

ОЦЕНКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ И КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ АЗИАТСКОГО СЕВЕРА НА ТЕРРИТОРИЯХ ОСВОЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

¹Рукавишников В.С., ²Бычков И.В., ¹Ефимова Н.В., ²Горнов А.Ю., ²Дьякович М.П.

¹ФГБУ «Восточно-Сибирский научный центр экологии человека» СО РАМН, Ангарск, Россия

²ФГБУН Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Иркутск, Россия
medecolab@inbox.ru

Возрастающее стратегическое значение Арктической зоны для развития экономики и обеспечения национальной безопасности страны диктует необходимость скорейшего решения не только экономических задач по освоению богатейших углеводородных ресурсов, но и социальных вопросов, касающихся здоровья, качества жизни и социального самочувствия коренного и укорененного здесь населения [1,2]. Социально-экономическое развитие территорий Арктической зоны приводит к изменению качества окружающей природной и социальной среды, что требует своевременного внедрения превентивных мер, направленных на сохранение здоровья населения, и связанного с ним качества жизни.

Исследования ряда авторов показали, что среди пришлого населения Севера лишь 4% взрослых можно считать условно здоровыми [3]. В исследованиях Л.Е. Панина, В.И. Хаснулина, Е.Р. Бойко 2005 показаны особенности метаболизма, психологического состояния пришлого и коренного населения на Севере, приводящие к состоянию северного стресса [4,5,6]. Снижение устойчивого состояния функционирования систем организма у жителей высоких широт наступает на 8-10 лет раньше, чем у лиц, проживающих в средней полосе России, что приводит к сокращению средней продолжительности жизни на 10-15 лет. Несмотря на большое количество работ, посвященных проблемам человека в Арктике, в настоящее время, недостаточно эмпирических данных и соответствующих аналитических материалов по вопросам адаптации к изменению комплекса условий природной и антропогенной среды, качества жизни, связанного со здоровьем у различных групп населения (в том числе детей и подростков).

В условиях дефицита данных представляется целесообразным использование накопленного экспертного опыта и математического моделирования. У термина «математическое моделирование» в среде специалистов традиционно имеется две различных трактовки. В данной работе будем придерживаться методологии, развиваемой школой академика А.А.Самарского и понимать процесс математического моделирования как итеративную методическую процедуру, основанную на цепочке «явление-модель-алгоритм-программа-трактовка», повторяемую по необходимости многократно [7]. При этом следует решить проблему нахождения подходящей структуры модели («структурная идентификация»), проблему настройки модели на реальную исследуемую ситуацию («параметрическая идентификация») и проблему оценки адекватности модели, ее верификации и валидации. Применение методик математического моделирования, к сожалению, во многих случаях оказывается неуспешным при решении сложных научно-технических задач. Это связано, очевидно, с проявлением целого ряда разнородных «усложняющих факторов», препятствующих созданию адекватных моделей, что требует проведения анализа риска математического моделирования в каждом конкретном случае [8,9].

Цель проекта – дать оценку и на основе математического моделирования разработать среднесрочный прогноз популяционного здоровья и связанного с ним

качества жизни населения Азиатского Севера России на территориях освоения месторождений углеводородного сырья.

Материалы и методы. Исследования проведены в Ямальском районе Ямало-Ненецкого автономного округа, где расположены крупнейшие месторождения углеводородного сырья, однако основное население, постоянно проживающее в Арктической зоне, сосредоточено в районном центре (п. Яр-Сале), удаленном от мест добычи и транспортировки нефти и газа. Динамика изучаемых объектов рассматривалась за период 2003-2013 годы, что позволило оценить тренды метеорологических параметров и уровни антропогенного воздействия на объекты окружающей среды и потенциальный риск здоровью населения; обеспеченности и доступности медицинской помощи; социальной инфраструктуры и социально-экономического благополучия на изучаемой территории. Так как на территории Ямальского района не проводится контроль химического загрязнения атмосферного воздуха, то для оценки потенциального ингаляционного риска использованы результаты модельных расчетов загрязнения воздуха (по УПРЗА «Эколог»). Верификация расчетов рассеивания загрязняющих веществ дана по измеренным концентрациям в аккумулялирующей среде (почве). Для изучения риска, связанного с техногенной нагрузкой, изучено накопление тяжелых металлов, мышьяка и других токсикантов в волосах детского и подросткового населения Ямальского района.

Эпидемиологическое исследование проведено по материалам лечебно-профилактических учреждений изучено изменение заболеваемости (первичной и общей) в многолетней динамике и по данным целевых экспедиционных исследований. Персонализированные обследования проведены с информированного согласия родителей (опекунов), протоколы обследования одобрены комитетом по биоэтике. Частота функциональных нарушений и хронических заболеваний оценивалось по результатам собственных медицинских исследований квоотированных когорт населения (195 детей и подростков). Группа обследованных была неоднородна по этническому составу и состояла из представителей коренной народности (ненцев) и русских, проживающих на Севере не менее 3 лет. Проведен социологический опрос фокус-групп с целью оценки качества жизни, связанного со здоровьем, с применением методик Pediatric Quality of Life Inventory – PedsQL™4.0 Generic Core по схеме Self – report (10-14лет), Medical Outcomes Study-Short Form (MOS SF-36) (старше 16 лет). Для характеристики обобщенной эмоционально-оценочной реакции на социальные и личностные изменения использованы методики оценки индекса социального индивидуального самочувствия (ИИСС) и субъективного социального благополучия (ССБ) [10,11]. При оценке субъективного социального благополучия (ССБ) выделяли индексы персонального, национального, регионального (на уровне поселка) благополучия. Индекс персонального благополучия (ИПБ) включал оценку следующих пунктов: уровень жизни, здоровье, достижения, взаимоотношения с близкими, безопасность, отношения с соседями, уверенность в будущем и жизнь в целом. Индекс национального благополучия (ИНБ) включал оценку экономической ситуации, состояния природы, социальную обстановку, деятельность правительства, состояние бизнеса, национальную безопасность и жизнь в России в целом. Аналогично последнему индексу оценивался индекс регионального благополучия (ИРБ). ИИСС характеризуется удовлетворенностью потребностей физического и социального существования.

