

**Научно-техническая конференция к 40-летию ГУ СибНИГМИ  
Новосибирск, 19-20 апреля 2011 г.**

# **Численное моделирование циркуляции воздуха и перенос формальдегида в г. Томске**

*Шлычков В.А., Селегей Т.С., Мальбахов В.М., Леженин А.А.*

**Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,  
г. Новосибирск**

**Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
г.Новосибирск**

В атмосферном воздухе практически всех российских городов отмечается превышение (по уровню ПДК) среднегодовых концентраций формальдегида, причем в Сибири концентрация почти в 2 раза выше, чем в целом по стране.

Формальдегид - газообразное вещество 2-го класса опасности, обладает канцерогенным действием и негативно влияет на центральную нервную систему человека.

Преобладающими источниками поступления формальдегида в атмосферу - предприятия нефтехимии, деревообработки, производства пластмасс, котельные, автотранспорт.

Вторичными источниками являются различные углеводороды (метан, этилен, и др.), которые в результате фотохимических реакций преобразуются в формальдегид.

Значения средних (за период 2000-2004 гг) и максимальных концентраций формальдегида в городах Сибири (в долях соответственно ПДКсс и ПДКмр)

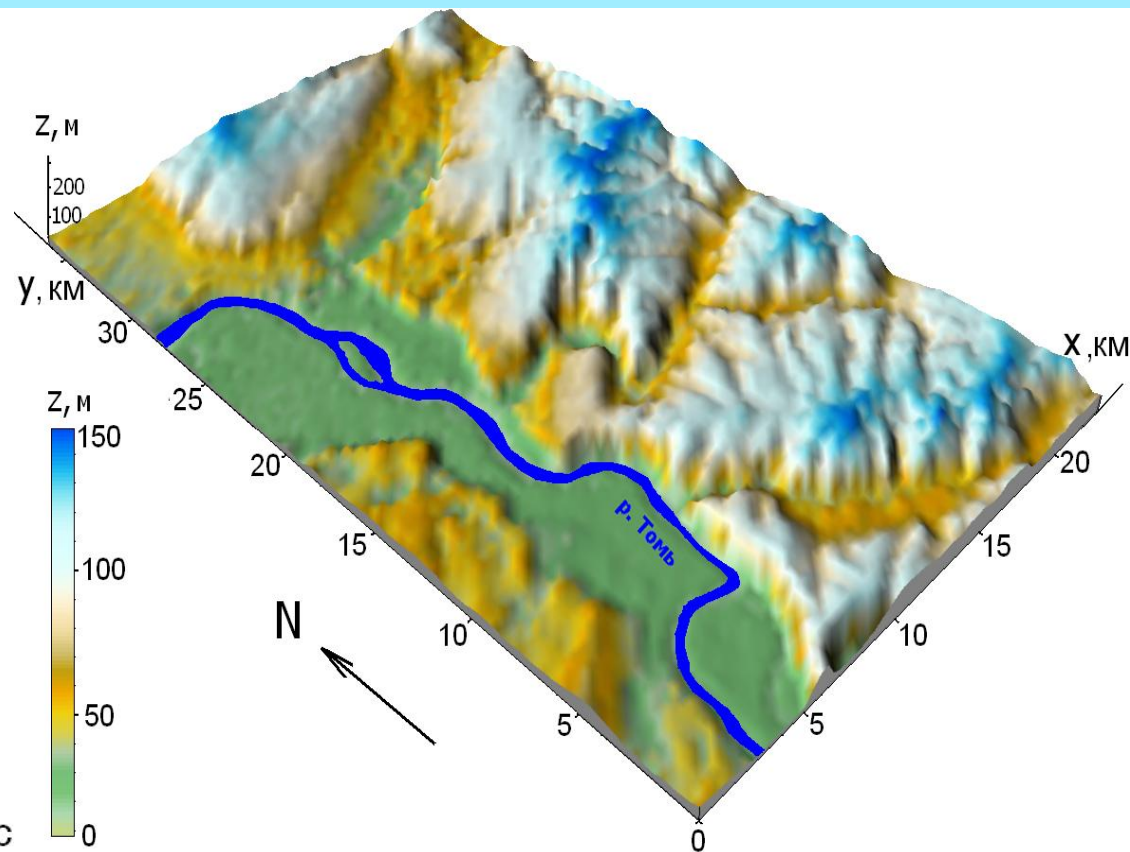
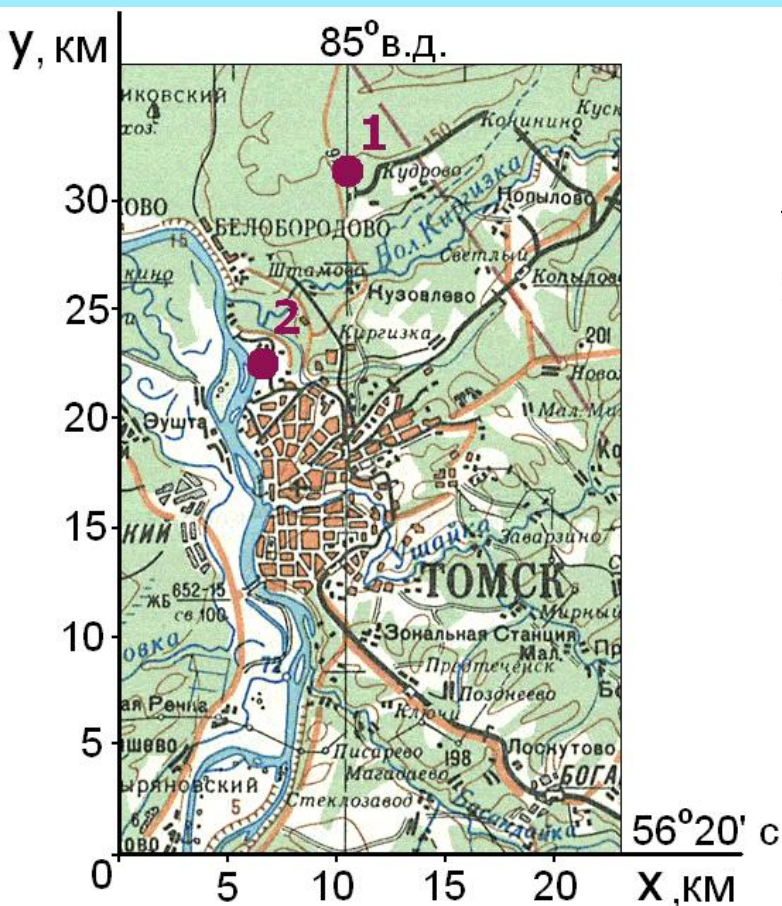
№ п/п	Город	Концентрация формальдегида		№ п/п	Город	Концентрация формальдегида	
		средн.	макс			средн.	макс
1	Абакан	0,9	0,5	19	Новокузнецк	4,7	8,9
2	Ангарск	2,2	2,1	20	Новосибирск	2,7	3,9
3	Барнаул	3,9	13,7	21	Норильск	8,8	11,2
4	Белоярский	12,0	4,7	22	Омск	4,0	5,1
5	Березово	6,2	4,2	23	Радужный	8,8	4,6
6	Бийск	3,8	4,6	24	Саяногорск	0,8	0,5
7	Братск	5,9	6,4	25	Саянск	1,2	1,1
8	Зыря	1,8	1,9	26	Селенгинск	2,7	0,7
9	Иркутск	4,0	4,9	27	Сургут	2,8	1,3
10	Кемерово	2,9	5,8	28	Тобольск	1,8	1,1
11	Красноярск	2,2	10,4	29	Томск	5,4	8,6
12	Кызыл	1,4	0,5	30	Улан-Удэ	1,8	2,7
13	Куйбышев	2,2	0,9	31	Усолжье-Сибирское	1,8	3,1
14	Лесосибирск	1,3	0,7	32	Ханты-Мансийск	3,8	8,6
15	Минусинск	0,9	0,4	33	Чита	3,3	5,5
16	Назарово	2,8	2,5	34	Шелехов	3,2	3,7
17	Нефтегоганск	3,1	0,9	35	Тюмень	3,1	6,1
18	Нижневартовск	5,0	4,4				

