

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭПИДЕМИИ

УДК 519.87:616.98

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ВИЧ-ИНФЕКЦИИ В СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

<sup>1</sup>А.С.Подымова, <sup>2</sup>Е.А.Носова<sup>1</sup>ГБУЗ СО «Свердловский областной центр профилактики и борьбы со СПИД», Екатеринбург, Россия<sup>2</sup>ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения» МЗ РФ, Москва, Россия

© А.С.Подымова, Е.А.Носова, 2017 г.

Свердловская область относится к регионам с высоким уровнем заболеваемости и пораженности инфекцией вирусом иммунодефицита человека. В статье представлены данные математического моделирования распространения инфекции вирусом иммунодефицита человека с прогнозом уровня пораженности до 2025 года. Оценена динамика численности групп различного риска инфицирования — «ядра» (потребители инъекционных наркотиков), группы «мост» и основного населения. Модель представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, которые описывают процесс инфицирования вирусом в популяции. Для определения процесса инфицирования вирусом в модели заданы вирулентность группы и весовые коэффициенты контактов между представителями разных групп. Для определения эффективных мероприятий по борьбе с распространением инфекции вирусом иммунодефицита человека проведен анализ чувствительности методом Монте-Карло. Математическое моделирование позволило предположить, что в результате реализации профилактических и лечебных мероприятий в области удалось повлиять на ход эпидемического процесса инфекции вирусом иммунодефицита человека в сторону замедления с 2013 по 2014 год и снизить пораженность.

**Ключевые слова:** ВИЧ-инфекция, математическое моделирование, социальная дезадаптация, пораженность ВИЧ населения, потребители инъекционных наркотиков (ПИН).

## MATHEMATICAL MODELING OF THE EVOLUTION OF HIV INFECTION IN SVERDLOVSK OBLAST

<sup>1</sup>A.S.Podymova, <sup>2</sup>Ye.A.Nosova<sup>1</sup>Sverdlovsk regional center for prevention and control of AIDS, Yekaterinburg, Russia<sup>2</sup>Central Research Institute of Health Care Organization and Information Management of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

Sverdlovsk Oblast is among regions featuring high levels of HIV incidence and prevalence. The present paper describes a mathematical model of HIV spread up to the year 2025. Changes in the sizes of population groups featuring different levels of HIV contraction, i.e. core risk group (injection drug users), bridging groups, and the general population, have been assessed. The model is based on a system of linear differential equations that capture HIV transmission in a population with account of risk group vulnerability to HIV and of weighted coefficients of contact rates between subjects referred to different risk groups. To estimate the effectiveness of interventions aimed at controlling the spread of HIV, sensitivity analysis using Monte-Carlo method was carried out. The modelling suggests that preventive and therapeutic interventions undertaken in Sverdlovsk Oblast slowed down HIV spread and reduced HIV prevalence in the year 2014 compared with 2013.

**Key words:** HIV infection, mathematical modeling, social maladjustment.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.22328/2077-9828-2017-9-2-47-57>

**Введение.** Свердловская область занимает одно из лидирующих мест среди регионов России по пораженности и первичной заболеваемости населения

вирусом иммунодефицита человека (ВИЧ)-инфекцией. Тенденции развития эпидемической ситуации в области в целом соответствуют Российской

Федерации, однако уровень заболеваемости в 2016 году превысил средний российский в 2,2 раза (156,9 и 70,6 на 100 тысяч населения соответственно), а уровень пораженности в 2,8 раза (1647,0 и 594,3 на 100 тысяч населения соответственно).

Первые случаи ВИЧ-инфекции в Свердловской области зарегистрированы в 1990 году и были связаны с половым путем передачи, преимущественно гомосексуальным, среди мужчин. В начале нового века в области произошла вспышка ВИЧ-инфекции среди потребителей инъекционных наркотиков (ПИН), в результате которой сформировался большой резервуар инфекции в данной группе: в 2001 году на долю ПИН пришлось 91,4%, а уровень первичной заболеваемости достиг максимальной отметки за весь период регистрации ВИЧ-инфекции — 197,7 на 100 тысяч населения. В последующем уровень регистрируемой заболеваемости снижался, а в 2011 году вновь произошло увеличение новых случаев ВИЧ-инфекции, с максимальным показателем в 2014 году, когда заболеваемость приблизилась к уровню 2001 года (173,6 на 100 тысяч населения). Однако в 2015 и 2016 годах регистрируется достоверное снижение заболеваемости ( $p < 0,001$  в 2016 г. по сравнению с 2015 г. и 2014 г.), на фоне увеличения охвата населения обследованием (до 24% в 2016 г.), в том числе среди уязвимых ВИЧ-инфекции групп и групп повышенного риска. Наряду со снижением первичной заболеваемости, с 2014 года в области наблюдается снижение темпа прироста пораженности населения — с 11,6% (в 2013 г.) до 7,7% (в 2016 г.) ( $p < 0,001$ ). В динамике наблюдается смена путей передачи ВИЧ-инфекции, если в 2001 году на долю парентерального пути передачи приходилось 91,4%, то в 2005 г. — 60,2%, 2011 г. — 48,6%, 2016 г. — 43,7%.

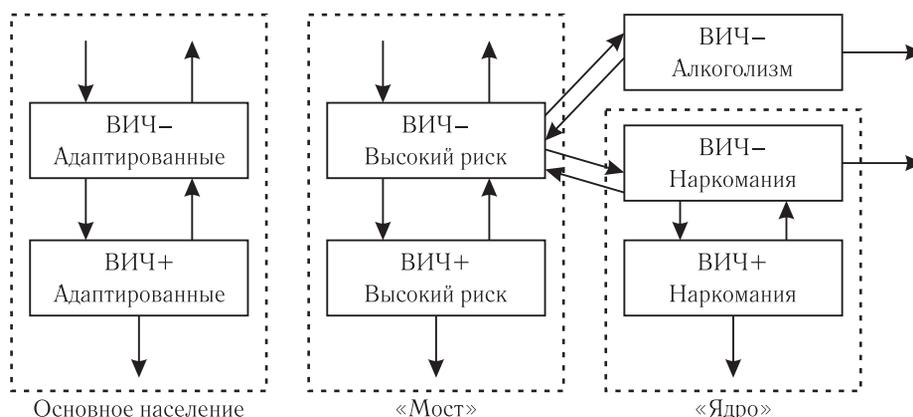
**Цель исследования.** С помощью математического моделирования изучить эволюцию и прогнозируемый уровень распространенности ВИЧ-инфекции в Свердловской области.