Исследование проведено среди 65 подростков в возрасте 14-17 лет, обучающихся в школе-интернате поселка Яр-Сале Ямальского района ЯНАО методом группового самозаполнения анкет. Анкеты заполнялись в присутствии интервьюера и собирались сразу после заполнения. Группа обследованных включала ненцев и

русских, из них 44 респондента обучались и проживали в школе интернате, 21 - обучались в этом же учебном заведении, но проживали в поселке с родителями.

Математическое моделирование.

Факторы риска моделирования.

При работе над проектом были выявлены факторы риска, возникающие при моделировании процессов заболеваемости населения и произведена оценка их влияния на получаемые результаты. Оценка рисков моделирования, возникших в настоящей работе, производилось на основе экспертных оценок с применением методики «единичного интервального шкалирования»: для каждого фактора риска его размеры оцениваются вещественным числом от 0 до 1. Выявлены следующие виды рисков, обуславливающих неопределенности полученных результатов:

- *Риск недостатка данных.* Проблема получения объективных данных, на основе которых возможно строить эффективные методики обучения моделей, является одной из основных проблем применяемого подхода. В настоящем проекте данные о заболеваемости населения были получены в виде временных рядов только из статистических отчетов; количество их представляется минимально необходимым; возможность пополнения данных и верификации их на основе сравнения информации из различных источников отсутствует. Одним из подходов, реализованным в проекте, является методика генерации «расширенной» обучающей выборки, основанная на гипотезе о равномерности исследуемых процессов в интервалах между проведенными измерениями.

- *Риск высоких «шумов» в данных.* Точность результатов целевых исследований, определяется различными причинами, например, возможностями приборно-аналитической базы или неопределенностями, связанными с валидностью методик анкетирования. В проекте для преодоления указанных проблем предложена нетривиальная методика моделирования, на частично интервальных экспериментальных данных, основанная на специально подобранных метриках, позволяющих достичь нечувствительности на интервалах неопределенности данных. Разработаны технология синхронной аппроксимации и анализа корректности частично интервальных данных на основе статистической информации и экспертных оценок. Реализован метод построения динамических моделей, опирающихся на временные ряды с существенно различными характеристиками погрешностей на различных временных участках.

- *Риск малой репрезентативности данных.* Даже наличие больших объемов данных, к сожалению, не может гарантировать успеха на этапе обучения моделей. Это может быть связано со специфическими свойствами имеющихся обучающих выборок. Нами проведены вычислительные эксперименты по проверке гипотезы «компактности по Журавлеву» для имеющихся экспериментальных данных, выявлены прецеденты, наиболее отклоняющиеся от оцениваемых закономерностей, и проведена «чистка выборки».

- *Риск неопределенности «модельных шаблонов».* Самой проблемной ситуацией при применении математического моделирования является, очевидно, случай, когда опыт применения этого подхода мал или вообще отсутствует. Поиск типов и структур моделей, подходящих для решения содержательных задач исследуемого класса, для таких ситуаций может оказаться чрезвычайно долгой проблемой с непрогнозируемой решабельностью.

- *Риск негибкости моделей.* «Изобразительные возможности» моделей могут в реальных ситуациях оказаться недостаточными для адекватной аппроксимации экспериментальных данных. При работе над проектом оказалось необходимым произвести достаточно существенные коррекции структур используемых моделей.

- *Риск неадекватного обучения.* Обучение моделей традиционно основывается на использовании методов конечномерной непрерывной оптимизации. При этом сложность задач обучения самым существенным образом может зависеть как от размерности решаемых экстремальных задач, равной числу настраиваемых параметров модели, так и от свойств сформулированных критериев качества – функционалов оптимизации. При работе над проектом авторы воспользовались имеющимся многолетним опытом разработки методов, алгоритмов и вычислительных технологий оптимизации. Для решения задач обучения разработанные ранее алгоритмы (методы туннельного типа, глобализованный метод Пауэлла, метод Лууса-Яколы, метод сферического поиска, метод дифференциальной эволюции, метод случайных покрытий, метод криволинейного поиска, «метод парабол» и ряд других) были дополнены механизмами «захвата границ», «методикой частиц» и специализированными инструментальными средствами настройки алгоритмических параметров.

