рынках, т. е. когда значительное количество людей осуществляют одинаковые действия, наследуя принятие решений, отказываясь от собственных предпочтений.

Теория, которая позволяет исследовать поведение агентов, действующих по принципам «стадности», традиционно называется теорией информационных каскадов [9]. Понятие информационного каскада было предложено С. Бикчандани, Д. Хиршлайфером и И. Уелшем в 1992 г. Вместе с термином «информационный каскад» во многих работах зарубежных авторов (например, у А. Банерджи и Д. Фунденберга) употребляется понятие *herding behavior* (т. е. массовое или стадное поведение) [9]. Позднее этой темой начали заниматься английские ученые Л. Р. Андерсон и Ч. А. Хольт. В теории информационных каскадов важное место занимают труды таких авторов, как Д. А. Новиков, А. Г. Чхартишвили, Б. И. Бирштейн, В. И. Боршевич, Дж. Сорос, Д. Сорнетте и др.

Стадное поведение можно определить как инвестиционную стратегию, которая заключается в исследовании поведения более опытных и авторитетных участников рынка или присоединении к господствующему на рынке тренду под влиянием ряда поведенческих факторов: недооценивания собственных

аналитических способностей, переоценки аналитических способностей других инвесторов, чрезмерных опасений в связи с возможностью нанесения вреда собственной репутации, переоценки достоверности информации, которой владеют другие участники рынка. Дестабилизирующее влияние массового поведения вызывает значительное отклонение цен от справедливого уровня в сторону роста и, как правило, формирование эффекта толпы, что приводит к появлению спекулятивных пузырей.

Результаты и их обсуждение

При анализе современного финансового рынка выявлен пример дестабилизации, явившийся следствием массового поведения и вызвавший падение индекса *Dow Jones* в 2008–2009, 2015–2016 и 2018–2019 гг. (рис. 1).

Возникновение в сентябре – октябре 2008 г. новой волны кредитного кризиса в развитых странах и современные обвалы на фондовых рынках, катастрофические снижения левериджа международных банков и уменьшение склонности инвесторов к принятию рисков негативно сказались на стоимости и объемах внешнего финансирования стран с формирующимися рынками. За 9 месяцев 2008 г. международные инвестиционные фонды, которые специализируются на инвестициях в экономике с формирующимися рынками, вывели из них 32,5 млрд долл. США (тогда как в январе – сентябре 2007 г. было вложено 20,6 млрд долл.) [10]. По мнению И. Шумпетера, каждому кризису свойственна своя психологическая картина, которая формирует отношение к инвестициям. Паника в кризисной ситуации оборачивается застоём капиталовложений, повышенная нервозность в условиях подъема курса акций стимулирует горячку. «Меняющиеся ситуации» формируют неравномерность инвестиционного цикла.

Обвал фондового рынка США в 2016 г. в первые четыре дня торгов с начала нового года оказался самым серьезным падением за последние 119 лет, а обвал 24 декабря 2018 года – за последние 122 года.

Спекулятивные операции несут как положительные, так и отрицательные последствия для функционирования рынков. Так, спекуляции на валютных курсах сопровождаются финансовыми операциями,



Рис. 1. Индекс *Dow Jones*, 1989–2019 гг.
Источник: [11]

Fig. 1. Index *Dow Jones*, 1989–2019.
Source: [11]

которые вызывают отклонения от экономически обоснованного уровня и приводят к перекосам в балансах домашних хозяйств и фирм и другим негативным последствиям [12].

Назначение эконометрических моделей искусственных финансовых рынков заключается в объяснении общих закономерностей, которые наблюдаются на реальных рынках. Модели искусственных рынков должны соответствовать трендам реальных данных в периоды нестабильности рынка, иначе они не смогут объяснить прошлое и предсказывать будущее. К таким моделям принадлежит агентно-ориентированная модель Люкса – Марчези [5], с помощью которой можно прогнозировать не только динамику рынка в периоды стабильности, но и предсказывать появление кризисных явлений. Этот подход дает возможность моделировать гипотетические или катастрофические ситуации, прогнозировать реакцию фондового рынка, что, в свою очередь, является инструментом для расширенного анализа рисков.

Модель Люкса – Марчези включает и элементы микромоделирования, и детальный количественный анализ динамических рядов. Модель воспроизводит динамику временных рядов, которые не подчиняются нормальному закону распределения, что характерно для фондовых рынков. С помощью этой модели можно объяснить типичные изменения волатильности фондовых рынков и прогнозировать их ценовую динамику. Модель может формировать как «пузыри» с переоцененными или недооцененными активами, так и колебания цен с периодическими обвалами рынка [13]. Таким образом, модель Люкса – Марчези служит инструментарием прогнозирования и предсказания кризисных явлений на рынке.

Логическая структура модели искусственного фондового рынка Люкса – Марчези [6] основывается на предположении о том, что на рынке действует две группы агентов-трейдеров – фундаменталисты и чартисты, которые могут менять свою стратегию и переходить из группы в группу.

Алгоритм работы модели Люкса – Марчези детально описан в их работе [6]. Среди чартистов выделяют подгруппы оптимистических и пессимистических участников. Такая сложная динамика приводит к хаотичности средних значений рыночной цены. Агенты принимают решения о покупке или продаже акций на основе результатов их рыночной цены и фундаментальной (внутренней) стоимости (относительно которой каждый агент имеет собственную оценку). Приведем краткое математическое описание модели Люкса – Марчези.

