
**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

**Прогнозирование динамики распространения анемии в регионах России
на базе агент-ориентированной модели**

© 2022 г. А.Л. Машкова, Н. Дукхи, Р. Каур, И.В. Неволин

А.Л. Машкова,

Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел; ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: aleks.savina@gmail.com

Н. Дукхи,

Совет по исследованиям в области гуманитарных наук, ЮАР; e-mail: doctordukhi@gmail.com

Р. Каур,

Центральная организация по научным приборам, Академия научных и инновационных исследований, Индия; e-mail: kaur@list.ru

И.В. Неволин,

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: jolutre@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.2022

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Департамента Министерства науки и технологий Индии и Национального исследовательского фонда ЮАР (проект 19-57-80003).

Аннотация. В статье раскрываются вопросы разработки агент-ориентированной модели динамики распространения анемии в России. Представлена структура, которая включает агентов-жителей, производителей продуктов питания и торговых агентов. Для каждого действующего субъекта в модели разработаны алгоритмы, определяющие их взаимодействия друг с другом. Для производителей продуктов питания моделируются их закупки, продажи, производственный процесс и динамика инвестиций в основные средства. Для торговых агентов — формирование ассортимента и цены продукции с учетом транспортных и торговых наценок, а для домохозяйств — питание исходя из их доходов, состава и привычек. В зависимости от качества получаемого питания и текущей стадии анемии моделируется ожидаемая динамика заболевания. В статье рассмотрены вопросы программной реализации и информационного наполнения модели, представлен пользовательский интерфейс. Формализованы четыре сценария динамики социально-экономической среды модели, учитывающие эпидемиологические и внешнеэкономические риски, в том числе сценарий «торговая война», учитывающий повышенные инфляционные риски в отношении продуктов питания. Проведена серия расчетов для прогнозирования динамики распространения анемии в условиях разработанных сценариев. Предложена программа субсидирования малообеспеченных семей и исследовано ее влияние на доступность сбалансированного питания и заболеваемость анемией среди жителей России. Проведенные расчеты показывают, что при отсутствии специальных мер поддержки сбалансированный рацион питания становится доступен меньшему количеству жителей (65% по сравнению с 78% в 2019 г.) в условиях наиболее вероятного на данный момент сценария «торговая война». При этом общая сумма субсидий, требуемых для обеспечения малообеспеченных семей качественным питанием, варьируется от 300 млрд до 1 трлн руб. в год в зависимости от размеров выделяемых пособий.

Ключевые слова: агентное моделирование, анемия, питание, рекомендуемая норма потребления.

Классификация JEL: I15.

Для цитирования: Машкова А.Л., Дукхи Н., Каур Р., Неволин И.В. (2022). Прогнозирование динамики распространения анемии в регионах России на базе агент-ориентированной модели // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 2. С. 64–79. DOI: 10.31857/S042473880018351-5

ВВЕДЕНИЕ

По данным Всемирной организации здравоохранения (World Health Organization..., 2019), во всем мире анемия является распространенным заболеванием, которое затрагивает как развитые, так и развивающиеся страны. Причины анемии варьируют в зависимости от географического положения государства, пола и возраста его жителей. При этом железодефицитная анемия, обусловленная низким качеством питания, остается основной глобальной причиной анемии (Thejpal, 2015). Экспериментальные и эпидемиологические данные свидетельствуют о том, что нарушения могут быть обратимыми благодаря правильно выбранным мерам, предпринятым системой здравоохранения. Эти меры должны включать наполнение рациона питания продуктами, богатыми микро- и макроэлементами и витаминами, и обогащение основных продуктов питания микроэлементами и биодобавками (DeMaeyer et al., 2019).

Особенно актуальной задача реализации сбалансированной продовольственной политики становится в условиях роста цен на продукты питания и снижения доходов населения в период пандемии COVID-19, причем направлениями такой политики могут быть государственное регулирование цен, различного вида субсидии населению, инвестиционная поддержка и налоговые льготы для отечественных производителей, а также обновление стандартов здорового питания и информирование о них населения. Анализ всего многообразия параметров политики и ее возможных последствий является сложной задачей, для решения которой необходимо применять современные инструменты, в частности информационные системы для предсказаний последствий политических решений (Трасу, Cerdá, Keyes, 2018).

Целью нашего исследования, реализуемого международным коллективом специалистов из России, Индии и Южно-Африканской Республики, является создание инструментария для прогнозирования распространенности анемии в странах БРИКС, основанного на методах агентного моделирования. Основываясь на взаимодействии различных индикаторов риска на микроуровне, данный метод поможет разработать подходящие стратегии вмешательства для сокращения анемии среди уязвимой части населения. Задачи исследования включают разработку структуры и алгоритмов агент-ориентированной модели, ее программную реализацию и информационное наполнение, а также проведение сценарных расчетов, учитывающих эпидемиологические и внешнеэкономические риски.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

За последние 40 лет агент-ориентированное моделирование (АОМ) становится все более популярным подходом для изучения социальных систем. В то время как использование АОМ в сфере здравоохранения находится в зачаточном состоянии, уже разработаны модели в таких разных областях, как эпидемиология, незаконный оборот лекарственных средств и физическая активность. В государственном здравоохранении моделирование на основе агентов исторически использовалось почти исключительно для моделирования передачи инфекционных заболеваний и борьбы с ними (Epstein, 2009). АОМ являются естественным подходом для моделирования передачи инфекционных заболеваний, потому что взаимодействия между индивидуумами и влияние окружающей среды часто приводят к популяционным моделям заболеваемости.

Что касается вопросов политики, можно отметить модели, которые исследуют распространение информации и эффективность профилактических мер (Barbrook-Johnson, Badham, Gilbert, 2016) или систем питания (Li, Zhang, Pagán, 2016). В (Barbrook-Johnson et al., 2016) описана АОМ, в которой агенты (люди) реагировали на коммуникационные сообщения в соответствии с их собственным отношением, другими соответствующими параметрами. Связь между агентами осуществляется в виде набора «сообщений». Каждое сообщение состоит из заранее определенных вариантов выбора в течение промежутка времени (например, каждые 10 дней), нацеленностью на аудиторию (медиаканал и группа населения) и контентом. Агенты отвечают на полученные сообщения в соответствии с содержанием сообщения, которое может принимать следующие значения: описание преимуществ; предоставление информации об эпидемическом статусе, акцентирование норм. Таким образом, сообщение влияет на принятие решения и выбор поведения, изменяя факторы принятия решения. Анализируя поведение потребителя и конкуренцию за его внимание, можно также использовать АОМ. В случае с питанием поведение может заключаться в выборе между здоровой и нездоровой пищей, а также предпочтением продукции определенного производителя. Так, в (Lamjed, Drogoul, Bouron, 2001) представлена агент-ориентированная модель поведения

потребителей на конкурентном рынке. Модель включает виртуальное население, которое принимает решения о покупке, выбирая между несколькими брендами.

