

МОДЕЛИ СОВМЕСТНОЙ ДИНАМИКИ МНЕНИЙ И ДЕЙСТВИЙ В ОНЛАЙНОВЫХ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ.

Ч. 2. Линейные модели

Д.А. Губанов, Д.А. Новиков

Аннотация. На примере социальной сети ВКонтакте исследуется влияние различных факторов на динамику мнений и действий как на макроуровне («общественное мнение»), так и на микроуровне (мнения и действия отдельных агентов). Кратко рассматривается модель коллективного принятия решений, в которой в явном виде присутствуют взаимосвязанные параметры, отражающие и психические, и поведенческие компоненты деятельности агентов. Представлены результаты идентификации ее модифицированных частных случаев: линейных макро- и микромоделей совместной динамики мнений и действий агентов в социальной сети. Проведена оценка влияния различных факторов на мнения и действия агентов: обобщенного социального влияния (общественного мнения), собственных мнений и действий агента, мнений и действий социального окружения, а также механизмов доверия агента к источникам информации и содержанию информации.

Ключевые слова: социальная сеть, агент, мнение, действие, социальное влияние, когнитивный диссонанс, доверие к информации.

ВВЕДЕНИЕ

В первой части настоящей статьи [1] был проведен первичный анализ совместной динамики мнений и действий¹ на примере отношения к ношению медицинских масок в онлайн-социальной сети ВКонтакте в первый год пандемии COVID-19 – за период с марта 2020 г. по февраль 2021 г. включительно. На выборке из нескольких десятков тысяч постов и связанных с ними миллионов комментариев и лайков было исследовано поведение социальной сети: насколько поддерживают ношение масок отдельные пользователи и в целом онлайн-сообщество, насколько меняется «общественное мнение» со временем и т. д. Были получены ответы на первые три из рассматриваемого перечня вопросов:

1) Насколько согласованы между собой мнения агентов и их действия?

2) Изменяют ли со временем агенты свои мнения и действия?

¹ Мнением условно считалась оцениваемая автоматическим классификатором «тональность» комментария, написанного агентом; действием условно считалась тональность комментария, которому агент поставил лайк.

3) Кто эти (изменившие свои мнения и действия) агенты, отличаются ли они от других по своим социально-демографическим характеристикам?

4) Какие модели лучше описывают динамику мнений и действий агентов – линейные, пороговые и т. п.?

5) Существенно ли влияние действий на мнения (эффект *когнитивного диссонанса*) и наоборот?

6) Под влиянием каких факторов происходит изменение мнений и действий агентов:

- его собственные предыдущие мнения или/и действия;

- социальное влияние:

- «общественное мнение» (усредненные доли тех или иных мнений и действий социальной сети в целом – так называемая «макромодель», в которой сеть условно рассматривается как один агент);

- мнения или/и действия окружения агента (агенты, связанные с ним отношением «дружбы») – усредненные и/или индивидуальные (так называемая «микромодель»);

- те или иные ненаблюдаемые (*латентные*) характеристики агента?



7) Зависит ли изменение мнения/действий агента от его доверия к источнику получаемой информации? А от содержания этой информации?

Структура изложения настоящей части следующая. В § 1 кратко описаны модели динамики мнений и действий, предложенные в работе [2]. В § 2 кратко описаны ключевые факторы для анализа и моделирования сетевых взаимодействий. В § 3 рассмотрены результаты идентификации линейных макро- и микромоделей совместной динамики мнений и действий. Этот раздел содержит ответы на вопросы 5–7. В заключении представлены промежуточные выводы.

1. ИЗВЕСТНЫЕ МОДЕЛИ СОВМЕСТНОЙ ДИНАМИКИ ПСИХИЧЕСКИХ И ПОВЕДЕНЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В качестве базовой выбрана математическая модель совместной динамики мнений и действий агентов, которая была предложена в работе [2]. В ней рассматривается процесс совместного принятия взаимодействующими субъектами решений и приводятся оригинальные модели совместной динамики психических и поведенческих компонент в процессе их индивидуальной и коллективной деятельности. Вводится множество $N = \{1, 2, \dots, n\}$ взаимодействующих субъектов, называемых *агентами*. Номер агента обозначается нижним индексом, а номер периода времени – верхним.

Вводится параметр $r_i \in R_i$, называемый «*состоянием*» (внутренним) i -го агента, $i \in N$, и отражающий все его существенные индивидуальные характеристики, в том числе параметры структуры личности [3]. Содержательно состояние агента в прикладных задачах может интерпретироваться как: его мнение, убеждение или отношение (например, оценка некоторого объекта или субъекта), или эффективность его деятельности, или скорость научения, или наиболее желательный для него результат деятельности и т. п.

Считается, что агент $i \in N$ может выбирать действия y_i из множества A_i допустимых действий. По итогам выбора агентами действий реализуются результаты их деятельности, которые обозначаются $z_i \in A_{0i}$, где A_{0i} – множество допустимых результатов деятельности i -го агента. Возможное несовпадение действия агента и результата его деятельности может быть обусловлено влиянием внешней среды (ее состояние обозначим через $\theta \in \Omega$) или действиями других агентов.

В работе [2] отмечается, что связь между действием агента и результатом его деятельности может иметь сложную природу. Для простоты считается, что результат z_i деятельности i -го агента является известной детерминированной функцией $w_i(y_i, y_{-i}, \theta)$, действительное значение которой зависит от его действия y_i , вектора $y_{-i} = (y_1, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_n)$ действий всех остальных агентов (так называемой *обстановки игры* для i -го агента) и состояния внешней среды θ .

Считается, что каждый агент всегда знает свое состояние, а его действие полностью наблюдаемо для него и всех остальных агентов. При выборе действия агент руководствуется своими предпочтениями на множестве результатов A_{0i} и тем, как выбираемое действие влияет на результат деятельности. При известном своем состоянии, состоянии внешней среды и действиях других агентов i -й агент выберет действие y_i^* , максимизирующее его полезность:

$$y_i^*(y_{-i}^*, r_i, \theta) = \arg \max_{y_i \in A_i} f_i(w_i(y_i, y_{-i}^*, \theta), r_i), i \in N, (1)$$

где $f_i: A_{0i} \times R_i \rightarrow \mathfrak{R}^1$ – функция полезности i -го агента.

В табл. 1 приведены факторы, влияющие на принятие агентом решений (столбцы), и научные направления (строки), исследующие модели принятия решений. В работе [2] рассматриваются все перечисленные в табл. 1 факторы (количество плюсов условно отражает степень учета фактора в соответствующем научном направлении), а в настоящей работе – факторы, соответствующие столбцам с желтой заливкой.

Далее в работе [2] вводятся различные предположения о поведении агентов, имеющие содержательные интерпретации, и рассматриваются соответствующие математические модели совместной динамики состояний и действий агентов, в частности модели информационного влияния и управления. Предположения следующие.

A.1. $A_i = A_{0i} = R_i = U_i = [0; 1], i \in N$.

A.2. $w_i(y_i, y_{-i}, \theta) = w(y_i, y_{-i}), i \in N$.

A.3. При фиксированном состоянии агента r_i его функция полезности $f_i: [0; 1]^2 \rightarrow \mathfrak{R}$ *однопиковая с точкой пика* $r_i, i \in N$.

A.4. $w(\cdot)$ – непрерывная, строго монотонно возрастающая по всем переменным функция, удовлетворяющая *условию единогласия*

$$\forall a \in [0; 1] w(a, \dots, a) = a.$$

Факторы принятия решений и научные направления [4]

Научные направления	Факторы						
	Полезность	Действие	Действия других	Социальное окружение	Внутреннее состояние	Предыстория	Управление
Индивидуальное принятие решений [5, 6]	+++	++		++	+	+	
Теория игр [7], теория коллективного поведения [8–10], поведенческая экономика [11]	++	+++	+++	+	+	+	+
Социальная психология [12–14], Психология личности [15–17] Математическая психология [18–21]	+	++	+	++	+++	+	+
Мультиагентные системы [22, 23]		+++	+	++	++	+	+
Теория управления (социальными и организационными системами) [24, 25]	++	++	++	+++	+	+	+++

Предположение А.1 является «техническим». Предположение А.2 более существенно, так как в соответствии с ним, во-первых, результат деятельности (*коллективное решение*) $z = w(y_i, y_{-i})$ един для всех агентов, а во-вторых, неопределенность относительно состояния внешней среды отсутствует. В соответствии с предположением А.3 функция полезности агента, определенная на множестве результатов деятельности, имеет единственную точку максимума, который достигается при результате, совпадающем с состоянием агента. Состояние агента может интерпретироваться как его *оценка, мнение или отношение/аттитюд* к тем или иным результатам деятельности. Предположение А.4 содержательно прозрачно: если цели всех агентов совпадают, то соответствующий результат их совместной деятельности достижим.

Если выражение (1) описывает однократное принятие агентами решений о своем действии, то для рассмотрения повторяющихся ситуаций принятия решений необходимо вводить те или иные дополнительные предположения. В работе [2] рассматривается динамика принятия решений и считается, что выполнено следующее предположение.

А.5. Динамика действий агентов следует процедуре индикаторного поведения

$$y_i^t = (1 - \gamma_i^t) y_i^{t-1} + \gamma_i^t y_i^* (y_{-i}^{t-1}, r_i^t), \quad (2)$$

$$t=1, 2, \dots,$$

с заданными начальными значениями (y_i^0, r_i^0) , $i \in N$, где $\gamma_i^t \in (0; 1]$ – известные константы. В каждый момент времени агент делает «шаг» (пропорциональный γ_i^t) от своего преды-

дущего состояния к своему наилучшему ответу y_i^* на обстановку, сложившуюся в предыдущий момент времени.

А.6. Динамика состояний агентов следует процедуре

$$r_i^t = \left[1 - b_i B_i(r_i^{t-1}, u_i^t) - c_i C_i(r_i^{t-1}, y_i^{t-1}) - d_i D_i(r_i^{t-1}, z^{t-1}) - e_i \right] r_i^{t-1} + b_i B_i(r_i^{t-1}, u_i^t) u_i^t + c_i C_i(r_i^{t-1}, y_i^{t-1}) y_i^{t-1} + d_i D_i(r_i^{t-1}, z^{t-1}) z^{t-1} + e_i E_i(r_i^{t-1}, y_{-i}^{t-1}), \quad t = 1, 2, \dots, i \in N,$$

где $u_i^t \in U_i$ – внешнее воздействие (управление), оказываемое на агента $i \in N$ в момент времени t .

Отметим, что именно выражениями типа (3) мы будем пользоваться ниже при построении и идентификации линейных моделей совместной динамики мнений и действий агентов.

А.7. Неотрицательные константы доверия (b_i, c_i, d_i, e_i) удовлетворяют ограничениям

$$b_i + c_i + d_i + e_i \leq 1, \quad i \in N.$$

А.8. Функции доверия $B_i(\cdot)$, $C_i(\cdot)$, $D_i(\cdot)$ и $E_i(\cdot)$, $i \in N$, принимают значения из отрезка $[0; 1]$; $\forall a \in [0; 1] E_i(a, \dots, a) = a$, $i \in N$.

А.9. Неотрицательные константы доверия (b_i, c_i, d_i, e_i) и функции доверия $B_i(\cdot)$, $C_i(\cdot)$ и $D_i(\cdot)$, $i \in N$, удовлетворяют условию

$$\forall x_1, x_2, x_3, x_4 \in [0; 1]$$

$$b_i B_i(x_1, x_2) + c_i C_i(x_1, x_3) + d_i D_i(x_1, x_4) + e_i \leq 1, \quad i \in N.$$



Предположения А.7 – А.9 гарантируют, что состояние динамической системы (2)–(3) не выйдет из множества допустимых значений.

«Весы»-константы (b_i, c_i, d_i, e_i) могут рассматриваться как отражающие отношение (доверие) i -го агента к соответствующему источнику информации, а функции $B_i(\cdot), C_i(\cdot), D_i(\cdot)$ и $E_i(\cdot)$ – как «функции доверия», отражающие доверие i -го агента к содержанию информации. Коэффициент

$$\left[1 - b_i B_i(r_i^{t-1}, u_i^t) - c_i C_i(r_i^{t-1}, y_i^{t-1}) - d_i D_i(r_i^{t-1}, z_i^{t-1}) - e_i \right]$$

при первом слагаемом в правой части выражения (3) условно отражает силу собственных убеждений агента.

Содержательные интерпретации пяти слагаемых в правой части выражения (3) следующие. В соответствии с выражением (3) состояние i -го агента r_i^t в момент времени t в общем случае определяется (является «линейной комбинацией»):

I) его состоянием r_i^{t-1} в предыдущий момент времени ($t - 1$);

II) его действием y_i^{t-1} в предыдущий момент времени ($t - 1$);

III) действиями y_{-i}^{t-1} и, в общем случае, результатами деятельности z_{-i}^{t-1} остальных агентов в предыдущий момент времени ($t - 1$); это влияние может быть и опосредованным – «через» результат деятельности агента;

IV) результатом деятельности z^{t-1} в предыдущий момент времени ($t - 1$);

V) целенаправленным внешним воздействием (управлением) или обобщенным социальным влиянием u_i^t на него в момент времени

Далее в работе [2] рассматриваются модели, которые являются частными случаями общей модели (2)–(3) и учитывают влияние на состояние агента одного из факторов – I, II, III, IV или V. Приводятся также результаты исследования равновесий в такого рода моделях (модель активной экспертизы, модель информационного управления, модель консенсуса, модель конформного поведения и модели социального влияния, в частности, когнитивного диссонанса, хиндсайта и взаимовлияния агентов).

Завершив краткое описание модели взаимосвязи состояний, действий и результатов деятельности агентов, отметим, что для рассматриваемого класса моделей необходима экспериментальная верификация, в том числе анализ взаимосвязи состояний и действий, а также других факторов, влияющих на динамику состояний и действий агентов. Результаты такого исследования для агентов, яв-

ляющихся участниками онлайн-социальной сети, приводятся ниже. Отличие от работы [2] заключается в том, что вместо выражения (2) ниже рассматриваются линейные зависимости (аналогичные выражению (3)) действий агента от его предыдущих состояний и действий, а также состояний и действий других агентов и ряда других факторов.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ФАКТОРОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА СЕТЕВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Кратко рассмотрим введенную ранее (см. первую часть статьи [1]) формализацию факторов, необходимых для анализа и идентификации моделей совместной динамики мнений и действий. Участниками сети являются агенты из множества $N = \{1, 2, \dots, n\}$, которые совершают акты того или иного вида из фиксированного множества $K = \{1, 2, \dots, k\}$ в те или иные моменты времени t из интервала T . Ограничимся рассмотрением следующих видов актов ($K = \{1, 2\}$):

- публикация комментария к посту или комментарию,
- постановка лайка комментарию.

