

КОМПАРТМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ФИНАНСОВЫХ РИСКОВ

Зиненко А.В., Балабанова Н.В.

Зиненко Анна Викторовна

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

г. Красноярск, Россия. 660036, Красноярский край, Свободный пр-т, д. 79.

Балабанова Наталья Владимировна (ORCID.ORG 0000-0002-1427-2547)

ФГБОУ ВО «Ивановский Государственный Университет»

г. Иваново, Россия. 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Ермака, д. 39.

E-mail: anna-z@mail.ru., nvbalabanova@mail.ru

Статья посвящена финансовым рискам, возникающим в банковской системе. Различают рыночные, операционные, кредитные риски и риски ликвидности, которые переходят один в другой и при выходе за пределы финансовой системы – в реальный сектор экономики – порождают системный кризис, который приводит к разрушительным последствиям для экономики государства. В работе предлагается модель распространения финансовых рисков по банковской системе с использованием компарментной модели. Компарментные модели применяются в таких научных направлениях, как биология, экология и медицина. Основная идея компарментных моделей – это разделение субъектов на группы и описание перехода субъектов из одной группы в другую обыкновенными дифференциальными уравнениями. Предложенная компарментная модель позволяет оценить динамику распространения финансового риска в банковской системе, а также при установке некоего порога значения «погибших» банков, возможность перехода рисков из финансового в реальный сектор экономики.

Ключевые слова: финансовые риски, системные кризисы, компарментные модели.

COMPARTMENT MODEL FOR ASSESSING FINANCIAL RISKS

Zinenko A.V., Balabanova N.V.

Zinenko Anna Viktorovna

FSAEI HE "Siberian Federal University"

Krasnoyarsk, Russia. 660036, Krasnoyarsk Territory, Svobodny Ave, 79.

E mail: anna-z@mail.ru.

Balabanova Natalia Vladimirovna (ORCID.ORG 0000-0002-1427-2547)

FSBEI HE «Ivanovo State University»

Ivanovo, Russia. 153025, Ivanovo region, Ivanovo, st. Ermak, 39.

E-mail: nvbalabanova@mail.ru

The following paper is devoted to financial risks arising in the banking system. There are market, operational, credit and liquidity risks, which pass one into another and, when leaving the financial system - into the real sector of the economy - give rise to a systemic crisis, which leads to devastating consequences for the state economy. The paper proposes modeling the spread of financial risks in the banking system using a compartmental model. Compartmental models used in such scientific areas as biology, ecology and medicine. The main idea of compartmental models is the division of subjects into groups and the description of the transition of subjects from one group to another by ordinary differential equations. The proposed compartmental model makes it possible to assess the dynamics of the spread of financial risk in the banking system, and, with setting a certain threshold for the value of "dead" banks, the possibility of transferring risks from the financial to the real sector of the economy.

Keywords: financial risks, systemic crises, compartmental models

ВВЕДЕНИЕ

Финансовый риск – это достаточно обширное понятие, включающее в себя любые риски, связанные с движением финансовых потоков. Определение финансового риска как «вероятности потерь финансовых ресурсов» либо «вероятности отклонения доходов от инвестирования от запланированной величины» на наш взгляд не совсем корректны, так как отождествляют понятия «риск» и «вероятность». Корректнее определить риск как «отклонение финансовых потоков от ожидаемого значения». Однако на макроэкономическом уровне такое определение также не может быть верным, так как финансовые риски включают в себя в том числе и риски ликвидности, которые при выходе из финансовой сферы в сферу реальной экономики порождают системные риски, которые в свою очередь выливаются в системные кризисы. Отметим, что вопросы оценки финансовых рисков освещены в трудах многих авторов [1-5].

По определению [6] системный риск – это возможность возникновения сбоя в предоставлении финансовых услуг, который вызывается ухудшением состояния всей финансовой системы или ее части и имеет потенциальные серьезные отрицательные последствия для реальной экономики. По примеру общемирового финансового кризиса 2008 года можно сказать, что системный риск порождается четырьмя видами финансовых рисков: операционный риск, рыночный риск, кредитный риск и риск ликвидности. В 2008 году банки выдавали ипотечные кредиты недобросовестным заемщикам (операционный и кредитный риски), затем получали средства от продажи взятого в ипотечный кредит жилья. После падения цен на жилье (рыночный риск) банки перестали получать ожидаемую прибыль и возник риск ликвидности, усугубленный продажей банками производных ценных бумаг, обеспеченных ипотекой (кредитно-дефолтные свопы). Рынок таких деривативов был весьма объемным, поэтому при сбое в платежах по данным бумагам пострадали не только банки и хедж-фонды, но и субъекты реальной экономики [7]. Различают два механизма распространения финансовых рисков. Первый – "эффект домино" – связан с невыполнением обязательств по кредитам. Финансовые организации связаны между собой цепочкой требований и обязательств. На кредитные обязательства выпускается множество деривативов (производных контрактов). Когда одно из звеньев цепочки не выполняет свои обязательства, кризис может распространиться на всю финансовую систему и далее коснуться и реальной экономики.

