

УДК 614.71:616.2:519.2

ОПЫТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И ЧАСТОТЫ ЗАБОЛЕВАНИЙ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ У НАСЕЛЕНИЯ УЛАН-БАТОРА

¹Батурин В.А., ²Ефимова Н.В., ³Будням С., ¹Столбов А.Б.,
¹Малтугуева Н.С., ²Елфимова Т.А.

¹ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова» СО РАН, Иркутск, e-mail: rozen@icc.ru;

²ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований»,
Ангарск, e-mail: medecolab@inbox.ru;

³Монгольский государственный университет, Улан-Батор, e-mail: budnyamsan@gmail.com

Цель исследований – разработать и апробировать математическую модель обращаемости за медицинской помощью по поводу болезней органов дыхания в зависимости от природных и техногенных факторов на примере города Улан-Батора по суточным данным. Оценка факторов среды проведена по результатам мониторинга гидрометеорологической службы Монголии за 2010–2013 годы. В качестве возможных предикторов рассматривали данные регулярных замеров температуры, влажности, скорости ветра, давления, а также концентрации примесей в атмосферном воздухе. Динамика заболеваемости населения описана системой дифференциальных уравнений. Установлено, что заболеваемость населения нелинейно зависит от поступления в атмосферный воздух загрязняющих веществ от автотранспорта, ТЭЦ и юрт. Выявлена обратная зависимость точности расчетных данных от площади района, плотности населения, численности групп наблюдения и частоты моделируемого явления.

Ключевые слова: математическая модель, дифференциальные уравнения, факторы окружающей среды, заболеваемость, болезни органов дыхания

EXPERIENCE OF MATHEMATICAL MODELING AIR POLLUTION AND THE FREQUENCY OF RESPIRATORY DISEASES OF THE ULAANBAATAR POPULATION

¹Baturin V.A., ²Efimova N.V., ³Budnyam S., ¹Stolbov A.B.,
¹Maltugueva N.S., ²Elfimova T.A.

¹Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, Irkutsk, e-mail: rozen@icc.ru;

²East-Siberian Institute Medical-Ecological Researches, Angarsk, e-mail: medecolab@inbox.ru;

³National University of Mongolia, Ulan-Bator; e-mail: budnyamsan@gmail.com

Purpose of that research – to develop and test a mathematical model of the daily incidence of respiratory diseases, depending on the natural and anthropogenic factors in Ulaanbaatar. Evaluation of environmental factors is given based on the results of monitoring of the Hydrometeorological Service of Mongolia for the 2010–2013 year. The data of temperature, humidity, wind speed, pressure, air pollution changes considered as predictors of morbidity. The dynamics of the morbidity described by the system of differential equations. It was found that the incidence of the population depends nonlinearly on the air emissions of pollutants from motor vehicles, power plants and yurts. Contact dependence of the accuracy of calculated data identified by the district area, population density, population size and frequency of observation of the simulated phenomenon.

Keywords mathematical model, differential equations, environmental factors, incidence, respiratory diseases

В условиях резко континентального климата центральноазиатского региона, характеризующегося высоким давлением, большой амплитудой перепада температур как в течение суток, так и в течение года, низкой влажностью, особенностями переноса воздушных масс в приземном слое атмосферы формируются не только повышенные требования к компенсаторно-приспособительным возможностям организма человека, но и возникает необходимость особых подходов к организационным, природоохранным и планировочным решениям при развитии таких территорий [2, 4]. Наи-

более сложная и неблагоприятная гигиеническая ситуация, связанная в первую очередь с загрязнением атмосферного воздуха, сложилась в столице Монголии [3]. Улан-Батор (численность населения 1,5 млн) расположен в узкой долине, окружен горами, максимальная температура регистрируется в июле (38°C), минимальная в январе (-46,7°C), относительная влажность воздуха находится в пределах 40–80%, а иногда в пределах 20–30%, преобладающими направлениями ветра в летний период года являются северо-западное и северное, в зимний – юго-восточное (средняя скорость

ветра от 3,3 до 5,7 м/с, максимальная – достигает 28 м/с). Формированию контаминации воздушного бассейна города способствуют высокая концентрация источников загрязнения, большое количество сжигаемого твердого топлива и неблагоприятное расположение стационарных источников в городской застройке. Все высотные источники (ТЭЦ № 2, 3, 4) расположены в юго-западном и западном районах, котельные – в северной и восточной части города без учета розы ветров. Значительный вклад в загрязнение атмосферного воздуха Улан-Батора и обследованных регионов вносят топки частного (юрточного) сектора, который окружает благоустроенную часть города со всех сторон и располагается на возвышенности.

