

# Ценообразование на рынке электроэнергии

## Мультимасштабный каузальный анализ

**Афанасьев Д.О.<sup>a</sup> Федорова Е.А.<sup>ba</sup>**

<sup>a</sup>Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва

<sup>b</sup>Высшая школа экономики, Москва

13 апреля 2017 г.



\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 16-06-00237 А

# Содержание

1 Мотивация

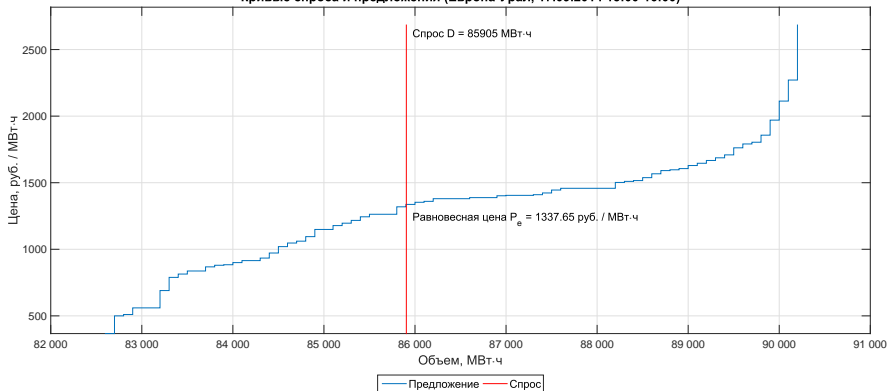
2 Методология

3 Результаты

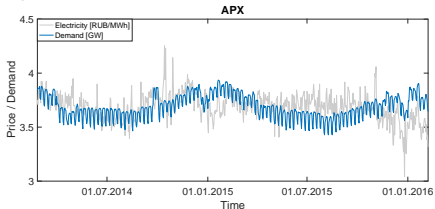
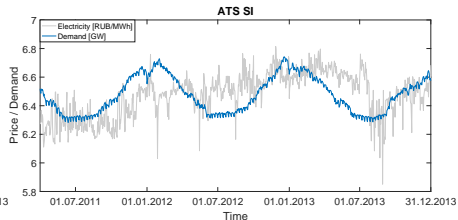
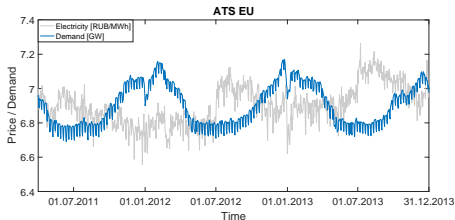
4 Выводы

# Инвертированная кривая предложения

Кривые спроса и предложения (Европа-Урал, 17.09.2014 15:00-16:00)

