

Геоинформационное моделирование состояния загрязнения воздуха г. Алматы при различных сценариях развития городского автотранспорта

Б.М. МИРКАРИМОВА

*Институт космических исследований Министерства образования
и науки Республики Казахстан*

29 декабря 2003 г.

Рассматривается геоинформационное моделирование загрязнения атмосферы города Алматы (Казахстан). Основное внимание уделяется моделированию и сравнительному анализу качества воздуха при различных сценариях развития автотранспорта в городе — соблюдение («оптимистичный прогноз») и несоблюдение («пессимистичный прогноз») европейских стандартов по выхлопным газам. Математическая модель, представленная в работе, была преобразована к статистическому виду путем осреднения по временным интервалам характерных периодов горно-долинной циркуляции.

1. Введение

Наиболее актуальной проблемой в управлении и изучении природно-территориальных систем является проблема загрязнения атмосферы городов. В качестве конкретного объекта исследований в данной работе был выбран город Алматы со сложной орографией и циркуляцией ветровых потоков. В связи с очень высокой повторяемостью периодов высокого загрязнения атмосферы, г. Алматы является одним из самых экологически неблагополучных городов Казахстана. За годы независимости Республики Казахстан уменьшилось промышленное производство в городе, однако основные источники вредных примесей либо остались на неизменном уровне (ТЭЦ, котельные), либо резко увеличились (автотранспорт).

Поскольку на качество городского воздуха влияют множество факторов, то детальный анализ текущего состояния и прогностические оценки дальнейшего развития возможно выполнить только с помощью математического моделирования. При этом наиболее эффективный подход связан с применением геоинформационных технологий. Следуя этому подходу, математическая модель погружается в геоинформационную систему (ГИС «Город»), и все этапы моделирования и анализа результатов осуществляются в информационной среде, основанной на реальных данных. Такая методика известна под названием геоинформационное моделирование [1] и позволяет резко сократить путь от исследовательской работы до её практического применения.

В данной работе основные задачи заключались в следующем:

- Построение информационного обеспечения модели переноса и рассеяния примеси в атмосфере города Алматы на базе ГИС.

- Моделирование текущего состояния загрязнения атмосферы за счет транспортных потоков, используя данные по мониторингу интенсивности движения автотранспорта, выбросов автомобилей и концентрации примесей вдоль основных магистралей.
- Моделирование и сравнительный анализ качества воздуха при различных сценариях развития автотранспорта в городе — соблюдение («оптимистичный прогноз») и несоблюдение («пессимистичный прогноз») европейских стандартов по выхлопным газам.

2. Математическая формулировка статистической модели

Математической основой модели загрязнения городской атмосферы являются уравнения сохранения массы загрязняющих примесей, которые описывают адвекцию, турбулентную диффузию, химические реакции, стоки и источники загрязняющих веществ [2]. Эти уравнения в результате осреднения по высоте расчетной области могут быть преобразованы в двумерные уравнения вида:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{C}\mathbf{u}) + \sigma\mathbf{C} &= \mathbf{K} \bullet \Delta\mathbf{C} + f \\ \mathbf{u} = \{u, v\}, \quad \mathbf{K} = \{K_x, K_y\}, \quad \Delta &= \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right\} \\ \sigma &= \frac{1}{H - z_0} \left[\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\mathbf{V}_d K_{z_0} \mu'_0}{K_{z_0} \mu'_0 + \mathbf{V}_d (\mu - \mu_0)} \right] \\ f &= \frac{\alpha}{H - z_0} \cdot \left[1 - \frac{\mathbf{V}_d (\mu - \mu_0)}{K_{z_0} \mu'_0 + \mathbf{V}_d (\mu - \mu_0)} \right] + \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}|_{\Gamma} &= 0, \quad V_n < 0 \\ \mathbf{C}(0, x, y) &= \mathbf{C}^0(x, y), \quad t = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ — вектор массовых концентраций загрязняющей примеси; \mathbf{u} — вектор компонентов скорости воздушных потоков; \mathbf{K} — тензор коэффициентов турбулентной диффузии; $\mathbf{Q} = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_N\}$ — вектор мощностей выбросов в объеме воздушного бассейна; N — число загрязняющих примесей; $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\}$ — мощность выбросов приземных источников, $\mathbf{V}_d = \{\mathbf{V}_{d_1}, \mathbf{V}_{d_2}, \dots, \mathbf{V}_{d_N}\}$ — скорость сухого осаждения примеси на поверхность, z_0 — шероховатость; — боковая поверхность; n — внешняя нормаль к поверхности; V_n — нормальная составляющая скорости ветра.

Для математической постановки задачи о среднесуточной концентрации загрязняющей примеси в атмосфере города, расположенной в горной местности, воспользуемся данными о характерных режимах горно-долинной циркуляции (ГДЦ) в районе г. Алматы 3. В антициклональных условиях (в условиях высокого уровня загрязнения атмосферы) реализуются следующие фазы этой циркуляции:

1. горный ветер (ночная циркуляция);
2. затухание горного ветра — развитие долинного ветра (утренний режим);

3. долинный ветер (дневная циркуляция);
4. затухание долинного ветра — развитие кататического стока (после захода солнца);
5. заполнение предгорной зоны холодным воздухом (вечерний режим).