Обозначим множество актов через Δ . Каждый акт $a \in \Delta$ характеризуется тремя параметрами – совершившим его агентом, видом акта и моментом времени, в который акт был совершен. Введем характеризующие акт функции:

- $f_a: \Delta \rightarrow N$, которая каждому акту $a \in \Delta$ ставит в соответствие совершившего его агента $i \in N$;
- $f_t: \Delta \rightarrow T$, которая каждому акту $a \in \Delta$ ставит в соответствие время его совершения $t \in T$;
- $f_k: \Delta \rightarrow K$, которая каждому акту $a \in \Delta$ ставит в соответствие его вид $j \in K$.

На множестве актов зададим бинарное отношение частичного порядка « a является причиной b »: $a \rightarrow b$. Если $a \rightarrow b$ и $a \neq b$, но при этом не существует такого $c \in \Delta$, что $a \rightarrow c$ и $c \rightarrow b$, то a является непосредственной причиной b : $a \downarrow b$. Считаем, что бинарное отношение $a \rightarrow b$ выполнено в следующих случаях:

- a – комментарий, b – поставленный ему лайк,
- a – комментарий, b – комментарий к нему,
- a и b совпадают.

Для каждого агента $i \in N$ определим множество всех совершенных им актов $\delta_i = \{a \in \Delta \mid f_a(a) = i\}$, а также множество его друзей $N_i \subseteq N$ (формальное отношение «дружбы» в онлайн-социальной

сети предполагает, что агент может получать информацию о публикуемых друзьями комментариях, поставленных ими лайках и т. д.).

Мнения и действия. При рассмотрении моделей совместной динамики мнений и действий *мнением* агента будем условно считать отношение к ношению медицинских масок, выраженное в комментарии. Формально определим *мнение агента*, выраженное в комментарии $b \in \Delta$ ($f_k(b) = 1$), в трех вариантах:

- $r' \in \{0, 1, 2\}$, где 0 – результат классификации «против масок» (или «-»), 1 – «за маски» (или «+»), 2 – «непонятно/ нейтрально» (или «=»). Результат определяется на основании рассчитанного классификатором стохастического вектора (p_-, p_+, p_+) . Компоненты такого вектора трактуются в машинном обучении как вероятности того, что объект принадлежит к тому или иному классу.

- $r'' = \frac{p_+}{p_+ + p_-} \in [0; 1]$ – уверенность в том, что комментарий отражает мнение «за ношение масок» (при этом для данного комментария $r' = 0$ или $r' = 1$).

- $r = \frac{p_+ - p_-}{p_+ + p_-} \in [-1; 1]$ (при этом либо $r' = 0$, либо $r' = 1$), где $r = 1$ означает сильную уверенность в том, что выражено мнение «за ношение масок», а $r = -1$ означает сильную уверенность в том, что выражено мнение против.

Будем считать *действием* лайк к некоторому комментарию; оценка лайка совпадает с оценкой комментария, к которому поставлен лайк: $y' \in \{0, 1, 2\}$, $y'' \in [0; 1]$ и $y \in [-1; 1]$. Например, для лайка $a \in \Delta$ $y'(a) = r'(b)$, где b – комментарий, к которому поставлен лайк (т. е. $b \downarrow a$). Для упрощения записи примем соглашение: $r'(a) = y'(a)$, $r''(a) = y''(a)$, $r(a) = y(a)$. Считаем, что момент постановки лайка совпадает с моментом публикации комментария, которому поставлен лайк.

3. ЛИНЕЙНЫЕ МИКРО- И МАКРОМОДЕЛИ СОВМЕСТНОЙ ДИНАМИКИ МНЕНИЙ И ДЕЙСТВИЙ АГЕНТОВ

Ранее (см. первую часть статьи [1]) было показано, что «усредненные» мнения и действия агентов в социальной сети взаимосвязаны. Проведем теперь идентификацию линейных моделей динамики мнений и действий в онлайн-социальной

сети и ответим на вопросы 5–7, сформулированные во введении.

3.1. Макромодели

Рассмотрим равные последовательные интервалы времени τ_1, τ_2, \dots (это может быть час, сутки и т. п., в настоящем разделе используется недельный интервал). Каждый акт в сети осуществляется в определенный момент времени, поэтому можно определить множество актов, совершенных в течение интервала τ_m :

$$\Delta(\tau_m) = \Delta^m = \{a \in \Delta \mid f_t(a) \in \tau_m\}.$$

Введем обозначения, необходимые для моделирования совместной динамики мнений и действий на макроуровне (на уровне всей сети):

- $r_+^m = \frac{|\{a \in \Delta^m \mid f_k(a) = 1, r'(a) = 1\}|}{|\{a \in \Delta^m \mid f_k(a) = 1\}|}$ – доля мнений «за»,

- $r_-^m = \frac{|\{a \in \Delta^m \mid f_k(a) = 1, r'(a) = 0\}|}{|\{a \in \Delta^m \mid f_k(a) = 1\}|}$ – доля мнений «против»,

- $y_+^m = \frac{|\{a \in \Delta^m \mid f_k(a) = 2, r'(a) = 1\}|}{|\{a \in \Delta^m \mid f_k(a) = 2\}|}$ – доля действий «за»,

- $y_-^m = \frac{|\{a \in \Delta^m \mid f_k(a) = 2, r'(a) = 0\}|}{|\{a \in \Delta^m \mid f_k(a) = 2\}|}$ – доля действий «против»,

где $m \in \mathbb{Z}_+$ – текущий шаг времени.

Рассмотрим такие макромодели совместной динамики мнений и действий, в которых мнения и действия в сети (т. е. доли мнений и действий) на следующем шаге $m + 1$ зависят от мнений и действий на текущем шаге $m = 1, 2, \dots$. Но для начала приведем на рис. 1 реальную динамику исследуемых за годовой период переменных.

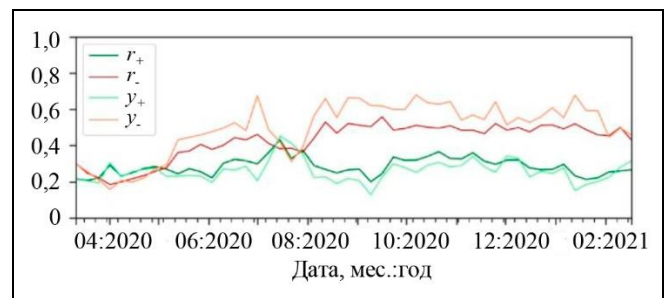


Рис. 1. Динамика мнений и действий

В начале рассматриваемого периода (см. рис. 1) виден рост доли мнений и действий как «за», так и «против». В какой-то момент происходит отрыв доли мнений и действий «против» (r_- , y_-) от доли «за», затем к концу лета доли «за» и «против» сравниваются, а дальше отрыв доли «против» становится окончательным. Значения корреляций переменных (используется коэффициент корреляции Пирсона) за весь годовой период приведены на рис. 2.

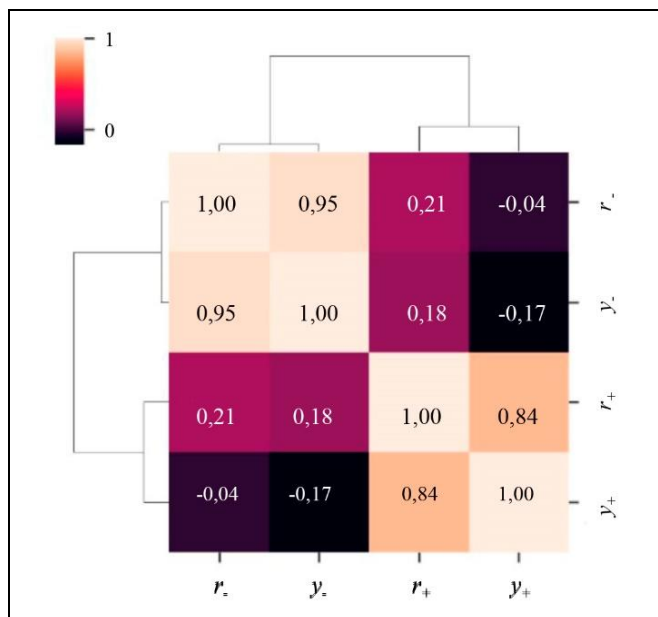


Рис. 2. Корреляции мнений и действий

Доли действий и мнений одной направленности хорошо коррелируют между собой: лучше всего

коррелируют мнения и действия «против», мнения «за» в некоторой степени коррелируют с мнениями и действиями «против». Однако на рис. 1 можно выделить два момента изменения динамики: начало июля и начало сентября 2020 г. Проверим, изменятся ли корреляции переменных для соответствующих периодов времени (см. таблицы на рис. 3).

Приведенные на рис. 3 данные подтверждают сильную положительную корреляцию между мнениями и действиями одинаковой направленности. При этом со временем происходит ослабление корреляции между переменными r_- и y_- . Можно отметить «монотонный» рост высказываний «против» (за исключением летнего месячного провала), и волнообразность доли высказываний «за». Выводы по отдельным периодам $T_1 - T_3$ следующие.

T_1) Положительная корреляция между переменными r_+ и r_- , которая может быть объяснена постепенной поляризацией общества (за счет уменьшения нейтральных высказываний), при этом y_+ плохо коррелирует с переменной y_- .

T_2) Сильная отрицательная корреляция между переменными r_+ и r_- , а также между переменными y_- и y_+ . Вероятно, достигнуты пределы роста за счет нейтральных высказываний.

T_3) Исчезновение корреляции между переменными r_+ и r_- . Уменьшилась отрицательная корреляция между переменными y_- и y_+ , возможно из-за исчезновения резких колебаний в сети.

Выводы подтверждаются динамикой мнений на рис. 4 (корреляция 0,21) и динамикой действий на рис. 5 (корреляция -0,17).

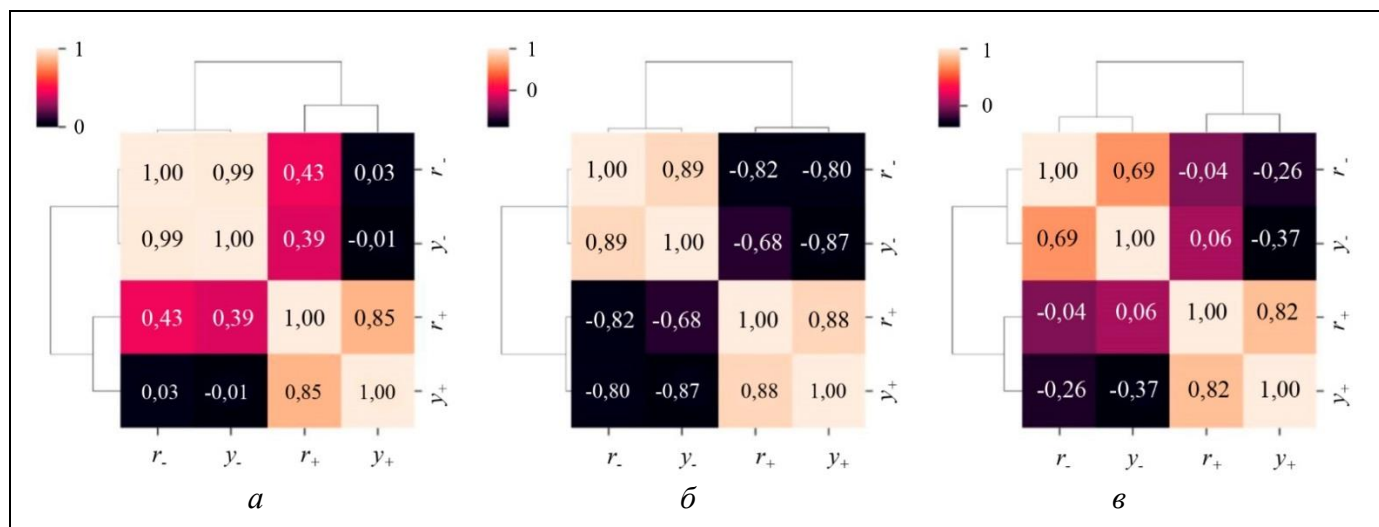


Рис. 3. Корреляции мнений и действий: *a* – март – июнь 2020 г. (T_1), *б* – июль – август 2020 г. (T_2), *в* – сентябрь 2020 г. – февраль 2021 г. (T_3)

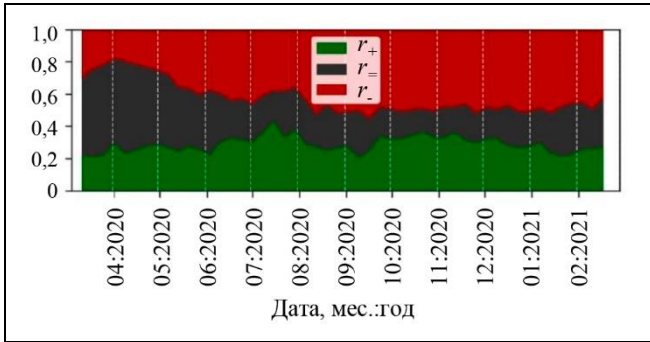


Рис. 4. Динамика мнений

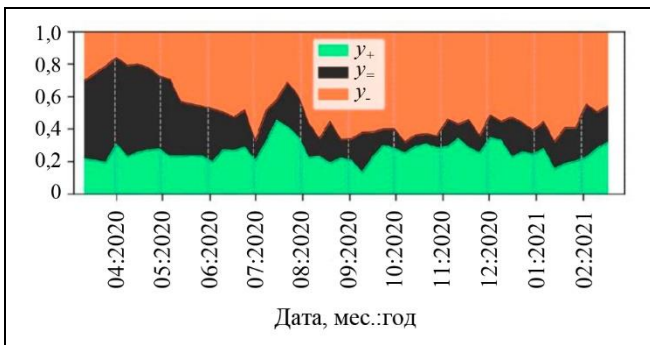


Рис. 5. Динамика действий

Вернемся к формальным моделям динамики мнений и действий, ограничимся рассмотрением марковских моделей², т. е. будем рассматривать только влияние предыдущего периода на текущий. Возможные зависимости между введенными переменными представлены на рис. 6.

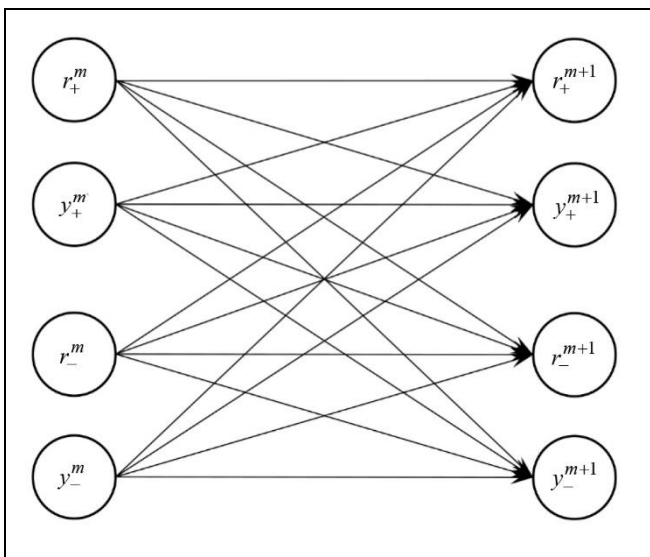


Рис. 6. Зависимости между переменными

² Рассмотрение соответствующих моделей с памятью представляется перспективным направлением будущих исследований.