- *Риск переобучения.* Для получения работоспособных моделей требуется не только (и не столько) хорошо решить задачи оптимизации (обучения), сколько суметь настроить модели так, чтобы они обладали хорошим свойством обобщения, игнорируя, в ряде случаев, большие «выбросы» данных и позволяя не столько точно отследить каждый прецедент, сколько хорошо аппроксимировать закономерность, скрытую в данных). Предложен новый вариант «Шепард-моделей», позволяющий понизить переобученность, априори присущую моделям такого типа, за счет нарушения свойства интерполяции в узлах. Управляемый всего одним параметром вариант обобщенной «Шепард-модели» содержит в построенном однопараметрическом семействе операторов, в предельных случаях, как исходную переобученную модель, так и полностью вырожденную модель, совпадающую константой-средним значением от выходного показателя обучающей выборки. Предложены алгоритмические варианты поиска значения этого параметра, соответствующий различным гипотезам о свойствах адекватной модели. Для «моделей оптимального управления» введен механизм весовых коэффициентов, также позволяющий существенно повлиять на степень ее переобученности.

- *Риск неадекватных свойств моделей.* Даже хорошо обученная модель, к сожалению, может иметь свойства, мало совпадающие со свойствами моделируемого явления или процесса. Математическая теория грубых систем позволяет на основе строгих подходов оценить, сохраняется ли качественная картина поведения модели при изменении ее параметров.

- *Риск высокой вычислительной сложности моделей.* Во многих научно-технических задачах построение адекватной модели еще не является окончательным решением проблемы. Это может быть связано со «сложностью манипулирования» (численным интегрированием систем дифференциальных уравнений), необходимостью решения обратных задач (подстройкой модели под конкретный «задаваемый вопрос»), вычислительной сложностью, проявляющейся во вспомогательных алгоритмах и др.

При работе над проектом за счет применения формализованных методик, в том числе, новых, удалось понизить указанные риски, по следующим позициям: риск малой репрезентативности данных (от 0.4 до 0.1), риск неопределенности «модельных шаблонов» (от 1.0 до 0.2), риск негибкости моделей (от 1.0 до 0.2), риск неадекватного обучения (от 0.8 до 0.0), риск переобучения (от 1.0 до 0.2).

Факторный анализ системы показателей. Разработана специализированная методика анализа данных, основанная на предложенных модификациях оператора Шепарда. Проведен факторный анализ системы основных показателей здоровья населения и условий жизнедеятельности, включающий 4 подсистемы и 25 элементов, с целью выявления и отсеечения отклоняющихся прецедентов. Разработаны

специализированные метрики в пространстве экспериментальных данных и подобраны типы критериев качества для задач параметрической идентификации моделей здоровья населения. Факторный анализ проведен с помощью метода Шепарда, позволяющего строить интерполирующие функции по “нерегулярным данным” и базирующегося на атрибутивном отсутствии этапа обучения и чрезвычайно легкой масштабируемости по размерности. Предложен модифицированный вариант данной модели с дополнительными параметрами w_j , которые можно интерпретировать как веса соответствующего фактора (переменной исходного пространства). Очевидно, что если $w_j = 0$, то значение соответствующего (j-го) фактора не влияет на вычисляемое значение функции Шепарда, и его можно исключить из модели и последующих расчетов. Для определения значений параметров w предложено проведение процедуры оптимизации функционала, оценивающего качество работы построенной модели. Предложенный функционал $F^*(w)$ по сути представляет собой один из вариантов реализации метода скользящего контроля (кросс-валидации). Выбранный минимизируемый функционал — невыпуклый и недифференцируемый, что накладывает определенные ограничения на методы оптимизации, которые можно использовать для решения этой задачи. В работе применены глобализованные методы покоординатного спуска и поиска по случайному направлению. Для всех элементов w на старте были выбраны параллелепипедные ограничения - $[0,1]$, а значения оптимизируемых переменных w установлены в 1. При таких настройках модифицированная модель Шепарда становится эквивалентной исходной. Глобализованный покоординатный спуск осуществляет последовательный одномерный поиск по каждой из координат пространства параметров w в выбранном диапазоне путем построения случайной сетки с достаточно большим числом узлов (100 - 1000) и переходом в найденный на очередной итерации минимум. Реализован и протестирован рандомизированный вариант этого метода со случайным выбором очередной оптимизируемой переменной, для повышения надежности глобального поиска использована методика случайного мультистарта.

Прогнозная модель. Расширенная обучающая выборка.

В силу дефицита информации технология прогнозирования, предложенная в рамках работы по проекту, базируется на «расширенной» обучающей выборке, генерируемой на основе исходной. Основная гипотеза, закладываемая на этом этапе, состоит в непрерывности процессов, происходящих в системе. Информации, задаваемой исходными временными рядами, как правило, оказывается чрезвычайно мало, что приводит, даже при использовании самых современных методик моделирования, к моделям, обладающим слишком узкими областями адекватности. Для преодоления этой проблемы предлагается следующий подход.

Рассмотрим исходные временные ряды, задаваемые, как правило, на очень крупной временной сетке (1 год, 1 квартал и т.п.):

$R_j = \{x_j(t_i), i = \overline{1, n_j}, j = \overline{1, n_V}\}$, где n_V - число временных рядов, n_j - число членов каждого временного ряда (измерений), $T_j = \{t_i, i = \overline{1, n_j}\}$ - общая для всех рядов сетка по времени. Предполагая, что измеренные в моменты времени из T_j процессы происходят непрерывно, возможно, применяя тот или иной метод интерполяции, ввести на каждом интервале новые «виртуальные узлы» и оценить в них значения всех измеряемых переменных. Таким образом, генерируется новая сетка $T_R = \{\tau_i, i = \overline{1, n_R}\}$, по построению включающая исходную: $T_R \supset T_j$; здесь n_R - число узлов новой

временной сетки, $n_R \gg n_I$. Для всех узлов новой сетки получаются оценки измеряемых переменных, таким образом и строится «расширенная» выборка $R_R = \{y_j(\tau_i), i = \overline{1, n_R}, j = \overline{1, n_V}\}$. Новая выборка может, при выполнении исходной гипотезы, более ли менее точно отражать поведение измеряемых переменных на значительно более мелком шаге, например, 1 месяц, 1 неделя и т.д.