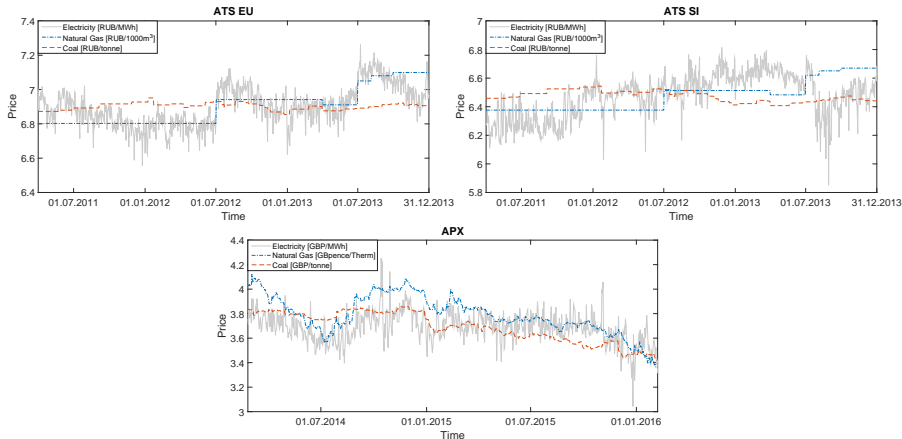


# Фундаментальные драйверы: спрос $D_t$



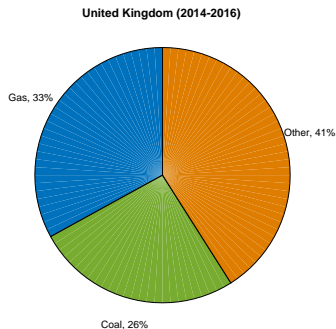
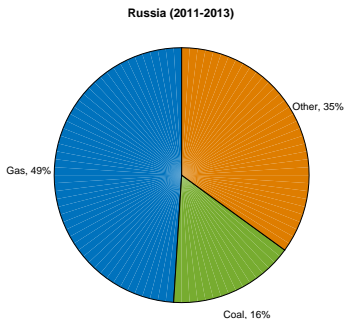
Skantzé и др. (2000); Barlow (2002)

# Фундаментальные драйверы: затраты на топливо $P_{t,k}$



Pirrong и Jermakyan (2008); Howison и Coulon (2009); Füss и др. (2015)

# Структура генерации электроэнергии



- Россия (2011-2013 гг.): 65% ТЭС = 49% газ + 16% уголь.
- Англия (2014-2016 гг.): 59% ТЭС = 33% газ + 26% уголь.

## Применение теста на причинность по Грэнджеру

Исследование	Результаты
Ferkingstad и др. (2011)	Изменения цен угля, в отличии от цен на газ, не оказывает одномоментного влияния на рынок электроэнергии Германии. В долгосрочной перспективе цены электроэнергии в Германии и Скандинавии и цена газа в Англии достигают равновесного уровня.
Moutinho и др. (2011)	Наличие долгосрочного коинтеграционного вектора, объясняющего совместную эволюцию цен электроэнергии и газа в Испании.
De Menezes и др. (2016)	Тренд в ценах электроэнергии с высокой вероятностью отражает тренд на топливных рынках. Для рынка APX обнаружено влияние как цены на газ, так и цены на уголь.

### Анализ на исходном уровне данных. Внутренние причины динамики?

- Uritskaya и Serletis (2008); Alvarez-Ramirez и Escarela-Perez (2010) – цена демонстрирует зависящее от временного масштаба поведение.
- Nowotarski и Weron (2016) – прогнозирование отдельных компонент цены улучшает точность прогнозов.

# Содержание

- 1 Мотивация
- 2 Методология**
- 3 Результаты
- 4 Выводы



# Мультимасштабный фреймворк

Позволяет выявлять влияние экономических показателей на различных временных масштабах и определять факторы, вносящие основной вклад в комплексные механизмы взаимодействия.

Мульти-масштабный фреймворк:

- 1 Из наблюдаемого временного ряда выделяются ненаблюдаемые структурные компоненты, соответствующие различным временным масштабам  $T$ .
- 2 К полученным компонентам применяются инструменты эконометрического анализа для ответа на вопросы о взаимосвязи исследуемых явлений на различных временных масштабах.

Компоненты должны быть слабо связаны на кросс-масштабах  $\Rightarrow$  отражают влияние различных внутренних факторов.

## Шаг 1. Декомпозиция на компоненты

Из наблюдаемого временного ряда выделяются ненаблюдаемые структурные компоненты, соответствующие различным временным масштабам  $T$ .

### ИНСТРУМЕНТЫ:

- Фурье-разложение (Weron и др., 2010)
- Вейвлета-декомпозиция (Janczura и др., 2013)
- Декомпозиция на эмпирические моды (Huang и др., 1998; Torres и др., 2011)

### ОГРАНИЧЕНИЯ:

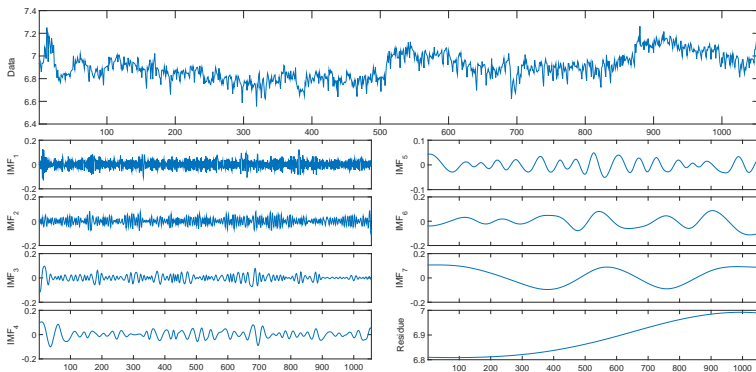
Метод	Нестационарность	Нелинейность	Адаптивность
Fourier	×	×	×
Wavelet	✓	×	×
EMD / CEEMDAN	✓	✓	✓

Адаптивность – способность извлекать ненаблюдаемые компоненты, используя только содержащуюся во временном ряду информацию (любой метод с априорным базисом не адаптивен).

