

УДК 504.3.054; 004.942

Доктор техн. наук	Э.А. Закарин ¹
Канд. техн. наук	Т.В. Дедова ¹
Доктор техн. наук	Б.М. Миркаримова ²
Доктор мед. наук	Н.А. Яковлева ³
	Е.К. Садвакасов ³

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГОРНО-ДОЛИННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА АЛМАТЫ

Ключевые слова: горно-долинная циркуляция, загрязнение атмосферы, математическая модель, выбросы, стационарные и подвижные источники

На основе численных расчетов по модели MoDAP выполнен анализ полей загрязнения атмосферы при реализации различных фаз горно-долинной циркуляции в характерные дни летнего и зимнего застойного состояния атмосферы. При расчетах были использованы данные по выбросам стационарных и подвижных (автотранспорт) источников.

Введение. Горно-долинная циркуляция (ГДЦ) является одним из главных процессов, формирующих ветровой режим и экологию воздушного бассейна г. Алматы. Это связано с высокой повторяемостью штилевых ситуаций, когда вынос загрязняющих веществ за пределы города осуществляется, в основном, местными (горными и долинными) ветрами. Закономерности ГДЦ связаны с солнечным нагревом и радиационным выхолаживанием подстилающей поверхности, при этом формируются не только местные ветра, но и инверсионные слои, препятствующие вертикальному выносу загрязняющих веществ. На взгляд авторов, наиболее эффективным способом анализа этих процессов с целью выработки оптимальных воздухо-охранных решений является математическое моделирование. В данной работе продемонстрирован такой подход к оценке влияния ГДЦ на динамические процессы загрязнения

¹ ТОО «EcoRisk», г. Алматы, Казахстан;

² АО «КазГеоКосмос» г. Алматы, Казахстан;

³ ТОО «ЭКОСЕРВИС-С» г. Алматы, Казахстан

атмосферы Алматы. Работа выполнена в рамках проекта «Установление целевых показателей окружающей среды для г. Алматы» [7] и гранта МОН РК №АР05132380 «Риск-анализ влияния предприятий теплоэнергетики на загрязнение воздушного бассейна города (на примере г. Алматы)».

Ветровой режим города. Основным климатообразующим фактором для г. Алматы является его географическое расположение в предгорьях северного склона хребта Илейского (Заилийского) Алатау. Большая часть города расположена на сравнительно ровной наклонной поверхности с уклоном 1...2° в северном направлении. Правда, последнее увеличение размеров городской территории сдвинуло границы города в сторону гор, где формируются свои микроклиматические зоны, но основная масса населения проживает в прежних предгорных районах. Горный массив, высота которого достигает 4...5 км, и русловые ущелья таких рек, как Большая и Малая Алматинка, Есентай и др., формируют ветровой, термический и турбулентный режимы воздушного бассейна города.

Несмотря на то, что город открыт в северном и северо-западном направлении, повторяемость штилевых ситуаций (скорость ветра до 1 м/с) летом оценивается в 71 %, зимой достигает 79 % [5, 8]. Такие неблагоприятные, в смысле загрязнения атмосферы, условия формируются, в основном, вследствие воздействия сибирского антициклона зимой и термической депрессии на территории Казахстана летом [3]. Следует, однако, подчеркнуть, что эти данные необходимо проверить, используя не только метеонаблюдения, но и результаты мониторинга загрязнения атмосферы, особенно показателя наибольшей повторяемости (НП) превышения ПДК любым загрязняющим веществом.

Кроме слабого проветривания, атмосфера города характеризуется сильным подавлением вертикального обмена, вследствие высокой повторяемости мощных запирающих инверсий. В отличие от равнинных городов, где образование инверсионных слоев связано с радиационным выхолаживанием подстилающей поверхности, в Алматы основной механизм – это ночной кататический сток и образование линзы холодного воздуха. Днем вблизи нагреваемой солнцем поверхности линза частично разрушается, и нижняя граница инверсии поднимается вертикальными токами иногда на высоту до 1 км. В нагретый слой ночью стекает новая порция холодного воздуха, и этот циклический процесс приводит к возникновению многослойных инверсий. Как показали измерения [1], выполненные с помощью звукового локатора во время экспедиции АНЗАГ-87, в период с

27 ноября по 9 декабря 1987 г. многослойные инверсионные структуры наблюдались в 92 % времени наблюдения.

Воздушный бассейн г. Алматы в штилевых условиях во многом можно рассматривать как замкнутую систему. Это связано с указанными выше мощными запирающими инверсиями и системой местных ветров, в виде замкнутых циркуляционных ячеек, возникающих под влиянием орographic и термических неоднородностей.

Главенствующую роль, при этом, играет горно-долинная циркуляция, подробные исследования которой выполнено Гельмгольцем [2]. Как показано в этой работе, в штилевых условиях в приземном слое формируются суточные циклы с фазами горного (катабатический сток) и долинного (анабатический подъем) ветров, которые в более высоких слоях атмосферы замыкаются с противотоками и образуют ночные и дневные циркуляционные ячейки. В промежутках между этими основными фазами реализуются переходные режимы, связанные с восходом и заходом солнца. Кроме того, в ночное время наблюдается медленный процесс накопления линзы холодного воздуха и региональный субширотный ветер, дующий с юго-запада на северо-восток [8].

Следует подчеркнуть, что этот суточный цикл может меняться в зависимости от фоновых состояний атмосферы. Например, на стадии зарождения молодого антициклона возможны эпизоды, когда подавляется местная циркуляция пришедшими воздушными потоками. Кроме того, закономерности ГДЦ сильно зависят от сезона. Так, в летнее время она более ярко выражена вследствие больших перепадов температуры: более четко прослеживаются все фазы и наблюдаются более высокие скорости воздушных потоков. Зимой горный ветер занимает большее время суток за счет укороченного светового дня и малой интенсивности солнечного излучения. В это время холодная линза медленнее рассасывается, и скорость ветра редко превышает 1...2 м/с вследствие меньшего перепада температуры между покрытыми снегом долинами и горами.