В рассматриваемых задачах возможно выполнить разбиение компонент исходных временных рядов на моделируемые и управляющие («входные» и «выходные»). В таком случае проблема моделирования может состоять в поиске взаимосвязей между моделируемым факторами при учете воздействия управляющих факторов. Для решения задач такого типа удобно пользоваться формализмом управляемых динамических систем. Рассмотрена линейная управляемая система вида $\dot{x} = Ax + Bu + f$, где $x(t)$ - фазовый вектор размерности n , $u(t)$ - вектор управлений размерности r , A - квадратная матрица размерности $n \cdot n$, B - прямоугольная матрица размерности $n \cdot r$, f - вектор свободных членом размерности n . Процесс будем читать определенным на интервале времени $t \in [0, 1]$, начальный фазовый вектор $x(0)$ заданным. Фазовым переменным $x(t)$ будем сопоставлять моделируемые переменные из исходных временных рядов, управлениям $u(t)$ - управляющие факторы, в простом случае, константы; тогда $n + r = n_V$. Сформировав из исходных временных рядов по указанной выше методике «расширенную обучающую» выборку, и задавшись «горизонтом прогнозирования» (например, 1 год), поставим каждому прецеденту расширенной выборки в соответствие вспомогательную задачу оптимального управления по переводу системы из начального состояния, измеренного в текущий момент времени, в конечное, оцененное ровно через интервал времени, равный «горизонту прогнозирования». Полученный набор из n_R задач оптимального управления агрегируем в одну общую экстремальную задачу

$\dot{y} = Cy + Du, t \in [0, 1], y(0) = y_0, \|y(1) - y_1\|^2 \rightarrow \min$, где $y(t)$ - фазовый вектор размерности $n \cdot n_R$, u - вектор управлений размерности $r \cdot n_R$, y_0, y_1 - фиксированные вектора размерности $n \cdot n_R$, C - квадратная матрица размерности $n \cdot n$, D - прямоугольная матрица размерности $n \cdot r$. Для «обучения модели» на «расширенной» обучающей выборке необходимо решить поставленную задачу оптимального управления, варьируя коэффициенты матриц C, D .

Для получения на основе идентифицированной («обученной») модели прогнозов необходимо, задав в качестве входных переменных начальные значения вектора моделируемых переменных и планируемые управляющие воздействия, проинтегрировать численно систему дифференциальных уравнений. Значения фазовых переменных в конечный момент времени и будут оценивать моделируемые переменные в прогнозируемый момент времени.

С применением предложенной технологии сгенерирована прогнозная модель позволяющая оценивать состояние системы через год после принятия неизменяемых управленческих решений. Модель в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений включает моделируемые переменные (заболеваемость детей, подростков и взрослых), и управляющие воздействия (среднегодовая температура, обеспеченность врачами, финансирование, загрязнения).

Результаты. Качество атмосферного воздуха исследовано на основании расчетных данных о концентрациях загрязняющих веществ в п. Яр-Сале, образующихся при сжигании дизельного топлива в 4 котельных. Проведено

моделирование концентраций при неблагоприятных условиях для рассеивания эмиссий по отдельным месяцам. Установлено, что соответствовали гигиеническим требованиям концентрации взвешенных веществ (кратность ПДК 0,3 – 0,4), диоксида азота (0,2 – 0,3). Выше допустимого уровня возможно содержание оксида углерода (1,7 – 2,0 ПДК_{м.р.}) и бенз(а)пирена (2,1 ПДК) (рис.1,2). Средние по территории поселка концентрации диоксида азота составили 0,9 – 1,0 ПДК_{м.р.}, а формальдегида - 0,5 ПДК_{м.р.}, однако в отдельных точках, приближенных к источникам выбросов возможно незначительное превышение ПДК (1,12). С учетом эффекта суммации рассчитан коэффициент, величины которого не должны превышать 1. Однако для двух комбинаций на территории п. Яр-Сале возможно нарушение гигиенических требований: $K_{\text{сум}}(\text{SO}_2 + \text{V}_2\text{O}_5) = 1,32 - 1,52$; $K_{\text{сум}}(\text{SO}_2 + \text{NO}_2) = 1,11 - 1,28$. Интегральный показатель «Р», включающий весь спектр рассчитанных примесей, составил 3,14, что свидетельствует о слабом уровне загрязненности атмосферного воздуха в период с наименее благоприятными условиями для рассеивания загрязняющих веществ и максимального потребления топлива. Результаты расчетов подтверждены данными химико-аналитического исследования почвы. Выявлена ассоциированность содержания токсикантов в воздушном бассейне и почве поселка: СО и нефтепродуктов ($r_{xy}=0,63$), взвешенных веществ и марганца ($r_{xy}=0,54$), бенз(а)пирена в обоих средах ($r_{xy}=0,97$).