Цель исследования – разработать и апробировать математическую модель обращаемости за медицинской помощью по поводу болезней органов дыхания в зависимости от природных и техногенных факторов города Улан-Батора (на основе суточных данных).

Материалы и методы исследования

Гигиеническая оценка условий жизнедеятельности в Улан-Баторе дана по результатам мониторинга гидрометеорологической службы Монголии за 2010–2013 годы. В качестве возможных предикторов рассматривали данные регулярных замеров температуры, влажности, скорости ветра, давления, а также концентрации примесей в атмосферном воздухе в 8.00, 13.00, 17.00 каждых суток, полученных на постах наблюдения гидрометеорологической службы. Анализ обращаемости за медицинской помощью в лечебные учреждения проведен по суточным данным информационной базы департамента здравоохранения Улан-Батора. Всего учтено более 110 тысяч случаев заболеваний, которые были сгруппированы по отдельным нозологическим формам, возрастным категориям (0–14, 15–17 и старше 18 лет) и районам проживания, привязанным к постам наблюдения. Основной мишенью воздействия примесей, образующихся при сгорании топлива, являются органы дыхания [6, 7], поэтому нами рассматривалась частота обращений в сутки по следующим нозологическим формам: острые респираторные заболевания (ОРЗ, шифр по Международной классификации болезней 10 пересмотра – J00-J06), острый бронхит (J20), острая респираторная инфекция нижних дыхательных путей (J22), хронические заболевания верхних дыхательных путей (J30-J31), хронические болезни миндалин и аденоидов (J35), хронический ларингит и ларинготрахеит (J37). На первом этапе исследований выявлены, с помощью факторного анализа, наиболее значимые характеристики условий жизнедеятельности, которые затем использованы в математической модели в качестве предикторов. К ним отнесены: отклонения температуры от среднегодовой для конкретного периода, коэффициенты опасности для отдельных примесей, содержащихся в атмосферном воздухе (взвешенные вещества, CO, SO₂, NO₂). На втором этапе выявлен наиболее показательный период, характеризующийся наименее благоприятными

условиями природной среды и высокой частотой нарушений здоровья, которые могут быть ассоциированы с воздействием выбранных для модели факторов. Анализ численности населения и обращаемости в абсолютных величинах по отдельным районам Улан-Батора показал, что для моделирования суточной обращаемости частота изучаемого явления недостаточна, поэтому репрезентативные данные можно получить только при условии объединения обращаемости (нами выбран «шаг» 14 дней). В связи с этим для оценки воздействия рассмотрены два периода осреднения концентраций: во-первых, в пробах 30-минутного отбора (для каждого вещества рассчитывали HQ_{ac} с учетом референтных концентраций для краткосрочного воздействия) и, во-вторых, средние концентрации за 14 суток (рассчитывали HQ_{chr} по референтным концентрациям для хронического воздействия). Также по двум периодам рассчитывали индексы опасности (HI) острого и хронического воздействия, суммирующие HQ контролируемых ингредиентов.

Для выявления числа дополнительных случаев заболевания, ассоциированных с загрязнением атмосферного воздуха, нами в динамических моделях использован метод «возмущений», который позволяет имитировать реальную ситуацию, определять возможный тренд загрязнения атмосферного воздуха и изменения заболеваемости, по сравнению с невозмущенным фоновым уровнем в сложившихся экологических условиях, с учетом процесса самовосстановления заболеваемости [1, 2]. Пусть состояние системы характеризуется некоторым набором показателей, изменяющихся во времени $x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$, t – время и $x(t)^*$ – описывает естественное состояние системы. Предполагается, что систему можно описать системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x(t), u(t)),$$

где вектор $u(t) = (u_1(t), \dots, u_m(t))$ – величина внешнего воздействия. Разложив в окрестности $x(t)^*$ и $u(t) = 0$ (отсутствие внешнего воздействия) систему до линейных слагаемых, получим линеаризованный вариант модели:

$$\frac{dz}{dt} = f_x(t, x^*(t), 0)z + f_u(t, x^*(t), 0)u,$$

где $z(t) = x - x(t)^*$ – отклонение от естественного состояния. Обозначим $f_x = Q$ и $f_u = B$. Будем иметь систему