Для таких зависимостей исследуются всевозможные линейные модели динамики мнений и действий (см. также выражение (3) в § 2), в частности:

$$r_+^{m+1} = (1 - \beta_{+1} - \beta_{+2} - \beta_{+3})r_+^m +$$

$$+ \beta_{+1}y_+^m + \beta_{+2}r_-^m + \beta_{+3}y_-^m,$$

где коэффициенты $\beta_{+1}, \beta_{+2}, \beta_{+3} \geq 0$,

$$\beta_{+1} + \beta_{+2} + \beta_{+3} \leq 1. \quad (5)$$

Примем интервал дискретизации равным семи дням. Для каждой объясняемой переменной построим дерево возможных моделей (рис. 7–10): от моделей с одной объясняющей переменной до модели, включающей все объясняющие переменные. Кроме того, для сравнения добавим *модель-среднее*, которая каждый раз выдает прогноз, равный среднему за год значению, и *модель-тренд*, прогноз которой линейно зависит от шага времени.

Величина *ошибки* рассчитывается как

$$100(1 - R_0^2), \quad (6)$$

где $R_0^2 = 1 - \frac{\sum (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum x_i^2}$; x_i – фактическое значение

объясняемой переменной; \hat{x}_i – прогнозируемое значение.

В каждой вершине *графов качества моделей* на рис. 7–10 приведены объясняющие переменные, соответствующие этим переменным коэффициенты в модели типа (4), а также величина ошибки (нижняя строчка в вершине). Зеленым цветом выделены вершины, лежащие на «критическом пути», соответствующем максимальному снижению ошибки, т. е. определяющем *оптимальную последовательность увеличения числа объясняющих переменных* (см. шестой вопрос, сформулированный во введении). На столбчатых диаграммах рис. 7–10 ошибка инерционной модели считается референсной (100%), относительно нее оценивается качество остальных моделей (изменение ошибки), в том числе моделей без стохастических переменных (5), а также моделей с дополнительными объясняющими переменными: константой, периодом (шагом времени), объемом постов за шаг (стандартизированным с учетом всего годового периода).

Переменная r_+ (доля мнений «за»): переменную r_+^{m+1} модель-среднее и модель-тренд объясняют хуже, чем модель с одной переменной r_+^m , но еще лучше объясняют модель динамики $0,96r_+^m + 0,04r_-^m$ и модель $0,91r_+^m + 0,04r_-^m + 0,04y_+^m$ (см. рис. 7).

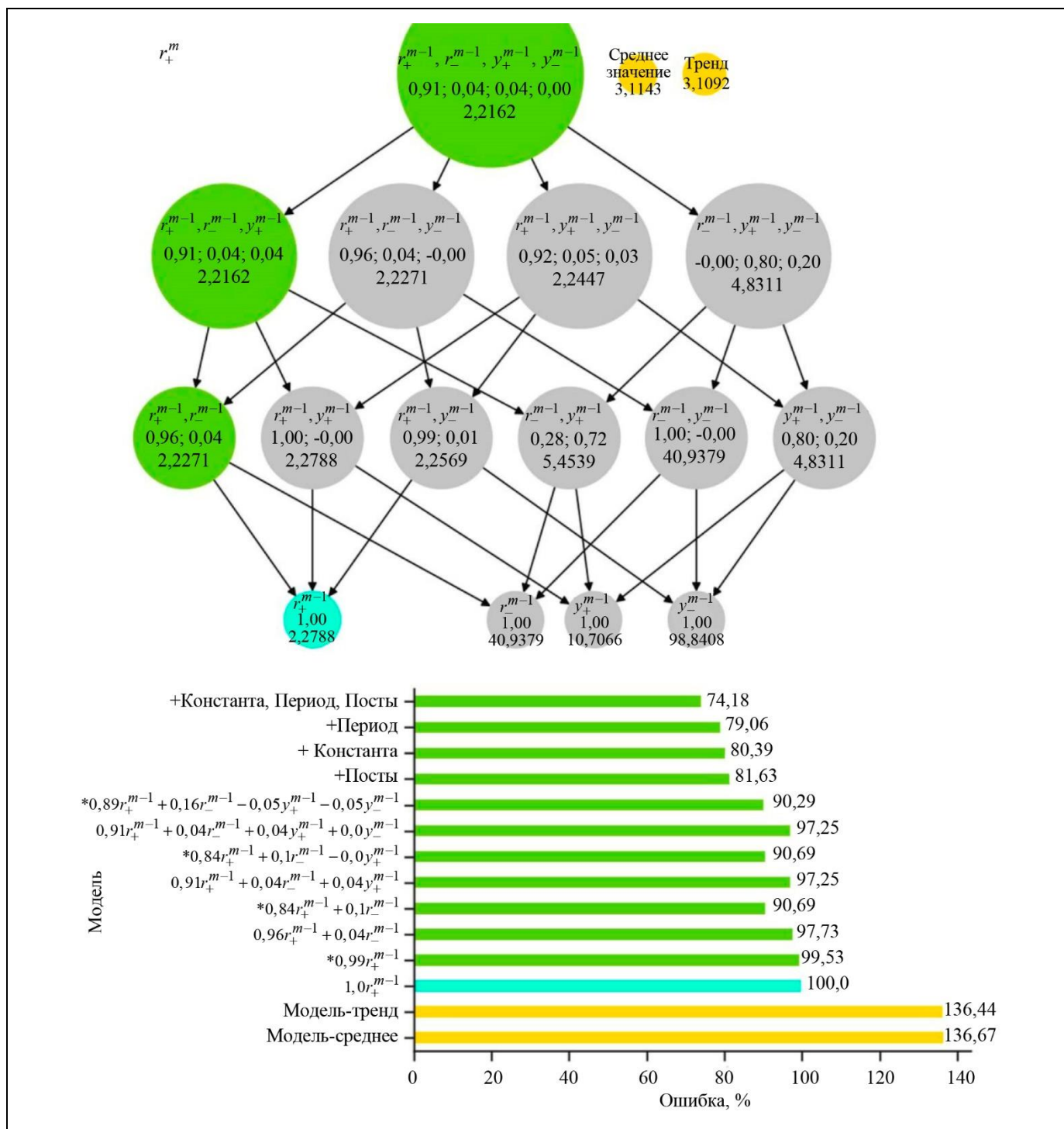
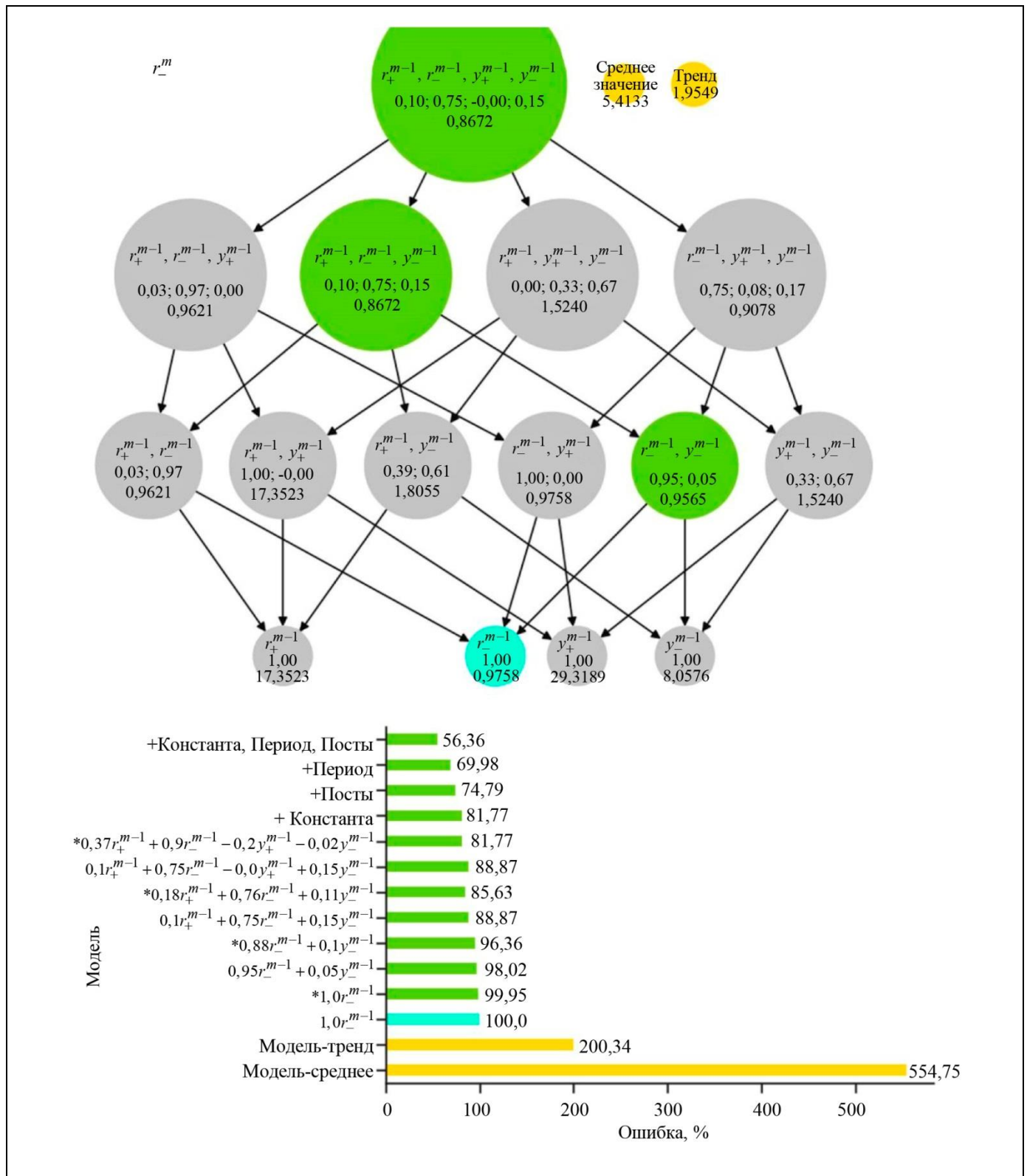


Рис. 7. Качество моделей для переменной r_+ (префикс «*» означает, что стохастические ограничения на коэффициенты модели не накладываются, префикс «+» означает, что к наиболее сложной модели (4) добавляются дополнительные переменные)

Переменная r_- (доля мнений «против»). Среди моделей с одной объясняющей переменной наилучшей является инерционная модель (модель-среднее и модель-тренд объясняют динамику гораздо хуже). С двумя – модель, которая учитывает

и мнение, и действие агента «против» $0,95r_-^m + 0,05y_-^m$. Модель с тремя переменными $0,1r_+^m + 0,75r_-^m + 0,15y_-^m$ позволяет достичь баланса между качеством и сложностью модели (см. рис. 8).


 Рис. 8. Качество моделей для переменной r .

Переменная y_+ (доля действий «за»): переменную y_+^{m+1} модель-среднее и модель-тренд объясняют точнее, чем модель с одной переменной

r_-^m , . В классе моделей со стохастическими ограничениями лучшие результаты показывает модель с двумя переменными $0,51r_+^m + 0,49y_+^m$ (см. рис. 9).

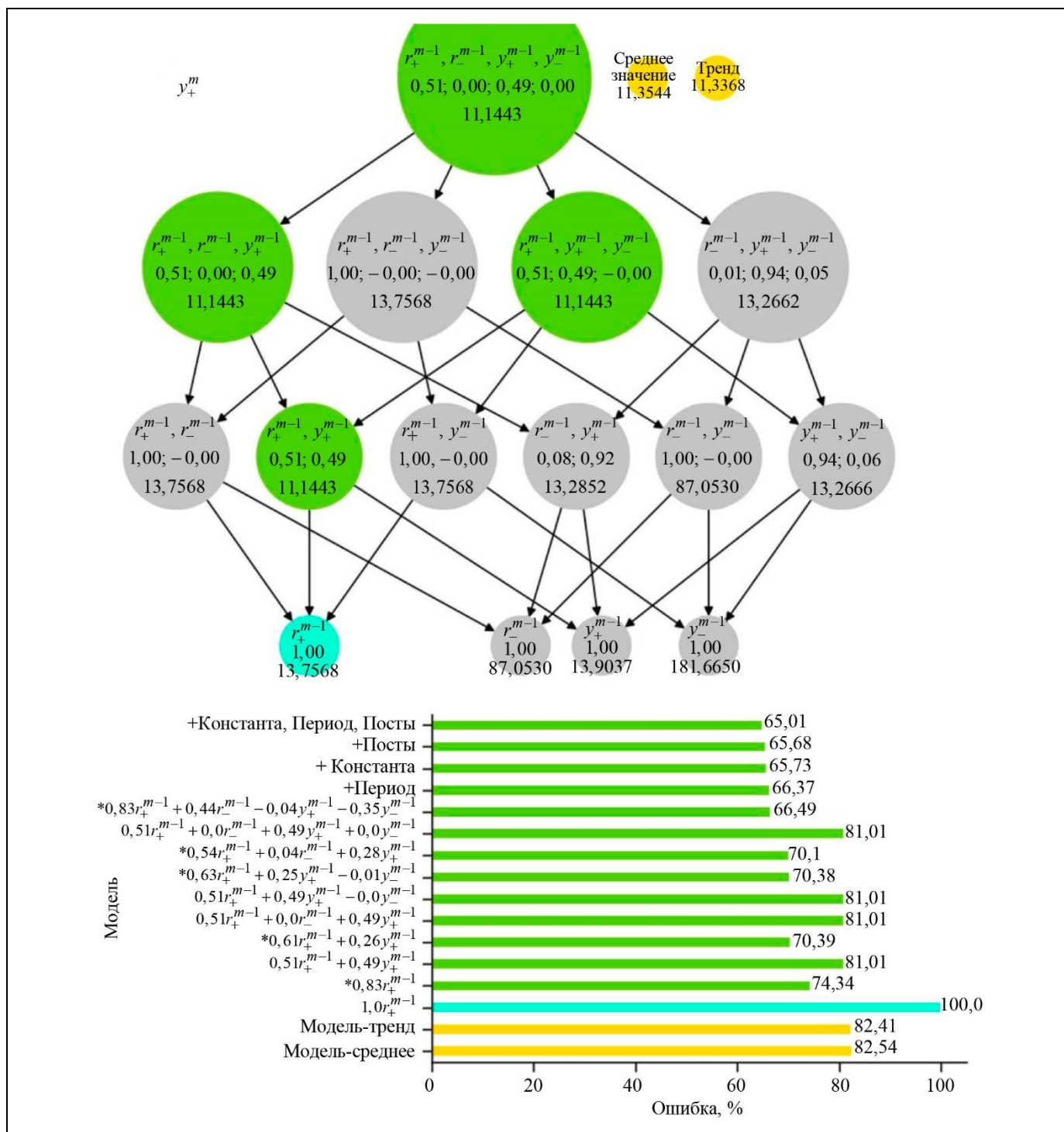


Рис. 9. Качество моделей для переменной y_+

Переменная y_- (доля действий «против»): переменную y_-^{m+1} модель-среднее и модель-тренд объясняют существенно хуже, чем модель с одной переменной y_-^m (инерционная модель). «Сбалансированное» качество показывает модель с двумя

объясняющими переменными $0,22r_-^m + 0,78y_-^m$ (см. рис. 10).