Для формализации модели введены следующие обозначения:

N – количество агентов, которые работают на искусственном рынке;

n_c – количество агентов-чартистов;

n_f – количество агентов-фундаменталистов;

n_+ – количество оптимистических агентов-чартистов;

n_- – количество пессимистических агентов-чартистов ($n_+ + n_- = n_c$);

p – текущая рыночная цена акции;

p_f – фундаментальная стоимость акции.

Интенсивность изменения стратегии агентов-чартистов с пессимистической на оптимистическую и наоборот обозначается в случае непрерывного времени как π_{+-} и π_{-+} соответственно. Тогда

$$\pi_{+-} = \nu_1 \frac{n_c}{N} \exp(U_1),$$

$$\pi_{-+} = \nu_1 \frac{n_c}{N} \exp(-U_1),$$

где U_1 – это доходность, которая описывается следующей зависимостью:

$$U_1 = \alpha_1 x + \frac{\alpha_2}{\nu_1} \frac{dp}{dt}.$$

Стратегия чартистов формируется под влиянием двух факторов:

- преобладающей точки зрения других чартистов $x = \frac{(n_+ - n_-)}{n_c}$;
- текущего тренда (направления движения) цены акции $\left(\frac{dp}{dt}\right)$.

Параметры ν_1 , α_1 и α_2 являются, соответственно, коэффициентами частоты пересмотра агентом стратегии, важности влияния взглядов других агентов на выбор стратегии отдельного агента и влияния динамики цен на его поведение.

Предполагается, что в данной модели переоценка происходит асинхронно, т. е. в дискретном случае за бесконечно малый промежуток времени Δt вероятность изменения стратегии с пессимистической на оптимистическую будет $\pi_{+} \cdot \Delta t$ и наоборот $\pi_{-} \cdot \Delta t$.

Поскольку чартисты могут взаимодействовать с фундаменталистами, то вероятность перехода из одной группы в другую умножается на текущую долю чартистов в общем количестве трейдеров. Аналогично формируется изменение стратегии трейдера с чартиста на фундаменталиста и наоборот. Следовательно, формально существует четыре варианта изменений стратегии агентов, интенсивность вероятности наступления которых описывается зависимостями:

$$\pi_{+f} = \nu_2 \frac{n_+}{N} \exp(U_{2,1}),$$

$$\pi_{f+} = \nu_2 \frac{n_f}{N} \exp(-U_{2,1}),$$

$$\pi_{-f} = \nu_2 \frac{n_-}{N} \exp(U_{2,2}),$$

$$\pi_{f-} = \nu_2 \frac{n_f}{N} \exp(-U_{2,2}).$$

Величины $U_{2,1}$ и $U_{2,2}$ для этих переходов зависят от разницы мгновенных доходов агентов-чартистов и агентов-фундаменталистов:

$$U_{2,1} = \alpha_3 \left(\frac{r + \frac{1}{\nu_2} \frac{dp}{dt}}{p} - R - s \left| \frac{p_f - p}{p} \right| \right), \quad (1)$$

$$U_{2,2} = \alpha_3 \left(R - \frac{r + \frac{1}{\nu_2} \frac{dp}{dt}}{p} - s \left| \frac{p_f - p}{p} \right| \right). \quad (2)$$

Первая составляющая уравнения (1) описывает доходность стратегии чартистов из групп n_+ и n_- , а другая – доходность фундаменталистов, где ν_2 – коэффициент частоты пересмотра агентом своей стратегии; α_3 – мера чувствительности к производной прибыли (разницы между рыночной ценой и фундаментальной стоимостью); r – номинальные дивиденды по акции; R – средний уровень доходности в экономике; $\left(\frac{dp}{dt}\right)$ – доходность, которая зависит от изменения цены акции.

Уравнение (2) описывает доходы пессимистических чартистов, которые для предотвращения потерь будут выходить с рынка и продавать подозрительные акции. Их осторожная позиция представлена стратегией сравнения среднего уровня доходов в экономике R с суммой номинальных дивидендов и изменения цен акций, которые они продают. Это объясняет, почему две первые составляющие в формулах для $U_{2,1}$ и $U_{2,2}$ переставлены местами. Изменение рыночной цены моделируется как эндогенная реакция рынка на несбалансированность спроса и предложения на рынке. Если предположить, что оптимистические чартисты создают дополнительный спрос на рынке (покупают), а пессимистические, наоборот, создают дополнительное предложение (продают), то изменение потребностей чартистов вычисляется по формуле:

$$ED_c = (n_+ - n_-) t_c,$$

где t_c – средняя величина транзакции.

Чувствительность фундаменталистов к колебанию между рыночной ценой и фундаментальной стоимостью акций описывается формулой:

$$ED_f = n_f \gamma \frac{p_f - p}{p},$$

где γ – параметр, характеризующий силу реакции.