$$\frac{dz_1}{dt} = \sum_{j=1}^n q_{1j}z_j + \sum_{k=1}^m b_{1k}u_k;$$

$$\dots$$

$$\frac{dz_i}{dt} = \sum_{j=1}^n q_{ij}z_j + \sum_{k=1}^m b_{ik}u_k;$$

$$\dots$$

$$\frac{dz_n}{dt} = \sum_{j=1}^n q_{nj}z_j + \sum_{k=1}^m b_{nk}u_k.$$

Диагональные элементы q_{ij} характеризуют скорости естественного самовосстановления при условии, что остальные компоненты системы находятся в естественном состоянии и нет внешнего воздействия ($u = 0$). Внедиагональные элементы q_{ij} ($i \neq j$) матрицы определяются двумя компонентами вектора z : i -я и j -я. Для определения матрицы B после того как найдены элементы матрицы Q используется метод наименьших квадратов, т.е. решается задача:

$$\frac{dz}{dt} = Qz + Bu, t \in [t_0, t_1], z(t_0) = z_0;$$

$$J(B) = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^n \beta_i (z_i - \bar{z}_i(t))^2 dt \rightarrow \min,$$

где величины $\bar{z}_i(t)$ получены из статистических данных; β_i – весовые коэффициенты.

Итак, динамику обращаемости населения будем описывать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = Qx + Bu + C(T^* - T^{**}),$$

где t – время; $x(t)$ – вектор, характеризующий количество заболевших с определенной заболеваемостью в течение недели; $u(t)$ – скалярный показатель загрязнения атмосферного воздуха, NI_{chr} (включающий HQ следующих веществ: CO , NO_2 , NO , PM_{10} , SO_2); $T^*(t)$ – средняя температура ($^{\circ}C$) в течение недели, $T^{**}(t)$ – средний многолетний уровень температуры в течение недели, векторы B и C отражают влияния загрязнения и температуры, матрица Q отражает процессы самовосстановления здоровья и взаимовлияния болезней.

В рассматриваемой модели исследуется N показателей, характеризующих заболевания населения. Пусть i – это индекс, изменяющийся в диапазоне от 1 до N , x_i – значение количества заболевших в течение недели, рассчитанное по модели, а $\bar{x}_i(t)$ – наблюдаемые значения количества заболевших, полученные по статистике.

Для оценки точности модели на интервале $[0, T]$ используются такие показатели, как K^l – интегральная ошибка по всем показателям модели, и K^i – интегральная ошибка по отдельным показателям модели, рассчитываемые по следующим формулам:

$$K^l = \frac{\sqrt{\int_0^T \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i(t))^2 dt}}{\sqrt{\int_0^T \sum_{i=1}^N \bar{x}_i(t) dt}}; \quad K^i = \frac{\sqrt{\int_0^T (x_i - \bar{x}_i(t))^2 dt}}{\sqrt{\int_0^T \bar{x}_i(t) dt}}.$$

В данной области исследований точность модели считается удовлетворительной при $K^l < 25\%$, $K^i < 20\%$.

На основании полученных моделей разработан прогноз поведения рассматриваемой системы при внедрении природоохранных мероприятий. В качестве базового сценария было принято фактическое состояние, т.е. учитывались наблюдаемые выбросы в атмосферный воздух от ТЭЦ, котельных, юрт и автотранспорта. Рассмотрены четыре сценария управления загрязнением воздушного бассейна г. Улан-Батора: снижение выбросов автотранспорта; снижение выбросов от топков юрт; снижение выбросов от котельных; снижение выбросов от ТЭЦ, основанных на результатах исследований, представленных в [2, 3, 5]. Расчеты последовательно проведены в два этапа: изменение содержания примесей в атмосферном воздухе при различных вариантах снижения эмиссии от рассматриваемых источников; изменение частоты заболеваний органов дыхания у населения по районам города при изменении загрязнения.

Результаты исследования и их обсуждение

Наиболее высокое содержание диоксида азота в воздушном бассейне селитебной зоны г. Улан-Батора наблюдается в зимние

месяцы (с ноября по март), причем в декабре достигают допустимого предела. Следует отметить, что в период интенсивной деятельности ТЭЦ, коммунальных и личных отопительных систем уровень загрязнения атмосферного воздуха селитебных зон выше, чем в среднем в течение года. Так как город подвергается техногенной нагрузке неравномерно, мы провели оценку потенциального риска, связанного с хроническим и острым воздействием, по отдельным районам. Наиболее высокое хроническое ингаляционное воздействие наблюдается в компактных благоустроенных районах центральной и южной частей города (Сухбатор $NI_{chr} = 10,6$, $NI_{ac} = 16,9$; Баянгол $NI_{chr} = 8,8$, $NI_{ac} = 10,6$; Хануул $NI_{chr} = 5,2$, $NI_{ac} = 8,0$). Максимальную долю в суммарный общетоксический риск вносят взвешенные вещества (PM_{10} и $PM_{2,5}$).