Построим теперь прогноз совместной динамики мнений и действий при помощи макромоделли без стохастических ограничений на коэффициенты и со свободным членом – константой (рис. 11).

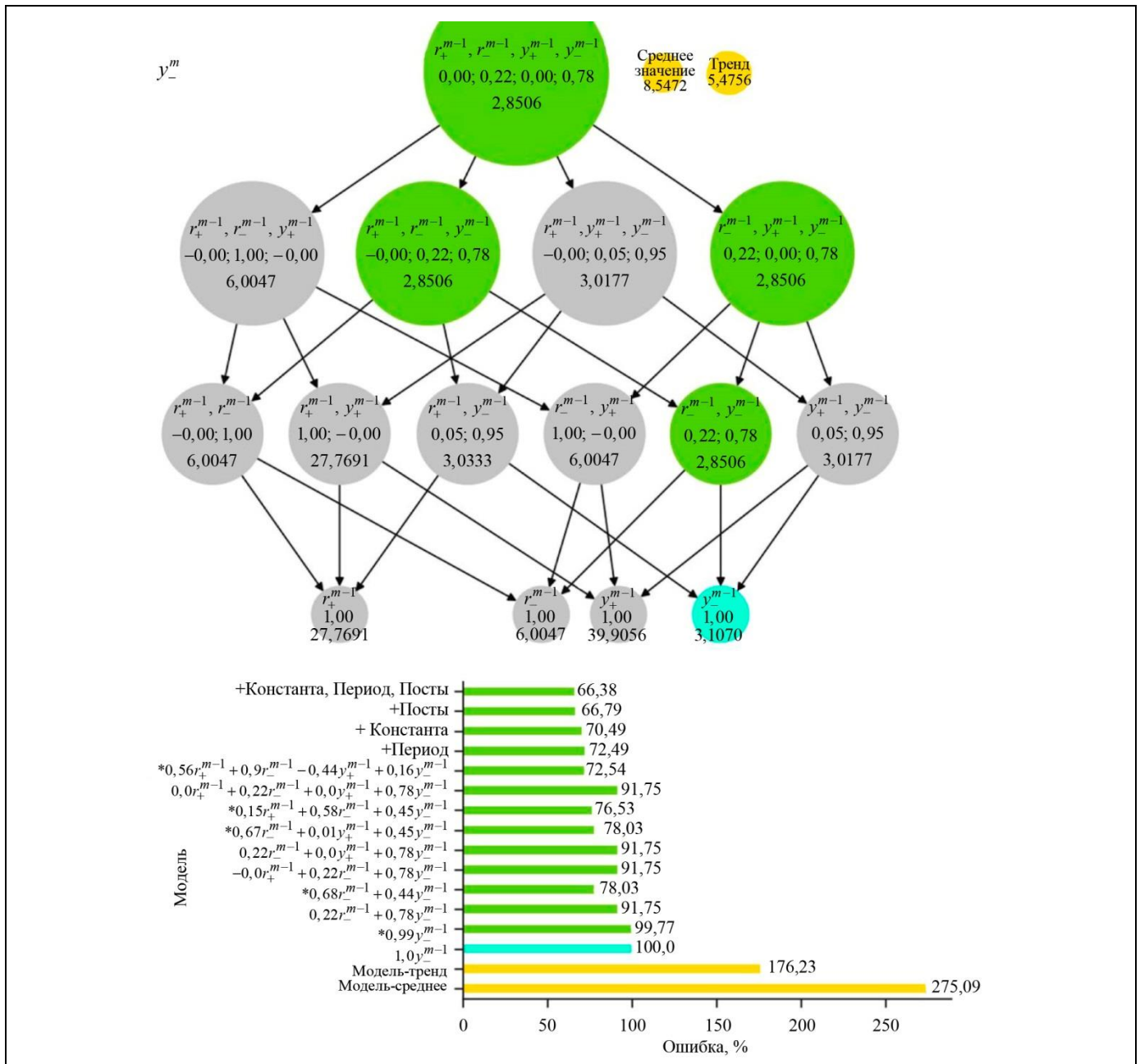
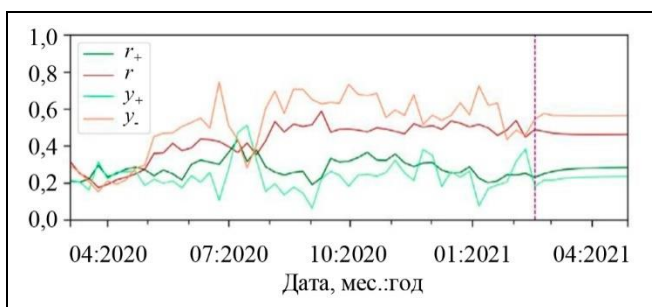

 Рис. 10. Качество моделей для переменной y_-


Рис. 11. Прогноз динамики мнений и действий (вертикальная линия разделяет фактические значения и прогнозные значения)

Оказывается, система довольно быстро достигает равновесия:

- $r_+^* = 0,28, r_-^* = 0,47,$
- $y_+^* = 0,24, y_-^* = 0,57.$

В целом, для исследования сложных закономерностей динамики мнений и действий следует учитывать влияние внешних факторов на сеть, а для решения задачи прогноза перспективным является применение нелинейных моделей.



Обсудим неформально полученные в данном разделе результаты для *макромодели* («причинно-следственной» взаимосвязи «усредненных» характеристик агентов).

Во-первых, даже «инерционная» модель с одной объясняющей переменной лучше отражает динамику объясняемой переменной, чем модель-среднее и модель-тренд (за исключением инерционной модели динамики доли действий «за», y_+). Включение в модель дополнительных объясняющих переменных – мнений и действий – приводит, конечно, к улучшению ее качества. При этом модель динамики r_+ является практически полностью инерционной (хотя отчасти и определяется переменными r_- и y_+). На значение переменной y_+ в текущий момент времени «поровну» влияют значения переменных r_+ и y_+ в предыдущий момент времени. Переменная r_- «зависит» от r_- на 75 %, от y_- на 15 % и на 10 % от r_+ (влияние этой переменной, возможно, отражает эффект реактивного сопротивления). Переменная y_- определяется на 78 % переменной y_- и на 22 % переменной r_- .

Во-вторых, происходит однозначное повышение качества при снятии стохастических ограничений (5) на коэффициенты модели: меньше для моделей динамики мнений (на ~7 %) и больше для моделей динамики действий (на ~15 %). Возможно, такое ослабление ограничений для модели динамики действий позволяет лучше учесть разнонаправленность воздействий мнений (возбуждающий эффект) и противоположных действий (тормозящий эффект).

В-третьих, добавление константы, периода времени (возможно, отражающего изменение настроений в обществе с развитием пандемии) и объема исходных постов (возможно, объясняющего внешнее информационное «управление») дает очередной прирост качества моделей динамики мнений на 18–31 % и моделей динамики действий на 2–8 %. Представляется, что эти факторы оказывают опосредованное мнениями влияние на действия агентов.

Таким образом, с одной стороны, можно сделать вывод о наличии двусторонней взаимосвязи между действиями и мнениями агентов в сети. С другой стороны, при моделировании желательно учитывать также и внешние по отношению к сети факторы.

3.2. Микромодели

Перейдем к моделированию и анализу динамики мнений и действий на *микроуровне*. В таких моделях рассматривается динамика мнений и действий агента $i \in N$, который в течение интервала времени τ совершает акты «за» и «против»:

• $\delta_i^\pm(\tau) = \{a \in \delta_i \mid f_t(a) \in \tau, r'(a) \in \{0, 1\}\}$ – множество актов,

• $\delta_{i,1}^\pm(\tau) = \{a \in \delta_i^\pm(\tau) \mid f_k(a) = 1\}$ – множество комментариев,

• $\delta_{i,2}^\pm(\tau) = \{a \in \delta_i^\pm(\tau) \mid f_k(a) = 2\}$ – множество лайков.

На агента i оказывают воздействие следующие факторы.

• *Воздействие всей сети*

$$\circ \bar{r}_i(\tau) = \frac{\sum_{a \in \Delta(\tau) \mid f_k(a)=1, r'(a) \in \{0,1\}} r(a)}{\left| \{a \in \Delta(\tau) \mid f_k(a) = 1, r'(a) \in \{0, 1\}\} \right|} \in [-1; 1],$$

$$\circ \bar{y}_i(\tau) = \frac{\sum_{a \in \Delta(\tau) \mid f_k(a)=2, r'(a) \in \{0,1\}} r(a)}{\left| \{a \in \Delta(\tau) \mid f_k(a) = 2, r'(a) \in \{0, 1\}\} \right|} \in [-1; 1].$$

Сетевое воздействие является массовым/фоновым для агента: учитываются все мнения и действия сети безотносительно того, информирован о них агент или нет.

• *Воздействие на агента его собственных действий и мнений:*

$$\circ \bar{r}_i(\tau) = \frac{\sum_{a \in \delta_{i,1}^\pm(\tau)} r(a)}{\left| \delta_{i,1}^\pm(\tau) \right|},$$

$$\circ \bar{y}_i(\tau) = \frac{\sum_{a \in \delta_{i,2}^\pm(\tau)} r(a)}{\left| \delta_{i,2}^\pm(\tau) \right|}.$$

• *Косвенное воздействие друзей на мнение/действие агента $h \in [-1; 1]$:*

$$\circ \bar{r}_{N_i}(\tau) = \sum_{j \in N_i, \delta_{j,1}^\pm(\tau) \neq \emptyset} e_{ij} \frac{\sum_{a \in \delta_{j,1}^\pm(\tau)} E_i(h, r(a)) r(a)}{\left| \delta_{j,1}^\pm(\tau) \right|},$$

$$\circ \bar{y}_{N_i}(\tau) = \sum_{j \in N_i, \delta_{j,2}^\pm(\tau) \neq \emptyset} e_{ij} \frac{\sum_{a \in \delta_{j,2}^\pm(\tau)} E_i(h, r(a)) r(a)}{\left| \delta_{j,2}^\pm(\tau) \right|},$$

где $e_{ij} \in [0; 1]$ – доверие агента к другу j , $\sum_{j \in N_i} e_{ij} = 1$,

E_i – функция доверия агента к информации (область значений $[0; 1]$). Здесь оценивается воздействие на мнение (или на действие), высказанное агентом в начале интервала τ .

В итоге изменение мнения агента $i \in N$ между последовательными моментами его высказываний $m-1$ и m (которые задают интервал времени $\tau = [t_{m-1}; t_m]$) определяется воздействием сети

$(\bar{r}_i^{m-1} = \bar{r}_i(\tau), \bar{y}_{-i}^{m-1} = \bar{y}_{-i}(\tau))$, воздействием действий агента $(\bar{y}_i^{m-1} = \bar{y}_i(\tau))$ и воздействием друзей $(\bar{r}_{N_i}^{m-1} = \bar{r}_{N_i}(\tau), \bar{y}_{N_i}^{m-1} = \bar{y}_{N_i}(\tau))$. В свою очередь, изменение действия агента $i \in N$ между последовательными моментами совершения действий $l-1$ и l ($\tau = [t_{l-1}; t_l]$) определяется воздействием сети $(\bar{r}_i^{l-1} = \bar{r}_i(\tau), \bar{y}_{-i}^{l-1} = \bar{y}_{-i}(\tau))$, воздействием мнений агента $(\bar{r}_i^{l-1} = \bar{r}_i(\tau))$ и воздействием друзей $(\bar{r}_{N_i}^{l-1} = \bar{r}_{N_i}(\tau), \bar{y}_{N_i}^{l-1} = \bar{y}_{N_i}(\tau))$.

Построим соответствующие микромодели совместной динамики мнений и действий. В качестве примера приведем одну из возможных моделей динамики мнений:

$$\begin{aligned}
 r_i^m = & (1 - \beta_{i1} - \beta_{i2} - \beta_{i3})r_i^{m-1} + \\
 & + \beta_{i1}\bar{r}_i^{m-1} + \beta_{i2}\bar{y}_i^{m-1} + \beta_{i3}\bar{y}_{-i}^{m-1},
 \end{aligned} \quad (7)$$

где $m=1, 2, \dots$, $\beta_{i1}, \beta_{i2}, \beta_{i3} \geq 0$, $\beta_{i1} + \beta_{i2} + \beta_{i3} \leq 1$.

Возможные варианты моделей динамики мнений типа (7) приведены в табл. 2, для таких вариантов необходимо оценить соответствующие зависимости между переменными. Аналогичную таблицу можно составить для вариантов модели динамики действий.

Микромодели динамики мнений и действий построены для *значимых агентов*³. Для оценки влияния друзей на значимых агентов был выполнен дополнительный сбор информации о первых, были собраны все опубликованные на стенах друзей посты (за указанный ранее период), а также комментарии к ним и лайки. При помощи таких данных были идентифицированы мнения и действия друзей.

Линейные модели. В линейных микромоделях агент «усредняет» свое мнение с мнениями тех агентов, с которыми взаимодействует и которым доверяет (согласовывает с ними свое мнение). Последовательно рассмотрим все более сложные виды линейных микромоделей, которые являются частными случаями модели (2)–(3):

(I) микромодели, в которых изменение мнений и действий объясняется воздействием сети;

(II) унифицированные микромодели, в которых учитывается воздействие как сети, так и друзей;

(III) персонифицированные микромодели, в которых учитывается воздействие как сети, так и

друзей, при этом функции доверия агентов позволяют учесть индивидуальные особенности агентов.

Таблица 2

Варианты моделей динамики мнений

Зависимости между переменными		\bar{r}_i^{m-1}	\bar{y}_i^{m-1}	\bar{y}_{-i}^{m-1}
I	$r_i^m(r_i^{m-1})$			
II	$r_i^m(r_i^{m-1}, \bar{r}_i^{m-1})$	+		
III	$r_i^m(r_i^{m-1}, \bar{y}_i^{m-1})$		+	
IV	$r_i^m(r_i^{m-1}, \bar{y}_{-i}^{m-1})$			+
V	$r_i^m(r_i^{m-1}, \bar{r}_i^{m-1}, \bar{y}_i^{m-1})$	+	+	
VI	$r_i^m(r_i^{m-1}, \bar{r}_i^{m-1}, \bar{y}_{-i}^{m-1})$	+		+
VII	$r_i^m(r_i^{m-1}, \bar{y}_i^{m-1}, \bar{y}_{-i}^{m-1})$		+	+
VIII	$r_i^m(r_i^{m-1}, \bar{r}_i^{m-1}, \bar{y}_i^{m-1}, \bar{y}_{-i}^{m-1})$	+	+	+

(I) Линейные микромодели с макропеременными

В такого рода моделях будем оценивать изменение мнений/действий агента в текущий момент времени в зависимости от мнения и действий агента в предыдущий момент времени и фонового воздействия всей сети:

$$r_i^m = \beta_{i10} + \beta_{i11}r_i^{m-1} + \beta_{i12}\bar{r}_i^{m-1} + \beta_{i13}\bar{y}_i^{m-1} + \beta_{i14}\bar{y}_{-i}^{m-1}, \quad (8)$$

где $m=1, 2, \dots$ ⁴, $\beta_{i10}, \beta_{i11}, \beta_{i12}, \beta_{i13}, \beta_{i14} \in \mathbb{R}$.

$$y_i^l = \beta_{i20} + \beta_{i21}\bar{r}_i^{l-1} + \beta_{i22}\bar{r}_i^{l-1} + \beta_{i23}y_i^{l-1} + \beta_{i24}\bar{y}_{-i}^{l-1}, \quad (9)$$

где $l=1, 2, \dots$, $\beta_{i20}, \beta_{i21}, \beta_{i22}, \beta_{i23}, \beta_{i24} \in \mathbb{R}$.