**Материалы и методы.** Для анализа распространения ВИЧ-инфекции на территории области были использованы данные Росстата, форм статистической отчетности Министерства здравоохранения РФ № 37, № 11 и № 61, данные персонафицированного учета ВИЧ-инфицированных ГБУЗ СО «Свердловский областной центр профилактики и борьбы со СПИД», а также ряд оценок из научной литературы по смежным тематикам. Массив данных содержал информацию о распространении ВИЧ-инфекции, наркомании, алкоголизма, миграции, рождаемости и смертности в Свердловской области с 1990 по 2016 год.

Исследование было проведено с использованием математической модели распространения ВИЧ-инфекции и социальной дезадаптации, предложенной Е.А.Носовой и А.А.Романюхой [1] и предназначенной для изучения и прогнозирования распространения ВИЧ-инфекции в Российской Федерации на региональном уровне. Модель представляет собой систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, которые описывают процесс инфицирования ВИЧ в популяции (формулы 1 и 2). Схема модели представлена на рис. 1.

$$\begin{cases} \frac{dS_i}{dt} = f_i + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}^S S_j - \omega_i \sum_{j=1}^n p_{ij} I_j S_i \\ \frac{dI_i}{dt} = \omega_i \sum_{j=1}^n p_{ij} I_j S_i + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}^I I_j \end{cases} \quad i \in \{G, B, A, D\} \quad (1)$$

Переменными модели являются численности групп восприимчивых (ВИЧ-)  $S_i$  и инфицированных (ВИЧ+)  $I_i$  индивидов в группах с различным риском инфицирования ВИЧ: G — основная



**Рис. 1.** Схема подгрупп популяции в модели распространения ВИЧ-инфекции и социальной дезадаптации. Прямоугольниками обозначены подгруппы модельной популяции, стрелками — потоки индивидов

популяция, В — «мост», А — больные хроническим алкоголизмом, Д — больные наркоманией.

Модель описывает одновременное развитие двух процессов — распространения ВИЧ-инфекции (слагаемые  $\omega_i \sum_{j=1}^n p_{ij} I_j S_i$  в формуле 1) и динамику численности групп различного риска инфицирования (слагаемые с коэффициентами  $\alpha$ ), как результат социальной дезадаптации и адаптации индивидов среди взрослого (старше 15 лет) населения.

Пополнение модельной популяции происходит за счет естественного прироста (взросление родившихся 15 лет назад) и миграции. Миграционный прирост отнесен к группе «мост», поскольку часть мигрантов имеют повышенный уровень заражения ВИЧ-инфекцией. Количественная оценка этих показателей возможна на основе данных Росстата. Для каждой группы проведена оценка смертности с учетом наличия дополнительных рисков в виде ВИЧ-инфекции или наркологической патологии. Оценка коэффициентов смертности проводилась с использованием данных Росстата и отчетных статистических форм Минздрава России.

Важным моментом при задании модели для конкретного региона является оценка численности основных групп. Особенно начальной численности основной популяции, группы «мост», больных наркоманией и хроническим алкоголизмом. Для двух других групп оценка численности может быть получена на основе данных статистических форм № 11 и № 37. Однако, как показало дальнейшее исследование модели, необходимо корректировать оценку численности больных наркоманией с учетом латентности данной патологии. По оценочным данным [2], коэффициент латентности наркомании для Уральского федерального округа составил 5,19 (в 2000 г.) и 5,67 (в 2005 г.). В настоящем исследовании было использовано среднее арифметическое этих значений для оценки полной численности «ядерной» группы.

Оценка численности группы «мост» задается через долю населения, подверженного высокому риску развития наркологической патологии. Получить данный показатель непосредственным статистическим измерением невозможно. Доступные в литературе оценки варьируют от 5 до 60% [3], что невозможно использовать при моделировании. Поэтому для получения индивидуальной региональной оценки численности группы «мост», а также скоростей потоков в эту группу из основной популяции и обратно применяется процедура оптимизации подмодели социальной

дезадаптации на стационар. Для этого рассматривается модель без процесса инфицирования ВИЧ и предполагается постоянство численности всех подгрупп и популяции в целом. Данное предположение подтверждается в пределах статистической погрешности для Свердловской области на периоде 2002–2016 годов. В результате этой процедуры было получено, что группа «мост» составляет 21% от всего населения; скорость дезадаптации составляет 0,56 (1/год), адаптации — 1,96 (1/год).

Оценки скоростей переходов из группы «мост» в группы с наркологической патологией и обратно были рассчитаны на основе данных форм № 37 и № 11 о числе новых случаев наркомании и хронического алкоголизма, выявленных впервые в жизни и снятых с учета в связи со стойкой ремиссией.

Количество новых случаев ВИЧ-инфекции в модели пропорционально числу инфицированных и числу восприимчивых индивидов:

$$\omega_i \sum_{j=1}^n p_{ij} I_j S_i \quad (2)$$

Это классический подход, применяемый в популяционном моделировании распространения инфекционных заболеваний [4]. Для определения процесса инфицирования ВИЧ в модели необходимо задать вирулентность группы  $\omega_i$  и весовые коэффициенты контактов между представителями разных групп  $p_{ij}$ .

Вирулентность группы  $\omega_i$  — количество новых случаев инфицирования ВИЧ, приходящееся на одного восприимчивого представителя группы  $i$  при взаимодействии с одним инфицированным индивидом из популяции.

Весовые коэффициенты  $p_{ij}$  отражают структуру взаимодействия восприимчивых индивидов из группы  $i$  с другими группами. Этот коэффициент, вообще говоря, включает в себя частоту контактов, склонность представителей группы вступать в незащищенные контакты, доступность (физическую и социальную) представителей группы  $j$  для вступления в контакт с представителем группы  $i$ . Получение явных оценок этих компонентов не представляется возможным. Поэтому в данной работе производится просто оценка весового коэффициента как целого, без уточнения его составляющих.

