

З. К. АВДЕЕВА, Е. А. ГРЕБЕНЮК, С. В. КОВРИГА
ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва

КОМБИНИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ РАЗНОРОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Предложена модель комбинированного мониторинга для выявления структурных сдвигов в нестационарных процессах. Модель включает мониторинг временных рядов, описывающих динамику таких процессов, ситуационный мониторинг внешней среды, влияющей на эти процессы, супервайзер для информационного обмена двух видов мониторинга. Эксперимент по данным рынка металлопродукции и сырья 2016–2019 гг. подтвердил, что комбинированный мониторинг повышает качество обнаружения структурных сдвигов цифровым мониторингом за счет информации от ситуационного мониторинга, и помогает выявить причины их возникновения.

Введение. В современных условиях нестабильности внешней среды, неопределенности ее воздействия на изменение процессов функционирования социальной, экономической и финансовой систем возрастает роль мониторинга процессов, на динамику которых влияет состояние внешней среды. Широкое распространение получили системы цифрового мониторинга, проводимые для выявления структурных сдвигов – изменений во временных рядах наблюдаемых процессов и определения типа этих изменений (трендовое изменение, волатильность, тип нестационарности процесса). Однако результаты цифрового мониторинга не позволяют решать такие задачи, как: а) прогнозирование дальнейшего развития ситуации, приведшей к возникновению структурного сдвига и сигнала цифрового мониторинга; б) прогнозирование ситуации, которая может привести к структурному сдвигу, – из-за недостатка необходимой информации в количественных данных или отражения ее в них с запаздыванием. Для поддержки решения указанных задач наряду с цифровым мониторингом необходимо развитие средств ситуационного мониторинга, проводимого на основе обработки и анализа экспертной информации и направленного на выявление причин возникновения структурных сдвигов в наблюдаемых процессах, получение углубленного понимания ситуации, которое поможет системе прогнозирования выстроить соответствующие прогнозы. В контексте обозначенной проблемы в докладе представляется подход к комбинированному мониторингу разнородной информации на примере товарных рынков, процессы которых носят, как правило, нестационарный характер.

В последние годы исследователи [1] отмечают резкое увеличение уровня взаимосвязанных рисков на мировых товарных рынках и повышение уровня эндогенности. Проведенный анализ [1–2] показал, что более 50 % изменений цен на товары связаны с деятельностью участников рынка. Экстремальные события внешней среды и изменения стратегий участников рынка приводят к возникновению структурных сдвигов. Анализ конъюнктуры рынка, обнаружение структурных сдвигов в режиме мониторинга и оценивание их влияния на динамику цен на товарных рынках позволяют снизить увеличивающиеся риски для товаропроизводителей и участников торгов.

Подход к комбинированному мониторингу. Целями мониторинга нестационарных процессов, проводимого в настоящем исследовании, являются: обнаружение структурных сдвигов, выявление причин, которые привели или могут привести к их возникновению, формирование сценариев возможного развития ситуации, оценка мощности и продолжительности предстоящих изменений.

В соответствии с поставленными целями, вклад данного исследования заключается в следующем:

1. Мы предложили модель комбинированного мониторинга, включающую наряду с цифровым мониторингом временных рядов, описывающих динамику процесса, ситуационный мониторинг макро- и бизнес-среды, супервайзер, управляющий информационным обменом обоих режимов мониторинга и обработкой поступающей от них информации.

Ситуационный мониторинг направлен на выявление информации о значимых изменениях внешней среды, влияющих на динамику наблюдаемого процесса. Выявление такой информа-

ции ситуационный мониторинг организует регулярным образом, а также по запросу от цифрового мониторинга в случае обнаружения структурного сдвига. Ситуационный мониторинг поддерживает обнаружение и идентификацию событий и системообразующих факторов, влияющих на динамику наблюдаемого процесса и формирование сигналов о состоянии текущей ситуации. Формирование сигналов осуществляется на основе переработки экспертной информации о потенциально значимых событиях и факторах посредством построения сценариев развития ситуации с оценкой значимости воздействий этих событий на наблюдаемый процесс.

Цифровой мониторинг обнаруживает структурные сдвиги следующего вида: изменение тренда, изменение уровня, изменение дисперсии. Применяемые методы цифрового мониторинга основаны на алгоритмах последовательного анализа [3, 4], адаптированных для мониторинга нестационарных процессов [5].