Эти фазы циклически повторяются на весь срок антициклонального состояния атмосферы. Такая закономерность дает возможность принять ряд предположений и на их основе строго математически преобразовать исходные уравнения к стационарному виду, отражающему среднесуточные закономерности. Эти предположения следующие:

- $C(0, x, y) = C(24, x, y)$, т.е. уровень загрязнения атмосферы
- периодически (с периодом в сутки) повторяется на все время антициклональной обстановки. Наземные измерения показали, что загрязняющие вещества в течение дня накапливаются, а ночью происходит очищение атмосферы.
- перестройка фаз ГДЦ происходит за период намного короче времени существования этой фазы, т.е. $\tau_i \ll \Delta t_i$, где τ_i — время перестройки, Δt_i — время существования i -ой фазы.
- основные параметры уравнения (1) сохраняют стационарные значения на весь период i -ой фазы, т.е. $\mathbf{u}_k = const$, $\mathbf{K}_i = const$, $\sigma_i = const$, $f_i = const$, где $i = \overline{1, 5}$

С учетом этих условий в результате осреднения задачи (1)–(2) по времени:

$$\bar{C} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \bar{C}_i \Delta t_i = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \int_{t_{i+1}}^{t_i} C_i dt, \Delta t_i = t_{i+1} - t_i \quad (3)$$

получим

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\bar{C}\bar{\mathbf{u}}) + \bar{\sigma}\bar{C} &= \bar{\mathbf{K}} \bullet \Delta \bar{C} + \bar{f} \\ \bar{\mathbf{u}} &= \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \mathbf{u}_i, \quad \bar{\mathbf{K}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \mathbf{K}_i, \\ \bar{\sigma} &= \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{H_i - z_0} \frac{V_d K_{z_0} \mu'_0}{K_{z_0} \mu'_0 + V_d (\mu - \mu_0)} \right)_i \\ \bar{f} &= \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \left[\frac{\alpha_i}{H_i - z_0} \cdot \left(1 - \frac{V_d (\mu - \mu_0)}{K_{z_0} \mu'_0 + V_d (\mu - \mu_0)} \right) + Q_i \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Замыкают задачу граничные условия

$$\bar{C}|_{=0}, \quad V_n < 0 \quad (5)$$

Статистическая задача (4)–(5) легко обобщается на большие (например, годовые) интервалы осреднения [4]. Для этого достаточно знать повторяемость ситуаций с ГДЦ на интервале осреднения и умножить C на эту величину. Правда, при этом предполагается, что другие метеоситуации характеризуются низким уровнем загрязнения атмосферы. В противном случае необходимо выполнить статистический анализ большого ряда наблюдений и выявить все типичные ситуации высокого уровня загрязнения воздушного бассейна города и для каждой ситуации сформулировать задачу, подобную данной.

3. Информационное обеспечение статистической задачи

Из большого количества параметров задачи (4)–(5) наиболее важными являются источники выбросов загрязняющих веществ. Для их определения воспользуемся моделью временного хода выбросов, следуя которой мощность выбросов можно выразить:

$$Q(t) = \bar{Q}f(t), \quad (6)$$

где \bar{Q} — средняя за сутки величина выброса автотранспорта, которая рассчитывалась по модели CAR International [5], $f(t)$ — функция, отражающая динамику изменения этих выбросов в течение суток.

В качестве такой функции после соответствующей нормировки:

$$\frac{1}{T} \int f(t)dt = 1 \quad (7)$$

(здесь T — период времени, равный суткам) была принята динамика интенсивности движения автотранспорта по улице Рыскулова, предоставленная НИИТ. Эта кривая была преобразована в гистограмму в соответствии с указанными выше фазами ГДЦ (см. рис. 1а).