Установлено, что индекс опасности неканцерогенных эффектов, связанный с загрязнением воздушного бассейна незначительно превышает приемлемый уровень (ИП=1,33). Канцерогенный эффект, связанный с присутствием в атмосферном воздухе бенз(а)пирена и формальдегида находится на допустимом уровне (индивидуальный риск $\text{ICR}=2,1 \cdot 10^{-6}$, популяционный $\text{PCR}=0,00002$ дополнительных случая на все население Яр-Сале в течение жизни).

Содержание большинства исследованных металлов в волосах детей и подростков ниже рекомендуемых уровней, что свидетельствует о гипозементозе жителей Ямальского района (таб.1). Исключение составляет концентрация железа, которая у 100% обследованных превышает физиологическую норму. Очевидно, что дисбаланс элементов в волосах связан с качеством воды в водоисточнике и разводящей сети, для которой характерны низкая минерализация и высокое содержание железа. Повышенное в 1,2 раза количество свинца в волосах выявлено лишь у 3,3% детей.

Показатели смертности населения Ямальского района 1,2 раза ниже, чем в среднем по РФ и Уральскому ФО. Среди причин смерти у детей первого года жизни преобладают болезни органов дыхания (56,9% от общей младенческой смертности), у взрослого населения - травмы, отравления, несчастные случаи (36,0%), болезни системы кровообращения (32,7%), органов дыхания (8,7%, из них 35% связано с туберкулезом). Ниже, чем в РФ частота смертей от злокачественных новообразований. Смертность у представителей коренного населения (ненцев) выше в 4-5 раз, чем среди пришлого населения. Следует отметить, что у ненцев в 45% случаев смерть происходит в тундре, из них 14% по неустановленной причине.

Анализ заболеваемости населения Ямальского района ЯНАО показал, что общая заболеваемость детей и подростков в 2003-2013гг. увеличилась в 1,5 и 1,4 раза соответственно (коэффициент аппроксимации, в соответствии с критерием Чеддока, свидетельствует о выраженной тенденции к росту показателей). Уровень первичной заболеваемости взрослых в период исследования составлял 939,4-1267,2‰ (таб.2). Отмечено увеличение уровня первичной заболеваемости по классам болезней: кожи и подкожной клетчатки (в 2 раза); системы кровообращения (в 1,7 раза); органов пищеварения и мочеполовой системы (в 1,5 раза); эндокринной и костно-мышечной систем (в 1,3 раза). По заболеваемости с впервые установленным диагнозом у подростков Ямальского района отмечен рост показателя по следующим классам

болезней: крови (в 3,3 раза); системы кровообращения (в 2,9 раза); нервной системы (в 2 раза); кожи и подкожной клетчатки (в 1,6 раза); органов пищеварения (в 1,4 раза); органов дыхания (в 1,3 раза). Снижение впервые установленной заболеваемости отмечено по классам болезней: врожденным аномалиям развития (в 4,7 раза). Отметим, что рост показателей заболеваемости как общей, так и первичной характерен для всей территории РФ и, в том числе, ЯНАО [12], что, вероятно, связано с расширением диагностических возможностей не только в крупных медицинских центрах, но и на уровне центральных районных больниц. Среди социально зависимых заболеваний у жителей Ямальского района наиболее высокие уровни имеет заболеваемость туберкулезом, уровень которого в Ямальском районе в 2-2,3 раза превышал общероссийский показатель.

При персонализированном обследовании выявлено, что значительная доля детей имела донозологические отклонения в состоянии здоровья: избыток массы тела наблюдался у 23% детей, низкая мышечная сила - 53%, низкая жизненная емкость легких - 73%. При целенаправленном клинико-физикальном осмотре установлено, что частота хронических заболеваний ЛОР-органов у детей, постоянно проживающих в поселке, ниже, чем у детей интерната: у мальчиков-тундровиков распространенность составила $99,5 \pm 1,2\%$, против $79,2 \pm 4,4\%$ – жителей поселка ($p < 0,05$); у девочек $97,9 \pm 2,4$ и $70,0 \pm 3,8\%$ ($p < 0,05$). У воспитанников интерната, обращает на себя внимание количество дерматозов ($8,6 \pm 2,9\%$, что в 1,5 раза больше, чем у жителей поселка), в развитии которых играет роль дефицит витаминов группы В и А, необходимых представителям коренных народностей Севера в первую очередь. Выявленный фолликулярный гиперкератоз у детей, проживающих в интернате, может свидетельствовать о паразитарном генезе патологии кожи и требует дообследования детей. Атопический дерматит у воспитанников интерната составляет 4,3% и может быть вызван расширением пищевого рациона, непривычного для детей, рожденных и проживающих в тундре до школьного возраста.

У подростков вне зависимости от этнической принадлежности наиболее распространены риски функциональных нарушений пищеварительной системы (38,8% у ненцев и 17,4% у русских), пограничных психических расстройств (30,6% у ненцев и 43,5% у русских). Вместе с тем подростки - ненцы отличались более низкими уровнями рисков артериальной гипертензии (0,12 и 0,34 у мальчиков, 0,24 и 0,37 у девочек, $p < 0,05$), функциональных нарушений органов дыхания (0,09 и 0,13 у мальчиков, 0,19 и 0,25 у девочек, $p < 0,05$), неврологических нарушений (0,23 и 0,53 у мальчиков, 0,35 и 0,40 у девочек, $p < 0,05$), пограничных психических расстройств (0,22 и 0,53 у мальчиков, 0,48 и 0,79 у девочек, $p < 0,05$). При опросе фокус-групп установлено смещение рациона у подростков с белково-липидного на углеводный, что может явиться причиной нарушений здоровья особенно для жителей Арктики [5,13,14].