# Декомпозиция на эмпирические моды, EMD

## Внутренняя модовая функция IMF

- 1 число экстремумов и число переходов через нулевую точку должны быть либо равны, либо отличаться не более чем на единицу;
- 2 в любой момент времени среднее значение огибающей, построенной на локальных максимумах, и огибающей, построенной на локальных минимумах, равняется нулю.



## Шаг 2. Анализ на уровне мод

К полученным модам применяется те или иные инструменты эконометрического анализа для ответа на вопросы о взаимосвязи исследуемых явлений на различных временных масштабах.

### ПРИМЕРЫ:

- Yu и др. (2015) – исследование причинно-следственных взаимосвязей между европейским рынком квот на выбросы  $CO_2$  и рынком сырой нефти марки Brent. Инструмент: линейный и нелинейный тесты на причинность по Гренджеру.
- Afanasyev и др. (2015) – анализ взаимосвязи цены и спроса на электроэнергию для 2х оптовых российских рынков на сутки вперед. Инструмент: зависящая от времени внутренняя корреляция TDIC (Chen и др., 2010).

**Мультимасштабный фреймворк + Адаптивная декомпозиции**

=

**Мультимасштабный адаптивный фреймворк**

# Мультимасштабный адаптивный каузальный анализ

## 1 Декомпозиция $y$ и $x$ (CEEMDAN):

$$y_t = \sum_{k=1}^{K_y} IMF_{t,k}^y \quad x_t = \sum_{k=1}^{K_x} IMF_{t,k}^x$$

## 2 Фильтрация шума – IMF, статистически не отличимые от fGn (Flandrin и др., 2004).

## 3 Линейный тест на причинность по Грэнджеру для каждой пары $\{IMF_{t,k}^y, IMF_{t,k}^x\}$ :

3.1 Тест Дики-Фуллера. Увеличиваем  $I$ , пока тест не будет пройден. Общий порядок интегрированности:  $I = \max(I_y, I_x)$ .

3.2 Оценка  $VAR(p)$  модели для  $p = 1, \dots, 30$ . Выбираем  $p_{AIC} = \arg \min_p AIC$ .

3.3 Тест Бреуша-Годфри (LM-тест) на автокорреляцию остатков. Увеличиваем  $p$  и переоцениваем модель, пока тесте не будет пройден:  $p_{BG} \geq p_{AIC}$ .

3.4 F-тест о совместном равенстве нулю соответствующих коэффициентов модели  $VAR(p_{BG})$ :

- $H_0: M_{t,i}^x$  не является причиной по Грэнджеру для  $M_{t,i}^y$
- $H_0: M_{t,i}^y$  не является причиной по Грэнджеру для  $M_{t,i}^x$

# Содержание

- 1 Мотивация
- 2 Методология
- 3 Результаты**
- 4 Выводы

# Цена и спрос на электроэнергию

Масштаб	Период	ATS EU	ATS SI	APX
Исходный	–	$E \leftrightarrow D$	$E \times D$	$E \leftarrow D$
Краткосрочный	<1 недели	$E \leftrightarrow D$	$E \times D$	$E \leftarrow D$
	1 неделя	$E \leftrightarrow D$	$E \times D$	$E \leftarrow D$
	2 недели	$E \leftarrow D$	$E \times D$	$E \leftarrow D$
Среднесрочный	1 месяц	$E \rightarrow D$	$E \times D$	$E \times D$
	2 месяца	$E \rightarrow D$	$E \times D$	$E \times D$
Долгосрочный	6-12 месяцев	$E \rightarrow D$	$E \rightarrow D$	$E \rightarrow D$
	>1 года	$E \times D$	$E \leftarrow D$	$E \times D$