Процесс корректировки цен формируется на основе того, что переходные интенсивности вероятностей изменения цены на минимально возможную величину $\Delta p = \pm 0,01$ определяются функциями:

$$\pi_{\uparrow p} = \max[0, \beta(ED + \mu)],$$

$$\pi_{\downarrow p} = -\min[\beta(ED + \mu), 0],$$

где β – параметр для регулирования скорости изменения цены; μ – составляющая шума, имеющая небольшую величину.

Для учета поведенческих аспектов принятия решений экономическими агентами модифицируем модель Люкса – Марчези путем расширения типологии агентов, добавления группы трейдеров-иррационалистов, которые будут принимать решения на основе собственных суждений и не будут переходить из группы в группу. Это позволит учитывать в модели иррациональность инвесторов. Такие агенты не ориентируются в своей деятельности на заранее разработанный алгоритм, а определяют свое поведение в процессе деятельности без логического обоснования.

Для модифицированной модели введены следующие обозначения:

n_i – количество агентов-иррационалистов;

n_{+i} – количество оптимистических агентов-иррационалистов;

n_{-i} – количество пессимистических агентов-иррационалистов ($n_{+i} + n_{-i} = n_i$).

При этом выполняются соотношения:

$$n_c + n_f + n_i = N.$$

Изменение потребностей иррационалистов вычисляется по формуле:

$$ED_i = (n_{+i} - n_{-i})t_i,$$

где t_i – средняя величина транзакции иррационалистов.

$ED = ED_f + ED_c + ED_i$ – общее превышение спроса над предложением.

Для проведения компьютерной симуляции построения искусственного фондового рынка такие параметры предложенного комплекса моделей были определены константами (по экспертной оценке):

- количество агентов $N = 500$;
- минимальное количество агентов в каждой стратегии $5 (n_{\min} = 5)$;
- фундаментальная стоимость акции $p_f = 10$;
- номинальные дивиденды $r = 0,005$;
- средняя величина дохода $R = 0,0005$.

Предельные случаи (вырождение групп агентов) принудительно исключаются установлением нижнего предела количества агентов в группе.

Параметры модели, которые оптимизировались (с полученными значениями):

- коэффициент частоты переоценки взглядов оптимистов/пессимистов $v_1 = 3, v_2 = 22$;
- скорость реакции агента (параметр для регулирования скорости изменения цены) $\beta = 6$;

- средняя величина транзакции чартиста $t_c = \frac{10}{N}$;

- средний объем транзакции чартиста на единицу разницы цен $\left(\frac{\gamma}{p}\right) t_f = \frac{5}{N}$;

- мера важности взглядов других трейдеров-чартистов $\alpha_1 = 0,6$;

- мера динамики цен $\alpha_2 = 0,2$;

• коэффициент чувствительности к производной доходов для перехода между чартистами и фундаменталистами $\alpha_3 = 0,5$.

Дальнейшим усложнением моделирования принятия инвестиционных решений является синтез модели Люкса – Марчези с моделью разнородных инвесторов, по которой совершают выбор своих действий агенты.

Разнородность имеет два проявления.

1. Разные типы инвесторов имеют разную склонность к проявлению стадного поведения, т. е. вероятность выполнения инвестором определенного действия зависит от его индивидуальных особенностей: в одной и той же ситуации вероятность выполнения того или иного действия одним инвестором будет равняться 50 %, а другим – 90 %. Такая особенность в данной работе будет называться склонностью к стадному поведению.

2. Вероятность выполнения инвестором того или иного действия может зависеть не только от процента представителей данного типа инвесторов, которые выполнили это действие, но и от того, кто именно выполнил это действие, т. е. разные типы инвесторов оказывают разное влияние на других инвесторов. Яркий пример такого явления в природе – следование стада за вожаком, а в инвестиционной деятельности – подражание успешным людям, руководителю коллектива и т. п. Такая особенность в данной работе будет называться авторитетом инвестора.

В психологии под авторитетом понимается признание человека, уважение к нему, его способность влиять на мысли и поведение других людей, быть для них образцом для подражания, источником идей, ценностей, норм морали, форм поведения [14]. В таком контексте, очевидно, авторитет отдельных инвесторов будет влиять на действия других инвесторов: чем больше авторитет у какого-либо инвестора, тем более склонны подражать ему другие его коллеги (повторять его действия), а это диктует необходимость учитывать в моделях принятия инвестиционных решений авторитет и поведенческие особенности агентов.

Модель разнородных инвесторов имеет следующий вид: популяция состоит из L инвесторов, каждый отдельный инвестор обозначается $l = 1, \dots, L$. В каждый момент времени t , где $t = 1, \dots, T$ (в модели рассматривается всего T моментов времени), каждый инвестор может выполнить определенное действие: купить $S_l = 1$, продать $S_l = -1$ или держать акцию $S_l = 0$. Действие носит дискретный характер: например, инвестор может купить или продать 1 акцию (пакет акций) в каждый момент времени.

Вероятность выполнения некоторого действия инвестором зависит от того, какие действия сделали другие инвесторы. В самой простой ситуации такая вероятность будет зависеть от того, какой процент инвесторов выполнил это действие. В более сложных ситуациях такая вероятность будет зависеть от того, кто именно из инвесторов выполнил это действие, какова интенсивность действия, насколько инвестор склонен к стадному поведению.