Такое качественное описание процесса, конечно, не отражает детальную картину ветрового режима. В действительности ветровое поле в нижних слоях атмосферы является очень изменчивым как в пространстве, так и во времени. Это связано с тем, что прилегающий к городу горный массив сильно изрезан ущельями, многочисленные склоны по-разному экспонируются солнцем и, к тому же, их температурный режим сильно зависит от свойств подстилающей поверхности. В результате мезоструи и

склоновые потоки, сложным образом взаимодействуя, образуют пеструю картину ветрового поля. Свой вклад в циркуляционные процессы вносит городской остров тепла, который приводит к возникновению бризовых ветров – подъему теплого воздуха над урбанизированной территорией и затеканию в город более холодного воздуха от окрестностей.

Сложный ветровой режим ставит серьезные проблемы перед исследователями при решении задач загрязнения атмосферы и выработке воздухоохраных мероприятий. Конечно, наиболее перспективным является создание математической модели динамических процессов, протекающих в воздушном бассейне города, и анализ, на ее основе, возможных вариантов решения экологических задач. Это вполне реальная задача, т.к. в мире разработаны эффективные мезометеорологические модели типа EnviroHERLAM Urbanization [10] или WRF CHEM [9]. Адаптация этих моделей к условиям атмосферы г. Алматы сложная, но решаемая задача.

Модель MoDAP. В данной работе использовалась модель MoDAP (Model of Daily Air Pollution), предназначенная для расчета переноса и рассеяния загрязняющих веществ на фоне заданного поля ветра. Модель разрабатывалась в течение ряда лет специально для условий предгорной местности г. Алматы и окрестностей. Она является одним из результатов проекта ТО-ПАЗ (Текущий Объективный Прогноз Атмосферных Загрязнений) [12] и прошла всесторонние испытания в 2001...2002 годах при выполнении проекта UAP (Urban Air Pollution) [13], осуществленного при финансовой поддержке ЕС в рамках программы TACIS (№ SCR-E/110738/C/SV/KZ). Важным элементом этого проекта явилось сопоставление результатов моделирования загрязнения атмосферы с данными измерений на маршрутах. Это сопоставление осуществлялось методом корреляционного анализа и показало хорошее согласие результатов. Для основных ингредиентов различие составляло 20...30 %: коэффициент корреляции r для CO равнялся 0,69; для NO_2 – $r = 0,88$; для твердых частиц PM – $r = 0,76$. Иллюстрацией служит корреляционная кривая для окислов азота NO_x (рис. 1).

Математическая формулировка задачи основана на уравнениях конвекции и турбулентной диффузии загрязняющих веществ [4] на фоне полей ветра, рассчитанных методом реанализа в базе ERA Interim. Поскольку эта база предоставляет пользователям метеополя в дискретные моменты времени (через каждые три часа), то указанные уравнения были преобразованы к стационарному виду и расчет для выбранного момента времени выполнялся методом выхода на стационарный режим. Кроме то-

го, используя тот факт, что инверсионный слой как «крышка» препятствует вертикальному обмену, уравнения были проинтегрированы по вертикальной координате от уровня шероховатости подстилающей поверхности z_0 до нижней границы инверсионного слоя.

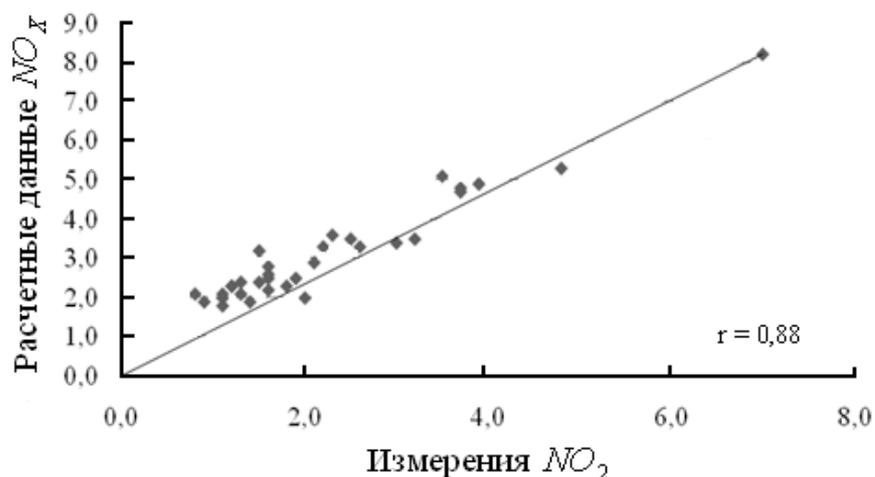


Рис. 1. Корреляционная зависимость между измерениями и расчетом концентрации окислов азота в единицах ПДК.

Математическая постановка задачи имеет следующий вид:

$$\operatorname{div}(C_i u) + \sigma_i C_i = K \cdot \Delta C_i + f_i$$

$$\sigma_i = \frac{1}{H - z_0} \frac{D_i K_{z_0} \mu_0'}{K_{z_0} \mu_0' + D_i (\mu - \mu_0)}$$

$$f_i = \frac{\alpha_i}{H - z_0} \cdot \left(1 - \frac{D_i (\mu - \mu_0)}{K_{z_0} \mu_0' + D_i (\mu - \mu_0)} \right) + Q_i$$

Замыкают задачу граничные условия

$$C_i|_{\Gamma} = 0, \quad \text{при } V_{\Gamma} < 0.$$

В задаче (1) – (2) использованы следующие основные обозначения: C_i – концентрация i -ой примеси, u – вектор скорости ветра, K – x и y компоненты тензора турбулентной диффузии, Q_i – мощность источника i -ой примеси в объеме расчетной области, H – высота базы инверсионного слоя, α_i – мощность источника i -ой примеси на поверхности, D_i – скорость сухого осаждения i -ой примеси.