- Краткосрочный (< 2 нед.): спрос причина цены на ATS EU и APX, но не ATS SI. Преобладание не гибкой теплогенерации на ATS EU / APX и существенная доля адаптивной гидрогенерации на ATS SI ( $\approx 60\%$ ).
- Среднесрочный (1-2 мес.): причинность не выявлена на всех рынках. Поставщики либо самостоятельно, либо в рамках регулирования, успевают задействовать резервные мощности.
- Долгосрочный сезонный (6-12 мес.): цена причина спроса на всех рынках. Долгосрочные сезонные колебания спроса не корректируют цену электроэнергии.
- Долгосрочный тренд (> 1 г.): спрос причина цены только на ATS SI. Высокая доля электроемкого алюминиевого производства в структуре потребления ATS SI.

# Цена электроэнергии и угля

Масштаб	Период	ATS EU	ATS SI	APX
Исходный	–	$E \rightarrow C$	$E \leftarrow C$	$E \times C$
Краткосрочный	<1 недели	$E \times C$	$E \leftarrow C$	$E \times C$
	1 неделя	$E \times C$	$E \times C$	$E \times C$
	2 недели	$E \times C$	$E \leftarrow C$	$E \times C$
Среднесрочный	1 месяц	$E \rightarrow C$	$E \times C$	$E \times C$
	2 месяца	$E \rightarrow C$	$E \times C$	$E \times C$
Долгосрочный	6-12 месяцев	$E \times C$	$E \times C$	$E \rightarrow C$
	>1 года	$E \leftarrow C$	$E \rightarrow C$	$E \leftarrow C$

- Краткосрочный (< 2 нед.): цена угля причина цены электроэнергии на ATS SI. Среднесрочные запасы угля, но при этом существенный вклад угольных станций в теплогенерацию ATS SI (компенсация расходов будущих периодов).
- Среднесрочный (1-2 мес.): цена электроэнергии причина для цены угля на ATS EU. Поставщики угля устанавливают цену, принимая во внимание ситуацию на рынке э/э.
- Долгосрочный сезонный (6-12 мес.): цена электроэнергии причина для цены угля на APX. Аналогично ATS EU, но ориентация на долгосрочные сезонные изменения на рынке э/э.
- Долгосрочный тренд (> 1 г.): цена угля причина цены электроэнергии на ATS EU и APX, и наоборот на ATS SI.  
На ATS SI основной драйвер – развитие гидрогенерации, поставщики угля адаптируются под рынок электроэнергии.



# Содержание

- 1 Мотивация
- 2 Методология
- 3 Результаты
- 4 Выводы**

# Выводы

- Механизм ценообразования на рынке электроэнергии — зависит от временного масштаба и отражает особенности конкретного рынка.
- Мультимасштабный каузальный анализ позволяет более детально исследовать комплексные механизмы ценообразования (результаты на исходном уровне данных  $\neq$  результаты для отдельных компонент).
- Для рынков ATS EU и APX подтверждаются такие известные стилизованные факты, как наличие влияния недельной сезонности спроса на цену и сонаправленное долгосрочное движение цен электроэнергии и первичных видов топлива (Ferkingstad и др., 2011; Moutinho и др., 2011; De Menezes и др., 2016).
- ATS SI достаточно сильно отличается от других исследованных рынков, что связано с особенностями как структуры генерации, так и структуры потребления.
- Различные причинно-следственные связи на различных временных масштабах требуют при прогнозировании цены электроэнергии строить индивидуальные модели для разных горизонтов.