Данные о групповых уровнях социального благополучия, оцениваемого по ССБ и ИИСС представлены в таблице 3. Установлен высокий уровень ИИСС у всех респондентов, который статистически значимо не отличался у подростков, проживающих в поселке (ППП) ($107,6 \pm 3,6$ баллов) и в интернате (ППИ) ($108,1 \pm 2,1$ баллов), а также у юношей и девушек ($106,1 \pm 2,6$ и $110,0 \pm 1,8$ баллов).

В целом, субъективное социальное благополучие обследованных подростков было высоким. По ИНБ подростки, проживающие в интернате и поселке, достоверно не различались ($6,9 \pm 0,2$ против $6,0 \pm 0,4$ баллов, $p < 0,05$). При этом доля ППП с низким уровнем ИНБ составляла $14,4 \pm 7,2\%$, среди ППИ таких лиц выявлено не было. Удовлетворенность жизнью в России была выше у девушек интерната, чем у девушек поселка ($8,6 \pm 0,4$ против $6,1 \pm 1,1$ баллов, $p < 0,05$). Следует отметить, что среди молодежи поселка доля девушек с низким уровнем ИНБ составила $30,0 \pm 14,5\%$, среди юношей

таких лиц выявлено не было. Гендерные различия были установлены для ППП и в отношении других составляющих ССБ. Доля девушек, имевших высокий уровень ИРБ, составила $30,0 \pm 14,5\%$, среди юношей таких лиц выявлено не было, при этом юноши поселка имели более высокое его значение ($8,2 \pm 0,5$ против $5,6 \pm 0,8$ баллов, $p < 0,05$). Среди юношей не было лиц с низким ИПБ (у девушек - $40,0 \pm 15,5\%$). У подростков интерната гендерных различий по социальному самочувствию установлено не было. Хотя значимых отличий в уровнях ИПБ не установлено, 19% ППП имели низкий уровень ИПБ (1-4баллов), в то время как среди ППИ такие лица не выявлены ($p < 0,05$). Следует отметить, что доля девушек, которые демонстрировали низкий уровень ИПБ, составляла $11,4 \pm 5,4\%$, в то время как таких юношей выявлено не было.

Полученные результаты свидетельствуют о более благоприятной оценке социальных и личностных изменений у жителей интерната, что может быть связано с меньшей критичностью по отношению общероссийских, региональных и личностных аспектов социального функционирования у подростков, воспитывающихся в школе-интернате на полном государственном обеспечении, по сравнению со сверстниками, проживающими в семьях. Гендерные различия среди подростков, проживающих в поселке, по-видимому, связаны с большим вниманием к указанным аспектам девушек, что объяснимо с точки зрения более раннего физиологического, психологического и социального взросления женского организма [15].

Таким образом, проживание в условиях Арктики предъявляет к организму человека повышенные требования, что проявляется на популяционном уровне повышенной заболеваемостью, особенно хронической. В связи с этим к числу неотложных мер следует отнести выявление ключевых управляемых факторов, определяющих уровень потерь здоровья населения.

Результаты проведенного факторного анализа позволили выявить наиболее существенные предикторы для каждой из моделей и существенно уменьшить их размерность. Наиболее значимыми для детского населения являются условия внешней среды (температура, загрязнение атмосферного воздуха) и доступность медицинской помощи, характеризуемая несколькими показателями (таб. 4). Для подросткового и взрослого населения высокую значимость имеют следующие природные факторы: давление, скорость ветра, а также некоторые параметры загрязнения атмосферы и обеспеченность врачами, доступность помощи приближенной к населению (посещения фельдшерско-акушерских пунктов, количество стационарных коек). Заболеваемость органов дыхания ассоциирована с уровнем химического загрязнения: $r = 0,68-0,71$, температурой $r = (-0,62)-(-0,75)$; органов кровообращения у взрослых – с геомагнитным коэффициентом, перепадами давления, содержанием твердых частиц в атмосфере ($r = 0,46-0,51$). Предикторы значимые для формирования коэффициента смертности несколько отличны, от таковых для заболеваемости. Здесь наряду с условиями природной среды и ее антропогенного изменения важным является возможность получения стационарной и скорой медицинской помощи, профилактических осмотров. Обобщая представленные результаты, отметим компоненты, оказывающие наиболее мощное влияние на основные показатели потерь популяционного здоровья. Так, для общей заболеваемости населения наиболее значимы параметры среды, входящие в блоки «обеспеченность и доступность ресурсов здравоохранения», «техногенная нагрузка», «климатические факторы» в соотношении 50:20:10. Формирования хронической патологии, требующей диспансерного учета, определяется указанными блоками в соотношении 32,7:39,3:9,4; а показатель общей смертности – 40:20:10. Полученные с помощью факторного анализа данные позволили дополнить ряд предикторов, определяющих уровень показателей потерь здоровья населения Арктической зоны, представленный в работах [6,16,17].

Выполнено построение прогнозной модели с «прогноznым горизонтом» в 1 год. После решения агрегированной задачи оптимального управления получена прогнозная управляемая динамическая модель, определенная на временном интервале $t \in [0,1]$. Прогнозирование производилось путем численного интегрирования системы при входных переменных и управлениях, соответствующих текущему моменту принятия управленческого решения. С использованием идентифицированной модели были выполнены прогнозные расчеты по исследованию влияния предикторов финансирования и загрязнений на состояние системы в 2015 году. Получены следующие результаты прогнозирования: при росте индекса опасности, связанного с химическим загрязнением объектов жилой среды, от допустимого уровня до среднего заболеваемость населения увеличится на 40%, при росте финансирования в 3,5 раза заболеваемость снизится на 50%.