Сигналы от систем ситуационного и цифрового мониторинга поступают в супервайзер для управления информационным обменом между системами мониторинга, агрегирования и передачи сформированных сигналов в систему решения целевых задач, связанных с анализом и прогнозированием состояния наблюдаемого процесса.

2. Для реализации ситуационного мониторинга разработан алгоритм формирования сигналов о состоянии внешней среды, формируемых в результате анализа значимых событий и моделирования сценариев развития ситуации с использованием нечеткой когнитивной карты (НКК) ситуации (fuzzy cognitive map) – модели представления причинно-следственных влияний между значимыми системообразующими факторами, характеризующими процессы на товарных рынках и процессы макро- и бизнес-среды, влияющие на динамику товарных рынков, и методов анализа и моделирования на ее основе [6, 7].

3. Разработан алгоритм цифрового мониторинга групп временных рядов, каждая из которых описывает различные аспекты развития ситуации. Алгоритм мониторинга представляет собой ансамбль алгоритмов последовательного анализа, настроенных на обнаружение изменений следующего типа: изменение направления тренда, изменение дисперсии процесса, изменение уровня процесса.

Укрупненная схема управления процессом обнаружения, идентификации и оценки изменений наблюдаемого процесса в режимах ситуационного и цифрового мониторинга представлена на рисунке. В верхней части рисунка показан процесс формирования и структурирования информации, необходимой для комбинированного мониторинга.

На основе сбора, структуризации и формализации экспертно-аналитической информации из базы качественных данных строится формализованное описание текущей ситуации, связанной с воздействием факторов внешней среды на динамику наблюдаемого процесса, в виде НКК ситуации. В основе НКК лежит граф, вершины которого представляют системообразующие факторы, влияющие на наблюдаемый процесс; ребра – прямые причинно-следственные влияния одних факторов на другие, при этом вес w_{ij} , приписанный каждому ребру между парой факторов $x_i \xrightarrow{w_{ij}} x_j$, характеризуют степень уверенности экспертов в том, что причиной изменения фактора x_j является изменение фактора x_i . По результатам структурного анализа НКК ситуации все системообразующие факторы разбиваются на группы (СФ-группы), характеризующие те или иные аспекты ситуации (конъюнктуру рынков, значимые финансово-экономические показатели макроэкономики, факторы влияния государственных регуляторов и т. п.), и каждой СФ-группе присваивается вес влияния группы на наблюдаемый процесс.

Формирование СФ-групп направлено на расширение информационного пространства поиска количественных данных для пополнения количественной базы данных и ее структурирование путем распределения рядов по сформированным СФ-группам.

В качественную базу данных поступают сведения о структуре взаимодействий между группами товаров, об экспертно значимых событиях и факторах, влияющих на процессы изменения цен на товарных рынках. Количественная база данных включает временные ряды цен, структурированные по СФ-группам.