Среднесуточная концентрация примеси рассчитывалась как среднее по всем расчетам за сутки, что соответствует принятым методам обработки восьмисрочных наблюдений.

Система уравнений (1) решалась численно методом Смоларкевича [11]. Входные данные в модель соответствующим образом собраны и систематизированы в виде картографической и файловой информации.

Информационное обеспечение модели. Основными массивами данных, использованных в данной работе, являются поля ветра каждой фазы ГДЦ, расположение и мощность выбросов стационарных и подвижных источников.

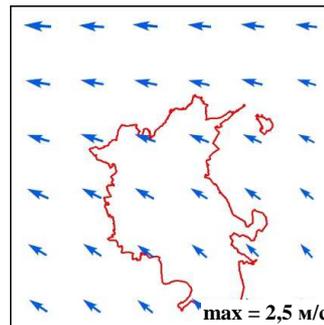
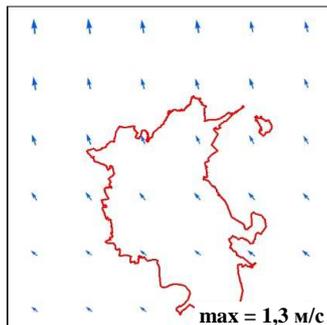
Горно-долинная циркуляция. Поля ветра были построены на основе метеорологических данных Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF), обработанные методом реанализа и загруженные в базу данных ERA Interim. Процедура реанализа предполагает совместную обработку результатов математического моделирования и данных наблюдений на сети метеостанций ВМО. В базе данных накоплены поля метеозадачных элементов через каждые три часа за последние 40 лет. Конечно, при использовании в мезометеорологических задачах эти данные не описывают детально процессы, а предоставляют интегральные характеристики. Например, рассматривается горный хребет как некий массив без ущелий и других элементов ландшафта (они не могут быть учтены на принятой вычислительной сетке), при этом горно-долинная циркуляция хорошо прослеживается в виде осредненных течений с ярко выраженным временным ходом.

В данной работе для анализа влияния ГДЦ на загрязнение воздушного бассейна города были выбраны двое характерных суток в зимнее (26 февраля 2017 г.) и летнее (26 июля 2017 г.) время. Конечно, речь не идет о детальном анализе (для этого необходима хорошая статистика мезометеорологических полей ветра, давления, температуры), а ставится задача оценки динамических процессов загрязнения воздуха в экстремальных эпизодах. На рис. 2 представлены поля ветра в виде двух колонок, левая относится к 26 февраля, правая – к 26 июля 2017 г. При этом выбраны наиболее характерные моменты времени, в которые ясно прослеживаются фазы горно-долинной циркуляции. Причем видны различия между зимними и летними циркуляционными процессами: зимой в 12:00 все еще наблюдается слабый горный ветер и только в 15:00 и 18:00 проявляется долинный ветер, летом все фазы соответствуют временам восхода и захода солнца.

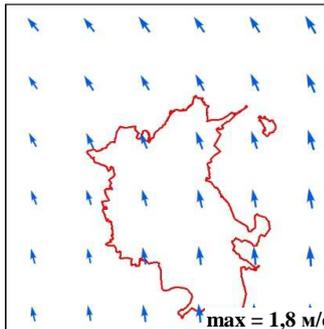
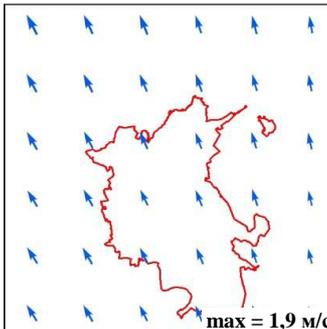
26 февраля 2017 года

26 июля 2017 года

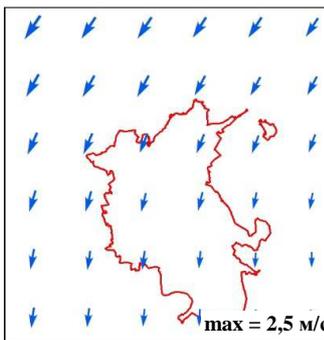
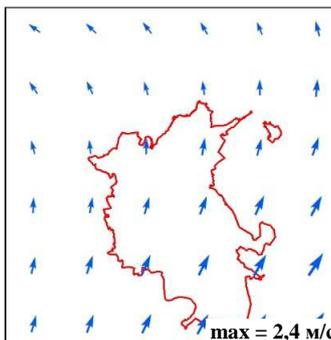
00:00



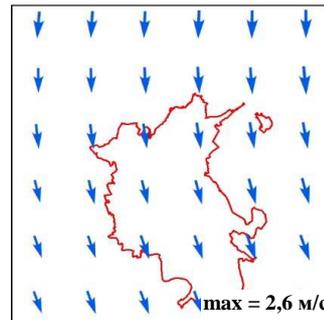
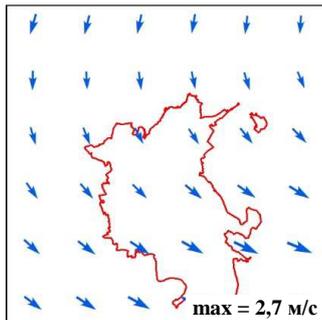
09:00