# Список литературы

- Afanasyev, D., Fedorova, E., Popov, V., 2015. Fine structure of the price–demand relationship in the electricity market: Multi-scale correlation analysis. *Energy Economics* 51, 215–226.
- Alvarez-Ramirez, J., Escarela-Perez, R., 2010. Time-dependent correlations in electricity markets. *Energy Economics* 32 (2), 269–277.
- Barlow, M., 2002. A diffusion model for electricity prices. *Mathematical Finance* 12, 287–289.
- Cartea, A., Villaplana, P., 2008. Spot price modeling and the valuation of electricity forward contracts: The role of demand and capacity. *Journal of Banking and Finance* 32 (12), 2502–2519.
- Chen, N., Wu, Z., Huang, N., 2010. The time-dependent intrinsic correlation based on the empirical mode decomposition. *Advances in Adaptive Data Analysis* 2 (2), 223–265.
- De Menezes, L., Houllier, M. A., Tamvakis, M., 2016. Time-varying convergence in european electricity spot markets and their association with carbon and fuel prices. *Energy Policy* 88, 613–627.
- Ferkingstad, E., Løland, A., Wilhelmsen, M., 2011. Causal modeling and inference for electricity markets. *Energy Economics* 33 (3), 404–412.
- Flandrin, P., Goncalves, P., Rilling, G., 2004. Detrending and denoising with empirical mode decomposition. в: 12th European Signal Processing Conference. cc. 1581–1584.
- Füss, R., Mahringer, S., Prokopczuk, M., 2015. Electricity derivatives pricing with forward-looking information. *Journal of Economic Dynamics and Control* 58, 34–57.
- Howison, S., Coulon, M., 2009. Stochastic behavior of the electricity bid stack: from fundamental drivers to power prices. *Journal of Energy Markets* 2 (1), 29–69.
- Huang, N., Shen, Z., Long, S., Wu, M., Shih, H., Zheng, Q., Yen, N., Tung, C., Liu, H., 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. в: Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Том 454. cc. 903–995.
- Janczura, J., Truck, S., Weron, R., Wolff, R., 2013. Identifying spikes and seasonal components in electricity spot price data: A guide to robust modelings. *Energy Economics* 38, 96–100.
- Moutinho, V., Vieira, J., Moreira, A. C., 2011. The crucial relationship among energy commodity prices: Evidence from the spanish electricity market. *Energy Policy* 39, 5898–5908.
- Nowotarski, J., Weron, R., 2016. On the importance of the long-term seasonal component in day-ahead electricity price forecasting. *Energy Economics* 57, 228–235.
- Pirrong, C., Jermakyan, M., 2008. The price of power: The valuation of power and weather derivatives. *Journal of Banking and Finance* 32 (12), 2520–2529.
- Skantze, P., Gubina, A., Ilic, M., 2000. Bid-based stochastic model for electricity prices: the impact of fundamental drivers on market dynamics. Тезисы, MIT Energy Laboratory Technical Report EL 00-004, Massachusetts Institute of Technology.
- Torres, M., Colominas, M., Schlotthauer, G., Flandrin, P., 2011. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise. Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 4144–4147.
- Uritskaya, O. Y., Serletis, A., 2008. Quantifying multiscale inefficiency in electricity markets. *Energy Economics* 30 (6), 3109–3117.
- Weron, R., Bierbrauer, M., Truock, S., 2010. Modeling electricity prices: jump diffusion and regime switching. *Phys. A* 336, 39–48.
- Yu, L., Li, J., Tang, L., Wang, S., 2015. Linear and nonlinear granger causality investigation between carbon market and crude oil market: A multi-scale approach. *Energy Economics* 51, 300–311.