Анализ данных наблюдений в отдельных точках города не дает полной информации о характере распределения формальдегида по территории. Обычно применяемая для целей нормирования выбросов модель ОНД-86 [Методика..., 1987], заметно искажает средние концентрации по отношению к фактически наблюдаемым, а вопрос ее применимости к орографически неоднородной местности (в частности, для г. Томска) остается открытым.

Цель данной работы заключается в реконструкции полей концентрации формальдегида в г. Томске на основе численной модели с использованием данных наблюдений при различных метеорологических ситуациях. Это требует решения следующих задач:

- создание базы данных по источникам валовых выбросов в городе с учетом химических превращений углеводородных и органических соединений в формальдегид;
- идентификация параметров численной модели переноса примеси для обеспечения адекватности расчетных и фактически наблюдаемых концентраций;
- детализация ветрового режима над городом с учетом орографической неоднородности территории;
- построение среднегодовых полей экстремальных концентраций путем осреднения по румбам розы ветров;
- построение модели локального прогноза формальдегидного загрязнения атмосферы в г. Томске на основе статистических и гидродинамических методов.

# Физико-географические характеристики территории.



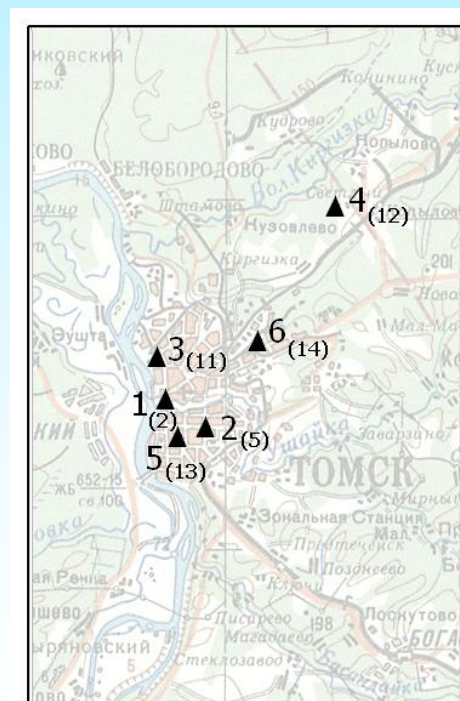
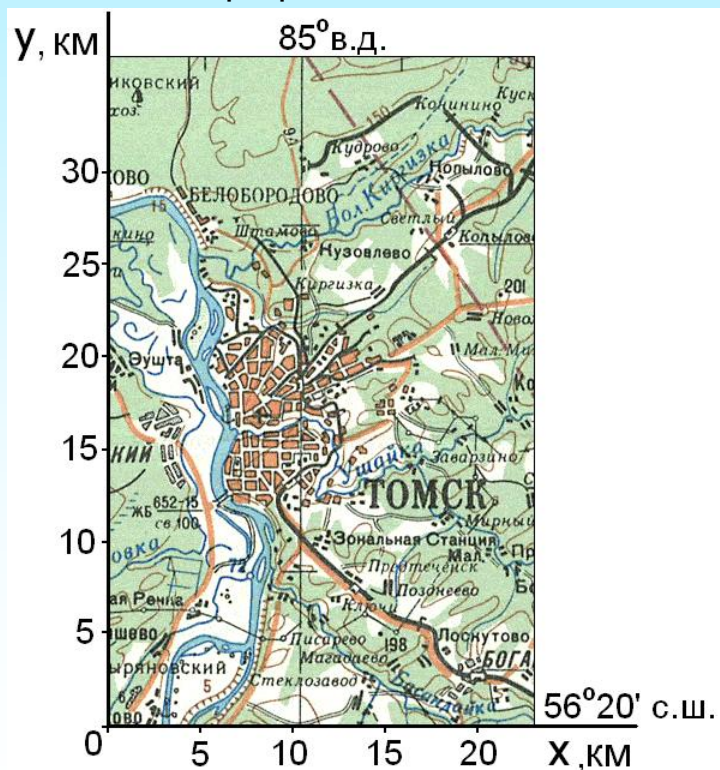
В окрестности города находятся 2 основных источника нефтехимический комбинат (1) и шпало-пропиточный завод (2) с консолидированной интенсивностью выбросов формальдегида ~46 г/с.

Правый берег р. Томь, на котором расположен город, имеет сложную орографическую структуру - долины речных притоков формируют пересеченный рельеф с перепадами высот 100-150 м.



В г. Томке имеется 6 стационарных постов наблюдений Росгидромета, на которых проводится контроль за содержанием формальдегида. Для анализа закономерностей формирования концентраций обработаны ряды наблюдений по постам за период 2003-2007 гг. Данные разбиты на 3 группы: а) благополучное экологическое состояние воздуха; б) повышенная концентрация формальдегида, когда регистрировалось превышение значений ПДК; в) экстремальные ситуации, когда не менее чем на 3 постах фиксировалось 10-кратное превышение ПДК.

Географическое положение г. Томска и посты наблюдений



Диагноз экстремальных ситуаций представляет наибольший практический интерес. Табл. 1 показывает, что сверхкритические концентрации в Томске формируются сравнительно редко - за 5-летний период наблюдений обнаружено 168 дней, так что повторяемость  $p$  (вероятность события) составила около 0.09. Наибольшее число случаев пришлось на летние месяцы.