К мишеням воздействия примесей, поступающих в атмосферный воздух, относятся органы дыхания. Среднесуточная обращаемость за медицинской помощью по поводу болезней органов дыхания представлена в табл. 1.

При сравнении данных выявлены статистически значимые различия в структуре и частоте обращаемости в различные сезоны года ($\chi^2 = 9,4$, $p = 0,003$). Так, в холодный сезон доля ОРЗ составляла 64–76%, случаев острого бронхита – 8,5–14,2%, заболеваний нижних отделов легких – 0,07–0,44%, обострения хронических заболеваний верхних дыхательных путей – 5,7–7,8%, миндалин – 10,9–18,5%. В теплый сезон снижался вклад в суммарную обращаемость случаев ОРЗ (42,2–60,5%), острого бронхита (4,2–6,2%) на фоне повышения доли случаев заболеваний хронических заболеваний верхних дыхательных путей (16,2–25,6%) и миндалин (19,2–6,9%).

Предварительный корреляционный анализ суточных данных частоты обращений и содержания примесей показал, что для ОРЗ и обострения хронических заболеваний верхних дыхательных путей сильные тесные связи выявлены для данных, обобщающих число обращений за 2 недели и средний за указанный период показатель NI_{chr} . Для острого бронхита характерен лаг между моментом регистрации заболевания и уровнем загрязнения атмосферного воздуха ($lag = 14$ дней).

При идентификации математической модели на реальных данных выявлено, что наиболее хорошие характеристики имели модели, рассматривающие следующие груп-

пы нозологических форм: ОРЗ (J00–J06), острый бронхит (J20); хронические заболевания (J30–J37). Для четырех районов города Улан-Батор были получены следующие оценки K^l : Баянгол – 94%, Сухбатор – 91,4%, Хануул – 81,5%, Чингелтей 92,7% (табл. 2).

Выявлена обратная зависимость точности расчетных данных от площади района, плотности населения, численности групп наблюдения и частоты моделируемого явления ($r = -0,62-0,75$, $p < 0,05$). Точность расчетов числа заболеваний для детского

и взрослого населения в 1,5–2 раза выше, чем для подростков; острых респираторных заболеваний и обострений хронической патологии органов дыхания на 10–16% выше, чем для острого бронхита. Характеристики моделей для подростков имеют худшие характеристики, неопределенности, возможно, связаны с недостаточной численностью контингента, большей значимостью других (мешающих) факторов, а также сложностью учета экспозиции для этой возрастной группы.

Таблица 1

Среднесуточная обращаемость за медицинской помощью населения Улан-Батора по классу болезней органов дыхания (на 1000 населения)

Месяцы	Нозологические формы (по МКБ 10)						В целом органы дыхания
	J00-J06	J20	J22	J30-J31	J35	J37	
Январь	97,45	12,90	0,39	11,77	28,10	1,00	151,61
Февраль	63,55	8,52	0,38	5,48	12,86	1,14	86,00
Март	73,32	8,10	0,10	9,94	13,19	1,87	106,52
Апрель	66,63	5,73	0,17	13,23	15,73	0,77	98,97
Май	44,55	3,94	0,16	10,61	11,71	0,94	71,90
Июнь	37,23	3,80	0,17	9,90	11,80	0,70	61,55
Июль	20,19	2,00	0,16	12,26	12,90	0,32	47,84
Август	27,23	2,61	0,16	14,81	14,81	1,29	60,90
Сентябрь	41,80	5,07	0,20	9,50	14,43	1,07	69,74
Октябрь	67,74	9,58	0,03	12,32	16,23	0,42	106,32
Ноябрь	140,63	18,73	0,13	11,03	20,67	0,27	185,29
Декабрь	91,77	19,06	0,19	7,68	14,61	0,58	133,90
Среднее за год	58,40	8,34	0,19	10,71	15,59	0,86	98,38

Примечания: ОРЗ (J00–J06), острый бронхит (J20), острая респираторная инфекция нижних дыхательных путей (J22), хронические заболевания верхних дыхательных путей (J30–J31), хронические болезни миндалин и аденоидов (J35), хронический ларингит и ларинготрахеит (J37).