**Спасибо за внимание!**  
**Вопросы?**

**Афанасьев Д.О.: [dmafanasyev@gmail.com](mailto:dmafanasyev@gmail.com)**

**Федорова Е.А.: [ecolena@mail.ru](mailto:ecolena@mail.ru)**

# Цена и спрос на электроэнергию: подробно

Масштаб	Период	$ADF_E(I)$	$ADF_D(I)$	$BG(PBG)$	$F_E$	$F_D$	Влияние (5%)
<i>ATS EU</i>							
Исходный		-10,71 <sup>***</sup> (1)	-9,08 <sup>***</sup> (1)	118,86 (26)	4,44 <sup>***</sup>	2,77 <sup>***</sup>	E ↔ D
Краткоср-ый	<1 недели	-19,97 <sup>***</sup> (0)	-24,21 <sup>***</sup> (0)	114,36 <sup>*</sup> (23)	5,56 <sup>***</sup>	1,61 <sup>**</sup>	E ↔ D
	1 неделя	-16,27 <sup>***</sup> (0)	-14,91 <sup>***</sup> (0)	161,05 <sup>***</sup> (30)	5,17 <sup>***</sup>	3,87 <sup>***</sup>	E ↔ D
	2 недели	-12,22 <sup>***</sup> (0)	-10,96 <sup>***</sup> (0)	94,73 <sup>*</sup> (19)	0,83	2,22 <sup>***</sup>	E ← D
Среднеср-ый	1 месяц	-8,99 <sup>***</sup> (0)	-6,61 <sup>***</sup> (0)	65,77 (16)	2,34 <sup>***</sup>	1,19	E → D
	2 месяца	-5,14 <sup>***</sup> (1)	-5,31 <sup>***</sup> (0)	25,15 (6)	2,76 <sup>***</sup>	0,6	E → D
Долгоср-ый	6-12 месяцев	-4,51 <sup>***</sup> (1)	-4,22 <sup>***</sup> (0)	24,1 (6)	3,67 <sup>***</sup>	1,54	E → D
	>1 года	-4,39 <sup>***</sup> (2)	-5,75 <sup>***</sup> (0)	34,78 (7)	0,17	1,14	E × D
<i>ATS SI</i>							
Исходный		-10,33 <sup>***</sup> (1)	-6,66 <sup>***</sup> (1)	55,2 (12)	1,06	1,2	E × D
Краткоср-ый	<1 недели	-15,48 <sup>***</sup> (0)	-23,2 <sup>***</sup> (0)	69,22 (14)	1,04	1,43	E × D
	1 неделя	-15,17 <sup>***</sup> (0)	-16,03 <sup>***</sup> (0)	132,76 (28)	0,66	0,49	E × D
	2 недели	-11,66 <sup>***</sup> (0)	-10,91 <sup>***</sup> (0)	113,74 (24)	0,82	1,04	E × D
Среднеср-ый	1 месяц	-7,83 <sup>***</sup> (0)	-6,62 <sup>***</sup> (0)	33,79 (7)	1,3	0,87	E × D
	2 месяца	-5,37 <sup>***</sup> (0)	-7,23 <sup>***</sup> (1)	41,07 (11)	1,26	0,47	E × D
Долгоср-ый	6-12 месяцев	-4,76 <sup>***</sup> (1)	-4,16 <sup>***</sup> (0)	23,64 (7)	2,00 <sup>**</sup>	1,07	E → D
	>1 года	-3,99 <sup>***</sup> (2)	-3,94 <sup>***</sup> (0)	45,56 (8)	0,58	1,95 <sup>**</sup>	E ← D
<i>APX</i>							
Исходный		-12,75 <sup>***</sup> (1)	-9,92 <sup>***</sup> (1)	56,91 (14)	1,05	3,18 <sup>***</sup>	E ← D
Краткоср-ый	<1 недели	-13,53 <sup>***</sup> (0)	-20,19 <sup>***</sup> (0)	58,08 (14)	0,72	3,22 <sup>***</sup>	E ← D
	1 неделя	-10,57 <sup>***</sup> (0)	-12,93 <sup>***</sup> (0)	85,53 (23)	1,19	3,72 <sup>***</sup>	E ← D
	2 недели	-9,17 <sup>***</sup> (0)	-8,75 <sup>***</sup> (0)	84,51 (24)	1,33	3,96 <sup>***</sup>	E ← D
Среднеср-ый	1 месяц	-6,62 <sup>***</sup> (0)	-6,03 <sup>***</sup> (0)	58,21 (14)	0,58	1,57 <sup>*</sup>	E × D
	2 месяца	-4,89 <sup>***</sup> (1)	-5,6 <sup>***</sup> (0)	25,74 (6)	1,75	0,7	E × D
Долгоср-ый	6-12 месяцев	-4,43 <sup>***</sup> (2)	-4,46 <sup>***</sup> (0)	27,15 (5)	2,22 <sup>**</sup>	0,36	E → D
	>1 года	-5,84 <sup>***</sup> (4)	-7,06 <sup>***</sup> (4)	8,33 (2)	1,19	0,56	E × D