Табл.1. Число дней с экстремальными концентрациями формальдегида

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Итого
2003	2	1			1	4	5	3	5			1	22
2004					4	4	9	8	7	1		1	34
2005					1	12	8	4	1			1	27
2006				8	3	2	2		5		2		22
2007					2	5	15	17	14	5	2	3	63
Итого	2	1		8	11	27	39	32	32	6	4	6	168

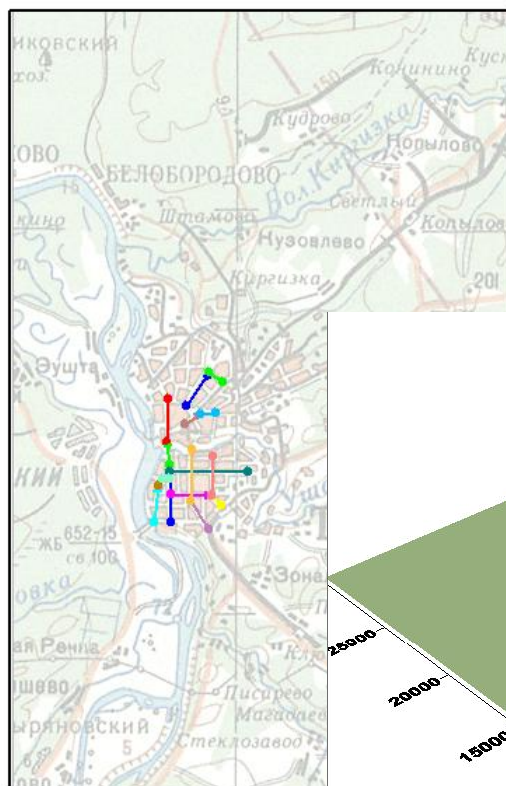
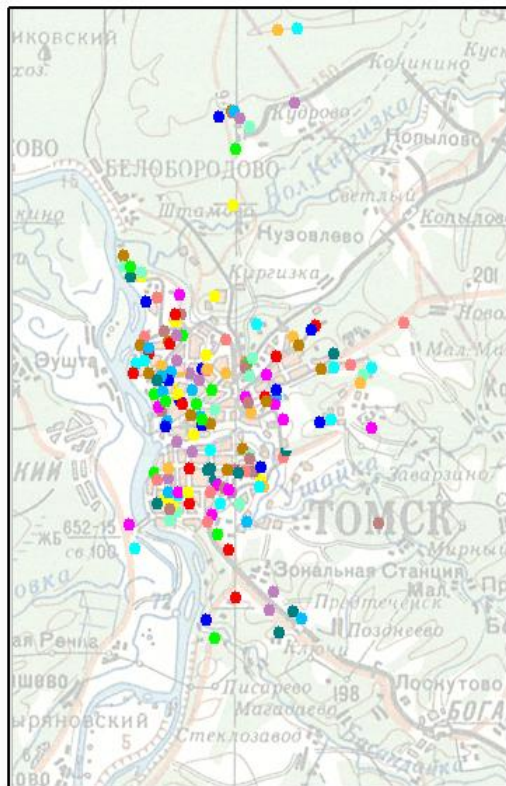
Градация дней с высоким загрязнением по направлениям высотного ветра показала (табл.2), что максимум случаев соответствует господствующим ветрам юго-западного сектора. Во всех случаях сила ветра не превышала 1 м/с.

Табл.2. Зависимость числа экстремальных случаев от направления ветра

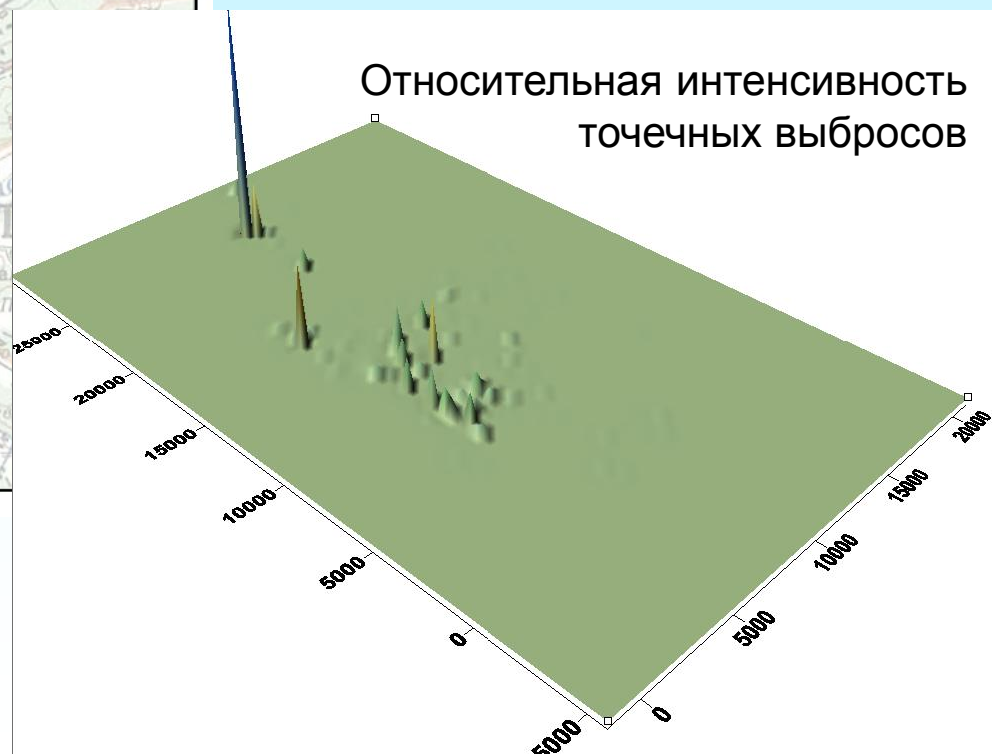
Направление ветра	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Итого
Число дней	10	9	7	7	23	39	20	23	138
Вероятность	0.005	0.005	0.004	0.004	0.012	0.021	0.01	0.012	0.075



Инвентаризация возможных источников эмиссии показала, что в городе имеется 65 предприятий с прямым выбросом формальдегида, около 100 предприятий с выбросами углеводородов. Кроме этого, учтены 40 участков магистральных дорог и перекрестков. Атрибуты источников (координаты, мощность, высота выброса) записаны в базу данных.



Расположение точечных и линейных источников эмиссии.



Для восстановления поля концентрации по территории использовалась 3D-модель переноса и диффузии вида

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial c}{\partial z} + J$$

В модели есть ряд свободных параметров. Вариации любого из этих параметров так или иначе влияют на перераспределение концентрации в пространстве. Например, при увеличении скорости адвекции факел от отдельного источника становится узконаправленным, а концентрация в нем уменьшается. При увеличении коэффициентов диффузии доминируют эффекты рассеяния и ширина факела, напротив, возрастает, каким-то образом будут меняться и расчетные значения  $C$  в точках наблюдения.

Это обстоятельство дает возможность целенаправленно подобрать параметры модели так, чтобы максимально приблизить расчетные концентрации к наблюдаемым и, тем самым, провести калибровку модели. В качестве варьируемых величин использовалось 2 параметра: модуль скорости ветра из диапазона 0.1 - 1 м/с и коэффициенты диффузии.