Второй механизм возникновения системного риска – это "эффект заражения". Если одно из звеньев финансовой системы показывает себя в невыгодном свете (например, падают котировки акций), то снижается доверие инвесторов ко всему сектору, осуществляющему подобные операции или даже находящемуся в том же регионе. Инвесторы массово забирают свои средства из финансовых организаций, и возникает кризис ликвидности. Эффект домино и эффект заражения не исключают друг друга. При наступлении эффекта домино эффект заражения неизбежно наступает.

В следующей работе мы предложим модель, показывающую трансформацию кредитного и рыночного рисков в риск ликвидности, порождающий системный кризис.

Мерой чувствительности к процентному риску выступает дюрация [6]. Это срок обязательства или требования, взвешенный по денежным потокам. Связь между изменением процентной ставки и ценой облигации показывает формула Макоули (1):

$$\frac{\Delta P}{P} = -D \frac{\Delta r}{1+r}, \quad (1)$$

где ΔP – изменение цены облигации,

P – текущая цена облигации,

r – текущая рыночная процентная ставка,

Δr – предполагаемое изменение процентной ставки,

D – дюрация облигации.

Очевидна обратная зависимость рыночного риска от дюрации. Формулу (1) можно применить не только к облигациям, но и ко всем требованиям и обязательствам банка или любой другой финансовой компании. На данном утверждении основана стратегия иммунизации – балансирование требований и обязательств по дюрации. Правило иммунизации состоит в том, что дюрация взвешенных по относительным долям требованиям должна быть равна дюрации взвешенной по относительным долям обязательств.

Также отметим, что вместо процентной ставки в формуле дюрации можно брать, к примеру валютный курс и тогда уже иммунизировать валютные требования и обязательства. Таким образом, формулу дюрации можно адаптировать к любому рыночному риску.

МЕТОДЫ

В качестве основы исследования мы возьмем компартментную модель. Компартментные модели изначально зародились в биологических и околобиологических научных дисциплинах, таких как непосредственно биология, а также экология и

эпидемиология. Компартментные модели – это один из методов имитационного моделирования процессов, развивающихся во времени. Основная идея такого рода моделей – это разбиение субъектов (например, популяции) на какие-либо группы (компарменты) и описание взаимодействий между группами с использованием обыкновенных дифференциальных уравнений.

Одной из первых компартментных моделей является модель Лотки – Вольтерра или модель Хищник – Жертва [8]. Данная модель делит популяцию на две группы – жертвы, которые размножаются и хищники, которые поедают жертв, размножаются, а без возможности поедать жертв умирают. Естественную смерть модель игнорирует. Взаимодействие между двумя компартментами описываются следующей системой уравнений.

$$\frac{dx}{dt} = \alpha x - \beta xy \quad \frac{dy}{dt} = -\gamma y + \delta xy, \quad (2)$$

где x – численность жертв,

y – численность хищников,

α – коэффициент рождаемости жертв,

β – коэффициент уничтожения жертв хищниками,

γ – коэффициент убыли голодных хищников,

δ – коэффициент воспроизводства сытых хищников.

Согласно модели, скорость прироста популяции жертв пропорциональна их рождаемости и скорости уничтожения их хищниками, а скорость прироста популяции хищников пропорциональна убыли голодных и размножаемости сытых хищников. На данный момент модель Лотки – Вольтерра имеет множество дополнений и модификаций, широко используемых в биологии.

Поскольку мы будем делать попытку исследования распространения финансового риска по банковской системе и его переход на реальный сектор, нам ближе другая известная компартментная модель – модель распространения эпидемии.

Простейшей такой моделью является модель SIR [9] (Susceptible, Infected, Recovered/Removed), разработанная исследователями вируса Эбола и получившая широкое распространение и множество дополнений и модификаций во время пандемии Covid-19. Согласно SIR популяция делится на три группы: восприимчивые, инфицированные и выздоровевшие/умершие.

Последнюю группу целесообразнее назвать «выздоровевшие», так как численность популяции предполагается неизменной.