12:00



15:00



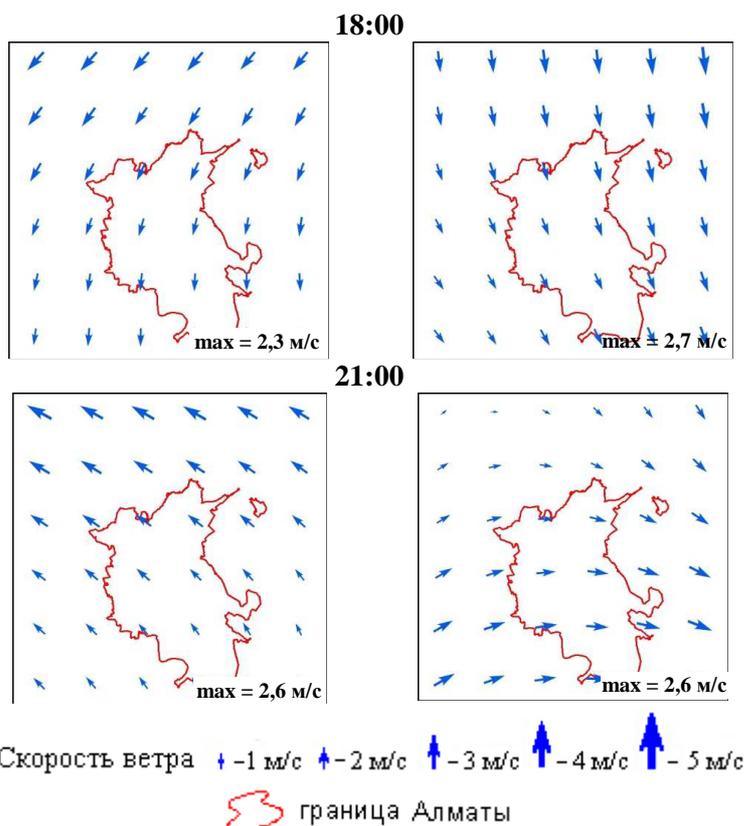


Рис. 2. Поля ветра ГДЦ в характерные моменты времени.

Источники выбросов загрязняющих веществ. Информация о выбросах загрязняющих веществ (ЗВ) от стационарных источников получена по данным бланков инвентаризации источников выбросов ЗВ из действующих на 2017 г. проектов предельно-допустимых выбросов (ПДВ). В расчет включены сведения о выбросах загрязняющих веществ от всех основных предприятий, расположенных на территории г. Алматы и в пригородной зоне. С использованием ГИС-технологий выполнена унификация расположения предприятий в единой системе координат. Всего были использованы данные по 61 предприятию с общим количеством источников – 1860. Локализация стационарных источников выбросов отражена на рис. 3.

Во многих городах мира основным виновником высокого уровня загрязнения атмосферы является автотранспорт. По разным оценкам доля примесей от автотранспорта в атмосфере Алматы достигает 70...80 %. В связи с этим, на первый план выступает задача оценки объемов выхлопных газов с детализацией по составу и токсичности. В соответствующих моделях необходимо учесть вид (грузовой, легковой), возраст, средний

пробег, городской цикл (доля периодов торможения, ускорения, холостого хода) и, конечно, трафик и другие характеристики улично-дорожной сети. В Казахстане сертифицирована методика [6], учитывающая самые важные из перечисленных параметров, но, к сожалению, эта методика фактически не используется. В официальном документе [5] прямо указано, что «объемы выбросов от автотранспорта и частных жилых домов не рассчитываются, и по ним не производится сбор статистических данных».

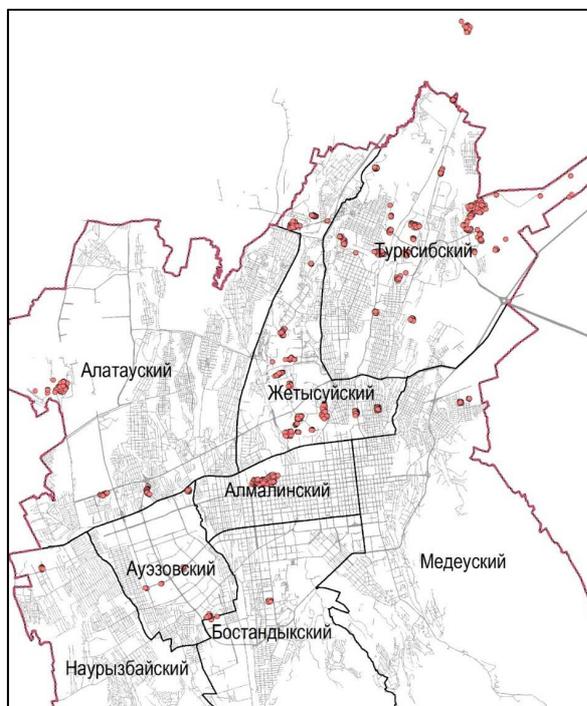


Рис. 3. Карта локализации стационарных источников выброса загрязняющих веществ.

В данной работе расчет валовых выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников выбросов был проведен по указанной методике с учетом фактической интенсивности движения автотранспорта на участках улично-дорожной сети города. При этом использовались данные, полученные с августа по октябрь 2017 г. в результате натурных исследований интенсивности транспортных потоков на основных автомагистралях города. Помимо этого, были использованы данные видеорегистрации на 76 перекрестках, полученные из УВД г. Алматы. На карте (рис. 4) красными линиями выделены улицы и перекрестки, по которым были выполнены замеры и рассчитаны выбросы автотранспорта. Эти данные, к сожалению, не охватывают всей улично-дорожной сети.