# Цена электроэнергии и угля: подробно

Масштаб	Период	$ADF_E(I)$	$ADF_D(I)$	$BG(p_{BG})$	$F_E$	$F_D$	Влияние (5%)
<i>ATS EU</i>							
Исходный		-10,71 <sup>***</sup> (1)	-9,93 <sup>***</sup> (1)	97,39 <sup>*</sup> (19)	2,38 <sup>***</sup>	0,57	E → C
Краткоср-ый	<1 недели	-19,97 <sup>***</sup> (0)	-22,19 <sup>***</sup> (0)	106,33 <sup>*</sup> (22)	0,86	0,46	E × C
	1 неделя	-16,27 <sup>***</sup> (0)	-14,3 <sup>***</sup> (0)	91,94 <sup>*</sup> (18)	1,25	0,89	E × C
	2 недели	-12,22 <sup>***</sup> (0)	-11,6 <sup>***</sup> (0)	98,26 (24)	1,26	1,27	E × C
Среднеср-ый	1 месяц	-8,99 <sup>***</sup> (0)	-7,77 <sup>***</sup> (0)	29,2 (7)	2,77 <sup>***</sup>	1,11	E → C
	2 месяца	-5,14 <sup>***</sup> (1)	-5,4 <sup>***</sup> (0)	25,2 (6)	2,4 <sup>**</sup>	0,88	E → C
Долгоср-ый	6-12 месяцев	-4,51 <sup>***</sup> (1)	-5,35 <sup>***</sup> (2)	26,73 (5)	0,76	1,46	E × C
	>1 года	-4,39 <sup>***</sup> (2)	-8,34 <sup>***</sup> (4)	39,75 (8)	1,65	2,35 <sup>**</sup>	E ← C
<i>ATS SI</i>							
Исходный		-10,33 <sup>***</sup> (1)	-9,14 <sup>***</sup> (1)	38,58 (12)	1,21	2,22 <sup>***</sup>	E ← C
Краткоср-ый	<1 недели	-15,48 <sup>***</sup> (0)	-21,36 <sup>***</sup> (0)	53,16 (15)	0,93	2,05 <sup>***</sup>	E ← C
	1 неделя	-15,17 <sup>***</sup> (0)	-16,28 <sup>***</sup> (0)	115,34 <sup>*</sup> (24)	1,27	0,93	E × C
	2 недели	-11,66 <sup>***</sup> (0)	-11,28 <sup>***</sup> (0)	112,86 <sup>*</sup> (23)	0,52	1,68 <sup>***</sup>	E ← C
Среднеср-ый	1 месяц	-7,83 <sup>***</sup> (0)	-7,14 <sup>***</sup> (0)	64,43 (15)	1,23	1,1	E × C
	2 месяца	-5,37 <sup>***</sup> (0)	-4,37 <sup>***</sup> (0)	33,21 (7)	1,65	0,67	E × C
Долгоср-ый	6-12 месяцев	-4,76 <sup>***</sup> (1)	-3,94 <sup>***</sup> (0)	25,39 (6)	0,55	0,8	E × C
	>1 года	-3,99 <sup>***</sup> (2)	-3,91 <sup>***</sup> (2)	27,07 (6)	2,88 <sup>***</sup>	0,56	E → C
<i>APX</i>							
Исходный		-12,75 <sup>***</sup> (1)	-7,93 <sup>***</sup> (1)	46,96 <sup>*</sup> (9)	1,16	0,9	E × C
Краткоср-ый	<1 недели	-13,53 <sup>***</sup> (0)	-18,87 <sup>***</sup> (0)	50,14 (12)	1,06	0,77	E × C
	1 неделя	-10,57 <sup>***</sup> (0)	-14,52 <sup>***</sup> (0)	90,64 <sup>*</sup> (18)	0,9	0,82	E × C
	2 недели	-9,17 <sup>***</sup> (0)	-9,17 <sup>***</sup> (0)	131,8 <sup>*</sup> (27)	0,86 <sup>*</sup>	0,69	E × C
Среднеср-ый	1 месяц	-6,62 <sup>***</sup> (0)	-4,98 <sup>***</sup> (0)	50,79 (11)	1,07	1,19	E × C
	2 месяца	-4,89 <sup>***</sup> (1)	-5,21 <sup>***</sup> (0)	42,85 (9)	1,25	1,74 <sup>*</sup>	E × C
Долгоср-ый	6-12 месяцев	-4,43 <sup>***</sup> (2)	-3,91 <sup>***</sup> (0)	23,09 (8)	3,18 <sup>***</sup>	0,42	E → C
	>1 года	-5,84 <sup>***</sup> (4)	-7,17 <sup>***</sup> (4)	8,5 (2)	1,16	3,99 <sup>**</sup>	E ← C