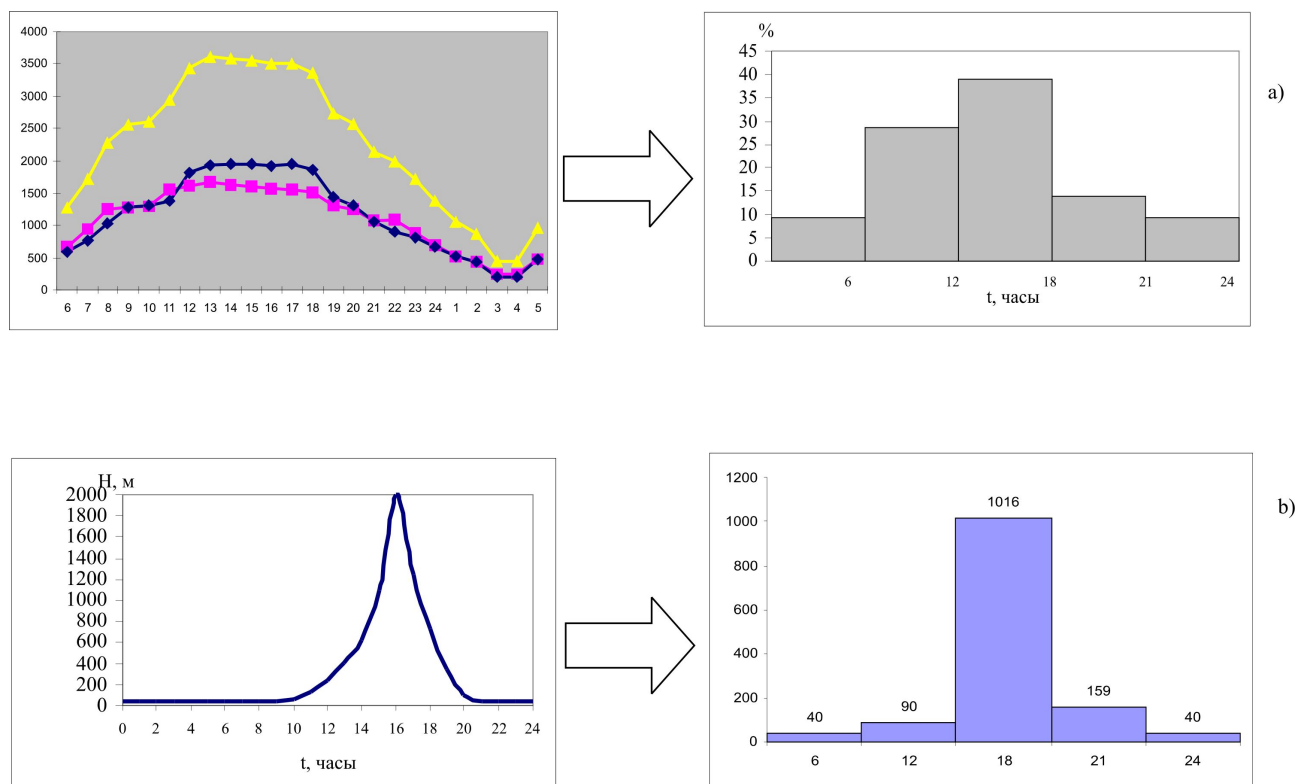


Рис. 1. Информационное обеспечение модели. (а) — временной ход интенсивности движения автотранспорта, (б) — временной ход базы инверсии.

В качестве типичной метеорологической ситуации был выбран день 23 октября 1986 года, когда выполнялся эксперимент СО-86 и наблюдался типичный режим ГДЦ. Для этого дня данные по динамике базы инверсионного слоя были также преобразованы к виду гистограммы по фазам ГДЦ (см. рис. 1б). Поля ветра были также соотнесены с фазами ГДЦ. Они приведены на рис. 2.

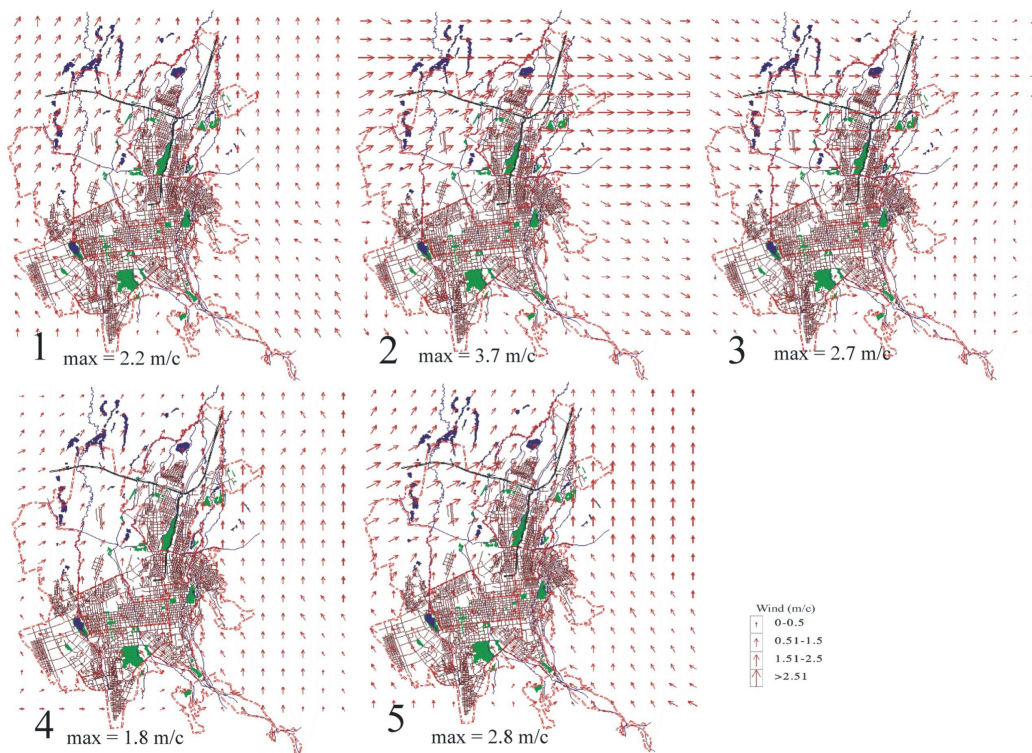


Рис. 2. Поля ветра, относящиеся к ситуации ГДЦ 23 октября 1986 года.

Кроме скорости и направления ветра на распределение примеси существенное влияние оказывают и такие параметры как сухое осаждение частиц и газов и шероховатость подстилающей поверхности. Эти данные взяты из литературных источников [6, 7, 8].

Следует отметить, что все пространственные данные загружались в геоинформационную систему (ГИС) и преимущество такого подхода особенно ярко видно по картированию характеристик улично-дорожной сети. На рис. 3 представлены результаты адаптации данных по трафику автотранспорта и средней скорости движения к ГИС. В рамках этой системы просчитаны по модели CAR International и построены карты мощности выхлопа продуктов сгорания. Однако, имеющиеся данные далеко не покрывают всю улично-дорожную сеть. Следовательно, расчеты дают только нижнюю границу уровня загрязнения атмосферы автотранспортом.

Имеет смысл кратко описать процедуру включения математических моделей в состав ГИС. Ключевым компонентом служит здесь так называемый набор данных в формате GRID, реализованный в программном обеспечении ArcInfo. Модель функционирует следующим образом: формирование задания определяется набором управляющих параметров, которые выделяют территорию моделирования, формируют базу семантических данных, активизируют файлы метеорологических данных и определяют возможность интерфейса с пользователем. Все указанные данные соответственно преобразуются в форме GRID-файла, при этом размеры и структура GRID-файла определяют параметры сеточной области.