В статье авторов Е.А.Носовой, А.А.Романюхи (2013) приведены рассуждения, согласно которым для задания процесса инфицирования достаточно оценить всего 5 параметров вирулентности контакта с группой «мост» и «ядерной» группой и три весовых коэффициента: для защищенных половых контак-

тов, незащищенных половых контактов ПИН и инъекционных контактов ПИН [1]. Вирулентность основной популяции заимствована из экспертных оценок [5, 6] и составляет  $15 \times 10^{-8}$  (1/чел./год). Недостающие коэффициенты модели были вычислены путем минимизации структурной метрики на протяжении всего периода распространения ВИЧ-инфекции с 1990 по 2016 год. Структурная метрика представляет собой сумму квадратичных отклонений наблюдаемых значений и решения модели для числа ВИЧ-инфицированных в каждой подгруппе.

Результаты определения параметров инфицирования ВИЧ на известном участке времени позволяют сделать выводы о характере процессов, протекавших в этот период. Поэтому их значения вынесены в следующий раздел настоящей статьи. Значения же остальных величин, необходимых для задания модели распространения ВИЧ-инфекции в Свердловской области, приведены в таблице 1.

Таблица 1  
Величины, использованные для задания модели распространения ВИЧ-инфекции

Название	Значение
Естественный прирост взрослой популяции	46 235 чел./год
Миграционный прирост взрослой популяции	69 чел./год
Естественная смертность (основная популяция)	0,0055 1/год
Смертность в группе «мост»	0,034 1/год
Смертность в группе больных алкоголизмом	0,031 1/год
Смертность в «ядерной» группе	0,023 1/год
Смертность от ВИЧ-инфекции	0,076 1/год
Скорость дезадаптации в «мост»	0,56 1/год
Скорость развития алкоголизма	0,0047 1/год
Скорость развития наркомании	0,0022 1/год
Скорость адаптации в основную популяцию	1,96 1/год
Скорость адаптации больных алкоголизмом	0,035 1/год
Скорость адаптации ПИН	0,0045 1/год
Вирулентность контакта основной популяции	$15 \times 10^{-8}$ 1/чел.-год
Численность основной популяции	2 816 500 чел.
Численность группы «мост»	777 166 чел.
Численность больных алкоголизмом	44 249 чел.
Численность ПИН	62 874 чел.

Для определения эффективных мероприятий по борьбе с распространением ВИЧ-инфекции был проведен анализ чувствительности методом Монте-

Карло. Для этого были сгенерированы 1000 испытаний — реализаций модели с параметрами, случайным образом отличающимися от исходных в пределах 1%. Исследование изменения решения в зависимости от этих изменений параметров статистическими методами позволяет оценить значимость каждого из процессов в основных эпидемиологических показателях ВИЧ и направление изменения.

Для выяснения распространенности и факторов риска заражения ВИЧ-инфекции в группе ПИН («ядро») в 2007-м, 2011-м и 2014 годах на территории Екатеринбурга проводились дозорные эпидемиологические исследования с помощью выборки, управляемой респондентом; опрос был связан с тестированием образцов крови на ВИЧ-инфекцию. Выборка составила: 2007 г. — 300 ПИН, 2011 г. — 350 ПИН, 2014 г. — 380 ПИН. В исследовании приняли участие, как мужчины, так и женщины ПИН, достигшие возраста 15 лет и старше, которые имеют опыт употребления наркотических веществ в немедицинских целях инъекционным путем в течение последних 4 недель, предшествовавших исследованию, и находящиеся на территории Екатеринбурга. Сравнение выборок производилось в программе SPSS 13.0 с использованием таблиц сопряженности с проверкой значимости связи с помощью критерия согласия Пирсона.

**Результаты и их обсуждение.** Социальная дезадаптация и адаптация в модели прогнозирования описаны, как последовательное изменение трех состояний: адаптированного, повышенного риска развития наркопатологии и непосредственного наличия наркопатологии (хронический алкоголизм или наркомания). Согласно исследованиям лица в состоянии повышенного риска развития наркопатологии практикуют различные формы рискованного поведения: незащищенный половой контакт, эпизодическое употребление алкоголя и наркотиков [2, 7–9].

Таким образом, можно утверждать, что данная группа образует так называемый «мост» между основной популяцией (низкий риск инфицирования ВИЧ) и «ядерной» группой (высокий риск инфицирования ВИЧ, главным образом, через парентеральные контакты) [7]. Среди больных с наркологической патологией выделяются две группы, которые радикально отличаются по риску распространения ВИЧ-инфекции: больные хроническим алкоголизмом и больные наркоманией. Больные хроническим алкоголизмом включены в модель как группа «мост». По нашим данным,

выявляемость ВИЧ-инфекции среди больных алкоголизмом составляла в 2011 году 1,4%, что в 1,6 раза превышает средний уровень выявляемости среди всего населения Свердловской области.

Потребители инъекционных наркотиков, образующие «ядро» эпидемии ВИЧ-инфекции, являются основной группой риска по заражению и распространению ВИЧ-инфекции, как внутри группы, так и за ее пределами, инъекционным и половым путями [10].

По данным дозорных эпидемиологических исследований, процент положительных результатов тестирования участников исследования на наличие ВИЧ-инфекции составил 65,3% (в 2014 г.), 58% (в 2011 г.) и 64,3% (в 2007 г.). Показатели пораженности ПИН ВИЧ-инфекцией в области имеют наибольшее значение в сравнении с другими регионами: в 2011 году пораженность ПИН в г. Москве — 18%, г. Омске — 16,7%, г. Орле — 6,4% [11]. При высоком уровне пораженности ВИЧ-инфекцией ПИН активно используют рискованные практики: средний стаж инъекционного потребления наркотиков составил для выборки 2007 г. —  $8,5 \pm 5,14$  лет, 2011 г. —  $18,7 \pm 6,46$  лет, 2014 г. —  $15,5 \pm 6,33$  лет; 85% респондентов (в 2014 г.) указали, что в их кругу соупо-

передачи среди партнеров — ПИН и неПИН. Эти данные соответствуют результатам моделирования в других регионах РФ [7–9].