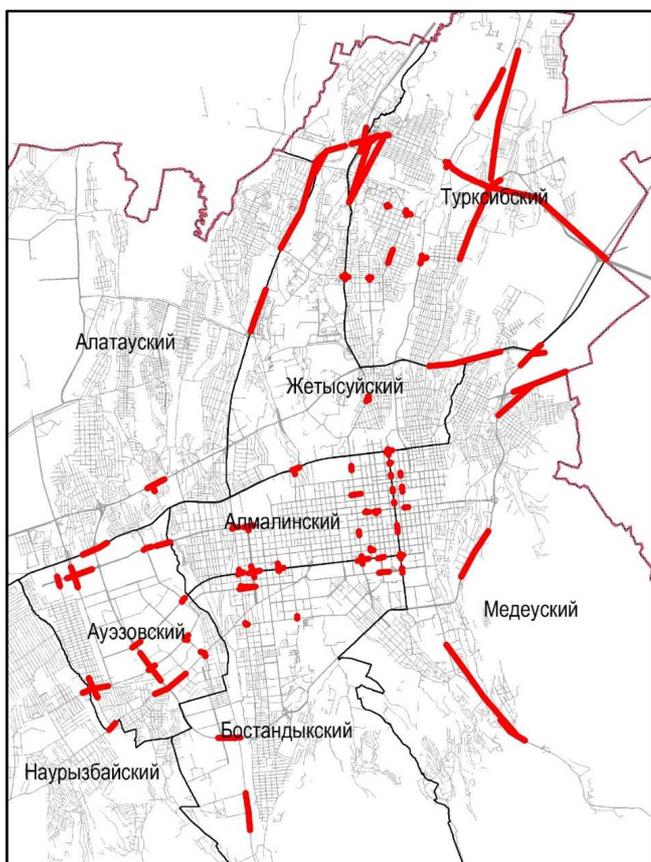


Рис. 4. Карта расположения перекрестков и магистралей, на которых проведены измерения и выполнен расчет выброса выхлопных газов.

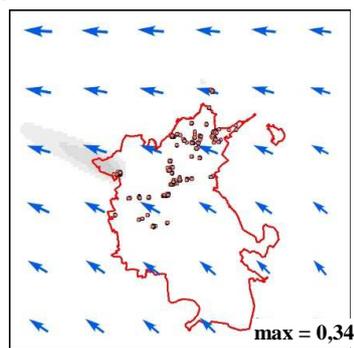
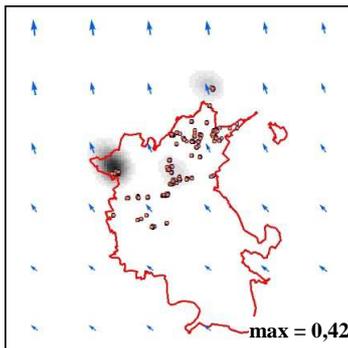
Результаты моделирования. При моделировании переноса и рассеяния загрязняющих веществ из всего списка выбрасываемых ингредиентов были выбраны приоритетные загрязнители – диоксид серы, оксид углерода, диоксид азота, оксид азота, фенол, формальдегид свинец, хром, медь, пыль неорганическая и взвешенные частицы. При этом все они учитывались при построении суммарных среднесуточных карт загрязнения атмосферы. Для иллюстрации влияния ГДЦ были выбраны только характерные для стационарных и подвижных источников ингредиенты.

Стационарные источники. Анализ влияния ГДЦ на загрязнение атмосферы стационарными источниками выполнен на примере переноса и рассеяния наиболее характерного для предприятий газа – двуокиси серы SO_2 . На рис. 5 приведены расчетные поля SO_2 , причем для наиболее наглядного сравнения рядом попарно расположены карты, относящиеся к одному и тому же моменту времени для эпизодов зимней и летней ГДЦ.

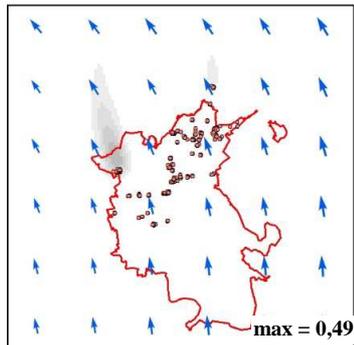
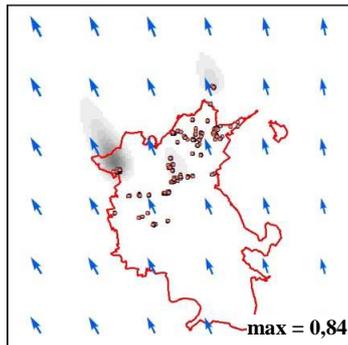
26 февраля 2017 года

26 июля 2017 года

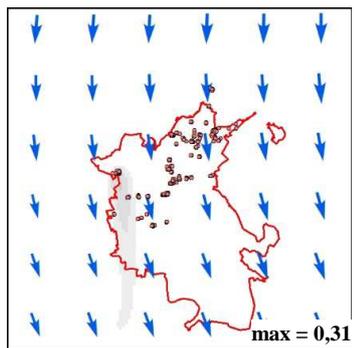
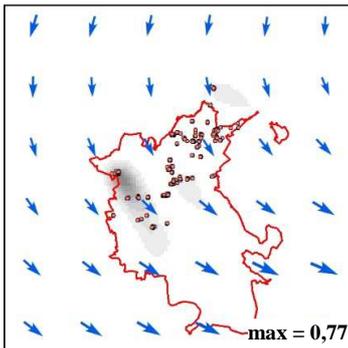
00:00



09:00



15:00



Скорость ветра ↑ -1 м/с ↑ -2 м/с ↑ -3 м/с ↑ -4 м/с ↑ -5 м/с

↻ граница Алматы

□ 0,0-0,1	□ 0,3-0,4	□ 0,6-0,7	□ 0,9-1,0	□ 1,2-1,3
□ 0,1-0,2	□ 0,4-0,5	□ 0,7-0,8	□ 1,0-1,1	□ 1,3-1,4
□ 0,2-0,3	□ 0,5-0,6	□ 0,8-0,9	□ 1,1-1,2	□ 1,4-1,5

Рис. 5. Сравнение полей загрязнения (в ед. ПДК) приземного слоя атмосферы диоксидом серы в условиях зимней (левая колонка) и летней (правая колонка) ГДЦ.