Расчетный процесс таким образом включает в себя формирование сеточной области, т.е. представление всех исходных величин (расположение источников, метеоданные и др.) на конечно-разностной сетке. Далее проводится собственно расчет и представление результатов в пространстве этой сеточной области. Матрицы результатов в соответствии

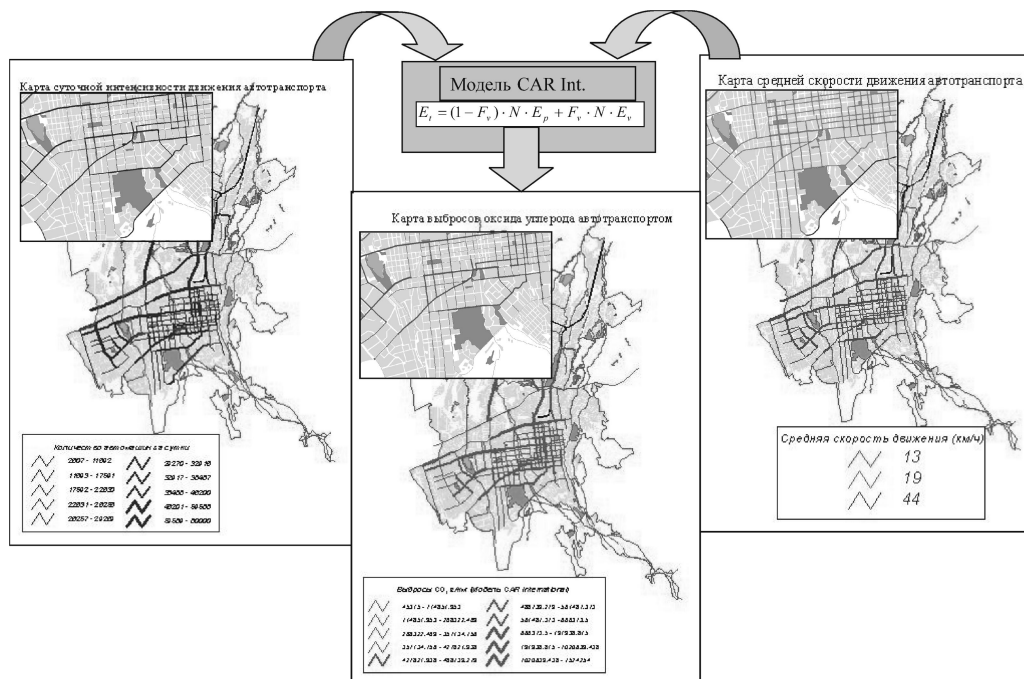


Рис. 3. Геоинформационное моделирование выбросов автотранспорта.

с ГИС-технологией проходят обратную процедуру преобразования к GRIDам и картам результатов. Это дает возможность при интерфейсе с пользователем использовать весь богатый сервисный комплекс ArcInfo для анализа полученных результатов.

4. Результаты расчета текущей ситуации (сценарий 1)

На рисунках 4, 5 представлены результаты расчета полей концентрации оксида углерода CO и оксидов азота NO_x. На каждом рисунке приведена серия полей загрязнения, относящиеся к различным фазам ГДЦ и среднесуточной концентрации:

1. Ночной цикл горно-долинной циркуляции (00:00–06:00)
2. Перестройка: затухание горного ветра & формирование дневной циркуляции (06:00–12:00)
3. Дневной цикл горно-долинной циркуляции (12:00–18:00)
4. Перестройка: затухание дневного цикла & формирование кatabатического ветра (18:00–21:00)
5. Катабатический ветер & заполнение холодной линзы (21:00–00:00)
6. Итоговое среднесуточное поле концентрации.

Подобные расчеты были выполнены для всех газов, расчет выбросов которых можно выполнить по модели CAR International. Это — оксид углерода CO, диоксид азота NO₂, оксиды азота NO_x, углеводороды HC, бензол C₆H₆, тетраэтилсвинец Pb, мелкодисперсная