Данная категория остается неблагополучной с точки зрения социальной реадaptации. Так, в течение последних 12 месяцев за бесплатной государственной наркологической помощью обращались только 7,7% респондентов 2007 года и 3,2% респондентов 2014 года ( $p \leq 0,01$ ). Обращение за наркологической реабилитацией статистически значимо не изменилось (2007 г. — 2,3% и 2014 г. — 5,7%).

В 2011 году в Свердловской области начался новый подъем заболеваемости ВИЧ-инфекцией, в том числе с активизацией полового пути передачи (50,8%). Для планирования организационно-практических вмешательств, в части выявления, лечения и профилактики ВИЧ-инфекции, авторами был проведен расчет модели с параметрами инфицирования 1990–2010 годов (рис. 2) и рассчитан (смоделирован) прогноз пораженности до 2020 года (451 698 случаев), характеризующийся насыщением к 2014 году «ядра» (с последующим снижением) и нарастанием вовлечения основной группы населения и «моста».

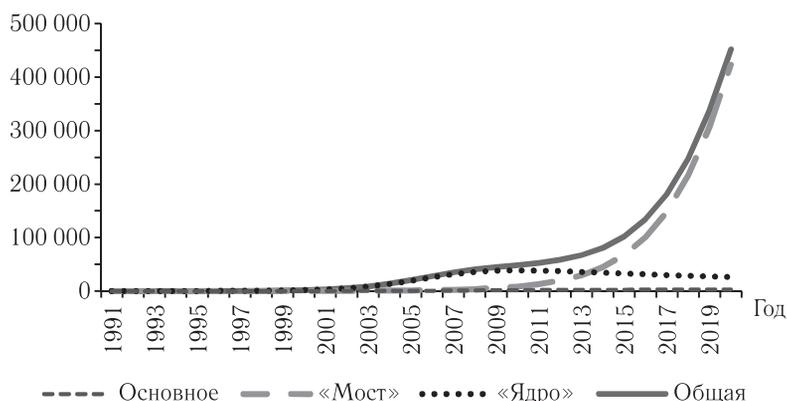


Рис. 2. Прогноз пораженности ВИЧ-инфекцией населения Свердловской области в модели с параметрами для 2010 года

ребителей есть ВИЧ-инфицированные и при этом 43,2% используют совместные иглы; 62,1% респондентов (в 2014 г.) указали на факт пребывания в местах лишения свободы. Сохраняется наличие половых контактов у представителей группы ПИН с «мостовой» популяцией — людьми, никогда не употреблявшими наркотики инъекционным путем: 2014 г. — 27,9%, 2011 г. — 49%, 2007 г. — 50,2%. Результаты исследования свидетельствуют о «насыщении» ВИЧ-инфекцией популяции ПИН и о высоких рисках передачи указанных инфекций при сохранении рискованного поведения в части их

Указанный прогноз послужил основой планирования, апробации и внедрения ряда медико-организационных технологий по привлечению к тестированию на ВИЧ уязвимых групп населения, в том числе ПИН.

В соответствии с приказом Министерства здравоохранения Свердловской области от 10.04.2012 № 354 «Об организации профилактики ВИЧ-инфекции среди лиц, употребляющих психоактивные вещества с немедицинскими целями» организовано обследование на ВИЧ лиц, проходящих освидетельствование на употребление психоактив-

ных веществ, а в рамках Соглашения Министерства здравоохранения Свердловской области и ГУ МВД России по Свердловской области от 23.04.2013 № 2013/03 10/10 «Об организации взаимодействия учреждений здравоохранения и правоохранительных органов по противодействию распространению ВИЧ-инфекции в Свердловской области» обследованию на ВИЧ подлежат лица, находящиеся в изоляторах временного содержания (ИВС) системы МВД. Уровень выявляемости ВИЧ среди лиц, проходящих освидетельствование на употребление психоактивных веществ, — 4,7%, в ИВС — 9%. С 2011 года применяется низкопороговый метод экспресс-тестирования на ВИЧ-инфекцию (выявляемость 3%). В 2013 году организовано тестирование в негосударственных реабилитационных центрах для лиц, потребляющих наркотики (выявляемость 10,2%);

Расчетный индикатор «тестировались в течение последних 12 месяцев и знают свой результат» показал незначимые различия. Как следствие лучшей информированности о своем статусе, значительно улучшилась обращаемость за помощью в связи с ВИЧ-инфекцией. Так, в 2007 году на это указали 8% респондентов, а в 2014 году — 29,7% ( $p \leq 0,01$ ).

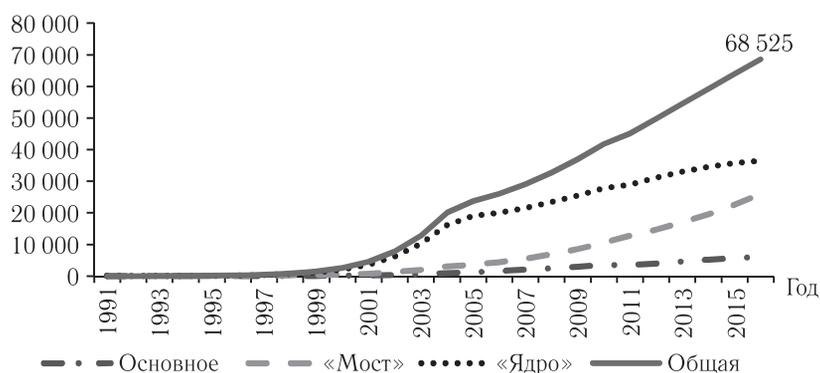
Помимо активного выявления ВИЧ-инфекции, акцент сделан на увеличении охвата антиретровирусной терапией в группе людей, живущих с ВИЧ (ЛЖВ), с разными путями инфицирования. Так, охват антиретровирусной терапией среди ЛЖВ с гетеросексуальным путем заражения («моста») увеличен в 1,42 раза, а среди инфицированных парентеральным путем («ядра») — в 1,49 раза. В результате неопределяемый уровень вирусной нагрузки в 2016 году достиг уровня соответственно 75,11% и 72,56% (табл. 2).