В (Li et al., 2016) авторы исследуют, может ли гипотетическая кампания в средствах массовой информации и просвещения по вопросам питания привести к увеличению потребления фруктов и овощей в Нью-Йорке. Предыдущие исследования показали, что такие факторы, как социальный статус, благосостояние, местные пищевые привычки и социальные факторы (например, социальные нормы), напрямую связаны с потреблением фруктов и овощей (Glanz et al., 2005; Rose, Richards, 2004). Традиционные статистические модели имеют ограниченную способность прогнозировать пищевое поведение, потому что они не в полной мере отражают сложные взаимодействия между людьми и распространяются только на эффекты, вызванные этими взаимодействиями. Для решения комплексных проблем в исследованиях используют агент-ориентированную модель, которая учитывает индивидуальные факторы (например, возраст, пол, образование, пищевая среда) и их соседство с другими агентами, их взаимодействие для прогнозирования пищевых пристрастий на замкнутой территории.

Отличием разработанной модели от известных аналогов является, во-первых, ее специализация на оценке распространения хронического заболевания (анемии); во-вторых, учет при этой оценке различных аспектов производства, торговли и потребления продуктов питания и влияния пищевых привычек на развитие анемии; в-третьих, интеграция агентов в развитую социально-экономическую среду модели, включающую занятость, доходы, бюджетную систему, что позволяет учитывать большое число факторов при построении прогноза и моделировать последствия различных политических решений в части продовольственной политики.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структура модели

В основе агент-ориентированной модели динамики распространения анемии лежит искусственное общество, отражающее половозрастной состав и состояние здоровья населения в регионах России. В модели отражаются основные демографические процессы: взросление, рождение и смерть агентов, а также браки и разводы, влияющие на состав домохозяйств (Новикова и др., 2019).

Экономическая среда модели включает организации различных отраслей экономики, занятость в которых обеспечивает доходы населения (рис. 1). Организации отраслей сельского хозяйства, рыбоводства и пищевой промышленности являются частью экономической среды

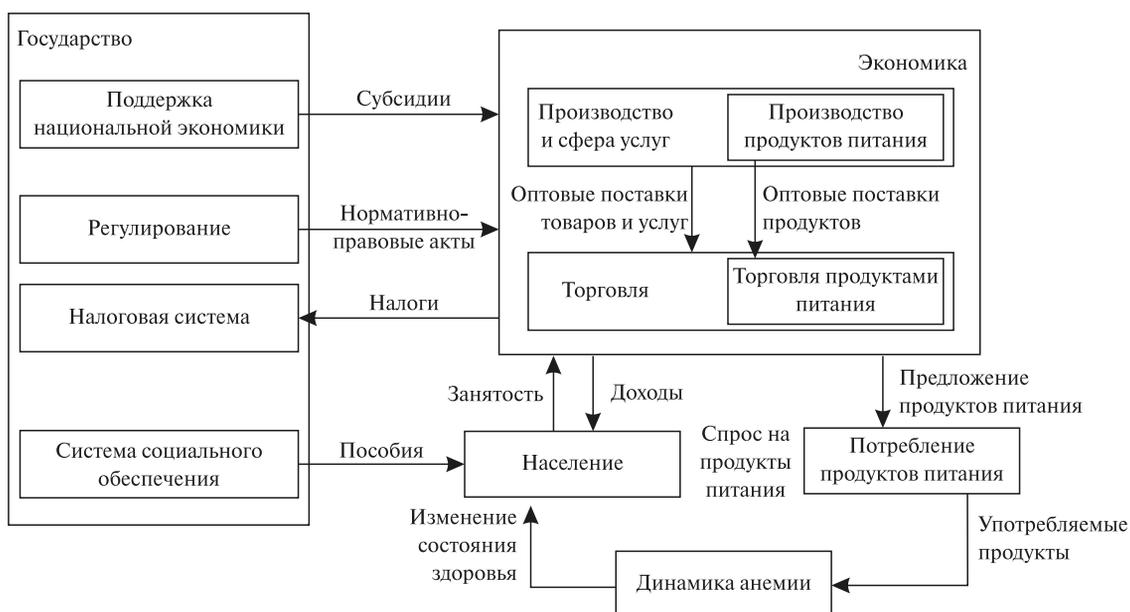


Рис. 1. Структура агент-ориентированной модели динамики распространения анемии

и одновременно — действующими субъектами модели, непосредственно участвующими в обеспечении населения продуктами питания. Аналогично среди организаций отрасли торговли выделяются организации, осуществляющие торговлю продуктами питания.

Агенты-жители формируют спрос на продукты питания в зависимости от своих доходов и пищевых привычек. Выбранный рацион питания влияет на здоровье населения, в частности на заболеваемость анемией.

Государство в модели является активным участником социально-экономических процессов, действуя через каналы инвестиционной и налоговой системы, системы социального обеспечения, а также регулируя деятельность хозяйствующих субъектов нормативно-правовыми актами. Альтернативные варианты политических решений формируют наборы управляющих воздействий, которые подаются на вход модели динамики распространения анемии. Оценка их влияния на здоровье населения производится с учетом исходного состояния объектов, а также потенциально возможных сценариев внешней среды, которые могут учитывать эпидемиологические риски, международную торговлю и курсы валют.

Далее будут рассмотрены алгоритмы базовых процессов в агент-ориентированной модели динамики распространения анемии.

Производство продуктов питания

Производители продуктов питания в модели A характеризуются пятью параметрами:

$$A = \langle P, Z, S, I, M \rangle, \quad (1)$$

где P — производство; Z — закупки; S — продажи; I — инвестиции; M — маркетинг.

Производство P задается через объем выпуска V , ассортимент выпуска PA_j и производственную задержку PT_j для каждого вида продукции j :

$$P = \left\langle V, \bigcup_{j=1}^m PA_j, \bigcup_{j=1}^m PT_j \right\rangle. \quad (2)$$

Ассортимент выпуска и производственная задержка определяются отраслью, которой принадлежит организация-производитель. Производство продуктов питания в России согласно действующей классификации видов экономической деятельности ведется в рамках трех отраслей: «01. Растениеводство и животноводство, охота и предоставление соответствующих услуг в этих областях»; «03. Рыболовство и рыбоводство»; «10. Производство пищевых продуктов». Наибольшая производственная задержка будет в растениеводстве (в особенности при выращивании в открытом грунте), наименьшая — в производстве пищевых продуктов.

Закупки Z включают ассортимент закупок ZA и долю импорта в закупках для каждого вида сырья i :

$$Z = \left\langle \bigcup_{i=1}^n ZA_i, \bigcup_{i=1}^n PT_i \right\rangle. \quad (3)$$

Ассортимент закупок определяется степенью обработки продукции в отрасли: в промышленном производстве продуктов питания производится закупка всего исходного сырья, в сельском хозяйстве и рыбоводстве — лишь вспомогательных веществ (удобрений и кормов).

Продажи S характеризуются оптовой ценой SP_j и долей экспорта SE_j для каждого вида продукции j :

$$S = \left\langle \bigcup_{j=1}^m SP_j, \bigcup_{j=1}^m SE_j \right\rangle. \quad (4)$$

Инвестиции I определяются прибылью PR , собственными инвестициями OI и государственными субсидиями SI :

$$I = \langle PR, OI, SI \rangle. \quad (5)$$

Маркетинг M включает целевые группы покупателей B и теги T , задающие позиционирование продукта на рынке:

$$M = \langle B, T \rangle. \quad (6)$$

Основными категориями покупателей являются иностранные организации, отечественные организации-производители и торговые агенты, выступающие посредниками при продаже конечной продукции домохозяйствам.