Модель SIR описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\beta}{N} IS \quad \frac{dI}{dt} = \frac{\beta}{N} IS - \gamma I \quad \frac{dR}{dt} = \gamma I, \quad (3)$$

где S – численность восприимчивых индивидов,

I – численность заразившихся индивидов,

R – численность переболевших индивидов,

N – численность населения,

β – коэффициент интенсивности контактов индивидов с последующим инфицированием,

γ – коэффициент интенсивности выздоровления инфицированных индивидов.

Согласно модели SIR численность восприимчивых уменьшается пропорционально числу контактов с инфицированными, численность инфицированных растет пропорционально числу контактов восприимчивых и инфицированных и уменьшается пропорционально времени. Интенсивность эпидемии, то есть число одномоментно болеющих индивидов определяется соотношением коэффициента интенсивности контактов индивидов с последующим заражением и коэффициента интенсивности выздоровления заболевших индивидов. В дальнейшем модель SIR развилась в такие модификации как SEIR (учет инкубационного периода), SIRS (предполагает повторное заражение) и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве субъектов модели мы выберем коммерческие банки, точнее суммарные пассивы банков в процентном выражении. Поскольку субъектами выступают не банки как таковые, в дальнейшем корректнее называть данные субъекты модели «юнитами». Компартментная модель рассматривает переход рыночного риска в риск ликвидности и последствия кризиса ликвидности в банковской системе. Стартом процесса является возникновение какого-либо рыночного риска. Юниты в рамках одной страны, общее количество которых составляет 100%, мы разделим на 4 компартмента.

S – «Susceptible» – восприимчивые – условно «здоровые» юниты, то есть те юниты, которых пока не коснулся рыночный риск (мы предполагаем, что кредитный риск в той или иной степени есть у всех без исключения банков).

I – «Infected» – зараженные – юниты, которых уже коснулся рыночный риск и породил в них начало риска ликвидности.

B – «Bankrupted» – юниты, окончательно пораженные риском ликвидности. Здесь необходимо установить некий порог нашего количественного показателя (относительной суммы счетов юридических лиц) при достижении которого риск перейдет в системный и возникнет всеобщий финансовый кризис.

R – «Recovered» – выздоровевшие. Поскольку при возникновении кризиса ликвидности

государство и центральный банк оказывают коммерческим банкам прямую и косвенную поддержку, мы не исключаем того, что банки могут преодолеть риск ликвидности и не дать финансовым рискам выйти за пределы финансовой системы. Обратим внимание на то, что в компартмент «Recovered» можно перейти только из компартмента Infected.

В качестве коэффициентов модели мы предлагаем следующие:

α – коэффициент интенсивности рыночного риска. Он показывает сколько юнитов станут зараженными за единицу времени.

δ – коэффициент чувствительности к рыночному риску. Он показывает сколько юнитов перейдут из состояния заражённых в состояние банкротств за единицу времени.

ε – коэффициент реабилитации. Данный коэффициент показывает, сколько юнитов смогут преодолеть «заражение» за единицу времени.

Возникает вопрос, каким образом задавать коэффициенты модели. Точная формула, по нашему мнению, требует дополнительных исследований прикладного характера, но проанализировать, от чего зависят данные коэффициенты мы можем.

Коэффициент α зависит от интенсивности рыночного риска. К примеру, если это риск изменения валютного курса, то коэффициент α зависит от того, на сколько процентов курс изменился. Также в коэффициент следует включить некоторый показатель банковских взаимодействий, чтобы учесть скорость распространения заражения между банками. Коэффициент δ очевидно следует связать с дюрацией обязательств, так как именно дюрация выступает мерой чувствительности к рыночному риску. Но поскольку дюрация это по сути своей срок, данный коэффициент должен быть скорректирован к безразмерной величине.

В коэффициент ε следует включить в первую очередь поддержку государства, а также запасы ликвидности. Отметим, что все три коэффициента должны быть приведены к определенной размерности. Каждый из коэффициентов по-

казывает, сколько процентов юнитов перейдет из одного компартмента в другой за один временной период, поэтому все коэффициенты модели должны быть как минимум меньше единицы (если, например, коэффициент α равен единице, то все юниты заразятся в первый же период).

Итак, на первом шаге мы имеем S (100%) банков в компартменте «Susceptible». Возникает некоторый рыночный риск с интенсивностью α . Данный риск может быть каким угодно: ценовым, валютным, товарным, процентным. Тогда на первом шаге банки перейдут из компартмента «Susceptible» в компартмент «Infected» со скоростью αS . Из компартмента «Infected» банки будут переходить в два компартмента в зависимости от чувствительности к рыночному риску и коэффициента реабилитации. Скорость перехода в компартмент «Bankrupted» равна δI , а скорость перехода в компартмент «Recovered» – εI .