Таблица 2

**Охват антиретровирусной терапией и уровень неопределяемой вирусной нагрузки у пациентов с различными путями инфицирования в 2013 и 2016 годах в Свердловской области**

		Гетеросексуальный путь инфицирования		Парентеральный путь инфицирования	
		2013 г.	2016 г.	2013 г.	2016 г.
Охват антиретровирусной терапией	n	5089	9574*	6212	10 721*
	%	29,75	42,17	24,39	36,39
Процент с неопределяемой вирусной нагрузкой	n	3536	7191*	4083	7779*
	%	69,48	75,11	65,73	72,56

\* — Обозначены различия, достоверно отличающиеся между годами ( $p \leq 0,05$ ).



**Рис. 3.** Модель пораженности ВИЧ-инфекцией в Свердловской области, по данным 2010 года

внедрено обследование при диспансеризации отдельных групп взрослого населения и половых партнеров беременных женщин.

ПИН, по результатам исследования 2007 и 2014 годов, узнавали результат своего тестирования в 93% и 95% случаях соответственно. Из них в 2007 году указали, что при последнем тестировании им был поставлен диагноз «ВИЧ инфекция» — 33,5%, а в 2014 году — 61,4% ( $p \leq 0,001$ ).

Как видно из прогноза с параметрами инфицирования до 2010 года, пораженность ВИЧ-инфекцией населения Свердловской области к 2016 году должна была достигнуть 133 969 человек, тогда как реальная пораженность составила 69 151 человек. Графически показаны различия между моделью 2010 года (рис. 3) и реальным уровнем пораженности на конец 2016 года (рис. 4), свидетельствующие о замедлении распространения эпидемического

процесса с 2013 по 2014 год, но сохраняющейся в большом объеме популяции «ядра».

сивного воздействия на эпидемическую ситуацию со стороны системы здравоохранения. В результа-

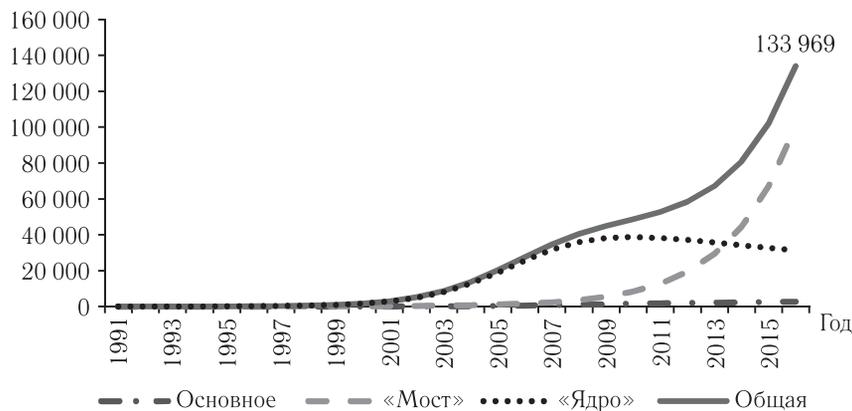


Рис. 4. Модель пораженности ВИЧ-инфекцией в Свердловской области, по данным 2016 года

В целях оценки проводимых мероприятий и планирования дальнейших действий, в том числе в рамках выполнения основных положений государственной стратегии противодействия распространению ВИЧ-инфекции [12], проведено математическое моделирование прогноза пораженности до 2025 года с качеством приближения модели пораженности ВИЧ-инфекцией (рис. 5) по данным 2016 года.

те удалось изменить ход процесса и несколько улучшить прогноз, что подтверждается сравнением результатов моделирования до 2010 года (см. рис. 2) и до 2016 года (см. рис. 5).

В результате исследования и математического моделирования прогнозируемого и наблюдаемого уровня распространения ВИЧ-инфекции были выявлены три периода (1994–2004 гг., 2004–2010 гг. и 2010–2016 гг.), которым соответствуют три различ-

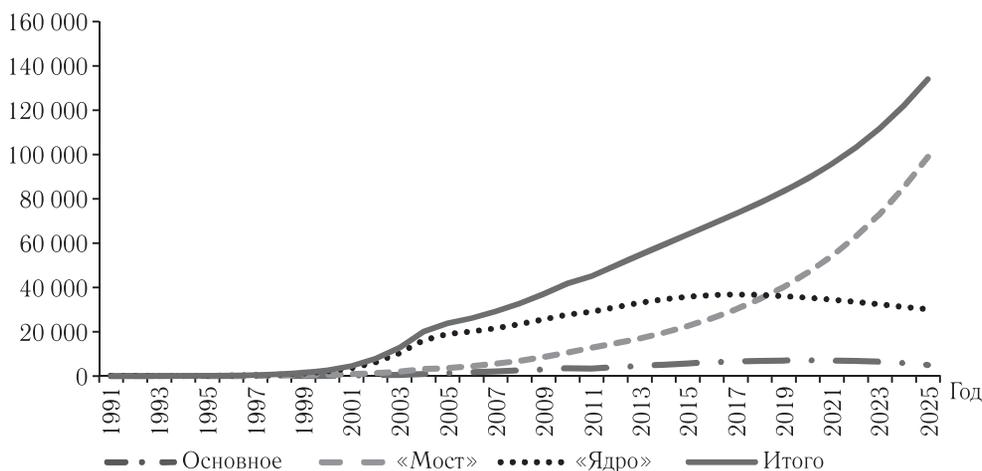


Рис. 5. Модель прогноза пораженности ВИЧ-инфекцией в Свердловской области до 2025 года с качеством приближения модели пораженности ВИЧ-инфекцией по данным 2016 года

Анализ результатов позволяет предположить, что эпидемиологическая динамика ВИЧ-инфекции в Свердловской области соответствует трем логическим периодам. В первый период — 1990–2004 годы — происходило накопление инфекции в «ядерной» группе. Далее — в 2004–2010 годы — происходил перенос инфекции из «ядерной» группы в группу «мост» с дальнейшим поражением «ядерной» группы. Период 2010–2016 годов соответствует времени интен-

ных модели с различными параметрами инфицирования ВИЧ (см. табл. 3). При этом достигается наилучшее приближение наблюдаемой структуры пораженности ВИЧ-инфекции в Свердловской области.