Отметим, что для целей данной работы анализ коэффициентов исследуемых микромоделей (и, соответственно, их статистическая значимость) не имеет большого значения, бóльший интерес представляют вклады тех или иных факторов, оцениваемые по результатам сравнения различных микромоделей динамики мнений и действий.

На рис. 12 представлен *граф качества* семейства моделей (8)–(9); каждой вершине соответствуют модели агентов с приведенными на ней объясняющими переменными (здесь константа равна нулю, а остальные коэффициенты являются «стохастическими», т. е. они неотрицательные и их сумма равна единице). Для каждой вершины приведена средняя величина ошибки ее моделей⁵.

³ Агенты, проявившие в сети минимально необходимую для моделирования активность. Критерии отбора значимых агентов приведены в предыдущей части исследования [1].

⁴ Для каждого агента эти моменты времени, естественно, свои.

⁵ Напомним, что ошибка рассчитывается по формуле (6).

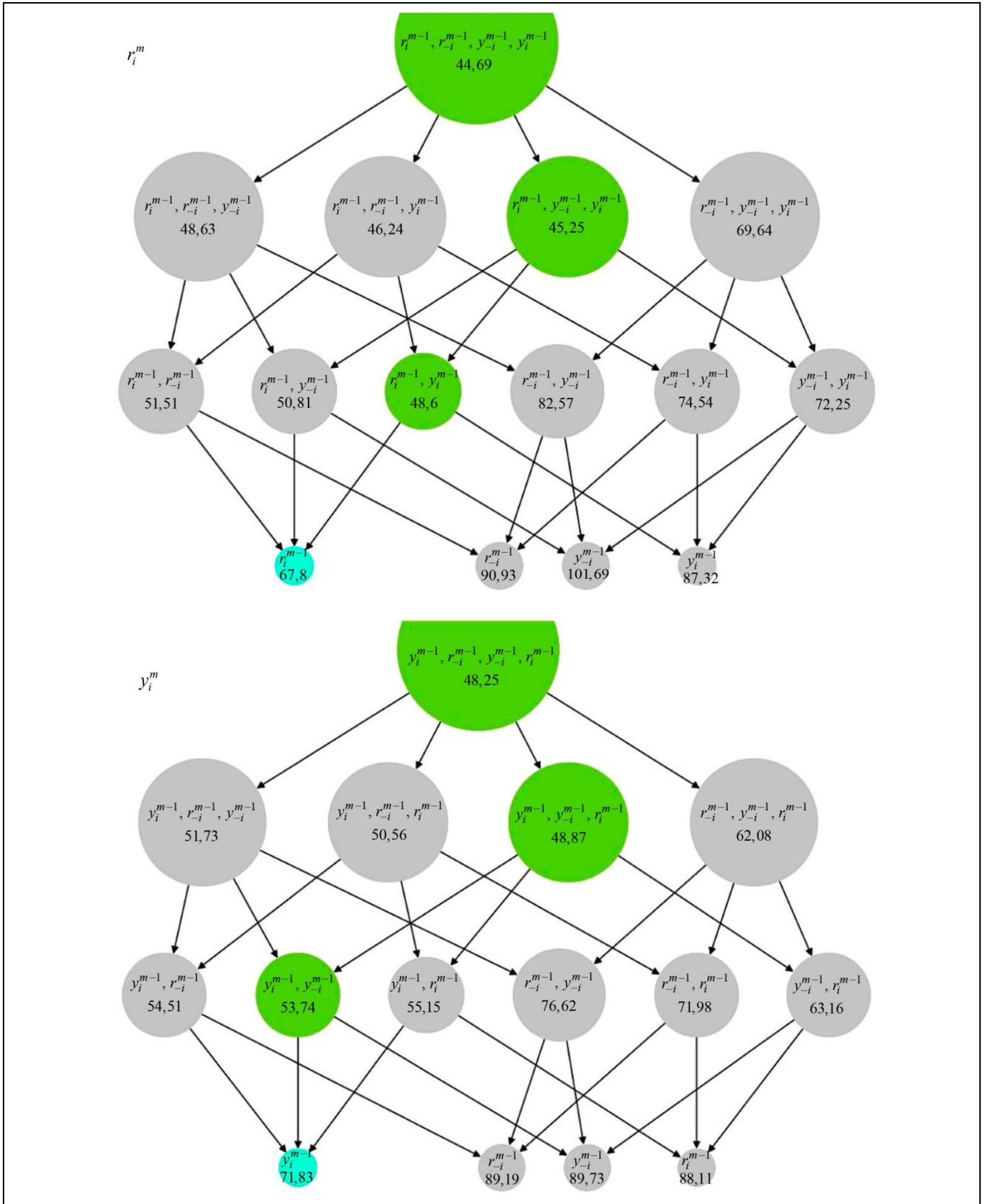


Рис. 12. Усредненное качество микромоделей динамики мнений и действий

На рис. 13 представлен граф качества моделей (8)–(9) без стохастических ограничений на коэффициенты.

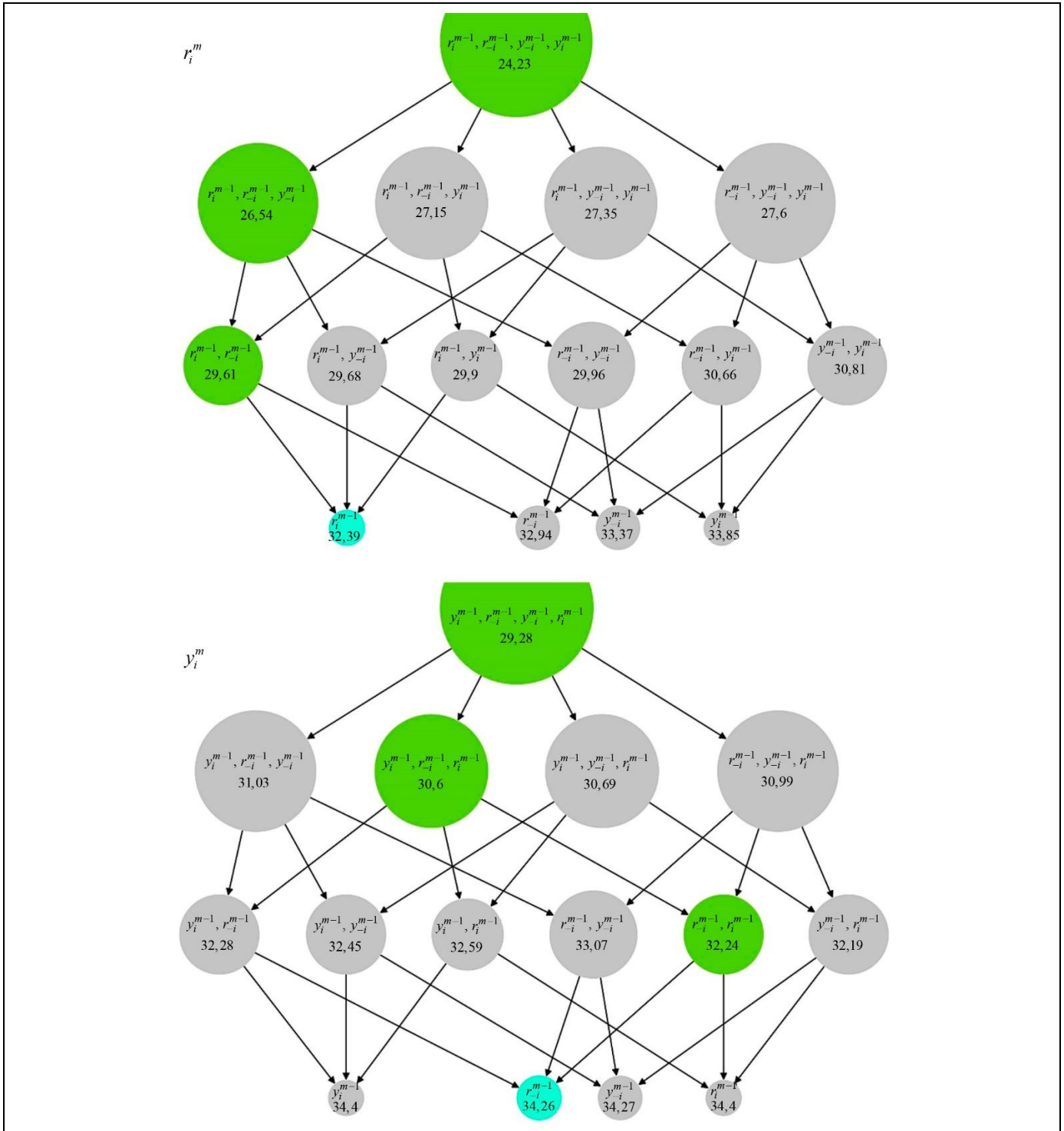


Рис. 13. Усредненное качество моделей (без стохастических ограничений и с учетом константы)

Сравним качество моделей динамики мнений и действий (8)–(9) с инерционной моделью⁶ по величине уменьшения ошибки. Для этого приведем на

⁶ Напомним, что инерционной называется модель, которая прогнозирует, что «завтра» будет то же самое, что и «сегодня».

рис. 14 распределение моделей агентов по величине уменьшения ошибки.

Учет воздействий сети и влияния агента на самого себя позволяет существенно улучшить качество микромоделей мнений и действий: для половины агентов значение ошибки уменьшилось как минимум на 60 % (для моделей динамики мнe-

ний) и на 57 % (для моделей динамики действий) по сравнению с инерционной моделью, а для пятой части агентов как минимум на 70 % и 68 % соответственно. Приведем пример модели динамики мнений одного из агентов (рис. 15).

Пример иллюстрирует, что воздействие сети (мнений и действий остальных агентов) приводит к изменению мнения агента.

(II) Унифицированные линейные микромоделли

В такого рода моделях будем оценивать изменение мнений и действий агента в зависимости от мнения и действий агента в предыдущий момент времени, воздействия всей сети и воздействия друзей этого агента. Каждый агент не «различает» друзей (рассматривает друзей как одного мета-

агента) и доверяет получаемой информации независимо от ее содержания:

$$r_i^m = \beta_{i10} + \beta_{i11}r_i^{m-1} + \beta_{i12}\bar{r}_{-i}^{m-1} + \beta_{i13}\bar{y}_i^{m-1} + \beta_{i14}\bar{y}_{-i}^{m-1} + \beta_{i15}\bar{r}_{N_i}^{m-1} + \beta_{i16}\bar{y}_{N_i}^{m-1}, \quad (10)$$

где $m=1, 2, \dots$, $\beta_{i10}, \beta_{i11}, \beta_{i12}, \beta_{i13}, \beta_{i14}, \beta_{i15}, \beta_{i16} \in \mathbb{R}$,

$$y_i^l = \beta_{i20} + \beta_{i21}\bar{r}_i^{l-1} + \beta_{i22}\bar{r}_{-i}^{l-1} + \beta_{i23}y_i^{l-1} + \beta_{i24}\bar{y}_{-i}^{l-1} + \beta_{i25}\bar{r}_{N_i}^{l-1} + \beta_{i26}\bar{y}_{N_i}^{l-1}, \quad (11)$$

где $l=1, 2, \dots$, $\beta_{i20}, \beta_{i21}, \beta_{i22}, \beta_{i23}, \beta_{i24}, \beta_{i25}, \beta_{i26} \in \mathbb{R}$.

Отметим, что в персонифицированных моделях, помимо коэффициентов, подбираются виды функций доверия при расчете воздействий со стороны друзей, т. е. переменных $\bar{r}_{N_i}^{m-1}$ и $\bar{y}_{N_i}^{m-1}$.

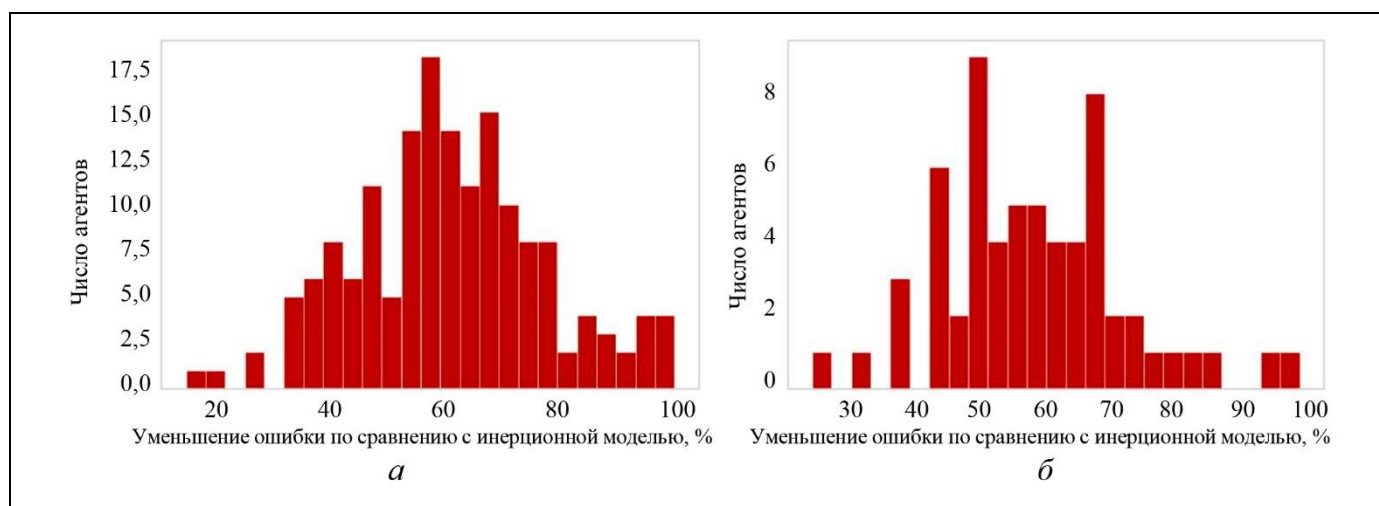


Рис. 14. Распределение моделей агентов по уменьшению ошибки (в процентах от ошибки инерционной модели): *a* – модели динамики мнений, *б* – модели динамики действий