Авторитет инвесторов в модели задается путем добавления в нее соответствующего фактора – q_l . В данном случае учитывается не просто процент инвесторов, которые выполнили данное действие, а авторитет каждого инвестора. Если для одного инвестора другой инвестор неавторитетен, то выполнение таким инвестором исследуемого действия не будет влиять на склонность другого инвестора выполнить это действие, т. е. у него не будет проявляться стадное поведение.

Вероятность выполнения инвестором l действия S_l в момент времени t будет зависеть от того, какое количество инвесторов выполнили к этому моменту соответствующее действие; каков, по мнению инвестора l , авторитет соответствующих инвесторов, выполнивших это действие:

$$S_l^t = f \left(\frac{\sum_{l=1}^L (q_l S_l^{t-1})}{\sum_{l=1}^L q_l} \right), \quad (3)$$

где q_l – авторитет инвестора l в глазах другого инвестора, который может быть в интервале от 0 до 1.

Упрощением модели (3) будет случай одинакового авторитета, когда авторитет инвестора l в глазах всех остальных инвесторов одинаков. Такой подход может быть целесообразным, когда рассматриваются большие популяции или когда нет возможности подробно оценить авторитет всех инвесторов в глазах друг друга (как и в нашем случае).

Есть возможность объединить модели разнородной популяции с учетом авторитета представителей популяции и модели разнородной популяции с учетом склонности к стадному поведению, получив соответствующие модели разнородной популяции с учетом и авторитета представителей популяции, и склонности к стадному поведению.

Модель разнородной популяции с учетом авторитета представителей популяции и склонности к стадному поведению для дискретного случая:

$$S_l^t = f \left(\frac{\sum_{l=1}^L (q_l S_l^{t-1})}{\sum_{l=1}^L q_l}, d_l \right),$$

где d_l – склонность инвестора l к стадному поведению, которое может быть в пределах от 0 до 1.

Следует также учитывать, что стадность является лишь одним из многих факторов, который определяет поведение инвесторов. Поэтому вклад стадности в итоговую вероятность выполнения инвестором некоторого действия далеко не исчерпывающий, что диктует необходимость учитывать при построе-

нии моделей не только стадность, но и другие факторы: собственные априорные ожидания относительно данного актива, внешние новости на рынке, шум.

На данном этапе целесообразно включить такие факторы в абстрактном виде, обозначив их множеством $\{g_1, \dots, g_G\}$, где g – значение соответствующих факторов, а G – общее количество дополнительных факторов.

Таким образом, путем расширения набора факторов, которые используются в предложенных выше моделях, можно получить модель на основе дополнительных факторов, связанных со стадностью. Например, модель разнородных инвесторов с учетом авторитета инвесторов, склонности к стадному поведению и дополнительных факторов примет следующий вид:

$$S_i^t = f \left(\frac{\sum_{l=1}^L (q_l S_i^{t-1})}{\sum_{l=1}^L q_l}, d_i, \{g_1, \dots, g_G\} \right),$$

Большую точность может показать включение в модель значений исходных показателей в аддитивном виде. Непосредственный вид функции соответствующей модели следующий:

$$S_i^t = g_1 V_i + \left(\frac{\sum_{l=1}^L (q_l S_i^{t-1})}{\sum_{l=1}^L q_l} \right) + d_i \left(\frac{\sum_{l=1}^L S_i^{t-1}}{L} \right) + g_2 H(t) + g_3.$$

Таким образом, в качестве ключевых факторов выделяем следующие: процент представителей инвесторов, который уже выполнил определенное действие; авторитет инвесторов в глазах друг друга; индивидуальная склонность к стадному поведению (конформизм). Эти факторы дополняются специфическим набором дополнительных факторов, сложившихся на основе анализа поведения инвесторов, а именно: собственные априорные ожидания относительно данного актива V_i в границах $[-1, 0, 1]$; коэффициент доверия собственному ожиданию g_1 в интервале от 0 до 1; среднее значение действий других агентов относительно данного актива; внешние новости на рынке $H(t)$; коэффициент доверия новостям g_2 , а также шум g_3 в интервале от $-0,2$ до $0,2$.

Для прогнозирования цены акций компаний, которые пользовались высоким спросом на биржевом рынке Украины в 2018 г. по количеству биржевых контрактов, использован разработанный комплекс моделей принятия инвестиционных решений. Построены агентные модели для прогнозирования временных рядов финансовых данных на базе среды моделирования *Anylogic*, а также составлена полная схема применения данных моделей для анализа и прогнозирования временных рядов на примере котировок акций компаний ПАО «Центрэнерго» (СЕЕН), ПАО «Райффайзен Банк Аваль» (BAVL), ПАО «Мотор Сич» (MSICH), ПАО «Укрнафта» (UNAF) и ПАО «Укртелеком» (UTLM). Данные для моделирования получены на информационном портале об инвестициях [15].

Пример результата реализации синтеза модели Люкса – Марчези с моделью разнородных инвесторов в среде моделирования *Anylogic* приведен на рис. 2.

На рис. 3 представлены результаты моделей прогнозирования курса акций для ПАО «Центрэнерго», АО «Мотор Сич»: лучшее прогнозирование цены акций для ПАО «Центрэнерго» дала модель разнородных инвесторов, а для АО «Мотор Сич» – синтез модели Люкса – Марчези с моделью разнородных инвесторов.