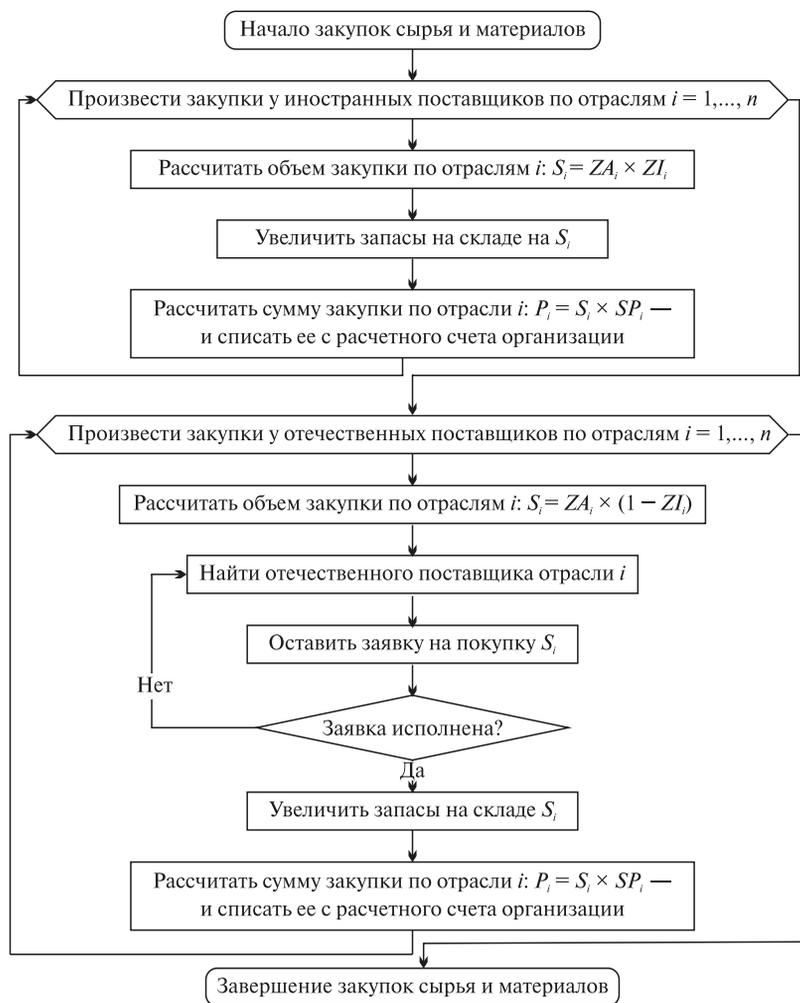


Рис. 2. Схема закупки сырья и материалов

Маркетинговая политика организации в модели задается с помощью связанных с ним атрибутов: «здоровое питание», «лучшая цена», «быстрое питание», «натуральный продукт», «элитный продукт». Атрибуты соотносятся с целевыми шаблонами потребления домохозяйств, определяя позиционирование продукта на рынке. Так, со сбалансированным шаблоном связаны атрибуты «здоровое питание» и «натуральный продукт», с минимальным уровнем потребления — «лучшая цена».

Компоненты модели производителя реализуются в рамках производственно-финансового цикла организации, который представляет собой итеративное повторение закупок сырья и материалов, производства и продажи готовой продукции, а также инвестирования в расширение производственных мощностей. Рассмотрим подробнее каждый шаг.

Закупка сырья и материалов (рис. 2) осуществляется сначала у иностранных поставщиков в соответствии с долями импорта $Z A_i$ в каждом виде сырья i . Такой порядок действий в алгоритме связан с допущением, что запасы сырья у иностранных поставщиков считаем неограниченными. Для отечественных поставщиков рассчитывается необходимый объем закупки каждого вида сырья i и формируется заявка, которую рассматривает поставщик и выполняет, если имеет достаточно продукции на складе. В ином случае подбирается следующий поставщик, и процесс повторяется. При совершении закупки увеличивается запас сырья на складе и списывается сумма поставки с расчетного счета организации.

Производство продукции включает списание сырья со склада, моделирование производственной задержки $P T_j$ и увеличение запасов продукции на складе через соответствующий промежуток времени.



Рис. 3. Схема продажи продукции

Продажа продукции (рис. 3) также осуществляется сначала иностранным покупателям в соответствии с долями экспорта SE_j в каждом виде производимой продукции j . Это необходимо, чтобы выполнить обязательства по международным контрактам и оценить остатки запасов на складе для продажи внутри страны. Далее обрабатываются заявки на приобретение продукции каждого вида отечественными организациями-производителями и торговыми агентами в порядке их поступления. Пока на складе имеется продукция определенного вида, осуществляется их продажа по оптовой цене SP_j (уменьшается запас продукции на складе и зачисляется оплата на расчетный счет). Когда запас на складе заканчивается, все оставшиеся невыполненными заявки заносятся в список неудовлетворенных заказов для анализа динамики спроса на следующем шаге.

Процесс инвестирования организации-производителя начинается с расчета прибыли:

$$PR = \sum_{j=1}^m S_j SP_j - (E + T + A), \tag{7}$$

где S_j — сумма продаж организации по виду продукции j ; SP_j — оптовая цена организации на продукцию j ; E — расходы организации (включая закупки сырья и оплату труда сотрудников); A — амортизация основных средств организации; T — уплаченные организацией налоги; PR — полученная чистая прибыль.

Далее определяется отношение неудовлетворенных заказов на различные виды продукции к общим продажам организации (U):

$$U = \left(\sum_{j=1}^m SN_j SP_j \right) / \left(\sum_{j=1}^m S_j SP_j \right), \tag{8}$$

где S_j — сумма продаж организации по виду продукции j ; SP_j — оптовая цена организации на продукцию вида j ; SN_j — объем неудовлетворенных заказов по виду продукции j . Если $U > 0$ — спрос на продукцию организации превышает ее выпуск и ей необходимо инвестировать часть прибыли в расширение производственных мощностей для увеличения объемов выпуска; $U \leq 0$ — инвестирование ограничивается размером амортизации для обновления списанного оборудования.

Расчет общего объема инвестиций I учитывает получение государственной субсидии SI , рассчитанную долю чистой прибыли PR и амортизацию A организации-производителя. После инвестирования объем выпуска организации пропорционально увеличивается:

$$V^* = V I / OS, \tag{9}$$

где V^* — увеличенный объем выпуска организации; V — текущий объем выпуска организации; I — общий объем произведенных инвестиций; OS — текущая стоимость основных средств организации.

Торговля продуктами питания

В каждом регионе модели создаются два агрегированных агента — торговых посредника: один в городской, другой — в сельской местности. Для каждого торгового агента формируется базовый ассортимент на основе данных мониторинга торговых точек во всех регионах РФ, проводимого в рамках проекта.

На вход модели торгового посредника поступают заявки покупателей-домохозяйств, сформированные в рамках модели потребителя. На основе полученных заявок покупателей торговый агент формирует заявки на оптовые закупки у производителей. Выбор поставщика начинается с организаций в своем регионе, затем в соседних и так далее, пока не будет сформирован требуемый ассортимент или не будут рассмотрены все поставщики (рис. 4). При выполнении заявки увеличивается запас продукции на складе торгового агента и производится оплата поставки с его расчетного счета.