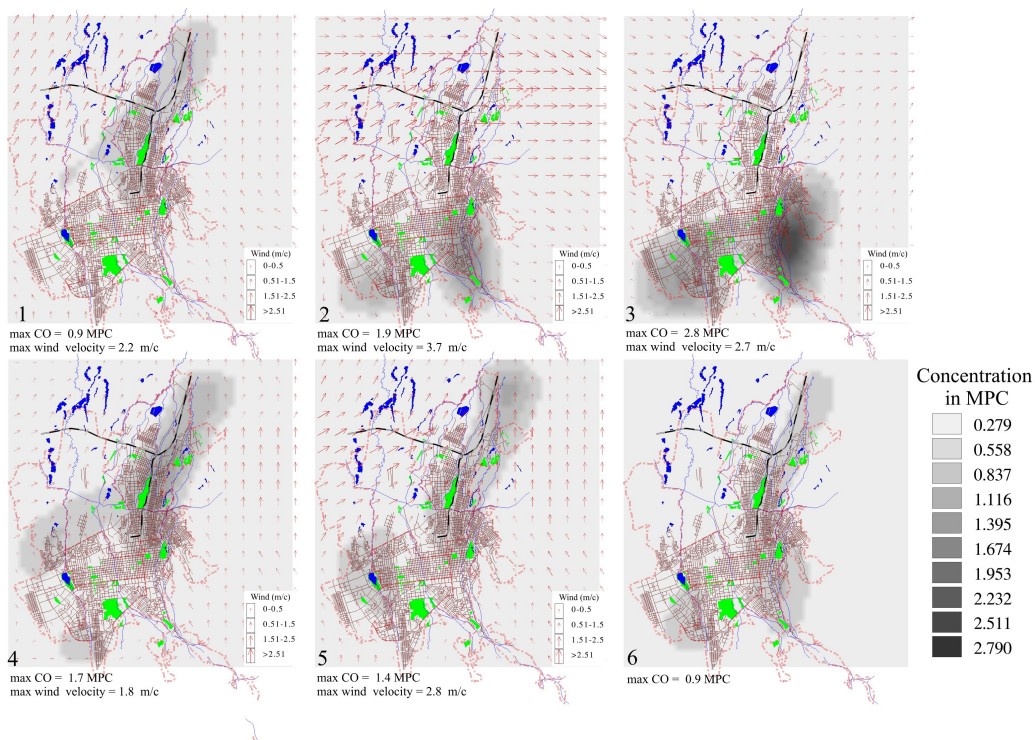


Рис. 4. Поля загрязнения атмосферы г. Алматы оксидами углерода CO транспортными потоками для 5 фаз ГДЦ (карты 1–5) и среднесуточное поле загрязнения (карта 6). Текущее состояние.

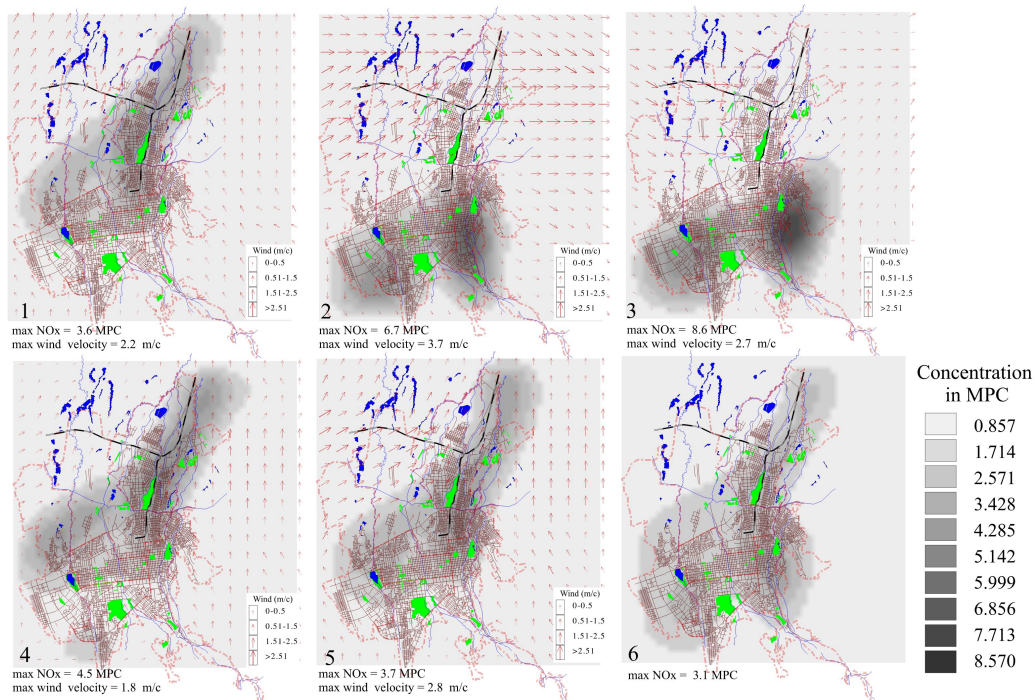


Рис. 5. Поля загрязнения атмосферы г. Алматы оксидами азота NO_x транспортными потоками для 5 фаз ГДЦ (карты 1–5) и среднесуточное поле загрязнения (карта 6). Текущее состояние.

аэрозоль РМ. По этим данным был выполнен расчет суммарной концентрации (индекса загрязнения), представленный на рис. 6:

$$C_{\Sigma} = \sum_n \left(\frac{C_n}{n} \right) \quad (8)$$

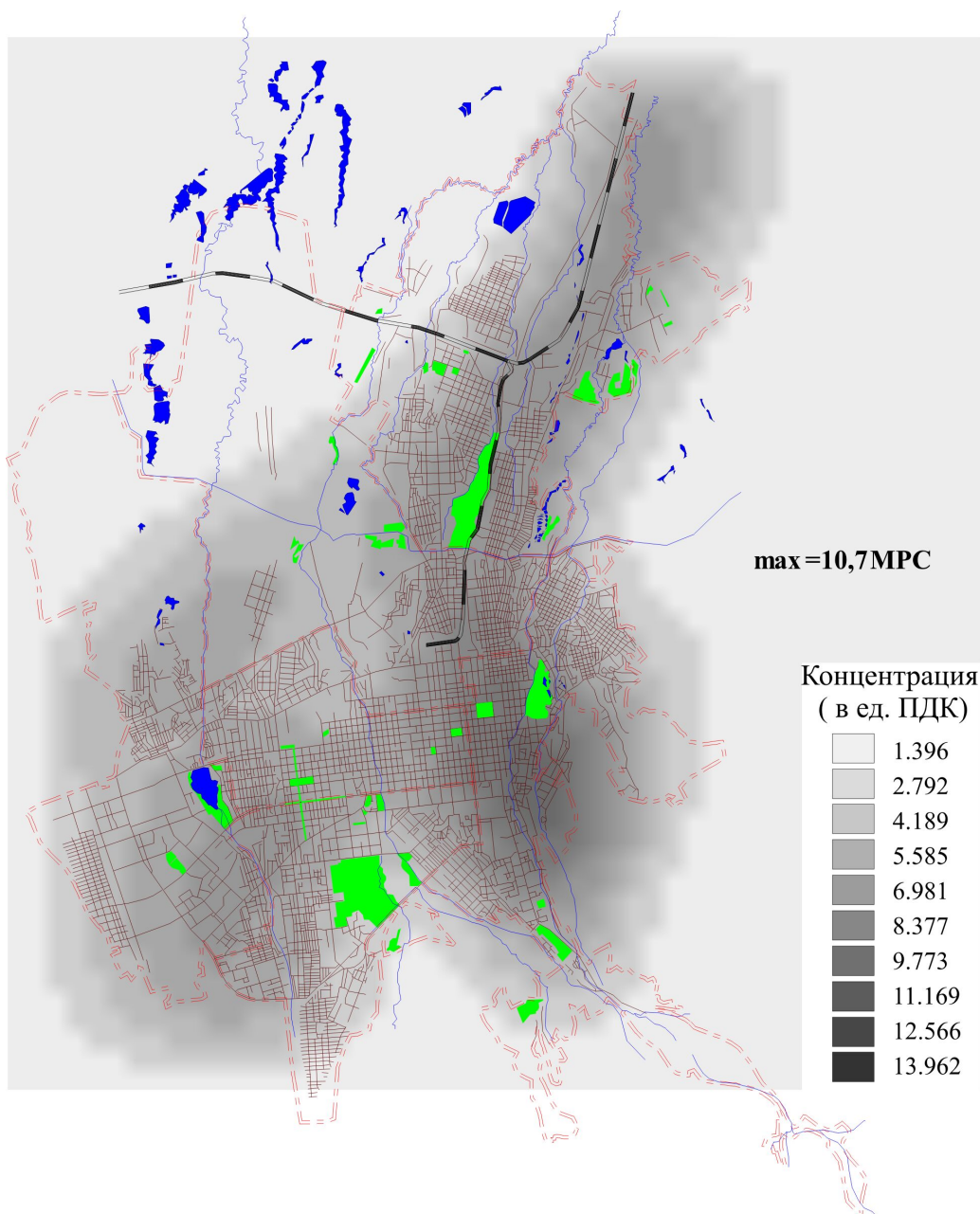


Рис. 6. Среднесуточное поле загрязнения атмосферы г. Алматы выхлопными газами автотранспорта. Текущее состояние.

Как видно по результатам расчета, воздушный бассейн города Алматы находится в критическом состоянии - максимальные концентрации в 10 раз превышают предельно-допустимые концентрации (ПДК), причем в ситуациях, повторяемость которых достаточно велика (около 50% в осенне-зимний сезон).

Кроме того, свой достаточно весомый вклад в загрязнение атмосферы вносят промышленные предприятия. Причем состав выбросов значительно изменяется. Если концентрация CO в воздухе увеличивается незначительно, то содержание сернистого ангидрида SO₂ достигает значительных концентраций (рис. 7) с превышением ПДК в 10 раз по максимальной и в 4 раза по среднесуточной концентрации.

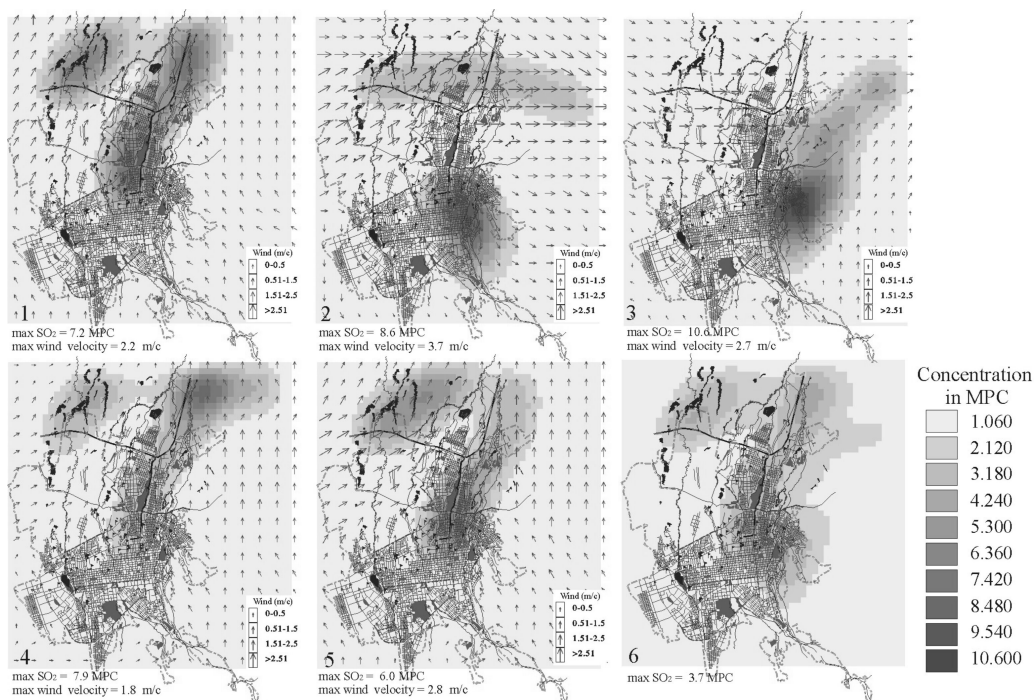


Рис. 7. Поля загрязнения атмосферы г. Алматы сернистым ангидридом SO₂ транспортными потоками для 5 фаз ГДЦ (карты 1–5) и среднесуточное поле загрязнения (карта 6).