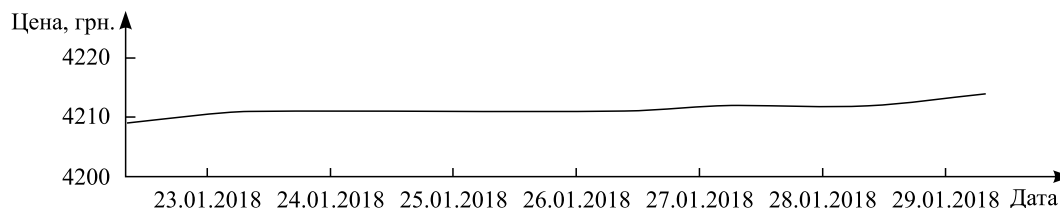


Рис. 2. Динамика изменения рыночной цены акции в модели Люкса – Марчези с моделью разнородных инвесторов для АО «Мотор Сич».

Источники: разработано авторами

Fig. 2. Dynamics of changes in the market price of shares in the Lux – Marchesi model with the model of heterogeneous investors for MSICH.

Source: developed by the authors

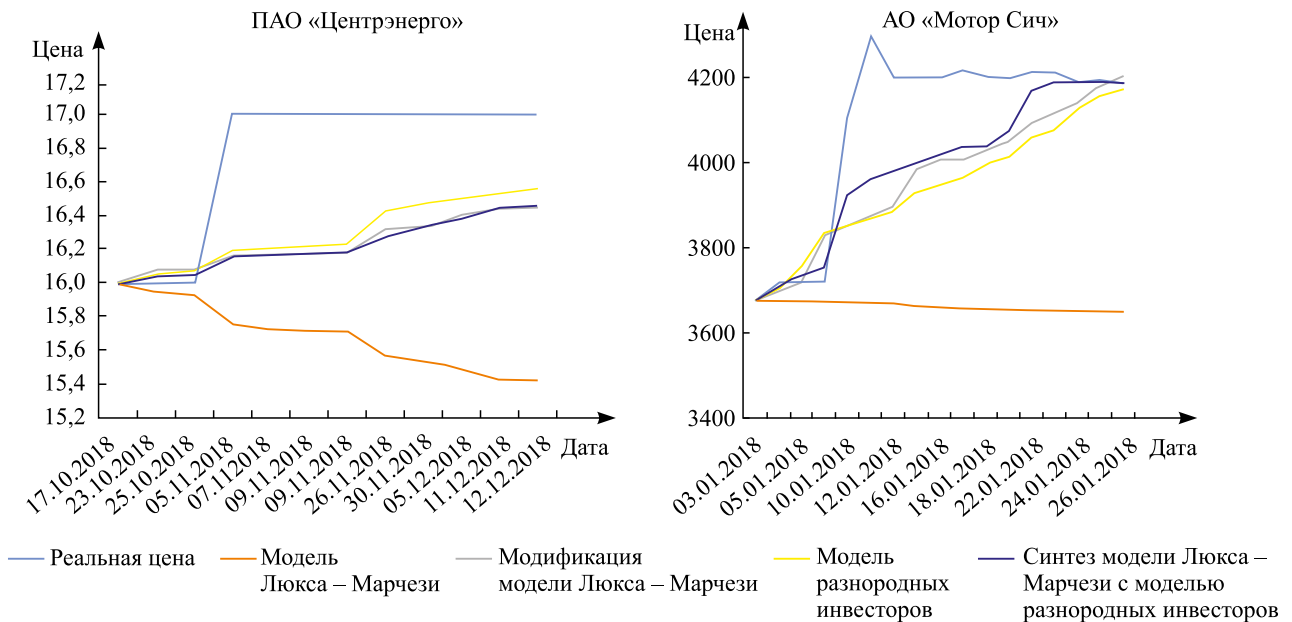


Рис. 3. Прогнозируемые и реальные цены в разных моделях для ПАО «Центрэнерго», АО «Мотор Сич».

Источник: разработано авторами

Fig. 3. Forecast and real prices in different models for CEEN, MSICH.

Source: developed by the authors

На рис. 4 представлены результаты моделей прогнозирования курса акций для ПАО «Райффайзен Банк Аваль», ПАО «Укртелеком»: лучшее прогнозирование цены акций для ПАО «Райффайзен Банк Аваль» и ПАО «Укртелеком» из предложенного комплекса моделей дала модель разнородных инвесторов.

Для каждой исследуемой компании была проведена серия экспериментов с разработанными моделями, прежде чем была получена та, которая лучше отражала тенденцию начального временного ряда. На рис. 5 представлены графики сравнения прогнозируемых и реальных данных цен акций в модели разнородных инвесторов для ПАО «Центрэнерго», ПАО «Райффайзен Банк Аваль», ПАО «Укртелеком», ПАО «Укрнафта».