Прежде, чем формировать и решать систему обыкновенных дифференциальных уравнений, изобразим нашу компартментную модель (рис. 1) В компартментных моделях выходящие из компартментов стрелки означают отрицательные коэффициенты, а входящие – положительные. Таким образом, мы получаем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\alpha S \\ \frac{dI}{dt} &= \alpha S - \delta I - \varepsilon I \\ \frac{dB}{dt} &= \delta I \\ \frac{dR}{dt} &= \varepsilon I. \end{aligned} \quad (4)$$

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (4) реализуем с помощью модуля solve_ivp библиотеки Python Scipy. Для решения необходимо задать начальные условия. В начальный момент времени 100 процентов пассивов банков находятся вне опасности, поэтому принадлежат компартменту «Susceptible»..

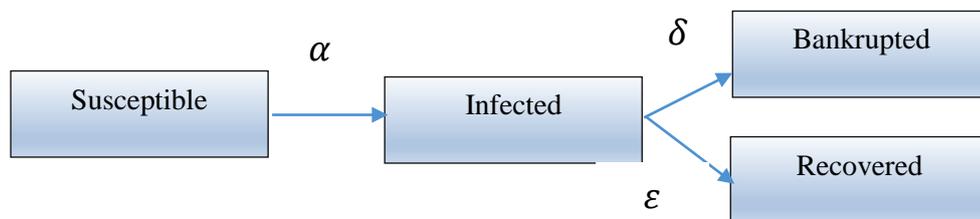


Рис. 1. Компартментная модель распространения финансового риска
Fig. 1. Compartment model of financial risk spread

Остальные компартменты «пустые», то есть начальные значения переменных I, B и R равны нулю. Развитие процесса во времени в первую очередь зависит от коэффициентов модели. Например, при высоком значении коэффициента чувствительности к рыночному риску будет расти компартмент «Bankrupted», а при высоком значении коэффициента реабилитации – компартмент «Recovered».

На данном этапе исследования мы возьмем условные значения коэффициентов модели:

$\alpha = 0,01$ (за единицу времени заражается 1% юнитов);

$\delta = 0,003$ (за единицу времени кризис ликвидности наступает у 0,3% юнитов);

$\varepsilon = 0,005$ (за единицу времени восстанавливаются 0,5% юнитов).

На рис. 2 показано распространение финансовых рисков во времени согласно представленной модели. В качестве временного периода выбрано два года. С заданными коэффициентами пик заражаемости наступает меньше, чем через 100 дней после возникновения рыночного риска. Затем юниты переходят в компартменты «Bankrupted» и «Recovered».

К концу периода ситуация становится стабильной, все юниты находятся в двух последних компартментах, то есть они либо реабилитированы, либо «погибли».

Поскольку мы выбрали коэффициент реабилитации больший, чем коэффициент чувствительности, выздоровевших юнитов больше.

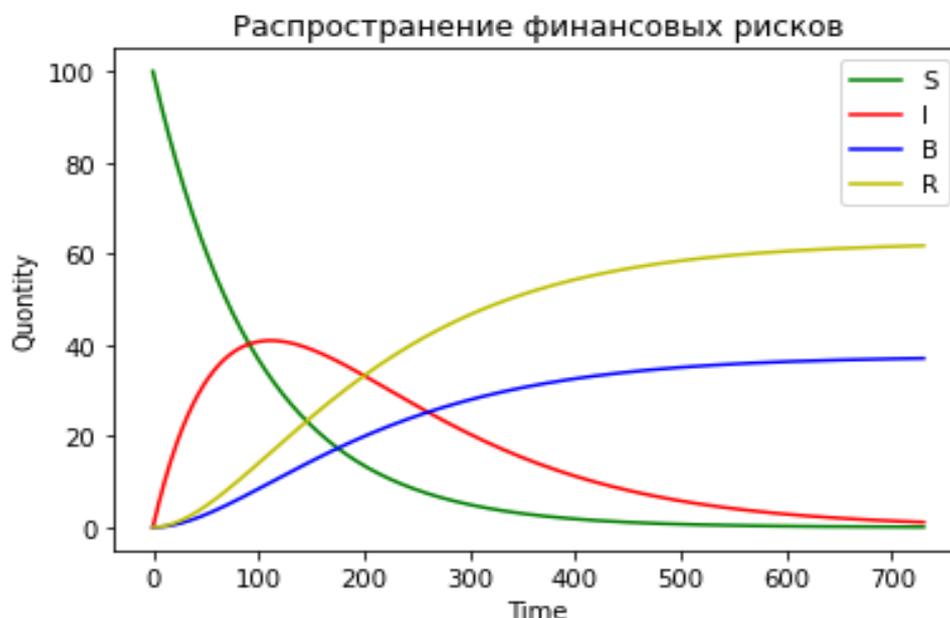


Рис. 2. Визуализация модели распространения финансового риска
Fig. 2. Visualization of the financial risk spread model