Модель показывает, что в динамике наблюдается планомерное снижение вирулентности в группе «мост» и «ядерной» группе на всех трех периодах моделирования и увеличивается высокий риск полового пути передачи, что соотносится с данными, характеризующими развитие эпидемической ситуации.

Таблица 3

## Результаты оценки параметров инфицирования ВИЧ для Свердловской области

Периоды наблюдений (годы)	Вирулентность «моста» (1/чел.-год)	Вирулентность «ядра» (1/чел.-год)	Веса контактов		
			Половые		Инъекции
			Низкий риск	Высокий риск	
1990–2004	0,007	0,7	0,6	0,4	0,1
2004–2010	0,009	0,3	0,3	0,2	0,003
2010–2016	0,003	0,3	0,3	0,6	0,001

Таблица 4

## Пораженность ВИЧ-инфекцией населения Свердловской области в модели и наблюдаемые в реальности данные

Год	Модель				Реальность			
	основная	«мост»	«ядро»	общая	основная	«мост»	«ядро»	общая
1990	0	4	0	4	0	4	0	4
1991	0	7	3	9	0	7	0	7
1992	0	11	8	19	0	8	0	8
1993	0	17	19	37	0	11	0	11
1994	1	28	42	71	0	14	0	14
1995	3	45	85	133	0	16	0	16
1996	6	73	167	247	0	15	0	15
1997	13	118	321	451	0	20	63	83
1998	25	190	602	817	0	24	109	133
1999	49	304	1111	1464	0	32	244	276
2000	93	485	2014	2592	24	168	3790	3982
2001	172	773	3574	4519	193	840	11 699	12 732
2002	310	1227	6169	7706	367	1486	14 945	16 798
2003	543	1942	10 235	12 720	531	2136	16 988	19 655
2004	917	3063	16 058	20 038	726	2881	18 371	21 978
2005	1156	3554	18 949	23 659	988	3732	19 564	24 284
2006	1583	4415	20 022	26 020	1322	4664	20 837	26 823
2007	2019	5499	21 526	29 043	1679	5936	22 268	29 883
2008	2475,2	6848	23 380	32 703	2080	7485	23 931	33 496
2009	2960	8514	25 486	36 959	2462	9183	25 355	37 000
2010	3478	10 558	27 720	41 756	2868	11 036	26 654	40 558
2011	3428	12 731	28 911	45 070	3260	12 889	28 036	44 185
2012	4000	14 682	31 059	49 741	3687	15 042	29 643	48 372
2013	4571	16 927	32 970	54 469	4128	17 348	31 617	53 093
2014	5129	19 517	34 539	59 185	4527	19 746	34 231	58 504
2015	5653	22 514	35 696	63 863	4905	22 386	36 574	63 865
2016	6125	25 991	36 409	68 525	5247	25 236	38 878	69 361
2017	6525	30 034	36 683	73 243				
2018	6832	34 746	36 557	78 136				
2019	7029	40 245	36 092	83 366				
2020	7096	46 669	35 362	89 127				
2021	7020	54 173	34 441	95 634				
2022	6784	62 935	33 401	103 120				
2023	6373	73 154	32 300	111 827				
2024	5774	85 049	31 184	122 007				
2025	4970	98 856	30 087	133 913				

В таблице 4 приведены значения пораженности ВИЧ-инфекцией для отдельных групп и их соответствие наблюдаемым реальным данным. Видно, что имеет место запаздывание наблюдаемых величин относительно модельных только в основной группе населения в течение всего периода наблюдения.

Реализуя предположение о наличии полного выявления ВИЧ-инфекции среди уязвимых ВИЧ-инфекции групп населения и групп повышенного риска («ядро» и «мост»), формируемых (инфицированных) в реальном времени, в случае неизменности мероприятий, проводимых в 2016 году, прогнозируемая пораженность ВИЧ-инфекцией составит в 2025 году 133 913 человек, с активным вовлечением в процесс группы «мост» и снижением «ядра» с 2018 года.

17,5% для 1990–2004 годов, 0,01% — для 2004–2010 годов и 0,02% — для 2010–2016 годов. В таблице 5 приведены параметры с наибольшим вкладом в изменение пораженности ВИЧ-инфекцией, а на рисунке 6 — примерный перечень мероприятий, воздействующих на данные параметры.

Анализ чувствительности показал, что на этапе 2010–2016 годов приоритетным параметром, вносящим наибольший вклад в увеличение пораженности населения, является вирулентность от половых контактов высокого риска, на который необходимо воздействовать определенными мероприятиями — профилактика рискованного полового поведения (защищенный секс), раннее выявление и лечение ВИЧ-инфекции с достижением неопределяемого уровня вирусной нагрузки (см. рис. 6).

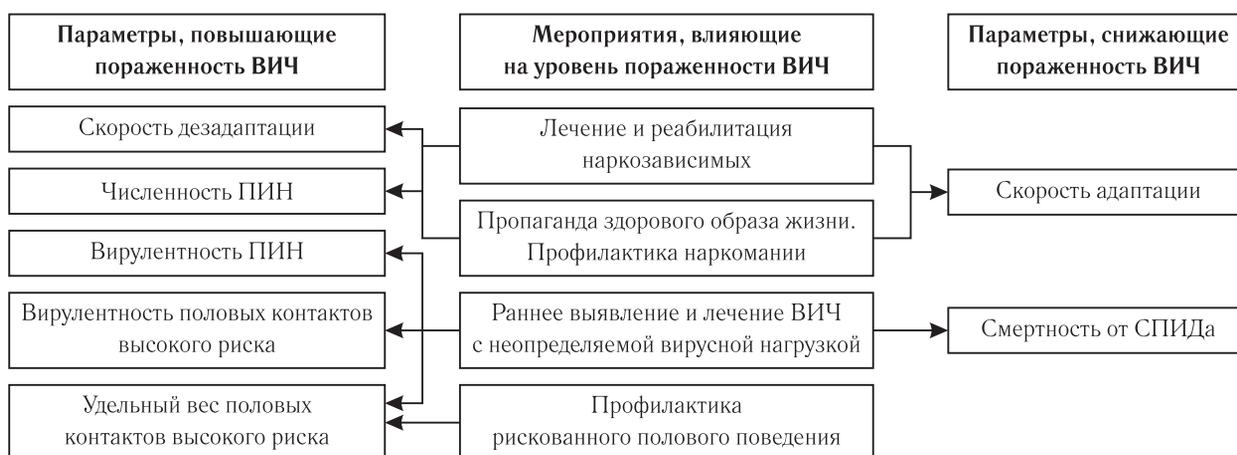


Рис. 6. Мероприятия, воздействующие на параметры, повышающие и снижающие пораженность ВИЧ-инфекцией