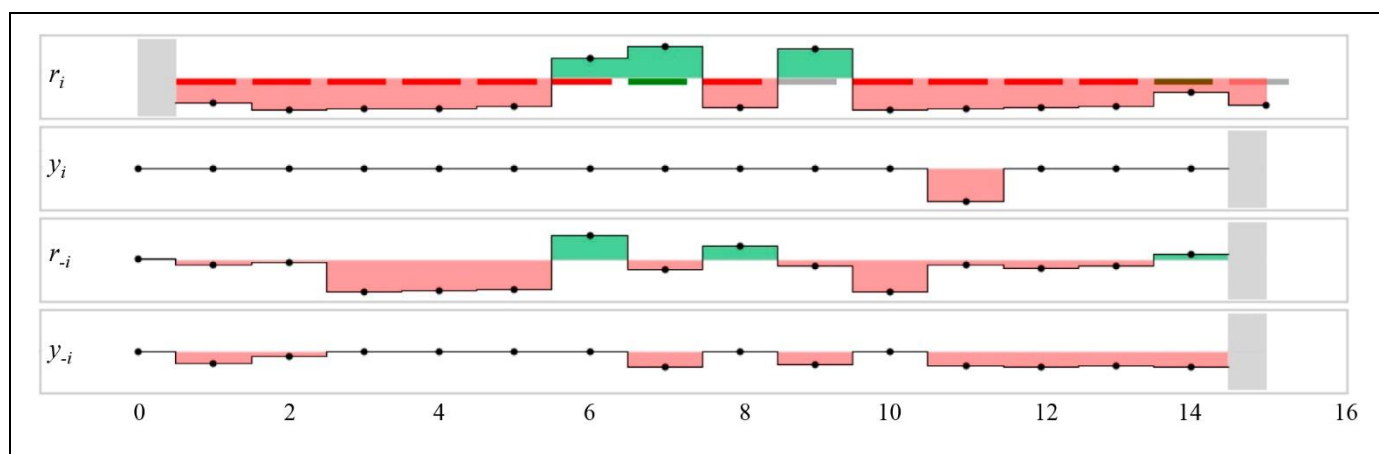


Рис. 15. Пример динамики переменных для одного из агентов

В унифицированных моделях для всех агентов при расчете переменных используется одна и та же функция доверия.

Сравним качество моделей динамики мнений и действий (10)–(11) с инерционной моделью по величине уменьшения ошибки (рис. 16).

Учет мнений и действий соседей агента позволяет улучшить качество микромоделей динамики мнений и действий: для половины агентов значение ошибки уменьшилось как минимум на 67 % и 61 % (соответственно для моделей мнений и моделей действий) по сравнению с инерционной моделью, а для пятой части агентов как минимум на 85 % и 75 % (в среднем на 68 % и 62 %).

Если нет необходимости и/или возможности для включения в модель всех переменных, то тогда

достаточно выбрать некоторое подмножество переменных, дающее наибольшее снижение ошибки. Для оценки такой возможности попробуем определить наилучшие в среднем модели агентов в зависимости от числа объясняющих переменных. Зависимость усредненной ошибки моделей от числа переменных показана на рис. 17 (на горизонтальной оси приведены переменные, включаемые в модель в оптимальной (убывающие кривые выпуклы) последовательности).

Отметим, что наилучшей (в среднем) микромоделью динамики мнений с одной объясняющей переменной является инерционная модель, а наилучшей моделью динамики действий с одной объясняющей переменной – та, в которой действие зависит от мнений сети в целом.

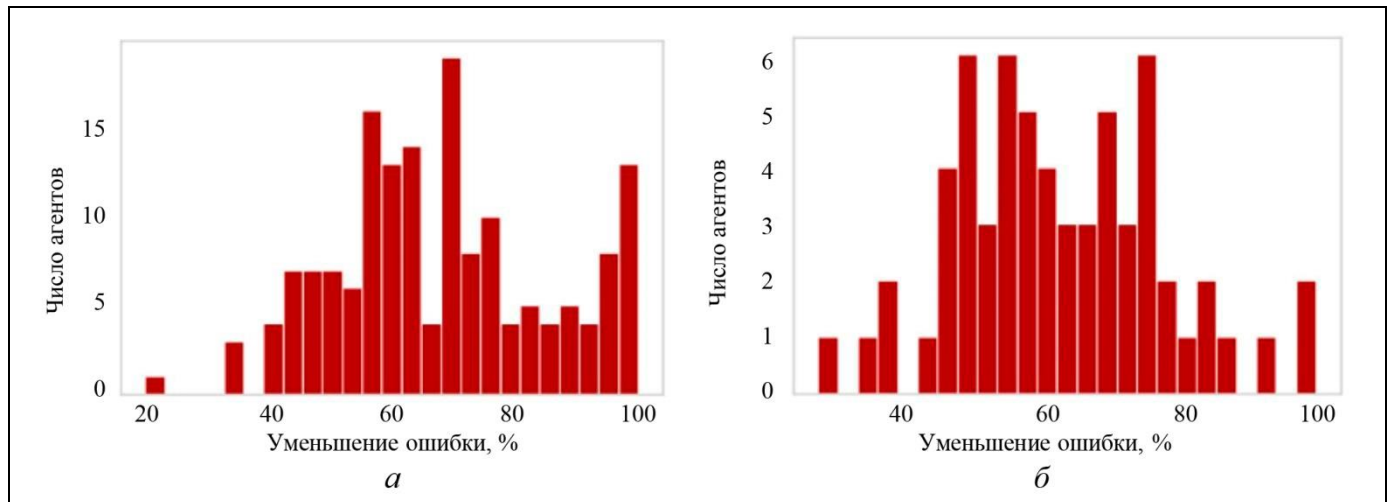


Рис. 16. Распределение моделей агентов по уменьшению ошибки (в процентах от ошибки инерционной модели): a – модели динамики мнений, $б$ – модели динамики действий

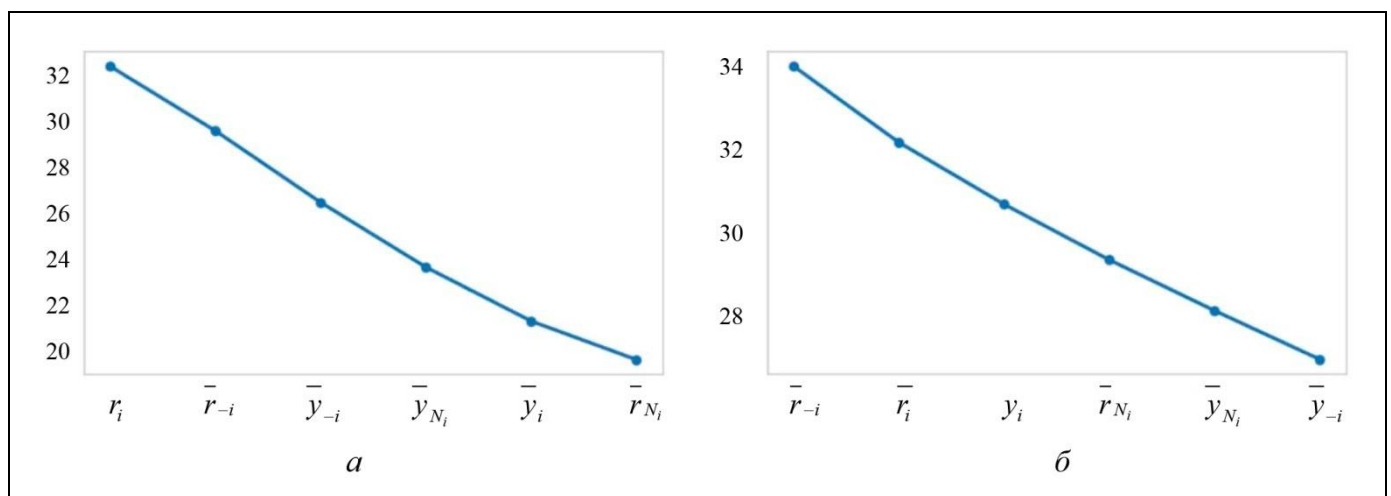


Рис. 17. Среднее качество семейства моделей (10)–(11): $a - r_i^m$, $б - y_i^m$

Рассмотрим теперь ситуацию, в которой оценивается значимость каждой отдельно взятой переменной. Зафиксируем одну из независимых переменных и рассмотрим наилучшие в среднем модели, которые ее не содержат. Насколько мы можем улучшить качество моделей каждого класса (толь-

ко с одной переменной, только с двумя и т. д.), если добавим в нее зафиксированную переменную? Прирост качества моделей динамики мнений показан на графиках рис. 18, а качества моделей динамики действий на рис. 19 (см. определение ошибки модели (6)).

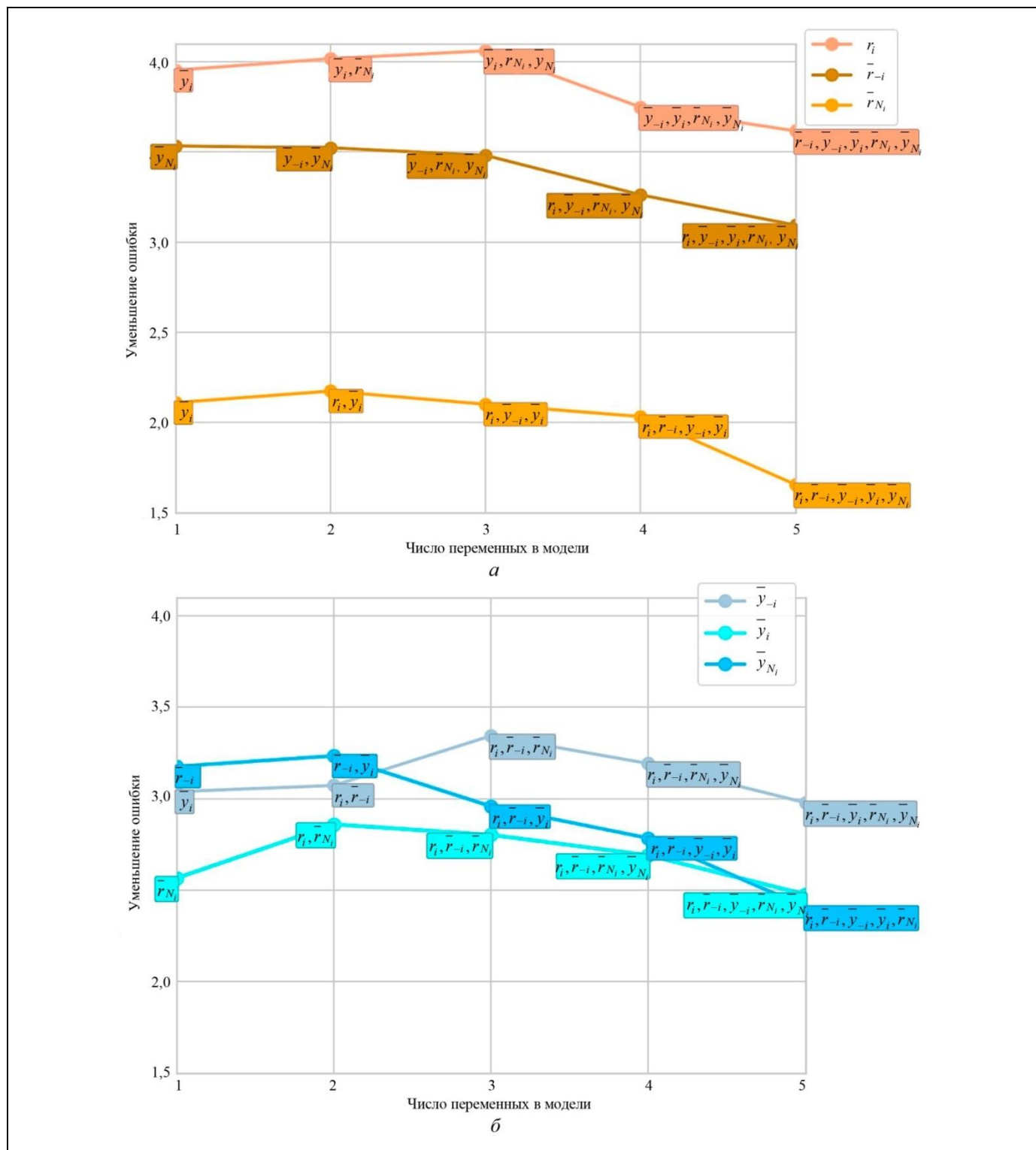


Рис. 18. Улучшение качества моделей динамики мнений при помощи заданных переменных (по горизонтальной оси указаны входящие в модель переменные, по вертикальной – величина уменьшения ошибки): а – зафиксированы переменные мнений, б – переменные действий

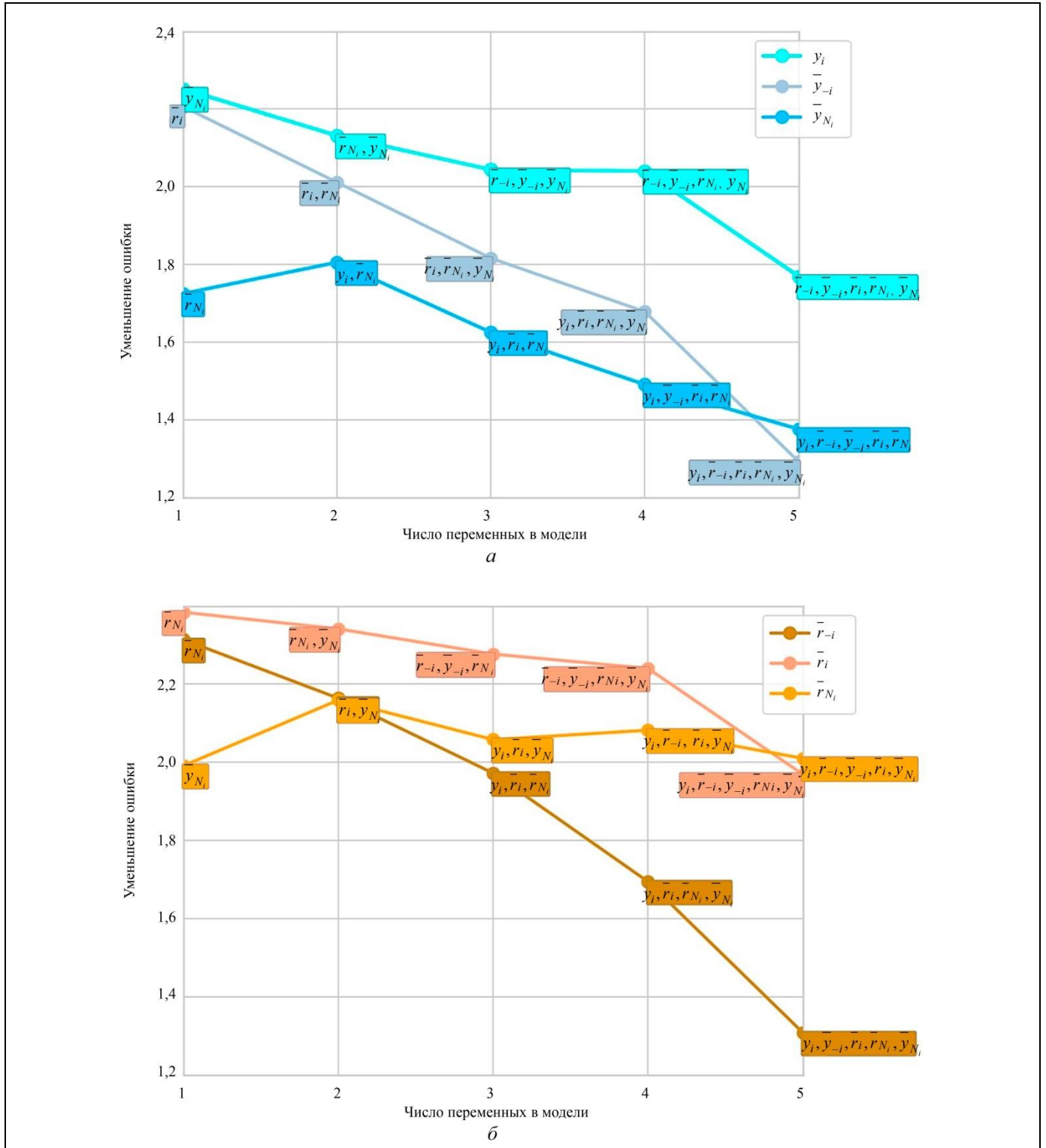


Рис. 19. Улучшение качества моделей динамики действий при помощи заданных переменных (по горизонтальной оси указаны входящие в модель переменные, по вертикальной – величина уменьшения ошибки): а – зафиксированы переменные действий, б – переменные мнений

Как можно видеть, наибольший эффект для микромоделей динамики мнений дает переменная r_i^{m-1} (мнение в предыдущий момент времени), наименьший – переменная \bar{r}_{N_i} (мнения друзей).