На рисунке видим:

- Перенос примеси соответствует ветровому режиму ГДЦ и проявляется в виде направленных по ветру шлейфов газа, привязанных к стационарным источникам: трубам ТЭЦ и котельных. При этом шлейфы в летний день распространяются на большее расстояние, чем в зимний.
- Наибольшие концентрации токсичных примесей сосредоточены вблизи предприятий теплоэнергетики как в зимнее, так и в летнее время года, т.к. выброс SO_2 этих предприятий намного превышает суммарный выброс других стационарных источников. Особенно ярко это проявляется в условиях полного безветрия, когда основная масса загрязняющих веществ концентрируется вокруг ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3.
- Наибольший вклад в загрязнение атмосферы вносит ТЭЦ-2, где топливом служит серосодержащий уголь, при сжигании которого образуется большое количество серного ангидрида. При этом шлейфы этого газа заносятся в густо населенные районы города, в основном, в периоды долинного ветра, когда анабатический подъем воздуха приводит к переносу загрязняющих веществ в сторону гор.
- В зимний день концентрация SO_2 в 2...3 раза выше, чем в летний и превышает ПДК вблизи источников в условиях малоподвижного воздуха. Это связано, во-первых, с отопительным сезоном, когда значительно интенсивнее работают ТЭЦ и котельные, и, во-вторых, более слабыми скоростями ветров вследствие меньшего перепада температур между горами и долинами.
- Стационарные источники не наносят серьезного ущерба качеству атмосферного воздуха. Максимальные концентрации загрязняющих веществ сосредоточены вблизи источников, в районах, где шлейфы из труб достигают земной поверхности, при этом только уровень SO_2 и NO_2 может достичь и превысить ПДК. Для других примесей даже зимой максимальная концентрация значительно ниже ПДК (рис. 6).

В целом, промышленность оказывает значительное влияние на качество воздуха только в северной части города в условиях слабых ветров, где суммарная концентрация:

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}$$

может превысить ПДК в три раза (рис. 7). Суммирование произведено по всем вышеперечисленным приоритетным ингредиентам.

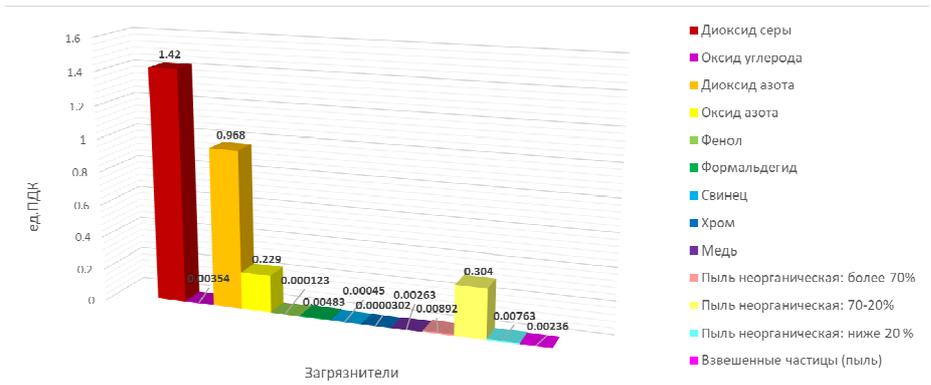


Рис. 6. Гистограмма максимальных значений концентрации различных примесей в условиях зимней ГДЦ.

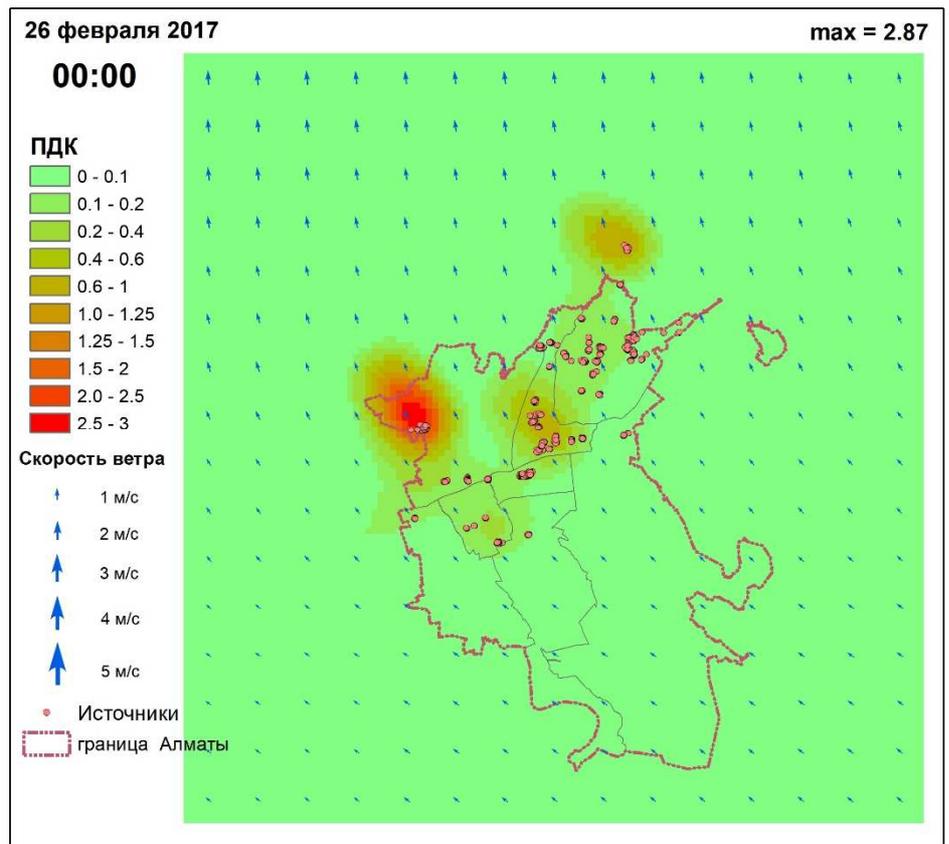


Рис. 7. Карта суммарной концентрации загрязняющих веществ, выбрасываемых предприятиями г. Алматы в штилевых условиях.

В заключение данного раздела отметим, что основным источником погрешности расчетов является погрешность в задании мощности выбросов. К сожалению, состав и объем загрязняющих веществ рассчитывают

сами предприятия – виновники выбросов. Системы независимого контроля предоставляемых данных в нашей стране не реализованы.