Формирование розничной цены на продукт производится с учетом оптовой цены и торгово-транспортных наценок:

$$RP_j = SP_j + TE_j + ME_j, \quad (10)$$

где RP_j — розничная цена продукта j ; SP_j — оптовая цена продукта j ; TE_j — транспортная наценка; ME_j — торговая наценка.

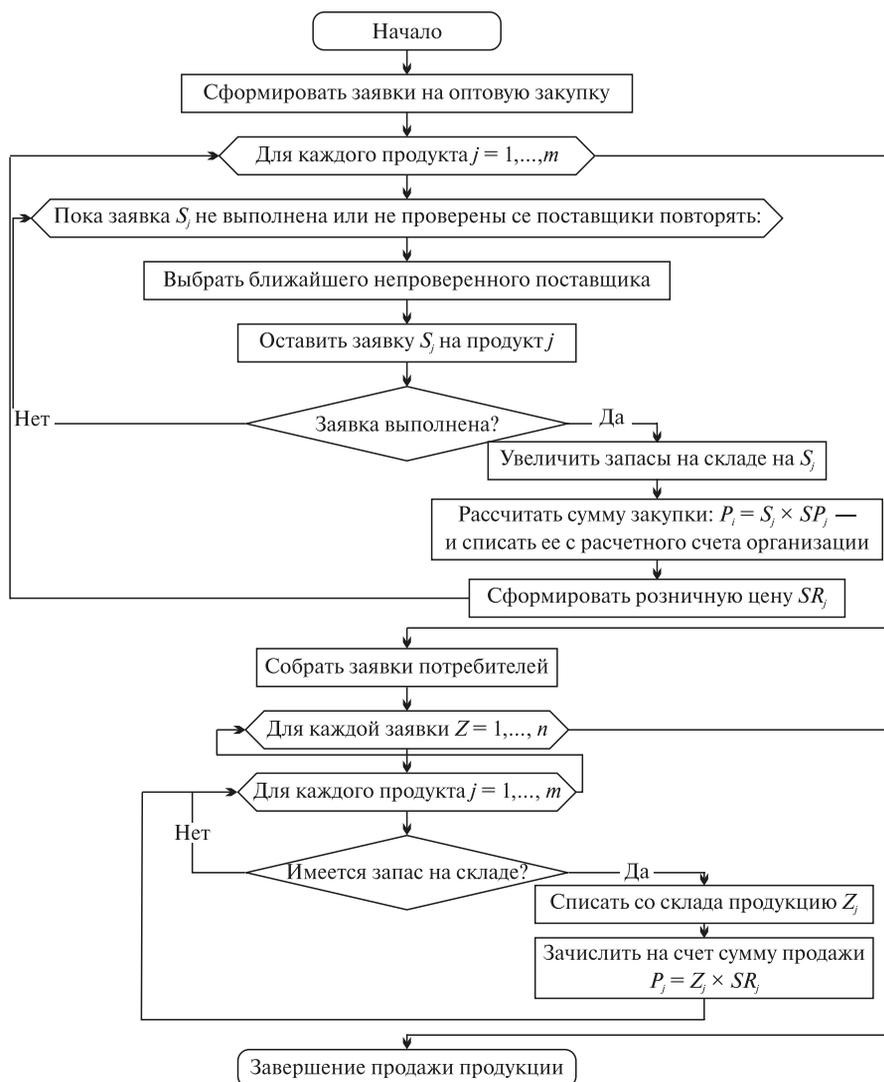


Рис. 4. Схема работы торгового агента

Транспортная наценка TE складывается из трех компонент:

$$TE = TBE + LE + TCE, \quad (11)$$

где TBE — базовая транспортная наценка при закупке у поставщика в своем регионе; LE — дополнительная транспортная наценка при доставке из других регионов, пропорциональная расстоянию до них; TCE — дополнительная транспортная наценка при доставке в сельскую местность.

Торговая наценка ME —

$$ME = MBE + MCE, \quad (12)$$

где MBE — базовая торговая наценка; MCE — дополнительная торговая наценка при продаже в сельской местности.

Таким образом, продукты питания в торговых точках в сельской местности в среднем стоят дороже за счет дополнительных транспортных издержек, связанных с доставкой в отдаленные деревни с городских складов, и дополнительных торговых наценок, обусловленных меньшим оборотом в сельских магазинах. Размер каждой наценки определяется на основе сравнения результатов мониторинга торговых точек в различных регионах РФ. Далее в модели осуществляется обработка заявок покупателей и продажа (при наличии на складе) входящих в них продуктов.

Спрос на продукты питания

Спрос домохозяйства на продукты питания зависит от его доходов, состава домохозяйства и его пищевых привычек, которые определяют собственно выбор продуктов для употребления. Бюджет, отводимый семьей на приобретение продуктов питания (S), рассчитывается на основе данных о доходах всех ее членов и структуре потребления домохозяйств различного дохода и состава:

$$S = D F, \quad (13)$$

где D — совокупный доход семьи; F — доля доходов, которая отводится на приобретение продуктов питания.

Совокупный доход семьи складывается из заработной платы, прибыли от бизнеса и пособий от государства, которые получают все члены семьи. Структура и размеры доходов агентов определяются в процессе работы модели и находятся в непосредственной связи с экономикой (уровень занятости и заработных плат) и управляющими воздействиями государства (введение новых видов пособий, их индексирование или отмена). Доля доходов, которая отводится на приобретение продуктов питания, зависит от размера дохода (чем ниже доход семьи, тем большая его часть уходит на приобретение продуктов) и состава домохозяйства (одинокое люди, семейные пары, дети). Этот показатель рассчитывается на основе данных о структуре потребления населения, публикуемых Федеральной службой государственной статистики¹.

Сумма, отводимая на приобретение продуктов питания, распределяется по категориям продуктов согласно пищевым привычкам домохозяйства. Для формализации этого процесса в модели вводится понятие «шаблон рациона», который определяет долю в тратах на каждую категорию продуктов:

$$W^r = \bigcup_{i=1}^n w_i^r, \quad \sum_{i=1}^n w_i^r = 1, \quad (14)$$

где W^r — шаблон для рациона r ; w_i^r — доля категории i в рационе r .

На выбор шаблона влияют цели домохозяйства и доступный уровень потребления. Доступный уровень потребления зависит от уровня цен на продукты и может серьезно отличаться в различных регионах. В модели выделяется три типа соответствия рациона принципам сбалансированного питания: I) позволяет получить не менее 90% нутриентов (витаминов и минералов), препятствующих развитию анемии; II) получить не менее 75% ключевых нутриентов; III) получить менее 75% ключевых нутриентов.

Состав продуктовой корзины, разработанный в сотрудничестве со специалистом-нутрициологом доктором Натишей Дукхи, включает крупы, молочные, мясные и рыбные продукты, фрукты и овощи, доступные во всех регионах России (более подробно состав разработанной корзины см. в работе (Машкова и др., 2021)). Цены на продукты в различных регионах оценивались с помощью специально организованного мониторинга в 77 субъектах, в результате которого были собраны

¹ См. материалы сайта Федеральной службы государственной статистики (<http://www.gks.ru>).

цены на 31 354 продукта. Информация по регионам, не охваченным проведенным мониторингом, была взята из Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС).