Учитывая успешный опыт новых технологий, введенных в регионе в части тестирования (выявления), лечения и профилактики, проведена оценка чувстви-

В связи с тем, что прогноз составлен с учетом полного выявления новых случаев ВИЧ-инфекции, он является оценкой первого приближения и требу-

Таблица 5  
Чувствительность общей пораженности ВИЧ-инфекцией к малым изменениям параметров модели в период 2010–2016 годов. В ячейках — % от среднего изменения пораженности, который может быть получен за счет повышения параметра на 1%

Параметры	Виды параметров	Чувствительность, %
Увеличивающие пораженность	Скорость дезадаптации	13
	Вирулентность половых контактов высокого риска	24
	Удельный вес рискованных половых контактов	14
	Численность ПИН	12
	Вирулентность ПИН	2
Снижающие пораженность	Скорость адаптации	11
	Смертность от синдрома приобретенного иммунодефицита (СПИДа)	9

тельности функционала пораженности ВИЧ-инфекцией методом Монте-Карло; каждый параметр изменялся в пределах 1%. Среднее изменение пораженности ВИЧ-инфекцией в экспериментах составило

ет как проведения вышеперечисленных мероприятий, так и дальнейшего снижения недиагностированных случаев ВИЧ-инфекции путем реализации межведомственных подходов к выявлению ВИЧ-

инфекции среди различных групп населения. Эпидемический процесс носит во всех случаях многокомпонентный характер и определяется рядом переменных, в том числе зависит от демографических изменений, наркотрафика, социально-экономических и других причин. Ранее было показано, что при маломеняющихся влияниях заболеваемость носит волнообразный характер, что, по-видимому, определяется указанными выше взаимоотношениями между инфекционным «ядром», людьми, имеющими с ними непосредственный контакт («мост»), и общей популяцией. В период роста заболеваемости люди в большем числе попадают в «ядро», и по мере их убывания постепенно снижается заболеваемость, то есть перенос в общую популяцию. Этим можно объяснить снижение первой волны на несколько лет, куда вошло поколение, сформировавшееся в 90-е годы [13, 14], где основным источником заражения было употребление инъекционных наркотиков. Вторая волна сформировалась в большей мере за счет полового заражения, накладываясь на еще высокий уровень употребления наркотиков. Сегодняшний период совпадает с внедрением активных технологий противодействия эпидемии, которые, вероятно, вносят существенный вклад в формирующиеся тенденции снижения заболеваемости и скорости роста распространенности ВИЧ. Однако эта тенденция весьма нестабильна и может быть нарушена внешними факторами, например ростом инъекционной наркомании или снижением профилактических мероприятий [8].

**Заключение.** Эпидемическая ситуация по ВИЧ-инфекции в Свердловской области между 2010 и 2016 годами перешла на качественно иной уровень протекания и потребовала реализации новых технологий в выявлении и оказании медицинской помощи ВИЧ-инфицированным.

Проведенное математическое моделирование позволяет предположить, что в результате реализации профилактических и лечебных мероприятий удалось изменить ход эпидемического процесса ВИЧ-инфекции в сторону замедления, начиная с 2013–2014 годов, и улучшить прогноз по уровню пораженности на среднесрочную перспективу.

Реализуя предположение о высоком выявлении ВИЧ-инфекции среди уязвимых групп населения и групп повышенного риска, в случае неизменности проводимых мероприятий, прогнозируемая пораженность ВИЧ-инфекцией составит в 2025 году минимум 134 тысячи человек, что требует дополнительных организационных и финансовых усилий в части оказания медико-социальной помощи.

Учитывая прогнозируемое увеличение вовлечения в эпидемический процесс группы «мост», то есть людей с рискованным поведением, влияющих на рост пораженности (половой риск передачи ВИЧ-инфекции), при сохранении других факторов, повышающих и снижающих пораженность, требуется усиление профилактических вмешательств, реализуемых на всех социальных уровнях, как в отношении группы «мост», так и в отношении основного населения [15].

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Носова Е.А., Романюха А.А. Математическая модель распространения ВИЧ-инфекции и динамики численности групп риска // Математическое моделирование. 2013. Т. 25, № 1. С. 45–64. [Nosova E.A., Romanyukha A.A. Mathematical model of HIV infection transmission and dynamics in the size of risk groups. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2013, Vol. 25, No. 1, pp. 45–64 (In Russ.)].
2. Социально-демографическая безопасность России / Под ред. В.А.Черешнева, А.И.Татаркина. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2008. 885 с. [Social and demographic safety of Russia. Ed. V.A.Chereshnev, A.I.Tatarkin. *Ekaterinburg: Institute of Economics UrO RAS*, 2008, 885 p. (In Russ.)].
3. Спектор С.И., Богданов С.И., Правительство Свердловской обл. [и др.] Наркомания в Свердловской области: история, современное состояние, прогноз. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2003. 297 с. [Spector S.I., Bogdanov S.I. The government of the Sverdlovsk region [etc.] Addiction in the Sverdlovsk region, the history, current status, prognosis. *Ekaterinburg: Uralsky University*, 2003, 297 p. (In Russ.)].
4. Андерсон Р.М., Мэй Р.М. Инфекционные болезни человека: динамика и контроль. М.: Мир, 2004. 784 с. [Anderson R.M., May R.M. *Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control*. Moscow, 2004, 784 p. (In Russ.)].
5. Малый В.П. ВИЧ. СПИД. Новейший медицинский справочник. М.: Эксмо, 2009, 672 с. [Maly V.P. HIV. AIDS. Newest medical handbook. *Moscow: Eksmo*, 2009, 672 p. (In Russ.)].
6. Денисов Б.П., Сакевич В.И. Динамика эпидемии ВИЧ/СПИД. Социологические исследования. 2004. № 1. С. 75–85. [Denisov B.P., Sakevich V.I. Dynamics of HIV/AIDS epidemic. *Sociological Research*, 2004, No. 1, pp. 75–85 (In Russ.)].