Подвижные источники (автотранспорт). Результаты расчетов в данной работе опираются на данные по выхлопным газам, которые, как указано выше, не охватывают всю улично-дорожную сеть города. Но даже эти неполные расчеты свидетельствуют об очень серьезной ситуации по загрязнению атмосферы города выхлопными газами. Практически по всем основным ингредиентам, входящим в состав выхлопных газов (по окислам азота, оксиду углерода, формальдегиду, свинцу и предельным углеводородам) концентрации превышают максимально разовые ПДК. Особенно высокий уровень загрязнения получен для оксида углерода, диоксида азота и предельных углеводородов (рис. 8, 9).

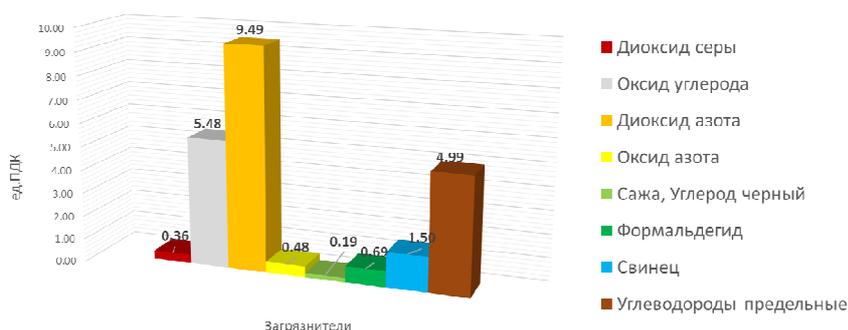


Рис. 8. Максимальные концентрации выхлопных газов 26.07.17.

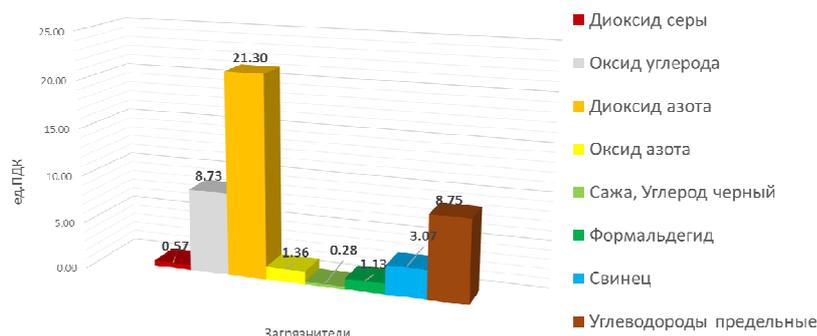


Рис. 9. Максимальные концентрации выхлопных газов 26.02.17.

Как видно на диаграмме наиболее опасным является диоксид азота NO_2 – бывают периоды, когда его концентрация вблизи магистралей превышает ПДК в 10 раз для летних условий и в 20 раз для зимних условий. Конечно, эти результаты необходимо тщательно проверить, проведя сравнительный анализ с натурными наблюдениями на маршрутных постах в точках максимального трафика автотранспорта.

Анализ расчетных карт показал, что

- Загрязнение приземного слоя напрямую связано с выбросами выхлопных газов. Неполный охват улично-дорожной сети при расчете выбросов приводит к неоднородной картине загрязнения урбанизированной территории (рис. 10).
- Перенос примесей происходит по направлению движения воздушных масс. Как видим на рис. 10 в вечернее время (21:00) летом и зимой шлейфы выноса примесей направлены в разные стороны, что связано с различием между ветровыми режимами ГДЦ: зимой в это время уже сформировался ветер с гор, а летом идет только зарождение горного ветра.
- Внутри большой территории с множеством источников горизонтальный воздушный перенос не приводит к очистке воздуха: слабый ветер сколько уносит, столько и приносит загрязняющих веществ. Это основная причина высокого уровня загрязнения: есть источник – нет стока. Конечно, на границе города идет вынос примесей, но основное влияние ГДЦ проявляется в ночное времена, когда ветер с гор и сильно уменьшенный трафик способствуют очистке воздушного бассейна города.

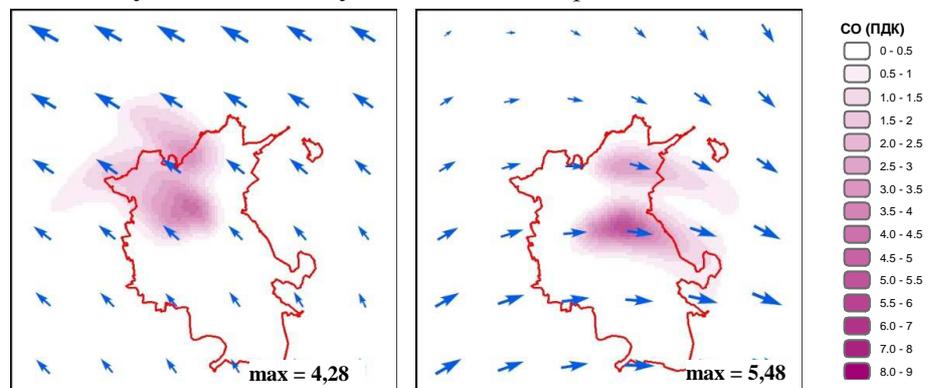


Рис. 10. Сравнение полей загрязнения окисью углерода CO в зимний (26.02.17, 21:00) и летний (26.07.17, 21:00) день и час.

Заключение. В данной работе выявлены общие закономерности ГДЦ и ее влияния на качество атмосферного воздуха. Расчетным путем определены различия между летними и зимними режимами ГДЦ, построены карты загрязнения воздуха приоритетными ингредиентами для стационарных и подвижных источников, выполнен анализ динамики процессов переноса в различных фазах ГДЦ. При формировании информационного обеспечения модели был собран и обработан большой массив данных по источникам выбросов загрязняющих веществ. Авторы выражают

благодарность специалистам ТОО «ЭКОСЕРВИС-С» Тазабекову А.Ж. и Салагаевой В.А., участвовавших в обработке этой информации.