Смысл параметров  $K_x$ ,  $K_y$  в данном контексте отличается от традиционно принятого -- они отражают не меру турбулизации воздушной среды, а степень неопределенности и стохастичности направлений ветра в диапазоне штилевых значений.

Предполагалось, что развитие экстремальных ситуаций может быть связано с направлением атмосферного переноса. Поэтому данные табл.1 были разбиты по 8 секторам круга ветров и расчеты выполнялись в соответствии с градацией данных по направлениям. При проведении оптимизации формировался функционал ошибок

$$\Phi = \sum_{n=1}^6 |c_n^{fact} - c_n^{calc}| \quad \Phi \rightarrow min$$

$c_n^{fact}$  - фактическая концентрация на постах, осредненная по всем реализациям на данном направлении,  
 $c_n^{calc}$  - расчетные значения  $c$ , спроецированные из сеточных узлов в точки местоположения постов

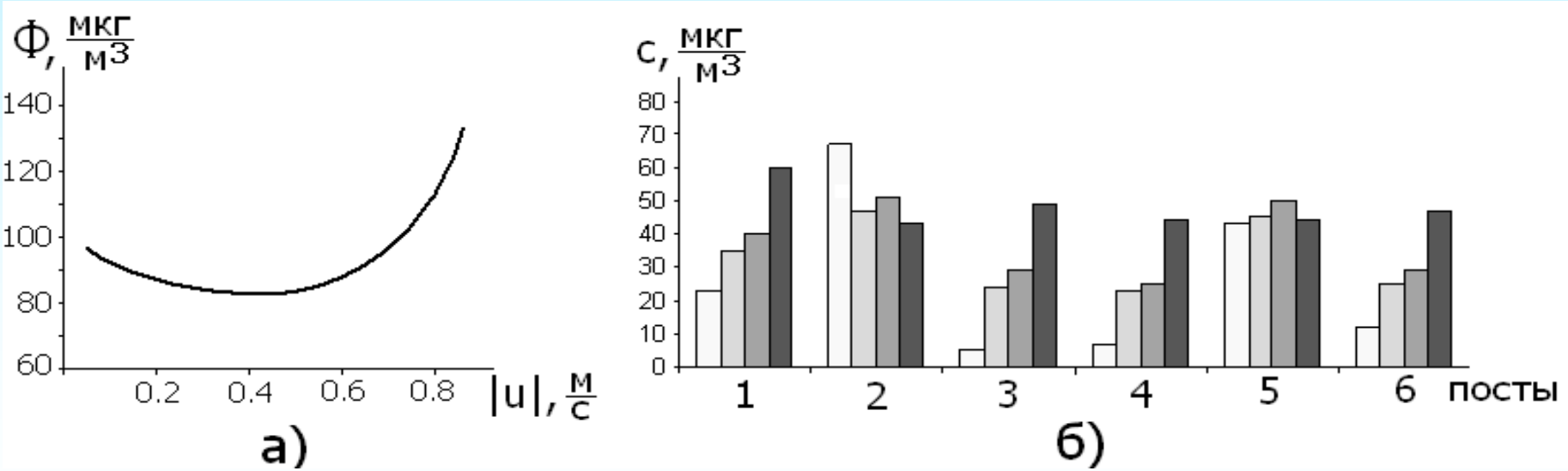
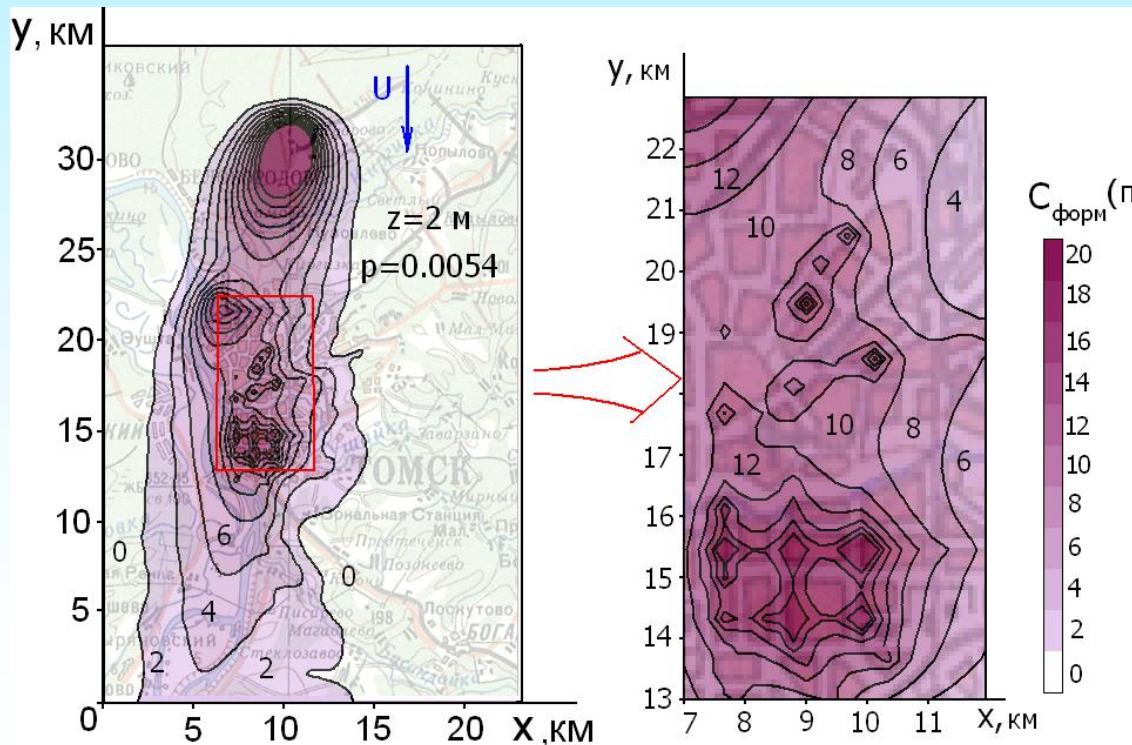