Если выбрать порогом 50% «погибших» юнитов, то системный кризис в нашем примере не наступает, однако финансовая система пострадает весьма существенно. На данном этапе исследования говорить о практическом применении предлагаемой модели еще рано. Во-первых, мы не имеем точных формул коэффициентов, во-вторых, финансовый рынок даже в рамках одной страны – это весьма сложный механизм с разнообразным взаимодействием его субъектов.

Однако, некоторые общие выводы сделать мы можем. Основной результат можно сформулировать следующим образом. Даже при относительно небольшом рыночном риске и при поддержке государства и запасе ликвидности, пре-

вышающих чувствительность банковской системы к рыночному риску, удар по финансовой системе может быть нанесен весьма болезненный. Хрупкость финансовой системы подтверждается историей и практикой.

Также, немаловажной является оценка сроков восстановления финансовой системы. Даже при малом значении интенсивности рыночного риска и чувствительности к нему, система стабилизировалась за срок, превышающий год.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. Балабанова Н.В., Журавлев А.Ю. Исследование проблематики управления рисками цифровой трансформации бизнес-процессов. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2021. №4 (68). С. 20–25.
2. Смолина Е.Ю., Зиненко А.В., Балабанова Н.В. Инвестиционный анализ на рынке Forex. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2020. № 4 (64). С. 50–56.
3. Переславцева И.И. Управление рисками в условиях цифровой трансформации <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-riskami-v-usloviyah-tsifrovoy-transformatsii/viewer>
4. Каранина Е.В. Управление рисками: механизмы, инструменты, профессиональные стандарты: учебник. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 257 с. Режим доступа: по подписке. <https://biblioclub.ru/index.php>.
5. Фомичев А.Н. Риск-менеджмент: учебник. 8-е изд., перераб. Москва: Дашков и К°, 2021. 366 с. Режим доступа: по подписке. <https://biblioclub.ru/index.php>
6. Боди З., Кейн А., Маркус А.Дж. Принципы инвестиций. Москва; Санкт-Петербург; Киев: Вильямс, 2018. 984 с.
7. Мабуссин М. Больше, чем вы знаете. Необычный взгляд на мир финансов. М.: Альпина Паблишер, 2014. 384 с.
8. Гончарова А.Б., Данилова М.Ю., Колпак Е.П. Модель Хищник-Жертва на линейном ареале. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022. № 2 (116) С. 6-14
9. Brockmann D., Helbing D. The Hidden Geometry of Complex, Network-Driven Contagion Phenomena. *SCIENCE*. 13 Dec 2013. Vol 342, Issue 6164. P. 1337-1342
1. Balabanova N.V., Zhuravlev A.Yu. Study of risk management issues of digital transformation of business processes. *Coordinated high-tech technologies. Regional application*. 2021. N 4 (68). P. 20–25.
2. Smolina E.Yu., Zinenko A.V., Balabanova N.V. Investment analysis in the Forex market. *Coordinated high-tech technologies. Regional application*. 2020. N 4 (64). P. 50-56.
3. Pereslavtseva, I.I. Risk management in the context of digital transformation <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-riskami-v-usloviyah-tsifrovoy-transformatsii/viewer>
4. Karanina E.V. Risk management: mechanisms, tools, professional standards: textbook. Moscow; Berlin: DirectMedia, 2020. 257 p. Access mode: by subscription. <https://biblioclub.ru/index.php>
5. Fomichev A.N. Risk management: textbook. 8th ed., revised. Moscow: Dashkov i K°, 2021. 366 p. Access mode: by subscription <https://biblioclub.ru/index.php>
6. Body Z., Kane A., Markus A.J. Principles of investment. Moscow; St. Petersburg; Kyiv: Williams, 2018. 984 p.
7. Mabussin M. More than you know. Unusual view of the world of finance. M.: Alpina Publisher, 2014. 384 p.
8. Goncharova A.B., Danilova M.Yu., Kolpak E.P. Predator-prey model on a linear range. *International Research Journal*. 2022. N 2 (116). P. 6–14.
9. Brockmann D., Helbing D. The Hidden Geometry of Complex, Network-Driven Contagion Phenomena. *SCIENCE*. 13 Dec 2013. Vol 342, Issue 6164. P. 1337-1342.