Таблица 2

Интегральная ошибка моделей заболеваемости населения отдельных районов г. Улан-Батора (K_p , K^l , %)

Заболевания	Группы	Районы Улан-Батора			
		Баянгол	Сухбатор	Хануул	Чингэлтэй
ОРЗ	Дети	7,8	16	41	11
	Подростки	12	16,5	46	28
	Взрослые	14	21	31	16
	Все население	6,8	12,6	29	8,8
Бронхит	Дети	13,6	20	36	18,7
	Подростки	35	50	67	57,6
	Взрослые	17,6	36	45	28,7
	Все население	10,5	17,6	17,6	18
Хронические заболевания	Дети	22	17	28	19
	Подростки	27	33	32,5	23
	Взрослые	18,5	17	19	17
	Все население	16	13,7	16	13

Сценарные расчеты проводились для четырех районов г. Улан-Батора (Баянгол, Сухбаатар, Чингелтей и Хан-Уул) на модели заболеваемости населения с учетом возраста. В основу расчетов положены следующие варианты: базовый сценарий и варианты снижения выбросов в атмосферу от различных источников выбросов. Расчет концентраций примесей велся на камерной модели распространения загрязнений в воздухе по г. Улан-Батору с дальнейшим осреднением концентраций по каждому району. Обобщая результаты численных экспериментов по предложенным моделям, установлено, что эмиссия автотранспорта наиболее значима для района Баянгол, где возможно снижение концентраций на 12% при выводе 50% автомобилей за пределы района. Снижение выбросов от топок юрт может привести к уменьшению загрязнения в районе Чингэлтэй. Однако наиболее перспективным является сокращение эмиссии от крупных источников – ТЭЦ. В районах размещения указанных предприятий снижение выбросов на 30% сократит концентрации примесей на 9,8–16,3%. А при снижении выбросов на 50% приведет к снижению до приемлемого уровня таких веществ, как диоксид серы, оксиды азота. Однако концентрации взвешенных веществ останутся выше ПДК. Интересно отметить, что для снижения выбросов от топок юрт в качестве индикатора эффекта можно рекомендовать мониторинг за частотой бронхита и ОРЗ, тогда как для мер, предусматривающих сокращение выбросов ТЭЦ и автотранспорта, лучшим индикатором будет наблюдение за ОРЗ, а частота бронхита значимо не изменится. Вероятно, это связано с различным составом эмиссии при горении топлива в промышленных котлах и в частных топках.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в Монголии вследствие развития топливно-энергетической промышленности и транспорта, а также особенностей жилой застройки (юрточное расселение) существует опасность поступления в атмосферу значительных коли-

честв выбросов вредных веществ, прежде всего продуктов сгорания топлива, что в условиях климатических особенностей и рельефа территории городов Монголии. Использование методов математического моделирования предоставляет возможность рассмотреть и сравнить различные варианты развития региона с учетом влияния на состояние природной среды и здоровье населения. Наиболее точные результаты получены для детской возрастной группы на моделях рассматривающих влияние факторов среды на обращаемость по поводу острых респираторных заболеваний. Точность математических моделей острых респираторных заболеваний и обострений хронической патологии органов дыхания на 10–16% выше, чем для острого бронхита.

Исследования поддержаны грантом № 1 СО РАН и Академии наук Монголии, «Математическое моделирование и информационные технологии в задачах оценки и прогнозирования здоровья населения города Улан-Батор в зависимости от социальных, экологических и экономических факторов».

Список литературы

1. Батурин В.А., Урбанович Д.Е., Маторова Н.И., Ефимова Н.В. Моделирование процессов самовосстановления и взаимовлияния показателей, характеризующих здоровье населения // Вычислительные технологии. – 2003. – № 8(IV). – С. 109–15.
2. Батурин В.А., Будням С., Малтугуева Н.С., Федоров Р.К. Оценка и моделирование загрязнения атмосферного воздуха в г. Улан-Батор // Программные системы: теория и приложения. – 2012. – № 5(14). – С. 81–91
3. Баярсайхан Г. Исследование загрязнения воздушной среды Улан-Батора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 3. – С. 96–100
4. Суржиков В.Д., Суржиков Д.В. Применение многомерных статистических методов в оценке воздействия атмосферных загрязнений на здоровье населения // Гигиена и санитария. – 2014. – № 2. – С. 41–4.
5. Монгол Улс Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлыг бууруулах хяналтын чадавхийг бэхжүүлэх төсөл (Проект по улучшению и поддержанию мониторинга за загрязнением атмосферы города Улан-Батора). – Улаанбаатар, 2013. – 385 с. (на монг. и англ. яз.).
6. Xiaochaan P., Wei H., Keven T. Health benefit evaluation of the denery use scenarios in Beijing. – China. Science of Total Environm, 2007. – № 374. – P. 242–51.
7. Wheeler B.W., Ben-Shlomo Y.J. Environmental equity, air quality, socioeconomic status and respiratory health: A linkage analysis of routine data from the health survey for England // Epidemiol and Community Health. – 2005. – № 11. – P. 948–54.