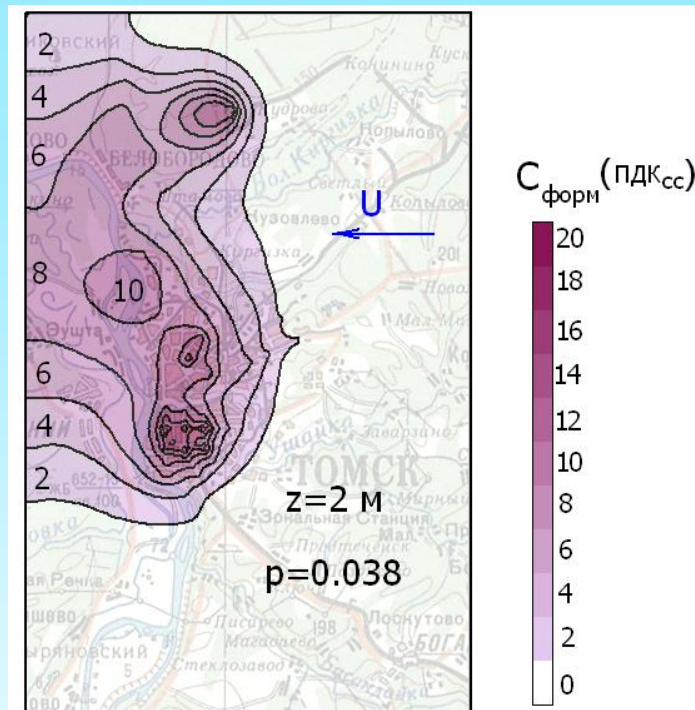
Рис.2. а) изменение функционала ошибок  $\Phi$  при вариациях скорости;  
 б) расчетные концентрации на постах в последовательности оптимизирующих экспериментов при юго-западном ветре.

Настроенная модель позволяет рассчитать среднее по реализациям распределение концентрации формальдегида по территории города и окрестностей. При северных ветрах получится картина, представленная на рисунке. Изолинии показывают поле средних экстремальных концентраций в терминах ПДК. Это не среднегодовые значения концентрации (они значительно меньше), а характерное распределение нагрузки в экстремальных ситуациях. Реализация таких событий возможна при слабых северных ветрах, а вероятность реализации равна 0.054. Справа показана городская врезка большего масштаба, соответствующая выделенному прямоугольнику на основном поле. На фрагменте можно видеть внутриквартальное распределение примеси по городу. Важно, что построенное поле согласовано с данными наблюдений, т.е. в узлах местоположения постов наблюдения расчетные значения концентрации совпадают или близки к фактическим.



Распределение средних концентраций (в терминах ПДКсс) формальдегида на уровне  $z=2$  м при ветрах северного сектора. Фрагмент справа детализирует картину в городских кварталах.





Диагноз концентраций для восточных направлений ветра

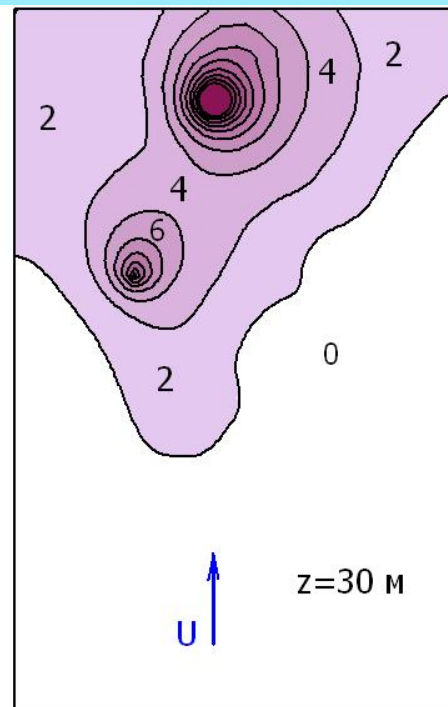
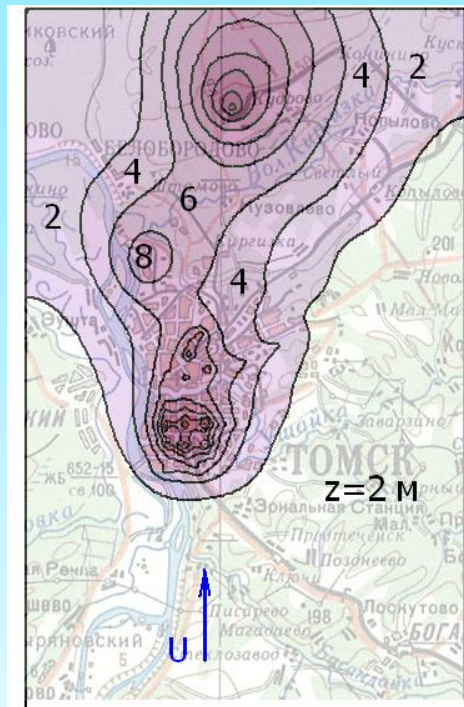
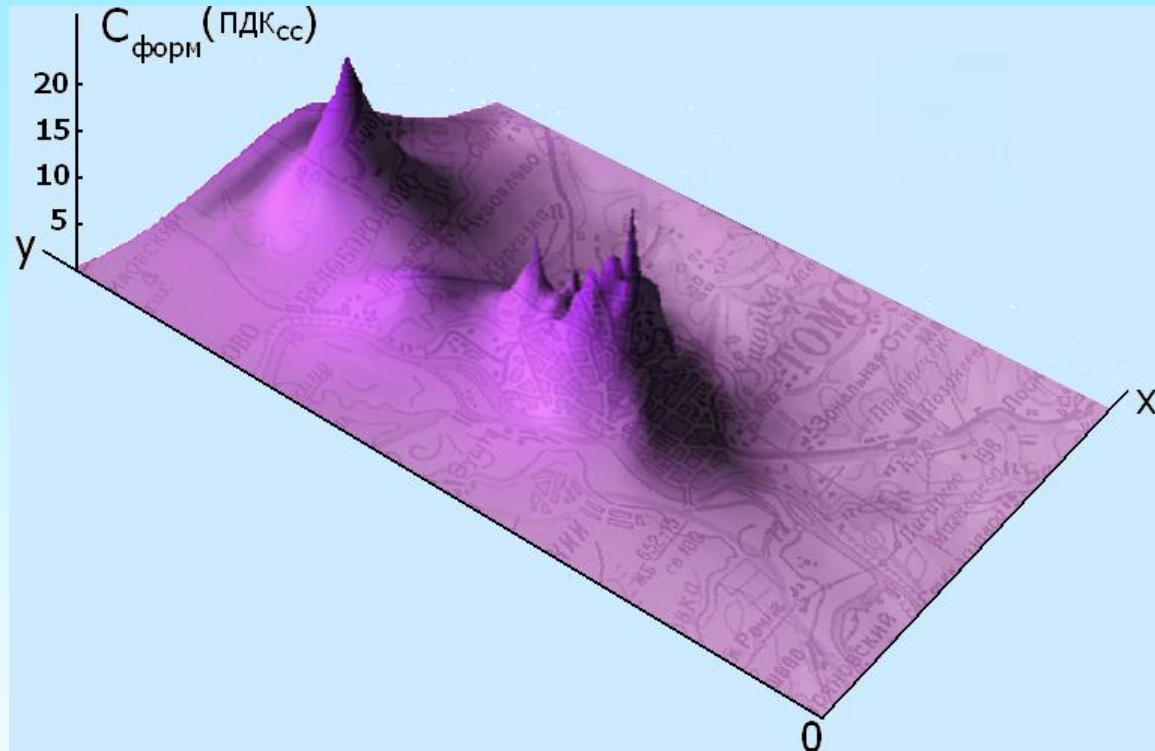
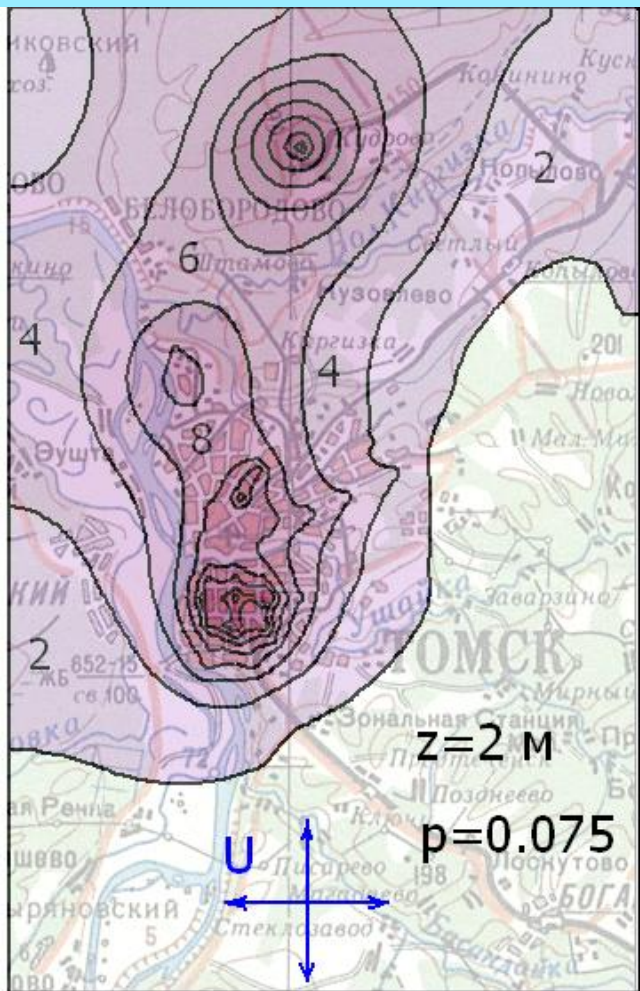