7. Хеймер Р., Миллс Х.Л., Уайт Э., Викерман П., Колийн К. Моделирование эпидемии вируса иммунодефицита человека в Санкт-Петербурге // ВИЧ-инфекция и иммуносупрессии. 2014. Т. 6, № 1. С. 59–64. [Heimer R., Mills H.L., White E., Vickerman P., Colijn C. Modeling the expansion of the HIV epidemic in St. Petersburg. *HIV Infection and Immunosuppressive Disorders*, 2014, Vol. 6, No. 1, pp. 59–64 (In Russ.)].
8. Беляков Н.А., Розенталь В.В., Деметьева Н.Е., Виноградова Т.Н., Сизова Н.В. Моделирование и общие закономерности циркуляции суб-типов и рекомбинантных форм ВИЧ // ВИЧ-инфекция и иммуносупрессии. 2012. Т. 4, № 2. С. 7–18. [Belyakov N.A., Rosental V.V., Dementjeva N.Ye., Vinogradova T.N., Sizova N.V. Mathematical modelling and general trends of circulation of HIV subtypes and recombinant forms. *HIV Infection and Immunosuppressive Disorders*, 2012, Vol. 4, No. 2, pp. 7–18 (In Russ.)].
9. Плавинский С.Л. Моделирование ВИЧ-инфекции и других заразных заболеваний человека и оценка численности групп риска. Введение в математическую эпидемиологию: производственно практическое издание. М.: Акварель, 2010. 100 с. [Plavinsky S.L. Modeling HIV infections and other contagious human diseases and assessing the number of risk groups. Introduction to mathematical epidemiology: production and practical publication. *Moscow: Watercolor*, 2010, 100 p. (In Russ.)].
10. Подымова А.С. Сексуальное поведение групп риска, уязвимых к ВИЧ, как возможный фактор распространения ВИЧ-инфекции в Свердловской области // Клиническая дерматология и венерология, 2016. № 5. С. 8–13 [Podymova A.S. Sexual behavior of risk groups vulnerable to HIV as a possible factor in the spread of HIV infection in the Sverdlovsk region. *Clinical Dermatology*, 2016, No. 5, pp. 8–13 (In Russ.)].
11. Изучение распространенности ВИЧ и гепатита С, а также поведения, связанного с риском инфицирования, в группе потребителей инъекционных наркотиков в гг. Москве, Екатеринбурге, Омске и Орле в 2011 году. Реферат. Некоммерческое партнерство поддержки социально-профилактических программ в сфере общественного здоровья «ЭСФЕРО», 2011 (Дата обращения 01.02.2017). URL: <http://www.esvero.ru> (accessed March 01, 2017).
12. О государственной стратегии противодействия распространению ВИЧ-инфекции в РФ на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу. Распоряжение Правительства РФ от 20.10.2016 г. № 2203 р (Дата обращения 13.01.2017). URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71421338/> (accessed January 13, 2017).
13. Розенталь В.В., Беляков Н.А., Рассохин В.В., Дубикайтис П.А. Подходы к определению оценочного числа ВИЧ-инфицированных больных в популяции // ВИЧ-инфекция и иммуносупрессии. 2011. Т. 3, № 3. С. 7–12. [Rosental V.V., Belyakov N.A., Rassokhin V.V., Dubikaitis P.A. Approaches to tentative assessment of HIV prevalence in a population. *HIV Infection and Immunosuppressive Disorders*, 2011, Vol. 3, No. 3, pp. 7–12 (In Russ.)].
14. Азовцева О.В., Архипов Г.С., Архипова Е.И., Смирнов А.В., Фишман Б.Б., Вебер В.Р. Оценка результатов математического моделирования и анализ эпидемической ситуации по ВИЧ-инфекции в Новгородской области // Медицинский академический журнал. 2015. № 3. С. 68–74. [Azovtseva O.V., Arhipov G.S., Arkhipova E.I., Smirnov A.V., Fishman B.B., Veber V.R. Evaluation of the results of mathematical modeling and analysis of the epidemiological situation of HIV infection in the Novgorod region. *Medical Academic Journal*, 2015, No. 3, pp. 68–74 (In Russ.)].
15. Медведская Д.Р., Турков С.Б., Подымова А.С., Ножкина Н.В. Основные направления оптимизации организационного и финансового обеспечения лечебных и профилактических мероприятий по ВИЧ-инфекции (на примере Свердловской области) // Уральский медицинский журнал. 2016. № 9. С. 9–17. [Medvedskaya D.R., Turkov S.B., Podymova A.S., Nozhkina N.V. The main directions of optimization of organizational and financial support of treatment and preventive measures for HIV infection (on the example of Sverdlovsk region). *Ural Medical Journal*, 2016, No. 9, pp. 9–17 (In Russ.)].

Статья поступила 04.05.2017 г.

Контактная информация: Подымова Анжелика Сергеевна e mail: [glvrach@livehiv.ru](mailto:glvrach@livehiv.ru)

**Коллектив авторов:**

Подымова Анжелика Сергеевна — к.м.н., главный врач ГБУЗ СО «Свердловский областной центр профилактики и борьбы со СПИД», 620102, Екатеринбург, ул. Ясная, 46, (343) 240-12-54, e mail: [glvrach@livehiv.ru](mailto:glvrach@livehiv.ru);

Носова Екатерина Александровна — врач ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения» МЗ РФ, Москва, ул. Добролюбова, 11.