Даже если семья имеет достаточно средств на приобретение всех необходимых продуктов, это не означает, что она будет придерживаться принципов правильного питания. В модели вводится понятие «целевой шаблон питания», которое отражает, насколько рацион домохозяйства соответствует современным стандартам. Выделяются сбалансированный, смешанный и несбалансированный целевые шаблоны, оценка их распространенности среди населения России производится на основе мониторингов ВЦИОМ².

Для отражения всех аспектов формирования спроса на продукты питания со стороны домохозяйств в модели разработан специальный алгоритм из пяти шагов.

Шаг 1. Рассчитывается бюджет домохозяйства и сумма, отводимая на потребление продуктов питания.

Шаг 2. Учитывается целевой шаблон потребления, определяющий предпочтения домохозяйства. Если домохозяйство обладает достаточными средствами, качество рациона будет определяться его целевым шаблоном питания, иначе ключевую роль будет играть стоимость продуктов. Так, с учетом возможностей и предпочтений выбирается соответствующий шаблон потребления W^r .

Шаг 3. Бюджет распределяется по категориям продуктов в соответствии со структурой шаблона W^r .

Шаг 4. Для каждой категории формируется базовая часть из наиболее часто употребляемых большинством населения продуктов и случайная компонента, которая вносит разнообразие в рацион конкретного домохозяйства. Выбранные продукты покупаются у организации — торгового агента.

Шаг 5. Оценивается пищевая ценность приобретенного набора продуктов, а также рассчитывается доля употребления каждым членом домохозяйства нутриентов, влияющих на динамику анемии, от рекомендуемой нормы потребления этих нутриентов.

Динамика распространения анемии

Качество потребляемого рациона питания влияет на динамику развития анемии у жителей в зависимости от их текущей стадии анемии, пола и возраста. На рис. 5 представлена модель динамики перехода по различным стадиям анемии в зависимости от получаемого питания. Состояния S обозначают стадии анемии: 0 — здоровый человек; 1 — анемия первой степени (легкой степени тяжести); 2 — анемия средней степени тяжести; 3 — тяжелая анемия. Переходы соответствуют качеству получаемого питания в соответствии с рекомендуемыми нормами потребления (РНП) ключевых нутриентов: R — богатое витаминами и минералами, потребление более 90% РНП (рацион I типа); N — нормальное, потребление не менее 75% РНП (рацион II типа); P — бедное, потребление 50–70% РНП (рацион III типа).

Переходы в модели являются вероятностными, вероятность переходов определяется путем калибровки модели на ретроспективных данных. На основе автоматной модели для каждого агента после определения его рациона и доли получаемых нутриентов от рекомендуемой нормы потребления рассчитывается его текущая стадия заболевания, при этом также учитывается временная задержка, необходимая для осуществления перехода.

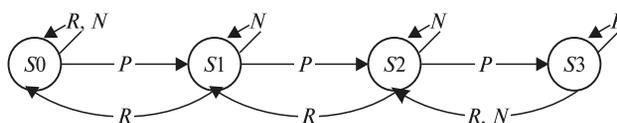


Рис. 5. Автоматная модель динамики анемии в зависимости от качества получаемого питания

Государственное регулирование

В модели государство может прямо или косвенно влиять на процессы производства и потребления продуктов питания путем проведения таких различных управляющих воздействий, как:

² Аналитические обзоры ВЦИОМ «Здоровый образ жизни: мониторинг» (<https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/zdorovyj-obraz-zhizni-monitoring>) и «Питание: правильное и безопасное» (<https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/pitanie-pravilnoe-i-bezopasnoe>).

- введение изменений в законодательном регулировании производства и торговли продуктами, норм и стандартов питания;
- реализация инвестиционных программ и введение налоговых льгот для отечественных производителей продуктов питания;
- введение ограничений на экспорт и импорт продуктов;
- выплата целевых субсидий на приобретение продуктов питания малообеспеченным семьям;
- организация и совершенствование программ бесплатного питания в детских садах и школах.

Альтернативные варианты управляющих воздействий подаются на вход модели динамики распространения анемии, таким образом, анализ результатов моделирования позволяет проводить сравнительную оценку политических решений с точки зрения их влияния на динамику заболеваемости среди населения.

В данной работе проводится анализ влияния субсидий на приобретение продуктов питания малообеспеченным семьям. Варианты управляющего воздействия формируются как доля стоимости продуктовой корзины, которая покрывается субсидией для тех семей, доход которых не позволяет обеспечить для всех их членов покупку продуктов, входящих в состав оптимальной корзины. Таким образом, размер пособия варьирует для разных регионов и лет (поскольку стоимость продуктовой корзины рассчитывается с учетом ожидаемой инфляции). Также на размер субсидии для конкретной семьи влияет ее доход и численность:

$$s_i = \min \left\{ (p^r S) n_i, (p^r - b_i p_i / n_i) \right\}, \quad (15)$$

где s_i — субсидия для семьи i ; p^r — стоимость продуктовой корзины в регионе r ; S — доля стоимости продуктовой корзины, которую покрывает субсидия; b_i — совокупный бюджет семьи i ; b_i — доля бюджета, отводимая семьей i на покупку продуктов питания; n_i — численность семьи i .

Программная реализация модели

Агент-ориентированная модель динамики распространения анемии представляет собой сложную программную систему, включающую интерфейсы, базы данных и модули, реализующие описанные выше функции динамического моделирования. Программная реализация модели выполнена на языке C# в среде Microsoft Visual Studio, база данных поддерживается с помощью СУБД PostgreSQL. Использование данных программных средств позволяет обеспечить высокую производительность вычислений, необходимую для многоагентной системы с большим числом действующих агентов.

Информационное наполнение модели осуществляется на основе данных Федеральной службы государственной статистики (ФСГС)³, мониторинга RLMS⁴, информационной системы СПАРК-Интерфакс⁵ и открытых интернет-порталов, посвященных вопросам питания⁶. Исходные данные моделирования загружаются в модель в виде таблиц. Базовыми таблицами исходных данных являются: численность населения регионов по полу и возрасту и их распределение по домохозяйствам; численность больных анемией в регионах страны; отраслевая классификация продуктов питания и сырья для их производства; объемы производства продуктов питания в региональном разрезе; доходы населения; цены на продукты в регионах; пищевая ценность продуктов питания; нормы потребления пищевых веществ для различных групп населения. Более подробно вопросы получения и преобразования исходных данных к требуемому для загрузки в модель формату рассматриваются в работе (Mashkova, 2021).

Всего в модели создается порядка 1,5 млн агентов-жителей, что соответствует масштабированию 1:100, т.е. каждый агент в модели представляет 100 жителей России одной половозрастной группы. Также создается 6500 агрегированных организаций, представляющих отрасли в различных регионах, из них 1777 организаций отраслей, производящих продукты питания. Созданные объекты и взаимосвязи между ними сохраняются в базе данных модели.

³ Сайт Федеральной службы государственной статистики (<http://www.gks.ru>).

⁴ Российский мониторинг экономического положения и здоровья населения НИУ ВШЭ (<https://www.hse.ru/rlms/>).

⁵ СПАРК-Интерфакс (официальный сайт: <https://spark-interfax.ru/>).