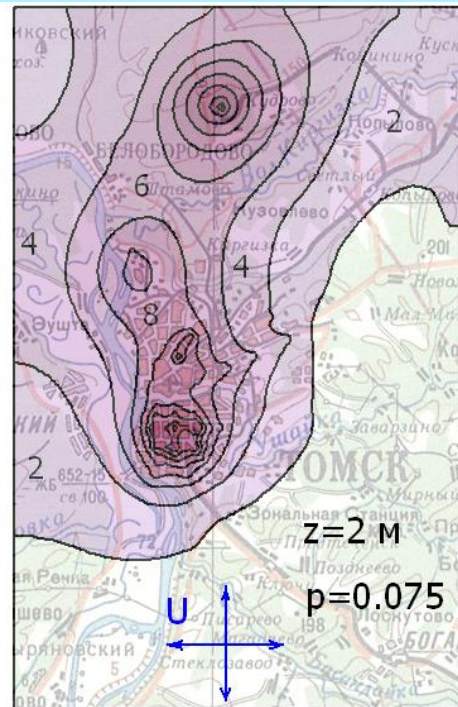
Рисунок иллюстрирует концентрацию при южных ветрах на уровнях 2 и 27 м (высота 9-го этажа жилого дома). Видим, что основная масса примеси в городе сосредоточена в нижних слоях, концентрация вверху сравнительно невелика, что, очевидно, связано с приземным характером выбросов.



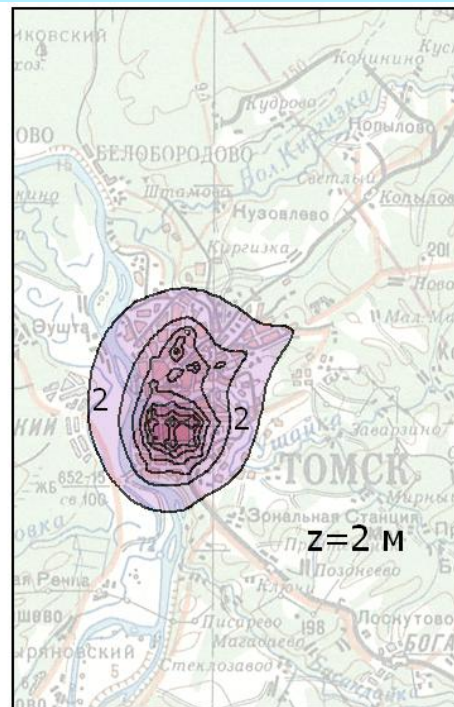
Осредненная по направлениям среднегодовая концентрация



Влияние автотранспорта на концентрацию формальдегида в городе довольно велико и играет ведущую роль. По разным оценкам оно составляет 50-77 %. Применяемые подходы позволяют более обоснованно оценить вклад этого фактора в общий бюджет формальдегидного загрязнения. С этой целью проведен сценарный цикл расчетов, в которых были учтены только выбросы автотранспорта, а остальные источники (предприятия) отключались. С помощью калиброванной модели получены аналоги вышеописанных результатов; на рисунке справа представлена средняя картина концентрации, обусловленная выбросами автотранспорта.