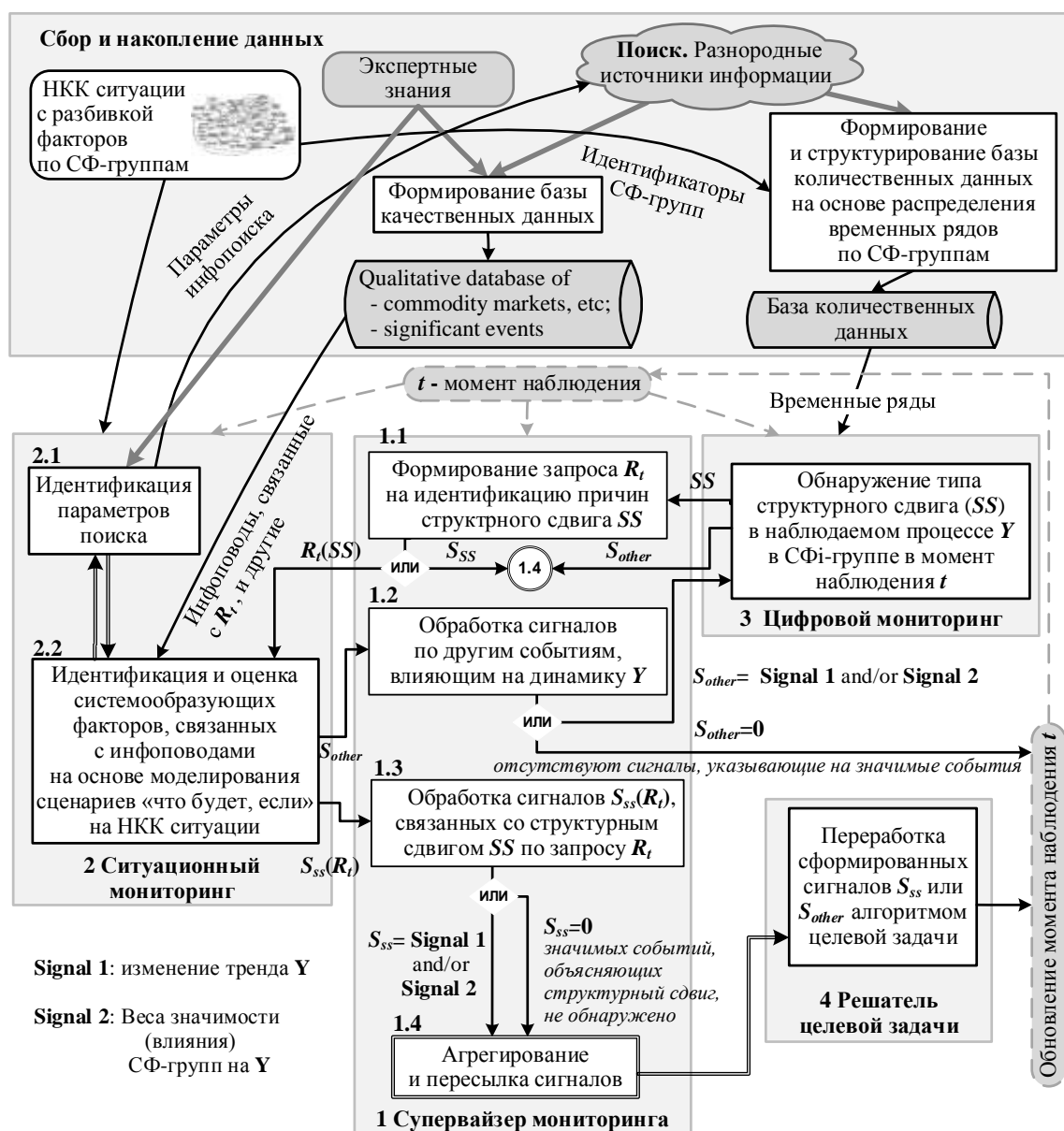


Рисунок. Укрупненная схема управления процессом обнаружения, идентификации и оценки изменений наблюдаемого процесса в режимах ситуационного и цифрового мониторинга

Комбинированный мониторинг реализует следующие функции: выявление структурных сдвигов – изменений свойств временных рядов, описывающих динамику процесса (блок 3 на рисунке); обнаружение и идентификация изменений состояния макро- и бизнес-среды (блок 2 на рисунке).

Супервайзер мониторинга (Блок 1) предназначен для обработки результатов комбинированного мониторинга, их подтверждения и передачи ответов в целевой блок решения задач (оценка текущей ситуации, выявление причинно-следственных связей между группами параметров, прогнозирование на различных временных горизонтах и др., Блок 4).

Ситуационный мониторинг (Блок 2) отслеживает значимые события, которые могут повлиять на динамику наблюдаемого процесса, для которого решается определенная целевая задача (прогнозирование целевого показателя, анализ динамики взаимосвязей, сравнительный анализ деятельности СФ-групп и др.). По результатам анализа значимых событий Блок 2 формирует и передает супервайзеру следующие сигналы: *Signal 1* – изменение тренда Y , *Signal 2* – веса значимости (влияния) СФ-групп на Y или 0 (нет сигнала) ($S_{other} = \text{Signal 1 and/or Signal 2 or 0}$).

Блок 3 формирует сигнал следующей структуры: {тип изменения: уровень, тренд, дисперсия, нарушение коинтеграции, нарушение причинности по Грейнджеру}; {направление изменения: увеличение, уменьшение, нарушение, внешний вид}; {значение параметра после обнаруженного изменения}; {название серии или группы серий, СФ-групп, к которым они относятся}. Блок 3 передает эту информацию супервайзеру, который может сравнить ее с информацией блока ситуационного мониторинга и подтвердить, опровергнуть, запросить дополнительную информацию у одной из систем мониторинга или не предпринимать никаких действий. После обработки супервайзер отправляет сигналы в Блок 4.