5. Результаты расчета по варианту пессимистичного прогноза (сценарий 2)

Аналогичные расчеты выполнены для варианта развития автотранспорта в городе Алматы, предложенный НИИТ. Следуя этому варианту, в ближайшее десятилетие парк автотранспорта возрастет на 20%, при этом доля тяжелого транспорта (автобусы, грузовой) уменьшится на 10%. При этом эмиссионные факторы сохранились на прежнем уровне. Эмиссионные факторы приняты приблизительно E_p = 12.1, E_v = 11.1. Как видно из рисунка 8 пропорционально выбросам увеличилась концентрация загрязняющих веществ по суммарному показателю.

6. Результаты расчета по варианту оптимистичного прогноза (сценарий 3)

Оптимистичный прогноз основан на предположениях, что автотранспортный парк развивался по тому же сценарию, что и сценарий 2, но эмиссионные факторы соответствовали

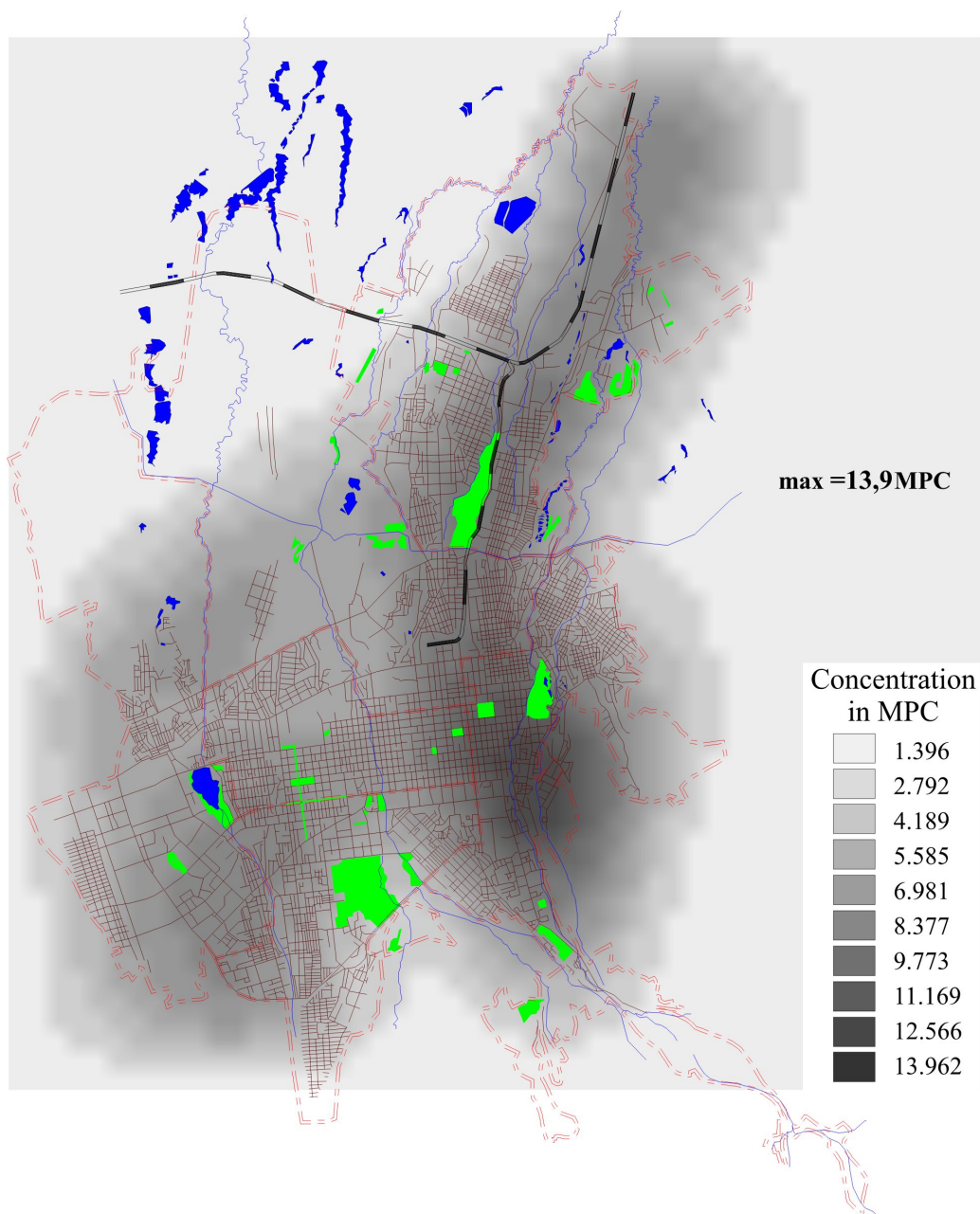


Рис. 8. Среднесуточное поле загрязнения атмосферы г. Алматы выхлопными газами автотранспорта. Пессимистичный прогноз.

при этом европейским стандартам: $E_p = 2.3$, $E_v = 8.2$. Расчеты суммарной концентрации по сценарию 3 приведены на рисунке 9. Анализ этих данных показывает, что переход к международным стандартам даст значительный эффект — максимальные концентрации уменьшатся в 2,5 раза. Таким образом, ограничение использования старых автомашин, обязательное наличие нейтрализаторов (дожигателей) и более эффективный контроль за состоянием автопарка приведет к значительному улучшению качества городского воздуха.