В целом, включение отдельных переменных в микромоделей динамики действий дает меньшую отдачу по сравнению с включением в модели динамики мнений. Наибольшее снижение ошибки

для моделей динамики действий дает переменная \bar{f}_i^{m-1} (мнения агента), наименьший – переменная \bar{y}_{N_i} (действия друзей). При этом эффект при увеличении числа переменных в модели в целом снижается, но не монотонно.

(III) Персонализированные линейные микромоделли

В персонализированных моделях для каждого агента подбирается наилучшая конфигурация гиперпараметров линейной модели: вид функции доверия к информации и вид функции доверия к друзьям.

В качестве типовых рассмотрим следующие виды функций доверия к информации $E(\cdot)^7$:

• $E_C(h, g) = 1$ (агентов с такой функцией назовем *доверчивыми*);

$$E_\varepsilon^+(h, g) = \begin{cases} 1 - (h - g)^2, & h, g \in (0; 1), \\ \varepsilon > 0, & (h - g)^2 = 1, \end{cases}$$

где $\varepsilon > 0$ – сколь угодно малая строго положительная константа (*агенты-консерваторы*);

• $E_\varepsilon^-(h, g) = \min\{\varepsilon + (h - g)^2, 1\}$, где $\varepsilon > 0$ (*агенты-новаторы*).

В качестве типовой функции доверия к соседям $e(\cdot)$ рассмотрим «не дифференцирующую» функцию (агент рассматривает друзей как одного мета-агента), а также функции, в которых доверие к другу пропорционально⁸:

- единице;
- числу друзей друга;
- числу общих друзей с этим другом;
- единице (если друг активен, т.е. имеет мнение или совершает действия);
- числу друзей друга (если друг активен);
- числу общих друзей с другом (если друг активен);
- активности друга по комментариям;
- активности друга по лайкам, популярности друга.

Модели динамики мнений. Индивидуальный подбор функций доверия позволил уменьшить значение ошибки инерционной модели в среднем

⁷ Введенные функции доверия отражают основные гипотезы в современных исследованиях о поведении индивидов в социальных сетях.

⁸ Для удовлетворения требования «стохастичности» ограничения.

на 77 % (как минимум на 78 % для половины агентов и на 97 % для пятой части агентов, рис. 20).

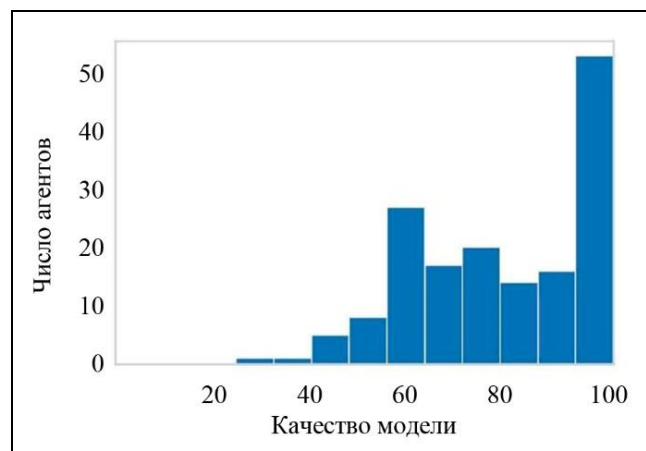


Рис. 20. Распределение персонализированных моделей динамики мнений агентов по уменьшению ошибки (в процентах от ошибки инерционной модели)

В целом средняя ошибка линейных микромоделли динамики мнений уменьшается по мере их усложнения (рис. 21): наибольшую ошибку дает инерционная модель, меньшую – модель с макропеременными и унифицированная модель, а наименьшую – персонализированная модель. Переход от унифицированной к персонализированной модели приводит уменьшению ошибки с 20 до 14 (напомним, что ошибка (б) принимает значение от 0 до 100).

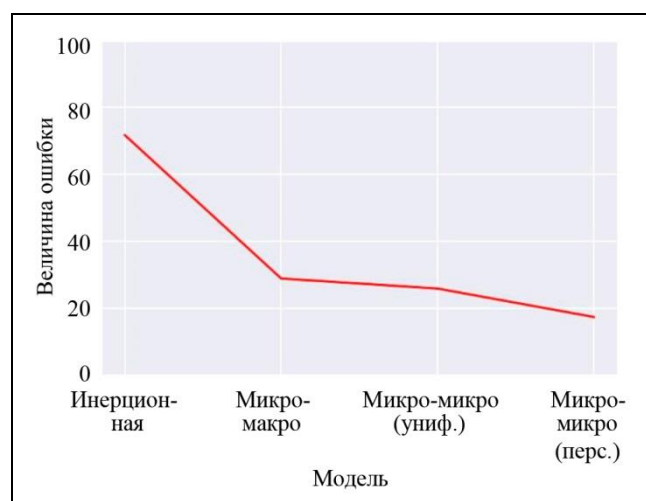


Рис. 21. Улучшение качества линейных моделей действий

Модели динамики действий. Индивидуальный подбор функции доверия позволил уменьшить значение ошибки инерционной модели в среднем

на 74% (как минимум на 74 % для половины агентов и на 92 % для пятой их части, рис. 22). В этом случае переход от унифицированной к персонализированной модели снижает ошибку с 26 до 17.

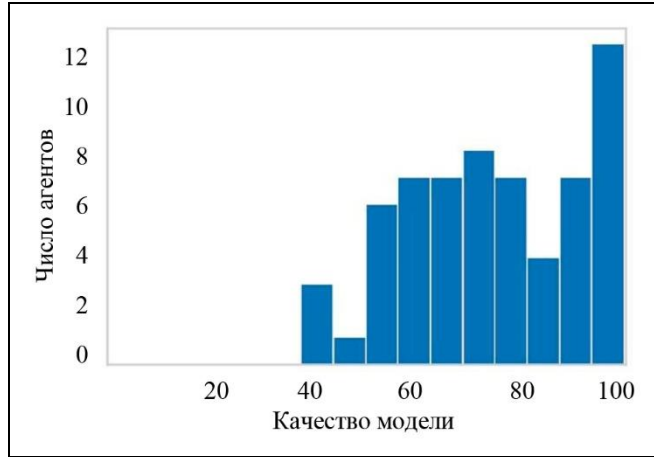


Рис. 22. Распределение персонализированных моделей динамики действий агентов по уменьшению ошибки (в процентах от ошибки инерционной модели)

Вывод по классам микромоделей динамики действий аналогичен выводу относительно микромоделей динамики мнений (рис. 23): наибольшую среднюю ошибку дает инерционная модель, меньшую – модель с макропеременными и унифицированная модель, наименьшую – персонализированная модель.

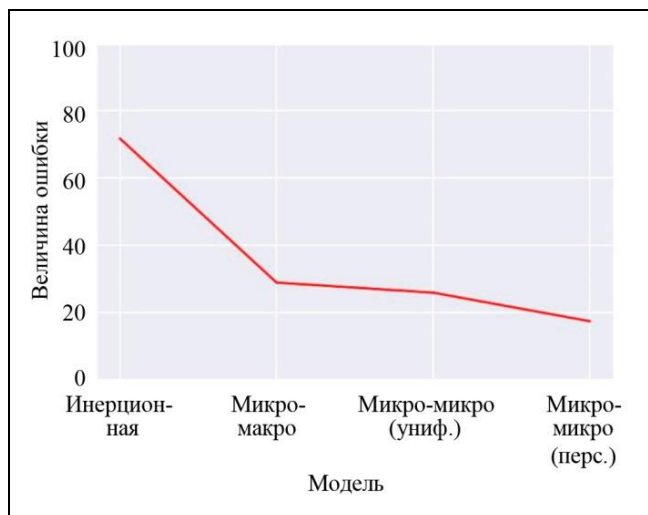


Рис. 23. Улучшение качества линейных моделей действий

Итак, мы получили частичный ответ на шестой вопрос, сформулированный во введении. Перейдем к седьмому вопросу.

Анализ значимости функций доверия, классы агентов. Оценим предпочтительность выбранных функций доверия и выделим классы агентов (или типы агентов) на основании того, как они доверяют друзьям и как доверяют поступающей к ним информации (подчеркнем, что вопрос о свойствах доверия агента своим соседям является одним из наиболее значимых в современных исследованиях моделей динамики мнений в социальных сетях).

А. Персонализированные модели динамики мнений

Предпочтительность вида функции доверия к информации. Оказывается, что для 30 % агентов выбор функции доверия не влияет на качество наилучшей для агента модели. Для трети агентов (36 %) наилучшим является выбор функции доверия E_c^- (чем больше разница в оценках, тем больше доверие). Для четверти агентов (25 %) наилучшим выбором является функция E_c^+ (чем меньше разница в оценках, тем больше доверие). На рис. 24 приведена диаграмма Эйлера – Венна для трех множеств агентов: множества агентов, для которых наиболее предпочтительной является функция доверия E_c^+ ; множества агентов, для которых предпочтительна функция E_c^- ; и множества агентов, для которых предпочтительна функция E_c .

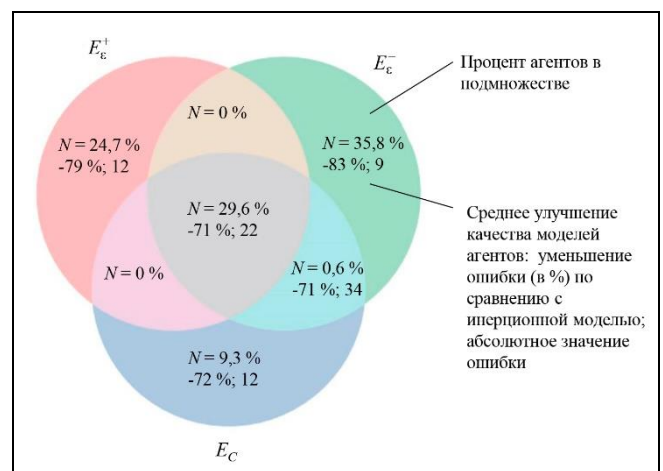


Рис. 24. Диаграмма Эйлера – Венна предпочтительности видов функций доверия к информации для моделей динамики мнений

Если рассматривать модели для агентов женского (69 агентов) и мужского (93 агента) пола от-

дельно, то оказывается, что среди мужчин выше доля тех, для которых вид функции доверия к информации не существен⁹ (30 % против 25 %), а также выше доля консерваторов (29 % против 20 %), в то время как среди женщин выше доля новаторов (45 % против 30 %); доверчивых примерно поровну – около 10 %.

Предпочтительность вида функции доверия к друзьям. Будем оценивать предпочтительность трех видов функции доверия $e_{ij}(\cdot)$:

- e_M – друзья воспринимаются агентом как одно целое, доверие к такому мета-агенту равно единице;
- e_U – все друзья равны по значимости ($e_{ij} = 1/|N_i|$, $j \in N_i$);
- e_D – друзья с большим числом друзей имеют

большую значимость: $e_{ij} = \frac{|N_j|}{\sum_{k \in N_i} |N_k|}$, $j \in N_i$.

Для 28 % агентов не существен вид функции доверия к друзьям. Большая по численности группа агентов (35 %) не «различает» друзей. Около 16 % агентов больше доверяет тем друзьям, у кого больше друзей, а 15 % агентов доверяет друзьям в равной степени (рис. 25).

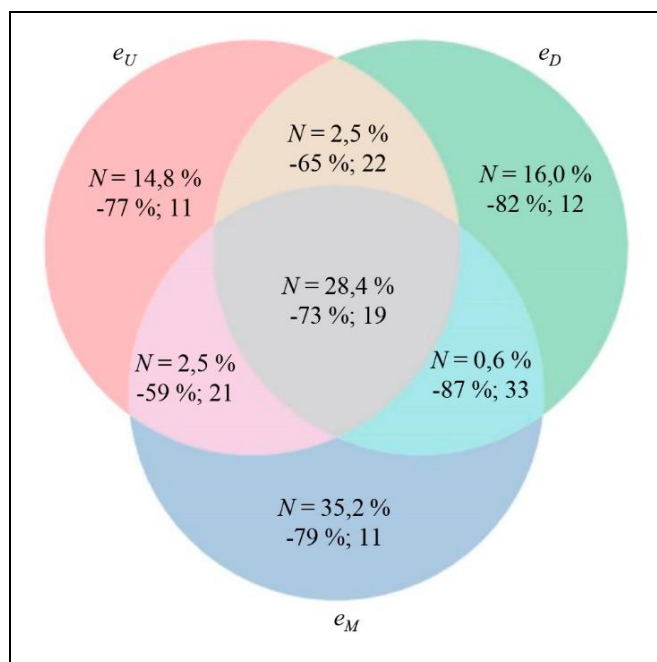


Рис. 25. Диаграмма Эйлера – Венна предпочтительности видов функций доверия к друзьям для моделей динамики мнений

⁹ В смысле улучшения качества наилучшей модели.

Если рассматривать модели для агентов женского и мужского пола отдельно, то оказывается, что среди мужчин выше доля тех, для которых не существен вид функции доверия к друзьям (31 % против 22 %), также для мужчин выше доля не различающих друзей (40 % против 30 %), в то время как среди женщин выше доля доверяющих одинаково друзьям (23 % против 9 %); доля тех, кто больше доверяет друзьям с большим числом друзей, одинакова (по 16%).