Когда алгоритм обнаруживает структурный сдвиг в некоторый момент времени t , он посылает из Блока 3 цифрового контроля супервайзеру сигнал $R_i(SS)$, содержащий информацию о виде сдвига и его параметрах, идентификатор серии или группа серий и идентификатор СФ-групп, которым принадлежат эти серии. Если в Блоке 2 ситуационного мониторинга алгоритм обнаружил потенциально значимое событие Inf , являющееся причиной структурного сдвига, и сигнал $S_{SS} = Signal 1 \text{ and/or } Signal 2$, обусловленный Inf , супервайзер отправляет информацию об обнаруженном структурном сдвиге в Блок 4 для обработки алгоритмом решения целевой задачи. Если событие не обнаружено, то супервайзер отправляет сигнал $S_{SS} = 0$ и информацию о SS в Блок 4.

Работоспособность комбинированного мониторинга проверена с использованием информации о событиях внешней среды и значений временных рядов (1) цен товарного рынка металлопродукции и сырья и (2) значимых для этой сферы финансово-экономических показателей макроэкономики с января 2016 года по декабрь 2018 года в контексте решения задачи формирования помесечного прогноза цен на черный лом на 2019 г. Проведенный эксперимент показал, что погрешность прогноза снижается в несколько раз (в сравнении с «наивным» прогнозом) за счет структурирования ситуации, формирования прогнозов с использованием ансамблей моделей, корректировки ситуации на горизонте прогноза по результатам ситуационного мониторинга и цифрового мониторинга.

Заключение. В докладе представлена модель комбинированного мониторинга, которая расширяет возможности цифрового мониторинга за счет предоставления ему дополнительной информации. Алгоритм интегрального мониторинга включает:

- алгоритмы цифрового мониторинга для выявления структурных сдвигов, использующие помимо наблюдений цифровых индикаторов сигналы ситуационного мониторинга;
- ситуационный мониторинг наблюдаемых процессов во взаимодействии с внешней средой, проводимый на основе обработки экспертных знаний, отслеживания информации из разнородных источников о потенциально значимых событиях внешней среды, сценарного анализа и моделирования ситуации с целью оценки ожидаемых последствий этих событий (возникновение структурных сдвигов) на динамику наблюдаемого процесса.

Эксперимент подтверждает, что комбинированный мониторинг повышает качество обнаружения структурных сдвигов цифровым мониторингом за счет информации, предоставляемой ситуационным мониторингом, помогает выявить причины их возникновения и учесть эту информацию при формировании прогноза с целью повышения его точности.

Предложенную модель комбинированного мониторинга мы рассматриваем как основу для дальнейшей разработки технологии мониторинга в составе систем анализа и прогнозирования развития динамических систем в ситуациях неопределенности и нестабильности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Filimonov V., Bicchetti D., Maystre N., Sornette D.** Quantification of the high level of endogeneity and of structural regime shifts in commodity markets. *Journal of International Money and Finance*. 2014. Vol. 42. P. 174-192.
2. **Zhang D., Broadstock D.C.** Global financial crisis and rising connectedness in the international commodity markets. *International Review of Financial Analysis*. 2020. Vol. 68. 101239. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2018.08.003>.
3. **Wald A.** *Sequential Analysis*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1947.
4. **Page E.S.** Continuous inspection schemes. *Biometrika*. 1954. Vol. 41. №1-2. P. 100-115.
5. **Grebenyuk E.A.** Monitoring and identification of structural shifts in processes with a unit root. In: 13th International Conference Management of large-scale system development. 2020. <https://doi.org/10.1109/MLSD49919.2020.9247829>
6. **Авдеева З.К., Коврига С.В.** Подход к постановке задач управления на когнитивной модели ситуации для стратегического мониторинга. *Управление большими системами*. 2016. № 59. С. 120-146.

7. **Avdeeva Z., Grebenyuk E., Kovriga S.** The Technology of the Strategic Goal-Setting and Monitoring of a Manufacturing System Development on the Basis of Cognitive Mapping. Chapter 3 in *Manufacturing Systems: Recent Progress and Future Directions*, edited by M.A. Mellal., New York: Nova Science Publishers. 2020.

Z.K.Avdeeva, E.A.Grebenyuk, S.V.Kovriga (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow)

Combined monitoring of heterogeneous information for forecasting of the non-stationary process dynamics

A model of combined monitoring is proposed for revealing structural shifts in non-stationary processes. The model includes monitoring of time series describing the dynamics of such processes, situation monitoring of the external environment that affects these processes, a supervisor for information exchange of two types of monitoring. An experiment based on the data of the market of metal products and raw materials for 2016–2019 confirmed that combined monitoring improves the quality of detection of structural shifts by digital monitoring at the expense of information from situation monitoring, and helps to identify the causes of their occurrence.