Выводы.

Реализованные математические модели оказались достаточно гибким формальным инструментом, позволяющим как хорошо описывать экспериментальные данные, так и выполнять прогнозные расчеты. Результаты расчетов позволили скорректировать обучающие выборки, оценить точность измерения и провести верификацию качества базовых показателей, наметить пути увеличения точности реализуемых математических моделей. Вычислительная сложность решаемых задач оказалась не слишком высокой, что позволило, применяя реализованный модельный и программный инструментарий, успешно проводить численные эксперименты без применения сложных параллельных технологий программирования.

Общая заболеваемость населения Ямальского района ЯНАО в 2003-2013 гг. увеличилась в 1,4 раза. Выявлены изменения патоморфоза в группах детского и подросткового населения: снизилась доля травм и отравлений, инфекционных заболеваний на фоне увеличения патологии органов пищеварения.

Чрезвычайно высокий риск развития общепатологических синдромов у подростков, изученный по данным самооценки, отмечен у 31,0±6,1% ненцев и 46,1±9,8% русских; у подростков коренной национальности ниже уровни рисков артериальной гипертензии, функциональных нарушений органов дыхания, неврологических нарушений, пограничных психических расстройств. В структуре рисков вне зависимости от этнической принадлежности преобладали функциональные нарушения пищеварительной системы (38,8% у ненцев и 17,4% у русских).

Эмоционально-оценочной реакции на социальные и личностные изменения у подростков не имели различий по этническому признаку, индексы социального индивидуального самочувствия и субъективного социального благополучия оценивались как высокие. Выявлены гендерные различия по обобщенной по национальному, региональному и персональному компонентам.

В связи с невозможностью ретроспективного расширения информационной базы о состоянии окружающей среды и популяционного здоровья, из-за изменения систем мониторинга и статистической отчетности необходимо увеличить объем исходной информации за счет данных по другим административным территориям ЯНАО.

Оценка состояния окружающей среды и здоровья населения в поселке, удаленном от участков добычи углеводородного сырья, свидетельствует о низкой значимости техногенного воздействия. К числу приоритетных, но мало изученных факторов следует отнести природно-климатические условия, в том числе качество питьевой воды, поступающей к потребителю. Структура заболеваемости детского и подросткового населения и рисков развития патологии, по данным самооценки, определяет необходимость выявления особенностей питания различных групп населения с оценкой риска алиментарно зависимых заболеваний.

1. А.Э. Конторович. *Научно-технические проблемы освоения Арктики. Российская академия наук*, М.: Наука, 2014, 31-39.
2. П.И.Сидоров, Г.Н. Дегтева, Л.А. Зубов. *Экология человека*, 2009, 6, 8-10.
3. Л.И. Афтанас, М.И. Воевода, В.П. Пузырев. *Научно-технические проблемы освоения Арктики. Российская академия наук*, М.: Наука, 2014, 104-110.
4. Е.Р. Бойко Физиолого-биохимические основы жизнедеятельности человека на Севере. Екатеринбург: УРО РАН, 2005, 190 с.
5. Л.Е. Панин. *Инновации и продовольственная безопасность*, 2013, 1(1), 131-135.
6. В.И. Хаснулин, П.В. Хаснулин. *Экология человека*, 2012, 1, 3-11
7. А.А.Самарский, А.П. Михайлов. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры, М.: Физматлит, 2002, 320 с.
8. Ю. И. Журавлев. *Математические заметки*, 1978, 23(6), 899–914.
9. А.Ю. Горнов Вычислительные технологии решения задач оптимального управления. Новосибирск: Наука, 2009, 279.
10. Е.И. Головаха, Н.В. Панина, А.П. Горбачик. *Социология: методология, методы и математическое моделирование*, 1998, 10, 45-72.
11. R. Cummins, A. Lau. <http://www.deakin.edu.au/research/acqol/instruments/wellbeing-index>
12. И.В. Мыльникова, Н.В. Ефимова. *Изв. Самарского науч. центра РАН*. 2014, 5(2), 923-926
13. T. Golloway, T.K. Young, G.M. Egeland. *Int. J. Circumpolar Health*, 2010, 69(2), 151-157.
14. T. Burtseva, M. Savvina, G. Dranaeva et all. *Int. J. Circumpolar Health*, 2013, 72 (1), 215-219
15. А.А. Баранов, В.Р. Кучма, О.Ю. Милушкина и др. *Вестник РАМН*, 2012, 12, 35-40.
16. А.Л. Марков, Т.А. Зенченко, Ю.Г. Солонин, Е.Р.Бойко *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 2013, 2(47), 29-32.
17. T. Voets, G. Droogmans, U. Wissenbach, et al. *Nature*, 2004, 430, 748.