Осредненная по направлениям среднегодовая концентрация

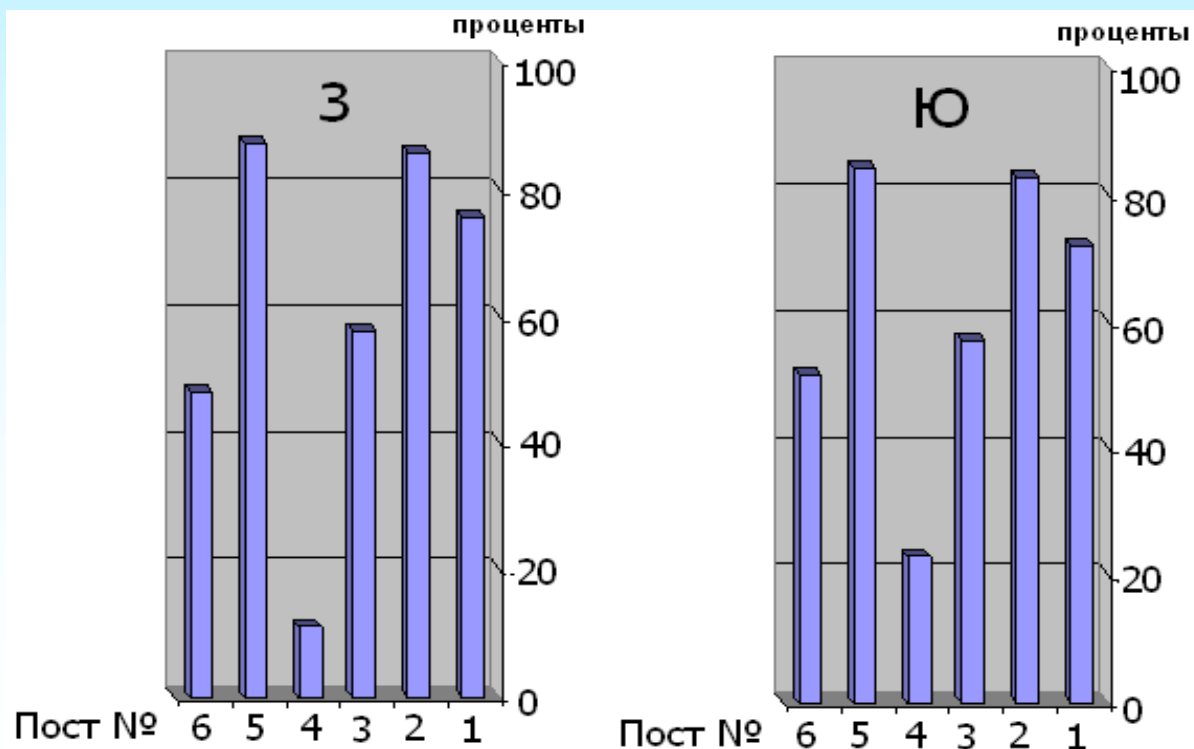


Поле концентрации, обусловленная выбросами автотранспорта

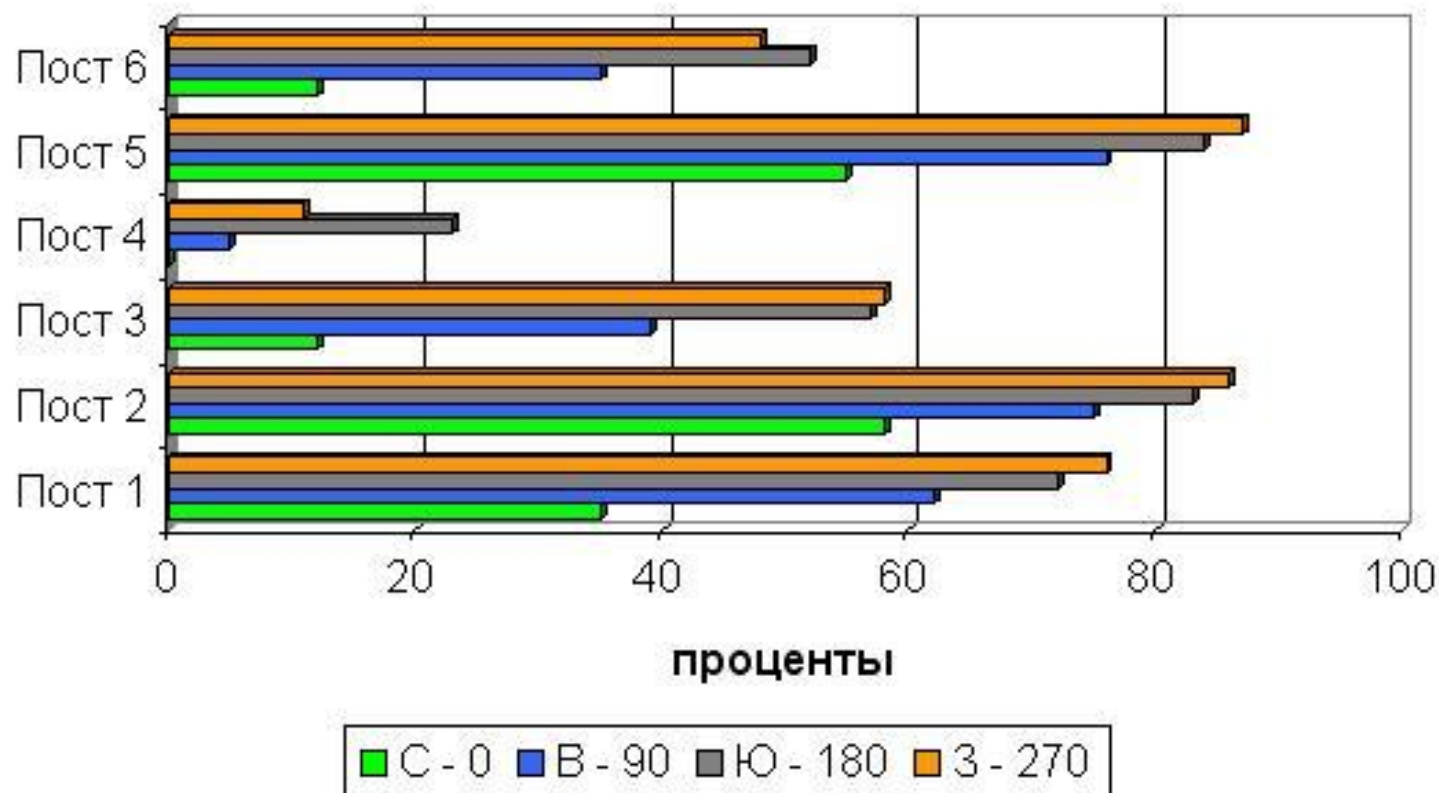
Влияние сгоревшего автомобильного топлива ограничено чертой города, причем в центральной части концентрация достигает значений 10-12 ПДК и оказывается сопоставимой с общим фоном экстремальных ситуаций.

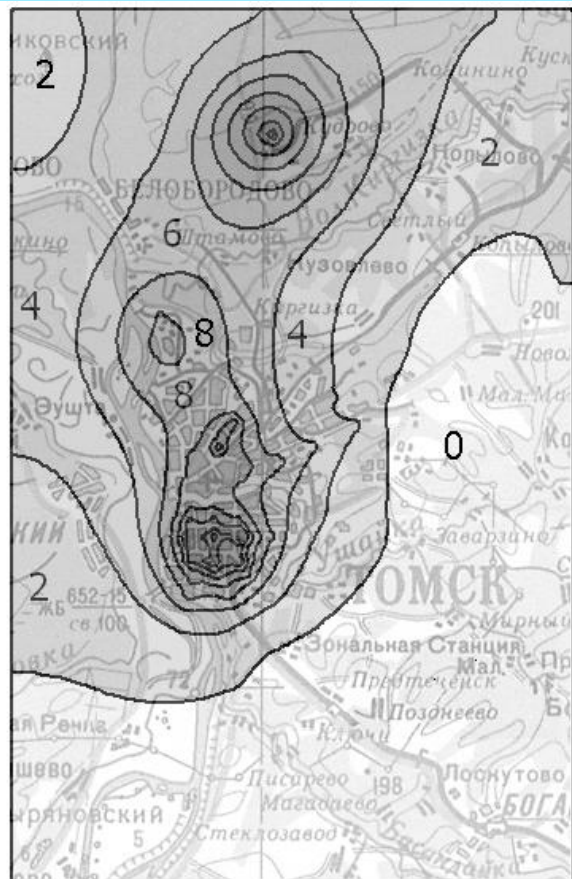
Относительный вклад автотранспорта на постах наблюдения показывают диаграммы на рисунке, построенные как пример для западного и южного направлений ветра. Согласно рисунку, величину вклада можно оценить в 50-80 % по отношению к суммарной концентрации от всех источников (пост №4 расположен вне города и здесь парциальная часть невелика). Эта цифра соответствует данным других авторов.