⁶ Портал о здоровом питании Health-diet: <https://www.health-diet.ru/>

Моделирование динамики распространения анемии осуществляется с учетом исходного состояния объектов, которые передаются из базы данных. В процессе динамического моделирования изменяется состав и характеристики этих объектов (взросление, изменение состояния здоровья и рождение новых агентов, изменения объемов выпуска организаций и доходов домохозяйств), соответствующие изменения сохраняются в базе данных модели.

Для запуска модели необходимо выбрать сценарий, который определяет параметры экономической среды и набор управляющих воздействий, в качестве которых выступают меры государственной поддержки производителей продуктов питания и/или семей с низкими доходами. В качестве результатов моделирования на экран может быть выведена доступность населению сбалансированного рациона питания, численность больных анемией среди детей и взрослых; также данная информация может быть представлена на карте для отдельных регионов России. Получение более подробных данных моделирования и их выгрузка для сопоставления результатов различных серий экспериментов осуществляются с помощью прямого обращения к базе данных модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Неопределенность дальнейшей динамики эпидемиологической обстановки в России и ее влияние на экономику и социальную сферу обуславливают применение сценарного подхода при проведении прогнозных расчетов на разработанной модели. Моделирование динамики распространения анемии проводилось на среднесрочный период до 2025 г. в рамках трех сценариев, учитывающих эпидемиологические риски и связанные с ними изменения в экономических процессах:

— сценарий 1 (пессимистический) — здесь регулярно повторяются волны коронавирусной инфекции. При данном сценарии продолжается действие ограничительных мер и снижение мирового спроса;

— сценарий 2 (консервативный) — предполагает, что распространение коронавируса завершится в 2023 г. В этом случае рост экономики (как российской, так и мировой) может ожидаться через два года;

— сценарий 3 (оптимистический) — предполагает затухание пандемии к концу 2022 г. и восстановление к этому сроку всех сфер экономики;

— сценарий 4 (торговая война) — в свете последних событий представляется необходимым рассмотреть также и такой сценарий, в котором учитываются возникшие политические риски в условиях консервативного эпидемиологического сценария.

В рамках разработанных сценариев в модель закладываются ряды прогнозов следующих значимых для экономики России факторов.

1. *Курс рубля по отношению к доллару США.* Начиная с курса в 75 руб. за 1 долл. на момент начала моделирования (январь 2022 г.), в оптимистическом сценарии рассматривается его постепенное снижение до 65 руб., в консервативном — сохранение на уровне 70–75 руб., в пессимистическом — рост до 80–85 руб. за 1 долл. В сценарии «торговая война» рассматривается повышение курса доллара до 120 руб.

2. *Рыночная цена барреля нефти.* В оптимистическом сценарии ожидается рост до 100 долл. за баррель, в консервативном — сохранение цены на уровне 75–85 долл., в пессимистическом — падение до 40–50 долл. за баррель. Сценарий «торговая война» предполагает повышение мировых цен на энергоносители, в частности цены барреля нефти до 140 долл.

3. *Объем экспорта продукции* отраслей сельского хозяйства, добывающей и обрабатывающей промышленности, которые в различной степени испытывают давление вводимых ограничений. Так, объем экспорта продуктов питания и энергоносителей растет во всех сценариях, спрос на прочие виды полезных ископаемых и продукцию обрабатывающих производств падает в пессимистическом сценарии в результате замедления мировой экономики, которая испытывает меньшую потребность в сырье, комплектующих и оборудовании. В числовом выражении ожидается ежегодный рост экспорта на 5–10% в различных отраслях; в консервативном сценарии — сохранение объемов экспорта обрабатывающей промышленности; рост на 2–5% продукции сельского хозяйства и полезных ископаемых; в пессимистическом — падение экспорта продукции добывающих и обрабатывающих производств на 2–5% при сохранении высоких объемов экспорта продукции сельского хозяйства. В сценарии «торговая война» предусматривается снижение объемов экспорта

продукции сельского хозяйства вследствие государственного регулирования вплоть до полной его остановки в 2022 г.

4. *Динамика внутреннего спроса* по группам отраслей, ставших объектом наиболее жесткого регулирования в условиях сохранения эпидемиологических рисков: организации развлечений, спорта, общественного питания, в несколько меньшей степени — торговля, поскольку при закрытии магазинов активизируются онлайн-продажи товаров. В оптимистическом сценарии предполагается возвращение организаций пострадавших отраслей к докризисным значениям в 2022 г. и затем — их умеренный рост в 2–4% ежегодно. При консервативном сценарии возврат к докризисным показателям ожидается в 2023 г., в пессимистическом — сохранение снижения роста пострадавших отраслей по сравнению с докризисным уровнем показателей вплоть до 2025 г.

5. *Инфляция* в оптимистическом сценарии возвращается к таргетированному значению в 4%; в консервативном — снижается до 6%; в пессимистическом — сохраняется на текущем уровне в 8% (по данным ФСГС, 2021 г.). Сценарий «торговая война» предполагает повышение темпов инфляции до 15% в 2022 г. с последующим снижением до 10–12% в год.

Параметры разработанных сценариев были заложены в разработанную агент-ориентированную модель динамики распространения анемии. Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 6. По сравнению со значениями 2019 г. в 2022 г. прогнозируется рост заболеваемости анемией до 1,8 млн человек во всех сценариях, что связано с падением доходов и ростом стоимости продуктовой корзины. В последующие годы вместе со стабилизацией экономической обстановки ожидается снижение числа людей, страдающих анемией, однако только в оптимистическом сценарии возможно снижение числа заболевших до значений 2019 г.

Наблюдаемые различия в сценариях обусловлены в первую очередь сценарным показателем инфляции продуктовой корзины, превышающей темп роста доходов как в консервативном, так и в пессимистическом сценариях. Данная ситуация может быть исправлена либо государственным регулированием цен на продукты питания, либо выплатой субсидий малообеспеченным семьям. Для проведения серии расчетов по оценке эффективности управляющих воздействий был выбран второй вариант, при этом варьировала величина государственного пособия. Размер выплат связан со стоимостью оптимальной продуктовой корзины, обеспечивающей получение минимум 75% необходимых витаминов и минералов при соблюдении требований к калорийности рациона (2500 кКал для взрослого мужчины). Стоимость корзины определяется составом входящих в нее продуктов питания и ценой этих продуктов в различных регионах страны. Цены на продукты в различных регионах оценивались на основе результатов мониторинга в регионах (см. п. «Спрос на продукты питания») и информации из ЕМИСС.

В качестве возможного управляющего воздействия в серии расчетов рассматривается вариант выплаты целевых пособий семьям, доход которых не позволяет обеспечить для всех ее членов покупку продуктов, входящих в состав рациона типа II. Для проведения расчетов были выбраны следующие варианты компенсации субсидиями:

- 1) базовый — субсидии данного вида отсутствуют;
- 2) покрывается 20% стоимости рациона типа II;
- 3) покрывается 50% стоимости рациона типа II;
- 4) покрывается полная стоимость рациона типа II.

Анализ эффективности управляющих воздействий проводился в условиях консервативного сценария и сценария «торговая война».