Б. Персонализированные модели динамики действий

Предпочтительность вида функции доверия к информации. Для 15 % агентов не существен вид функции доверия к информации. Большая часть агентов (61 %) является «чистыми» новаторами. Пятая часть агентов (19 %) является «чистыми» консерваторами. На рис. 26 приведена диаграмма Эйлера – Венна для трех множеств агентов: консерваторов, новаторов и доверчивых агентов.

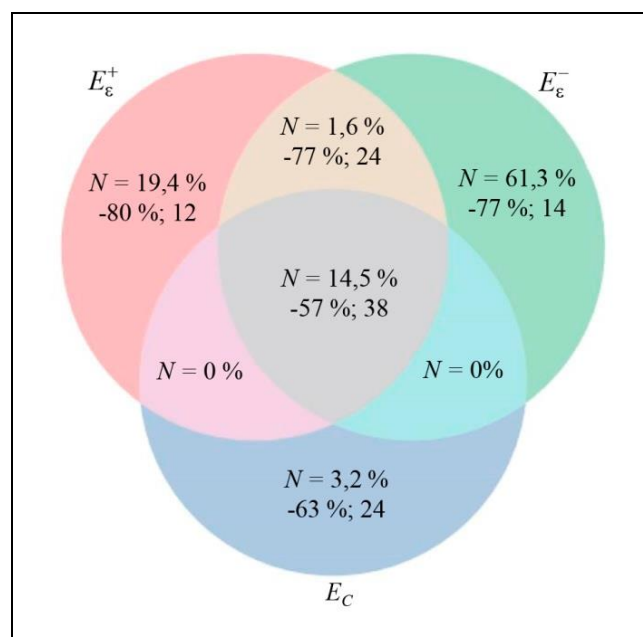


Рис. 26. Диаграмма Эйлера – Венна предпочтительности видов функций доверия к информации для моделей динамики действий

Раздельный анализ моделей для агентов женского (30 агентов) и мужского (32 агента) пола показывает, что среди мужчин выше доля тех, для которых не существен вид функции доверия к информации (16% против 10%), и выше доля доверчивых (10% против 0%), а среди женщин выше доля «новаторов» (67% против 56%), консерваторов примерно поровну – около 20%.

Предпочтительность вида функции доверия к друзьям

Оценивается предпочтительность трех видов функции доверия $e_{ij}(\cdot)$:

- e_M – друзья воспринимаются агентом как одно целое,
- e_U – все друзья равны по значимости,
- e_D – друзья с большим числом друзей имеют большую значимость.

Для 13 % агентов не существенен вид функции доверия к друзьям. Большая по численности группа агентов (40 %) не различает друзей. Около четверти агентов (26 %) больше доверяет друзьям с большим числом друзей (рис. 27).

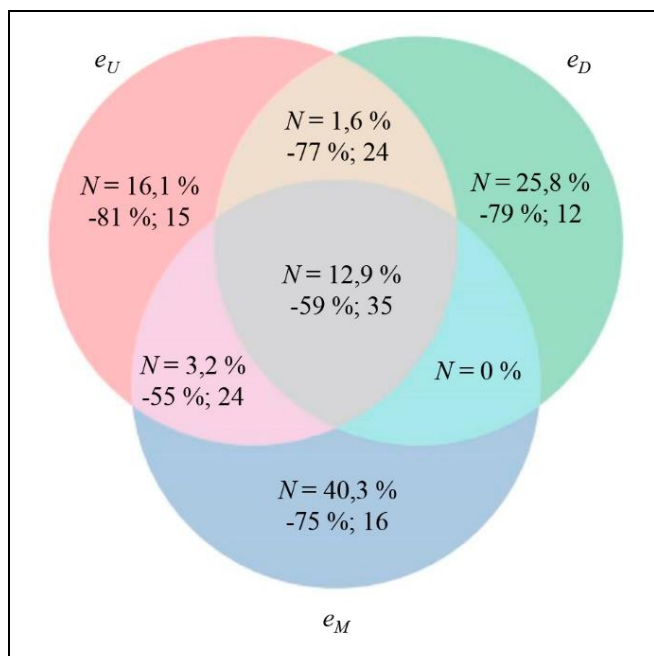


Рис. 27. Диаграмма Эйлера – Венна предпочтительности видов функций доверия к друзьям для моделей динамики действий

Оказывается, что среди мужчин выше доля тех, для которых не существенен вид функции доверия к друзьям (16% против 10%) и выше доля доверяющих одинаково друзьям (19% против 13%), в то время как среди женщин выше доля тех, кто не различает друзей (47% против 38%), доля доверяющих друзьям с большим числом друзей примерно одинакова: 27% (женщины), 25% (мужчины).

Общие выводы по персонифицированным линейным моделям

Среди мужчин больше тех, для кого не суще-

ственен вид функции доверия. Доля таких агентов увеличивается при рассмотрении динамики мнений (уменьшается при рассмотрении динамики действий).

Преобладает доля доверяющих информации, которая расходится с их мнением/действием, причем для женщин доля их больше. Доверчивых же меньше всего (т. е. доверяющих информации независимо от ее содержания).

Преобладает доля тех, кто не различает друзей (35–40 %). При рассмотрении динамики действий возрастает доля тех, кто больше доверяет друзьям с большим числом друзей (с 16 до 26 % по сравнению с ситуацией с динамикой мнений), причем эта доля одинакова и для мужчин, и для женщин. Доля одинаково доверяющих друзьям одна и та же (15 и 16 %) при рассмотрении моделей динамики мнений и действий.

В заключение проиллюстрируем на рис. 28 качество проанализированных в п. 3.2 линейных микромоделей мнений и действий агентов:

- качество инерционной модели («Инерционная» на рис. 28);
- качество моделей, которые не включают переменные, отражающие воздействия друзей (с одной объясняющей переменной, с двумя, с тремя и четырьмя);
- качество унифицированной модели с учетом воздействия друзей («Униф.» на рис. 28);
- качество персонифицированной модели с учетом воздействия друзей («Перс.» на рис. 28).

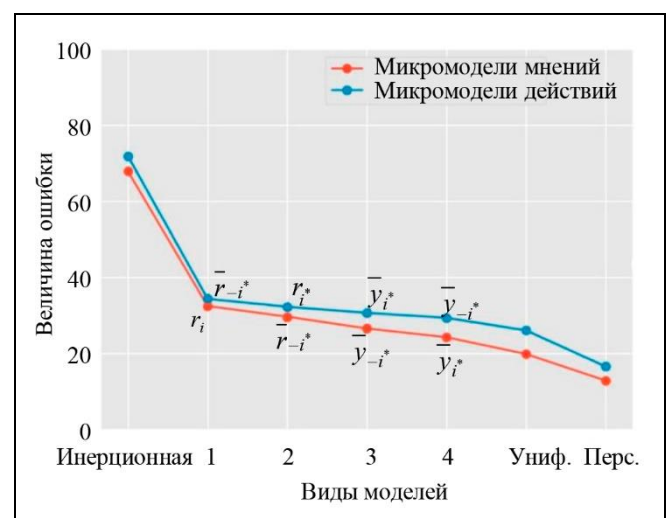


Рис. 28. Качество различных видов линейных микромоделей мнений и действий агентов



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе выполнено исследование линейных моделей совместной динамики мнений и действий агентов в онлайн-социальной сети ВКонтакте (на примере отношения к ношению медицинских масок в период первого года пандемии COVID-19). Получены следующие результаты.

Проведена верификация формальных моделей динамики мнений и действий (вопрос 6 во введении): сначала рассматривались различные варианты макромоделей, в которых «общественное» мнение и действие в сети (т. е. доля мнений и действий «за» или «против») на текущем шаге зависит от мнений и действий на предыдущем шаге (п. 3.1); затем различные варианты линейных микромоделей, в которых учитываются воздействие сети, воздействие друзей агента и его индивидуальные особенности (п. 3.2). Результаты идентификации макромоделей позволяют сделать вывод о наличии связи между действиями и мнениями в сети, а также о желательности учета при моделировании внешних по отношению к сети факторов.

Микромодели рассматриваются только для значимых агентов. Качество таких микромоделей является приемлемым и улучшается по мере их усложнения. В классе линейных микромоделей наибольшую ошибку дает инерционная модель, меньшую – модель с макропеременными и унифицированная модель, а наименьшую – персонифицированная модель, в которой у каждого агента может быть своя функция доверия.

В случае персонифицированных моделей преобладает доля агентов, доверяющих информации тем больше, чем больше она расходится с их мнением или действием (причем доля таких агентов выше для агентов женского пола). Меньше всего агентов, доверяющих информации независимо от ее содержания. Что касается доверия к друзьям, то агенты преимущественно не разделяют действия друзей; немало тех, кто больше доверяет друзьям с большим числом друзей, а тех, кто доверяет друзьям в равной степени, меньше (вопрос 7).

Вопросам идентификации бинарных микромоделей, а также сравнению линейных и пороговых моделей (вопросы 4, 6 и 7) будет посвящена третья, заключительная часть исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Губанов Д.А., Новиков Д.А. Модели совместной динамики мнений и действий в онлайн-социальных сетях. Ч. 1. Исходные данные и первичный анализ // Проблемы управления. – 2023. – № 2. – С. 37–53. [Gubanov, D.A., Novikov, D.A. Models of Joint Dynamics of Opinions and Actions in Online Social Networks. Part I: Primary Data Analysis // Control Sciences. – 2023. – No. 2. – P. 31–45.]
2. Новиков Д.А. Модели динамики психических и поведенческих компонент деятельности в коллективном принятии решений // Управление большими системами. – 2020. – Вып. 85. – С. 206–237. [Novikov, D.A. Dynamics Models of Mental and Behavioral Components of Activity in Collective Decision-Making // Large-Scale Systems Control. – 2020. – Iss. 85. – P. 206–237. (In Russian)]
3. Новиков Д.А. Управление, деятельность, личность. – М.: ИПУ РАН, 2020. – 80 с. [Novikov, D.A. Upravlenie, deyatel'nost', lichnost'. – M.: IPU RAN, 2020. – 80 s. (In Russian)]
4. Novikov D. Models of Strategic Decision-Making under Informational Control // Mathematics. – 2021. – No. 9. – Art. No. 1889.
5. Fishburn P. Utility Theory for Decision Making. – London: R. E. Krieger Pub. Co, 1979.
6. von Neumann J., Morgenstern O. Theory of Games and Economic Behavior. Princeton: Princeton University Press, 1944.
7. Myerson R. Game Theory: Analysis of Conflict. – London: Harvard University Press, 1991.
8. Granovetter M. Threshold Models of Collective Behavior // The American Journal of Sociology. – 1978. – Vol. 83, no. 6. – P. 1420–1443.
9. Heckelman J., Miller N. Handbook of Social Choice and Voting. – London, UK: Edward Elgar Publishing, 2015.
10. Schelling T. Micromotives and Macrobehaviour. – New York, London: Norton & Co Ltd, 1978. – 256 p.
11. Dhami S. The Foundations of Behavioral Economic Analysis. – Oxford, UK: Oxford University Press, 2016.
12. Зимбардо Ф., Ляйппе М. Социальное влияние. – СПб.: Питер, 2000. – 448 с. [Zimbardo F., Lyayppe M. Sotsial'noe vliyanie. – SPb.: Piter, 2000. – 448 s. (In Russian)]
13. Майерс Д. Социальная психология. – СПб.: Питер, 1998. – 688 с. [Myers, D. Social Psychology. – Boston: McGraw-Hill, 1996.]
14. Чалдини Р. Психология влияния. – СПб.: Питер, 2003. – 258 с. [Cialdini, R. Influence: The Psychology of Persuasion. – N.-Y.: HarperCollins Publishers, 1993.]
15. Feist J., Feist G. Theories of Personality, 9th ed. – N.-Y.: McGraw-Hill Education, 2017.
16. Boyle, G.J., Matthews, G., Saklofske, D.H. The Sage Handbook of Personality Theory and Assessment. Vol. 1. Personality Theories and Models: An Overview. – Los Angeles: Sage Books, 2008.
17. Schultz D., Schultz S. Theories of Personality, 11th ed. – Boston: Cengage Learning, 2016.
18. Allbaracin, D., Shavitt S. Attitudes and Attitude Change // Annu. Rev. Psychol. – 2018. – Vol. 69, no. 4. – P. 1–29.
19. Banisch S., Olbrich E. Opinion Polarization by Learning from Social Feedback // The Journal of Mathematical Sociology. – 2019. – Vol. 43. – P. 76–103.
20. Hunter J., Danes J., Cohen S. Mathematical Models of Attitude Change. – Orlando: Academic Press, 1984. – 339 p.
21. Xia H., Wang H., Xuan Z. Opinion Dynamics: A Multidisciplinary Review and Perspective on Future Research // Int. Journal of Knowledge and Systems Science. – 2011. – Vol. 2, no. 4. – P. 72–91.
22. Shoham Y., Leyton-Brown K. Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretical and Logical Foundations. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

23. *Yakouda M., Abbel W.* Multi-Agent System: A Two-Level BDI Model Integrating Theory of Mind // *Int. J. Eng. Res. Technol.* – 2020. – Vol. 9, no. 7. – P. 208–216.
24. *Burkov V., Goubko M., Kondrat'ev V., et al.* Mechanism Design and Management: Mathematical Methods for Smart Organizations. – N.-Y.: Nova Science Publishers, 2013.
25. *Novikov D.* Theory of Control in Organizations. N.-Y.: Nova Science Publishing, 2013.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Т. Алескеровым.

*Поступила в редакцию 28.12.2022,
после доработки 27.03.2023.
Принята к публикации 05.04.2023.*

Губанов Дмитрий Алексеевич – д-р техн. наук,
✉ dmitry.a.g@gmail.com,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0099-3386>

Новиков Дмитрий Александрович – академик РАН,
✉ novikov@ipu.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9314-3304>

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

© 2023 г. Губанов Д.А., Новиков Д.А.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

MODELS OF JOINT DYNAMICS OF OPINIONS AND ACTIONS IN ONLINE SOCIAL NETWORKS. PART II: Linear Models

D.A. Gubanov and D.A. Novikov

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ dmitry.a.g@gmail.com, ✉ novikov@ipu.ru

Abstract. Based on *Vkontakte* data, we study the influence of various factors on the dynamics of opinions and actions both at the macro level (“public opinion”) and at the micro level (the opinions and actions of individual agents). A model of collective decision-making is briefly considered; in this model, interconnected parameters reflect both the mental and behavioral components of the agents’ activity. Identification results are presented for two special modifications of the model, namely, linear macro- and micro models of the dynamics of opinions and actions in a social network. We estimate the influence of various factors on the opinions and actions of agents: aggregated social influence (public opinion), the agent’s individual opinions and actions, the opinions and actions of the social environment, and the mechanisms of the agent’s trust in information sources and information content.

Keywords: social network, agent, opinion, action, social influence, cognitive dissonance, trust in information.