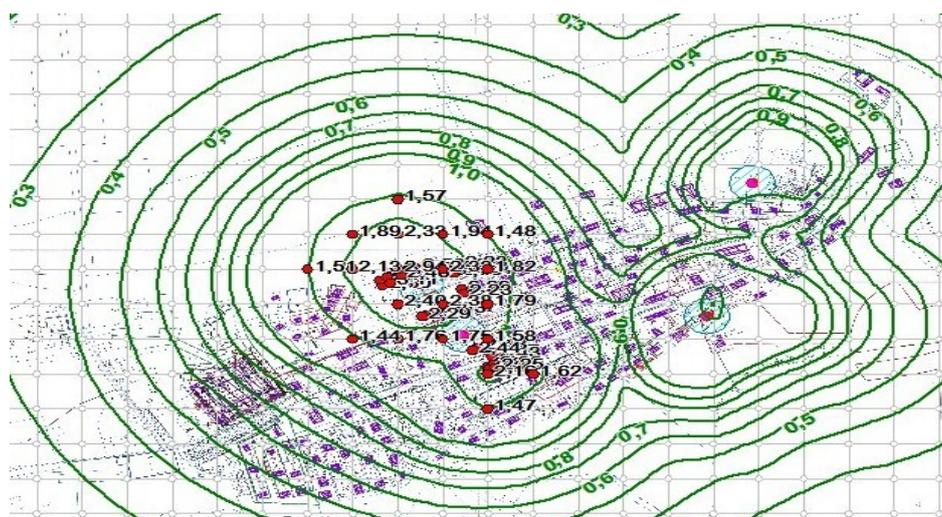


Рис. 1. Содержание оксида углерода (кратность к ПДК_{м.р.})

Таблица 3. Групповые уровни индексов субъективного социального благополучия и социального самочувствия подростков п. Яр-Сале, баллы (средняя и стандартная ошибка средней)

Шкалы	Оба пола		Юноши n=30	Девушки n=35	Оба пола n=65
	поселок n=21	интернат n=44			
Удовлетворенность жизнью					
в России	7,4±0,7	8,7±0,3	7,9±0,5	8,7±0,3	8,3±0,3
в целом	7,8±0,5	7,9±0,3	7,8±0,4	8,0±0,3	7,9±0,3
в поселке	7,6±0,6	8,0±0,3	7,9±0,4	7,9±0,4	7,9±0,3
Индекс благополучия					
национального	6,6±0,4	6,9±0,2	6,7±0,3	6,9±0,3	6,8±0,2
персонального	7,2±0,4	7,8±0,3	7,5±0,3	7,7±0,3	7,6±0,2
регионального	6,9±0,5	7,5±0,3	6,9±0,3	7,7±0,3	7,3±0,3
Индекс социального самочувствия	107,6±3,6	108,1±2,1	106,1±2,6	110,0±2,5	107,9±1,8

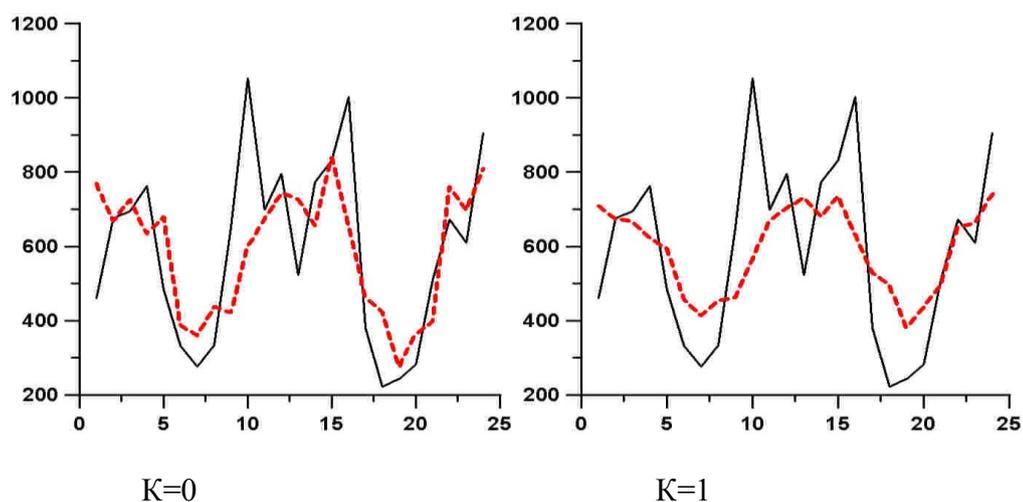


Рис. 3. Графики выхода обученной модели (красный пунктир) и экспериментальных данных (черный) при различных значениях К.

Таблица 4. Значимость факторов (рядов входных данных) для моделей популяционного здоровья

Факторы	первичная заболеваемость			общая смертность
	дети	подростки	взрослые	
Среднегодовая T (С°)	1.0000			1.0000
Среднегодовая скорость ветра (м/с)		0.7216	0.9921	
Среднегодовое давление (ГПа)		1.0000	0.9997	1.0000
Расход топлива (т.)		1.0000		0.3565
Выбросы загрязняющих веществ (т.)		0.9977	0.8419	1.0000
Диоксид серы	1.0000			
Взвешенные в-ва	0.9999	0.9988	0.9989	1.0000
НИ БОД	1.0000			
% осмотренных (профосмотры)	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Обеспеченность врачами (на 1000 чел.)		1.0000	1.0000	1.0000
Обеспеченность средними м/р. (на 1000 чел.)	1.0000			
Укомплектованность врачами	1.0000			
Количество посещений ФАП	0.9367	0.9722	0.9713	
Количество коек			0.9997	1.0000
Работа койки в году	1.0000		1.0000	1.0000
Число выездов скорой помощи (на 1000 чел.)		0.4207		1.0000