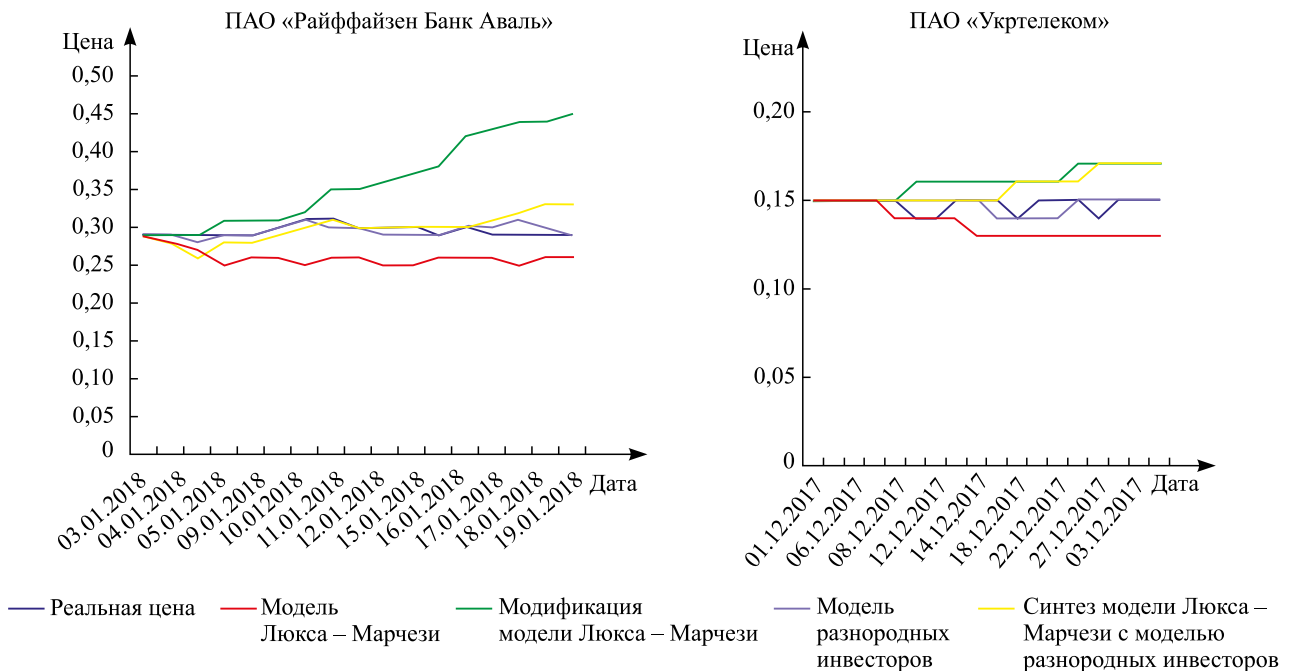


Рис. 4. Прогнозируемые и реальные цены в разных моделях для ПАО «Райффайзен Банк Аваль», ПАО «Укртелеком».

Источник: разработано авторами

Fig. 4. Forecast and real prices in different models for BAVL, UTLM.