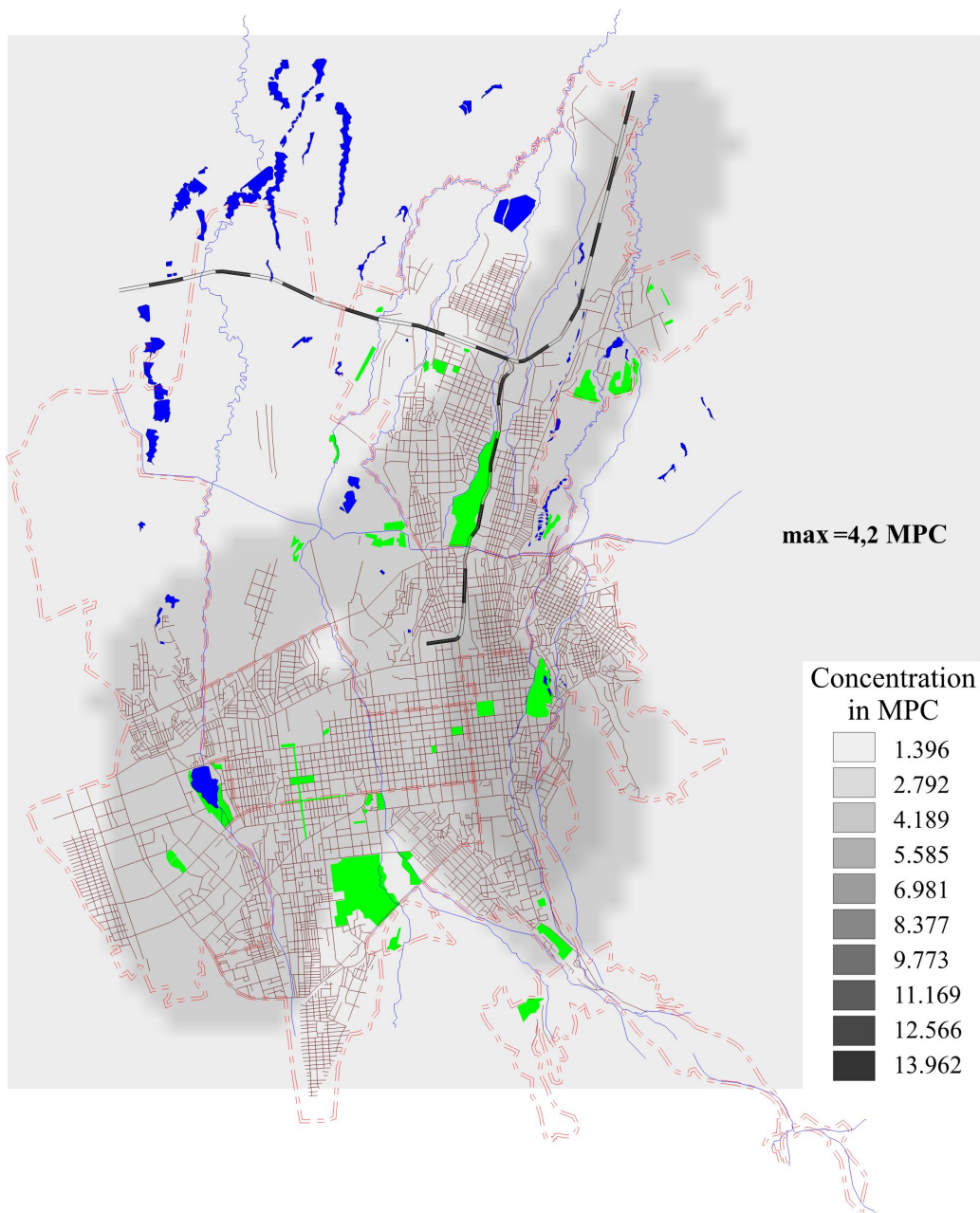


Рис. 9. Среднесуточное поле загрязнения атмосферы г. Алматы выхлопными газами автотранспорта. Оптимистичный прогноз.

7. Заключение

Таким образом, воздушный бассейн города Алматы находится в критическом состоянии вследствие неконтролируемого роста количества автомашин, большинство из которых являются изношенными и их выбросы практически не контролируются. Расчеты показали высокий уровень загрязнения, достигающий десятикратного повышения над санитарными нормами, причем речь идет не о мгновенных, а о статистически осредненных суточных концентрациях.

Список литературы

- [1] ЦВЕТКОВ В.Я. Геоинформационные системы и технологии. М. 1998. 139 с.
- [2] ЗАКАРИН Э.А., МИРКАРИМОВА Б.М. Математическое моделирование загрязнения атмосферы города на основе геоинформационной системы // Изв. АН РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 3. С. 366–375.
- [3] ГЕЛЬМГОЛЬЦ Н.Ф. Горно-долинная циркуляция северных склонов Тянь-Шаня // Л.: Гидрометеоиздат. 1963. 330 с.
- [4] МАРЧУК. Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука. 1982. 320 с.
- [5] EERENS H.C., SLIGGERS C.J. AND VAN DEN HOUT K.D. The CAR Model: The Dutch method to determine city air quality // Atmos. Environ. 27B. 1993. P. 389–399.
- [6] PLATT U. Dry deposition of SO₂ // Atmos. Environ. 1978. 12. P. 363–367
- [7] SEHMEL G.A. Particle and gas dry deposition // Atmos. Environ. 1980. 14. P. 983–1011.
- [8] GRAKEN M.C., WALTON J.J., DUEVER W.H. The Livermore regional air quality model. II Verification and sample application in the San Francisco Bay Area // J. Appl. Met. 17, N 3. P. 273–311.