Данная работа является первым шагом на пути создания уникальной мезомасштабной модели. Модель учитывает формирование местных ветров (мезоструй из ущелий, склоновых потоков, городского острова тепла), городскую застройку, сухое и влажное осаждение, химические реакции в атмосфере, в результате которых выбрасываемые газы превращаются в гораздо более токсичные вещества и окислители типа озона. При этом наиболее эффективное направление – это адаптация к местным условиям наиболее подходящей модели, например, американского вычислительного комплекса WRF CHEM или европейской разработки EnviroHERLAM urbanization. Эти модели находятся в свободном доступе и постоянно совершенствуются большими коллективами высококвалифицированных специалистов. Модели имеют статус исследовательских проектов, и их разработчики могут предоставлять консультативную помощь на каждом шаге трудного пути приспособления моделей к исключительно сложным условиям города Алматы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белявская В.Д., Пекур М.С., Петенко И.В., Шурыгин Е.А. Исследование АПС над Алма-Атой методом акустического зондирования. / Исследование загрязнения атмосферы города Алма-Аты. – Ч. 1. Эксперимент АН-ЗАГ-87. – Алма-Ата: Гылым, 1990. – С. 19-22
2. Гельмгольц Н.Ф. Горно-долинная циркуляция северных склонов Тянь-Шаня. – Л.: Гидрометеиздат, 1963 – 330 с.
3. Климат Алма-Аты / Под ред. Ахметжанова Х.А., Швер И.А. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 266 с.
4. Марчук Г.И. Математические модели в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 319 с.
5. Программа Алматы-2020 [Электрон. ресурс]. – URL: https://almaty.gov.kz/page.php?page_id=3239&lang=1 (дата обращения 23.07.2018)
6. РНД 211.2.02.11-2004 Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов. – Астана: Министерство охраны окружающей среды Республики Казахстан. – 2004. – 21 с.
7. Установление целевых показателей окружающей среды для г. Алматы. – Отчет, часть 2 [Электрон. ресурс]. – URL: http://ecoservice.kz/index.php?route=information/news&news_id=101 (дата обращения 23.07.2018)

8. Черноножкина В.В. Анализ природно-климатических особенностей местности, способствующих загрязнению воздушного бассейна г. Алматы // Международный научно-исследовательский журнал – 2013. – №1(8) Часть 1 – С. 73-74. [Электрон. ресурс]. – URL: <https://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/8-1-1.pdf> (дата обращения 23.07.2018).
9. Fast J.D., Gustafson Jr. W.I., Easter R.C., Zaveri R.A., Barnard J.C., Chapman E.G., and Grell G.A., Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct forcing in an urban area using a new fully-coupled meteorology, chemistry, and aerosol model // J. Geophys. Res. – 2006. 111, D21305, doi:10.1029/2005JD006721.
10. Gonzalez-Aparicio I., J. Hidalgo, A. Baklanov, U. Korsholm, R. Nuterman, A. Mahura, O. Santa-Coloma (2013): Urban Boundary Layer Analysis in the Complex Coastal Terrain of Bilbao using Enviro-HIRLAM. // Theoretical and Applied Climatology. – Vol. 113, Iss 3-4, P. 511-527; DOI: 10.1007/s00704-012-0808-6
11. Smolarkiewicz P.K., Grabowski W.W. The Multidimensional Positive Advection Transport Algorithm: Nonoscillatory Option // J. Comput. Phys. – 1990. – 86, № 2.
12. Zakarin E. Modeling and Monitoring of Urban Atmosphere Pollution in a composition of GIS // Journal of Computational Technologies. – 2002. – vol. 7, special issue. – P. 48-56.
13. Zakarin E.A., Mirkarimova B.M. Air pollution modeling for Almaty city / In «UAP: Urban Air Pollution (SCR-E/110738/C/SV/KZ)». – Netherlands, DHV Consultants. – 2002. – Final Report, Annex VI. – 27 p.

Поступила 23.07.2018

Техн. ғылымд. докторы	Э.А. Закарин
Техн. ғылымд. канд.	Т.В. Дедова
Техн. ғылымд. докторы	Б.М. Миркаримова
Мед. ғылымд. докторы	Н.А. Яковлева
	Е.К. Садвакасов

АЛМАТЫ ҚАЛАСЫНЫҢ АТМОСФЕРАЛЫҚ АУАСЫНЫҢ ЛАСТАНУЫНА ТАУ-АҢҒАР АЙНАЛЫМЫНЫҢ ӘСЕРІН САНДЫҚ ТАЛДАУ

Түйінді сөздер: тау-аңғар айналымы, атмосфераның ластануы, математикалық модель, шығарындылар, стационарлық және жылжымалы көздер

MoDAP моделі бойынша сандық есептеулер негізінде жазға және қысқа тән атмосфераның тұрақты жағдайындағы күндерде

тау-аңғар айналымының әр түрлі фазаларын жүзеге асыру кезінде атмосфераның ластану өрістерін талдау іске асырылды. Есептеу кезінде стационарлық және жылжымалы (автокөлік) көздердің шығарындылары бойынша деректер пайдаланылды.

Zakarin E., Dedova T., Mirkarimova B., Yakovleva N., Sadvakassov Ye.

NUMERICAL SIMULATIONS OF THE IMPACT OF MOUNTAIN-VALLEY WIND CIRCULATION ON THE ALMATY CITY ATMOSPHERIC POLLUTION

Keywords: mountain-valley wind circulation, atmospheric pollution, mathematical model, emissions, stationary and mobile sources

The impact of mountain-valley wind circulation (MVC) on the atmospheric pollution was analyzed using MoDAP model. Pollution fields realized on various phases of MVC for the two characteristic summer and winter low-winded days were considered. Atmospheric pollution of Almaty city has been studied taking into account the emissions of stationary (industrial) and mobile (vehicle) sources.