Source: developed by the authors

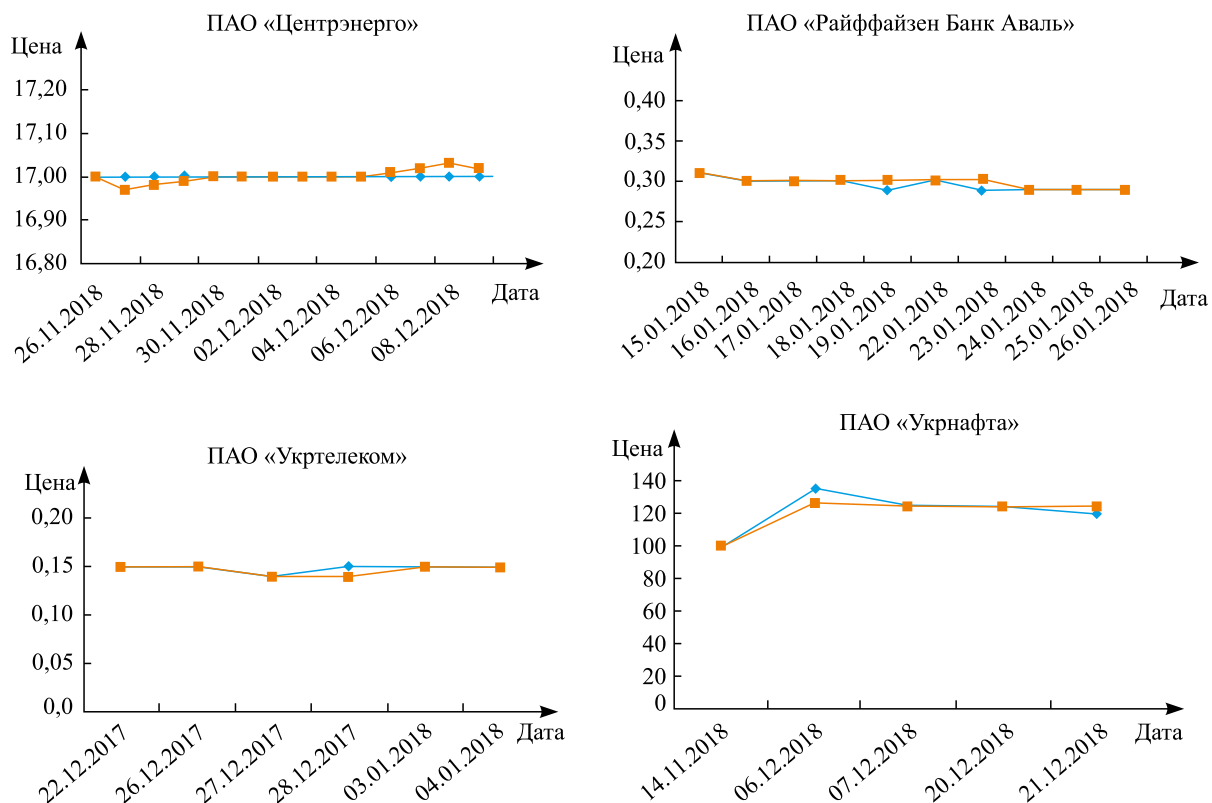


Рис. 5. Прогнозируемые и реальные цены акций для ПАО «Центрэнерго», ПАО «Райффайзен Банк Аваль», ПАО «Укртелеком», ПАО «Укрнафта». Реальная цена обозначена синим цветом, модель разнородных инвесторов – оранжевым. Источник: разработано автором

Fig. 5. Forecast and real share prices for CEEN, BAVL, UTLM, UNAF. The real price is indicated in blue, the model of heterogeneous investors is indicated in orange. Source: developed by the author

В качестве оценок точности прогнозирования временных рядов был использован ряд традиционных подходов:

- средняя абсолютная погрешность в процентах (*MAPE*);
- средняя абсолютная погрешность (*MAE*);
- средняя квадратическая погрешность (*MSE*);
- корень средней квадратической погрешности (*RMSE*);
- средняя погрешность (*ME*);
- стандартное отклонение (*SD*).

Таблица 1

Сравнение точности прогнозируемых цен акций

Table 1

Comparison of the accuracy of projected stock prices

Модель разнородных инвесторов						
Предприятие	<i>MAPE</i>	<i>MAE</i>	<i>MSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>ME</i>	<i>SD</i>
ПАО «Центрэнерго»	0,06	0,01	0,0002	0,015	-0,0014	17,003
ПАО «Райффайзен Банк Аваль»	0,69	0,002	0,00002	0,005	-0,002	0,3
ПАО «Укртелеком»	1,11	0,002	1,66667E-05	0,004	0,0017	0,145
ПАО «Укрнафта»	2,42	3,1	22,45	4,74	0,9	119,13
Синтез модели Люкса – Марчези с моделью разнородных инвесторов						
АО «Мотор Сич»	0,15	6,5	85,9	9,27	-4,7	4213,3

Таким образом, спрогнозированы цены акций АО «Мотор Сич», ПАО «Центрэнерго», ПАО «Райффайзен Банк Аваль», ПАО «Укртелеком», ПАО «Укрнафта». Полученные результаты демонстрируют довольно высокое качество прогнозирования построенных моделей.

Заключение

С помощью анализа современного фондового рынка было доказано, что поведенческие особенности субъектов экономической деятельности значительно влияют на изменение курса акций и тем самым на доходность финансовых инвестиций.

По результатам изучения преимуществ и недостатков агентно-ориентированных моделей принятия инвестиционных решений была модифицирована модель Люкса – Марчези, так как она больше всего соответствует состоянию отечественного фондового рынка, поскольку в условиях его неразвитости использование более сложных моделей становится неэффективным. Построение и тренировка искусственного рынка позволяет имитировать поведение агентов и наглядно продемонстрировать ценовую динамику рынка.

В статье с учетом поведенческих особенностей были смоделированы ситуации принятия агентами решений относительно покупки или продажи ценных бумаг на виртуальном фондовом рынке.

Разработан комплекс моделей принятия инвестиционных решений с учетом поведенческих факторов. Модели показали, что методы агентно-ориентированного подхода эффективны и могут быть использованы для прогнозирования динамики фондового рынка или его отдельных составляющих при условии высокой волатильности и резкой смены настроений трейдеров.

Таким образом, разработанный комплекс моделей принятия инвестиционных решений на основе поведенческих факторов позволит повысить обоснованность инвестиционных решений в части оценки и анализа финансовых активов за счет построения искусственного рынка, имитации поведения агентов и наглядной ценовой динамики рынка, что обеспечит инвесторов необходимой информацией в целях эффективного формирования портфеля ценных бумаг.