Проведенные расчеты показывают, что в 2019 г. сбалансированный рацион типа II был доступен почти 80% жителей России, при реализации консервативного сценария прогнозируется снижение

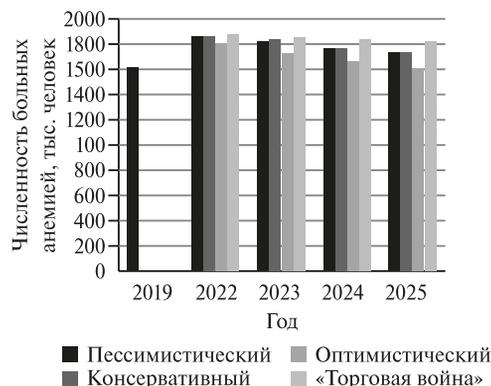


Рис. 6. Численность больных анемией в России, по результатам сценарных расчетов

по результатам сценарных расчетов

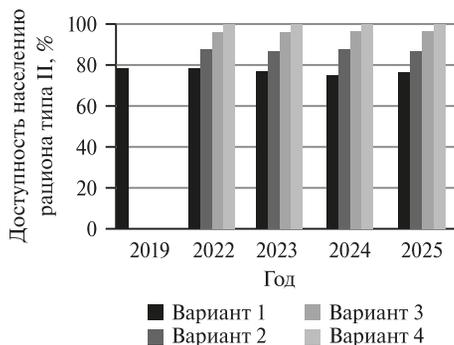


Рис. 7. Прогноз доступности населению рациона типа II уровня при различных вариантах программы субсидирования семей с низким доходом (консервативный сценарий)

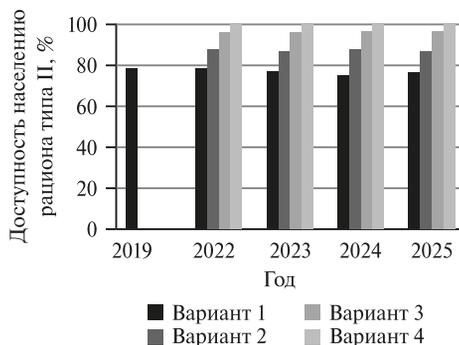


Рис. 8. Прогноз доступности населению рациона типа II при различных вариантах программы субсидирования семей с низким доходом (сценарий «торговая война»)

этого показателя до 78%. График, представленный на рис. 7, показывает, насколько повысилась доступность рациона типа II при реализации представленной программы субсидирования семей с низким доходом. При реализации второго и третьего вариантов субсидирования рацион доступен 83–88% населения, при реализации четвертого варианта — всем жителям России.

В условиях сценария «торговая война» доступность сбалансированного рациона питания для жителей России снижается еще более драматично — до 65% населения (рис. 8), что делает программу субсидирования семей с низким доходом необходимой все большему числу жителей.

Требуемый объем субсидирования рассчитывается в программе как сумма пособий данного вида, выплаченных семьям во всех регионах России. С учетом ожидаемой инфляции, заложенной на уровне 6% в консервативном сценарии, ежегодный объем субсидирования лежит в диапазоне 250–350 млрд руб. для варианта 2, 430–550 млрд руб. для варианта 3, 490–625 млрд руб. для варианта 4 (см. таблицу). В сценарии «торговая война» объем требуемых субсидий значительно выше, что связано в первую очередь с более высокими темпами инфляции на продукты питания (10–15% ежегодно).

Численность больных анемией обратно пропорциональна доступности жителям сбалансированного рациона питания и при реализации программы субсидирования снижается до 1,4–1,55 млн человек в консервативном сценарии и 1,4–1,7 млн человек в сценарии «торговая война» (рис. 9, 10).

Анализ результатов моделирования позволяет заключить, что реализация даже минимального по объему варианта программы субсидирования приводит к значительному снижению числа

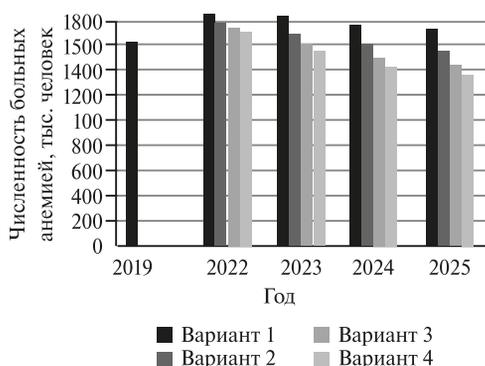


Рис. 9. Прогноз динамики распространения анемии в России при различных вариантах программы субсидирования семей с низким доходом (консервативный сценарий)

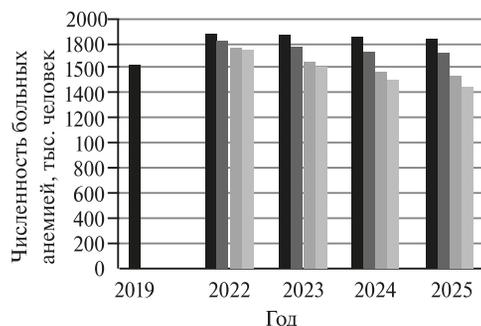


Рис. 10. Прогноз динамики распространения анемии в России при различных вариантах программы субсидирования семей с низким доходом (сценарий «торговая война»)

Таблица. Требуемый объем субсидирования в рамках программы поддержки семей с низким доходом

Год	Объем субсидирования в год, млрд руб.					
	Консервативный сценарий			Сценарий «торговая война»		
	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
2022	255,1	430,3	488	341,1	577,2	645,4
2023	284,8	473,9	536,6	454	764,5	850,5
2024	313,4	512,5	580,6	550,6	934,2	1037,7
2025	344,4	556,9	624,6	624,1	1071,4	1187

больных анемией уже к 2024 г. в условиях консервативного сценария, однако при реализации наиболее вероятного на данный момент сценария «торговая война» для достижения таких результатов необходима реализация промежуточного варианта 3, а его стоимость составит порядка 3 млрд руб. за четыре года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен разработанный международным коллективом инструментарий для прогнозирования динамики распространения анемии в странах БРИКС. В качестве метода исследования было выбрано агент-ориентированное моделирование, которое в контексте поставленной задачи обеспечило возможность учета влияния качества получаемого питания на возникновение и протекание анемии у различных категорий населения. Структура модели включает агентов-жителей, производителей продуктов питания и торговых агентов. Алгоритмы модели воспроизводят процессы производства продуктов питания от сельскохозяйственного сырья до готовой к употреблению продукции, а также импорта и экспорта продуктов питания.

Модель отличается достаточно высокой степенью детализации исследуемых процессов. Так, при моделировании работы торговых посредников учитывается разница в ассортименте продуктов питания в городской и сельской местности, а также аспекты ценообразования в различных регионах, обусловленные различиями в климате и инфраструктуре. При моделировании аспектов потребления продуктов питания оценивается качество доступного домохозяйствам рациона питания с точки зрения наличия в нем рекомендуемых норм потребления ключевых витаминов и микроэлементов, дефицит которых приводит к развитию анемии, при этом нормы потребления учитывают пол и возраст агента-жителя.

Разработанная модель основана на ряде допущений.

1. Рассматривается развитие железодефицитной анемии под влиянием качества получаемого рациона питания и не принимается в расчет употребление специальных добавок, назначаемых врачами для лечения тяжелых стадий анемии.

2. Исследуется рацион только частных домохозяйств, тогда как рацион коллективных домохозяйств (интернатов, тюрем, казарм) считается соответствующим текущим государственным стандартам питания.

3. Бюджет частных домохозяйств в модели считается общим, как и качество питания, получаемого членами одного домохозяйства.

Устранение допущения 1 является задачей дальнейших исследований нашего коллектива. Допущения 2 и 3 обусловлены недостаточностью исходных данных для более полной детализации данных процессов.

На базе разработанной модели проведена серия расчетов, направленная на прогнозирование динамики распространения анемии в регионах России в условиях различных сценариев, параметры которых отражают эпидемиологические и внешнеэкономические риски. Расчеты показывают увеличение числа больных анемией на 10–12% в 2022 г. по сравнению со значениями 2019 г., который принимается как базовый. В оптимистическом сценарии заболеваемость возвращается к уровню базового года к 2025 г., в консервативном и пессимистическом сценариях остается на 5–7% выше него. В условиях консервативного сценария смоделированы последствия программы государственного субсидирования семей с низкими доходами. Согласно полученным результатам

реализация такой программы в полном объеме обеспечит доступ всех жителей России к сбалансированному рациону питания и приведет к снижению числа больных анемией на 25% по сравнению с прогнозом в условиях отсутствия такой субсидии.

Представленная структура и алгоритмы модели являются универсальными для всех стран БРИКС, необходимые отличия могут быть отражены в наборах исходных данных, в частности региональной структуре, численности и половозрастной структуре населения, доходах, ценах на продукты питания и традиционных рационах в различных странах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Машкова А.Л., Дукхи Н., Неволин И.В., Савина О.А.** (2021). Прогнозная оценка доступности сбалансированного рациона питания для жителей регионов России: агент-ориентированный подход // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. Т. 14. № 6. С. 107–125. DOI: 10.15838/esc.2021.6.78.6 [Mashkova A.L., Dukhi N., Nevolin I.V., Savina O.A. (2021). A forecasting assessment of the affordability of a balanced diet for residents of Russian regions: An agent-based approach. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 14, 6, 107–125. DOI: 10.15838/esc.2021.6.78.6 (in Russian).]
- Новикова Е.В., Савина О.А., Машкова А.Л., Маматов А.В.** (2019). Воспроизведение динамики населения регионов России методом агентного моделирования // *Информационные системы и технологии*, 2, 48–55. [Novikova E.V., Savina O.A., Mashkova A.L., Mamatov A.V. (2019). Reproduction of population dynamics of Russian regions using agent modeling. *Information Systems and Technologies*, 2, 48–55(in Russian).]
- Barbrook-Johnson P., Badham J., Gilbert N.** (2016). Uses of agent-based modeling for health communication: The TELL ME case study. *Health Communication*, 1–6. DOI: 10.1080/10410236.2016.1196414
- DeMaeyer E.M., Dallman P., Gurney J.M., Hallberg L., Sood S.K., Srikantia S.G.** (1989). *Preventing and controlling iron deficiency anaemia through primary health care*. Geneva, World Health Organization. Available at: http://www.who.int/nutrition/publications/micronutrients/anaemia_iron_deficiency/9241542497/en/index.html
- Epstein J.M.** (2009). Modelling to contain pandemics. *Nature*, 460 (7256), 687. DOI: 10.1038/460687
- Glanz K., Sallis J.F., Saelens B.E., Frank L.D.** (2005). Healthy nutrition environments: Concepts and measures. *Am.J. Health Promot.*, 19 (5), 330–333. DOI: 10.4278/0890-1171-19.5.330
- Lamjed B.S., Drogoul A., Bouron T.** (2001). Multi-agent based simulation of consumer behaviour: Towards a new marketing approach. *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM)*. Canberra, Australia.
- Li Y., Zhang D., Pagán J.A.** (2016). Social norms and the consumption of fruits and vegetables across New York City neighborhoods. *Journal of Urban Health*, 93, 244–255.
- Mashkova A.L.** (2021). Processing initial data for the agent-based model of the Russian Federation spatial development. In: S.L. Peng, M. Favorskaya, H.C. Chao (Eds.). Sensor networks and signal processing. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 176. DOI: 10.1007/978-981-15-4917-5_18
- Rose D., Richards R.** (2004). Food store access and household fruit and vegetable use among participants in the US Food Stamp Program. *Public Health Nutr.*, 7 (08), 1081–1088. DOI: 10.1079/PHN2004648
- Thejpal R.** (2015). Iron deficiency in children. *S. Afr. Med. J.*, 105 (7), 607. DOI: 10.7196/SAMJnew.7781
- Tracy M., Cerdá M., Keyes K.M.** (2018). Agent-based modeling in public health: Current applications and future directions. *Annual Review of Public Health.*, 39, 77–94.
- World Health Organization and Centers for Disease Control and Prevention (WHO/CDC). Worldwide prevalence of anaemia 1993–2005. WHO Global database on anaemia. 2008. Available at: http://whqlibdoc.who.int/publications/2008/9789241596657_eng.pdf

Forecast of anaemia prevalence in the regions of Russia using the agent-based model

© 2022 A.L. Mashkova, N. Dukhi, R. Kaur, I.V. Nevolin

A.L. Mashkova,

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel; Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: aleks.savina@gmail.com

N. Dukhi,

Human Sciences Research Council, South African Republic; e-mail: doctordukhi@gmail.com

R. Kaur,

Central Scientific Instruments Organization, India; Academy of Scientific and Innovative Research, India, e-mail: kaur@list.ru

I.V. Nevolin,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: jolutre@mail.ru

Received 25.01.2022

The reported study was funded by RFBR, Department of Science and Technology (India) and National Research Foundation (South African Republic) according to the research project № 19-57-80003.

Abstract. In the article development of the agent-based model of anaemia prevalence in Russia is discussed. The structure of the model is presented, which includes agents-residents, food producers and sales agents. For each actor in the model, algorithms have been developed that determine their interactions. For food producers, their purchases, sales, production process and dynamics of investments in equipment are simulated. Simulation of sales agents includes the assortment formation and product prices, taking into account transport and trade margins. Households form their diet based on their income, composition, traditions and habits. The expected dynamics of anaemia is modeled depending on the quality of the received food and the current stage of the disease. The article also discusses program realization and information support of the model; the user interface is presented. Four scenarios of the dynamics of the socio-economic environment of the model are formalized, taking into account epidemiological and external economic risks. A series of calculations was carried out to predict the dynamics of anaemia prevalence under conditions of the developed scenarios. A program of subsidizing low-income families was proposed and its influence on availability of a balanced diet and anaemia prevalence among Russian residents was studied. The calculations show that in the absence of special support measures, a balanced diet becomes available to a smaller number of residents (65% compared to 78% in 2019) in the conditions of the most likely “trade war” scenario. At the same time, the total amount of subsidies required to provide low-income families with quality food varies from 300 billion to 1 trillion rubles per year, depending on the amount of benefits allocated.

Keywords: agent-based modeling, anemia, nutrition, recommended daily allowance.

JEL Classification: I15.

For reference: **Mashkova A.L., Dukhi N., Kaur R., Nevolin I.V.** (2022). Forecast of anaemia prevalence in the regions of Russia using the agent-based model. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 2, 64–79. DOI: 10.31857/S042473880018351-5