Библиографические ссылки

1. Лепя РН, Солодухин СВ. Анализ влияния теории информационных каскадов и стадного поведения агентов на формирование финансовых пузырей. *Економіка промисловості*. 2011;4:256–262.
2. Markowitz HM. Portfolio selection. *The Journal of Finance*. 1952;7(1):77–91. DOI: 10.1111/j.1540-6261.1952.tb01525.x.
3. Kim G, Markowitz HM. Investment rules, margin and market volatility. *Journal of Portfolio Management*. 1989;16(1):45–52. DOI: 10.3905/jpm.1989.4092233.
4. Levy M, Levy H, Solomon S. A microscopic model of the stock market: cycles, booms, and crashes. *Economics Letters*. 1994;45(1):103–111. DOI: 10.1016/0165-1765(94)90065-5.
5. Lux T. Herd behaviour, bubbles and crashes. *Economic Journal*. 1995;105(431):881–896. DOI: 10.2307/223156.
6. Lux T, Marchesi M. Volatility clustering in financial markets: a micro-simulation of interacting agents. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*. 2000;3(4):675–702. DOI: 10.1142/S02190249000000.
7. Holland JH, Miller JH. Artificial adaptive agents in economic theory. *American Economic Review*. 1991;81(2):365–370.
8. Gustafsson L, Sternad M. Consistent micro, macro, and state-based population modelling. *Mathematical Biosciences*. 2010;225(2):94–107. DOI: 10.1016/j.mbs.2010.02.003.
9. Stiglitz JE. *Financial systems for Eastern Europe's emerging democracies (Occasional papers (International center for economic growth))*. San Francisco: CA: ICS Press in collaboration with the Institute for Policy Reform; 1993. 39 p.
10. Солодухін СВ, Шайтанова ЄС. Аналіз поведінкових факторів на фінансових ринках при управлінні інвестиційними ресурсами підприємства. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Економічні науки*. 2016;16(4):159–162.
11. Динамика индекса Dow Jones [Интернет; процитировано 10 января 2019 г.]. Доступно по: https://www.finanz.ru/indeksi/sredstva-grafika/Dow_Jones.
12. Солодухін СВ, Шайтанова ЄС. Аналіз впливу поведінкових факторів на фінансові ринки під час управління інвестиційними ресурсами підприємства. *Економічний вісник Запорізької державної інженерної академії*. 2017;1(2):117–121.
13. Примостка АО. Агентно-орієнтоване моделювання інвестиційної діяльності банків на фондовому ринку [дисертація]. Київ: Українська академія банкової справи Національного банку України; 2015. 225 с.
14. Словник соціально-психологічних понять [Интернет; процитовано 9 січня 2019 р.]. Спосіб доступу: http://stud.com.ua/15775/psihologiya/slovnik_sotsialno_psihologichnih_ponyat.
15. Информационный портал об инвестициях [Интернет; процитировано 9 января 2019 г.]. Доступно по: <http://investfunds.ua/markets/stocks/Centrjenergo/quotes/>.

References

1. Lepa RN, Solodukhin SV. Analyzing the influence of the theory of informational cascades and herd behavior of agents on formation of financial resources. *Ekonomika promislovosti*. 2011;4:256–262. Russian.
2. Markowitz HM. Portfolio selection. *The Journal of Finance*. 1952;7(1):77–91. DOI: 10.1111/j.1540-6261.1952.tb01525.x.

3. Kim G, Markowitz HM. Investment rules, margin and market volatility. *Journal of Portfolio Management*. 1989;16(1):45–52. DOI: 10.3905/jpm.1989.4092233.
4. Levy M, Levy H, Solomon S. A microscopic model of the stock market: cycles, booms, and crashes. *Economics Letters*. 1994;45(1):103–111. DOI: 10.1016/0165-1765(94)90065-5.
5. Lux T. Herd behaviour, bubbles and crashes. *Economic Journal*. 1995;105(431):881–896. DOI: 10.2307/2235156.
6. Lux T, Marchesi M. Volatility clustering in financial markets: a micro-simulation of interacting agents. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*. 2000;3(4):675–702. DOI: 10.1142/S02190249000000.
7. Holland JH, Miller JH. Artificial adaptive agents in economic theory. *American Economic Review*. 1991;81(2):365–370. DOI: 10.1016/j.mbs.2010.02.003.
8. Gustafsson L, Sternad M. Consistent micro, macro, and state-based population modelling. *Mathematical Biosciences*. 2010; 225(2):94–107. DOI: 10.1016/j.mbs.2010.02.003.
9. Stiglitz JE. Financial systems for Eastern Europe's emerging democracies (Occasional papers (International center for economic growth)). San Francisco: CA: ICS Press in collaboration with the Institute for Policy Reform; 1993. 39 p.
10. Solodukhin SV, Shaitanova ES. The analysis of behavioural factors in the financial markets at management of investment resources of the enterprise. *Naukoviy Visnik Kherson derzhavnogo universytetu. Seriya: Ekonomichni nauky*. 2016;16(4):159–162. Ukrainian.
11. Dynamics of the index Dow Jones [Internet; cited 2019 January 09]. Available from: https://www.finanz.ru/indeksi/sredstva-grafika/Dow_Jones. Russian.
12. Solodukhin SV, Shaitanova ES. Analysis of the influence of behavioral factors on financial markets in the management of investment resources of the enterprise. *Ekonomichnii visnik Zaporiz'koï derzhavnoi inzhenernoi akademii*. 2017;1(2):117–121. Ukrainian.
13. Primostka AO. Agent-based model-investing investment projects on the stock market [dissertation]. Kiev: Ukrainian Academy of Banking of the National Bank of Ukraine; 2015. 225 p. Ukrainian.
14. Slovník sotsialno-psihologichnikh ponyatij [Internet; cited 2019 January 09]. Available from: http://stud.com.ua/15775/psihologiya/slovník_sotsialno_psihologichnih_ponyat. Ukrainian.
15. Informatsionnyi portal ob investitsiyakh [Internet; cited 2019 January 09]. Available from: <http://investfunds.ua/markets/stocks/Centrjenergo/quotes/>. Russian.

Статья поступила в редакцию 12.01.2019.
Received by editorial board 12.01.2019.