Заметим, что изложенным способом можно определить роль любого источника (или группы источников) в общем загрязнении воздуха. Для этого необходимо провести перерасчет задачи по заданной совокупности источников. Полученная информация позволит разработать систему профилактических мероприятий, способствующих повышению качества городской атмосферы.



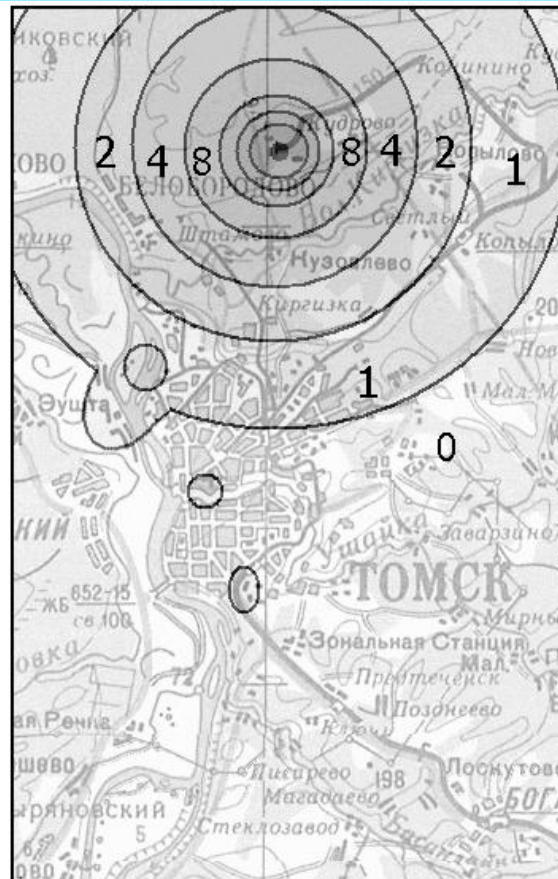
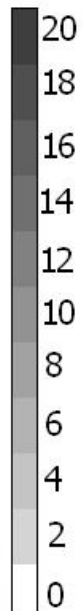
## Вклад автотранспорта в зависимости от направления ветра





а)

$\bar{C}$



б)

а) расчетное поле среднегодовой концентрации формальдегида (в единицах ПДКсс) на уровне  $Z=2$  м ;

б) поле концентрации, полученное по модели ОНД-86.



Ввод исходных данных

день 25

Дата расчета:

месяц июль

год 2006

Температура 21 град. Цельс

Отн. влажность 74 %

Давление 1040 гПа

Ветер сила 1,5 м/с

направл. север

Синопт западная часть анти

Сохранить ввод

Рассчитать прогноз

Результаты прогноза

Маркеры изолиний (мкг/м<sup>3</sup>)

Выход



Ввод исходных данных

день 25

Дата расчета:

месяц июль

год 2006

Температура 21 град. Цельс

Отн. влажность 74 %

Давление 1040 гПа

Ветер сила 1,5 м/с

направл. север

Синопт западная часть анти

Сохранить ввод

Рассчитать прогноз

Результаты прогноза

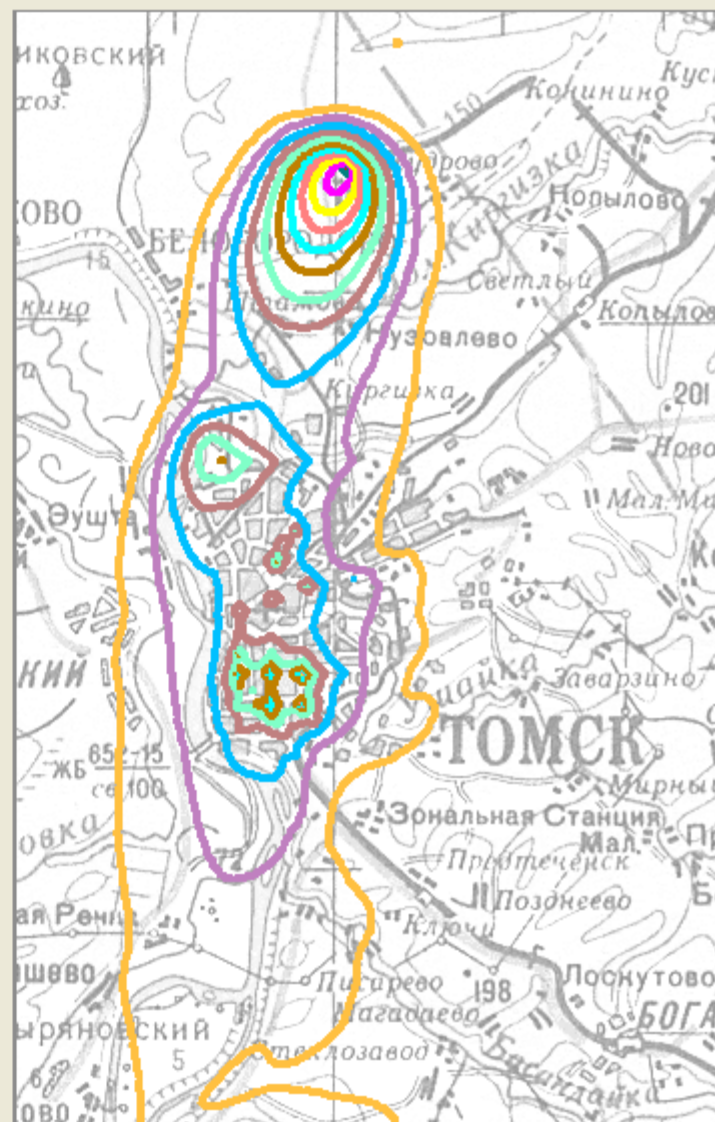
**Уровень загрязнения  
повышенный.**

**Средняя по городу  
прогностическая  
концентрация  
составила 17,2 мкг/м<sup>3</sup>.**

Маркеры изолиний (мкг/м<sup>3</sup>)



Выход





Ввод исходных данных

день 28

Дата расчета:

месяц август

год 2006

Температура 18 град. Цельс

Отн. влажность 84 %

Давление 1010 гПа

Ветер сила 1,5 м/с

направл. юго-запад

Синопт ложбина

Сохранить ввод

Рассчитать прогноз

Результаты прогноза

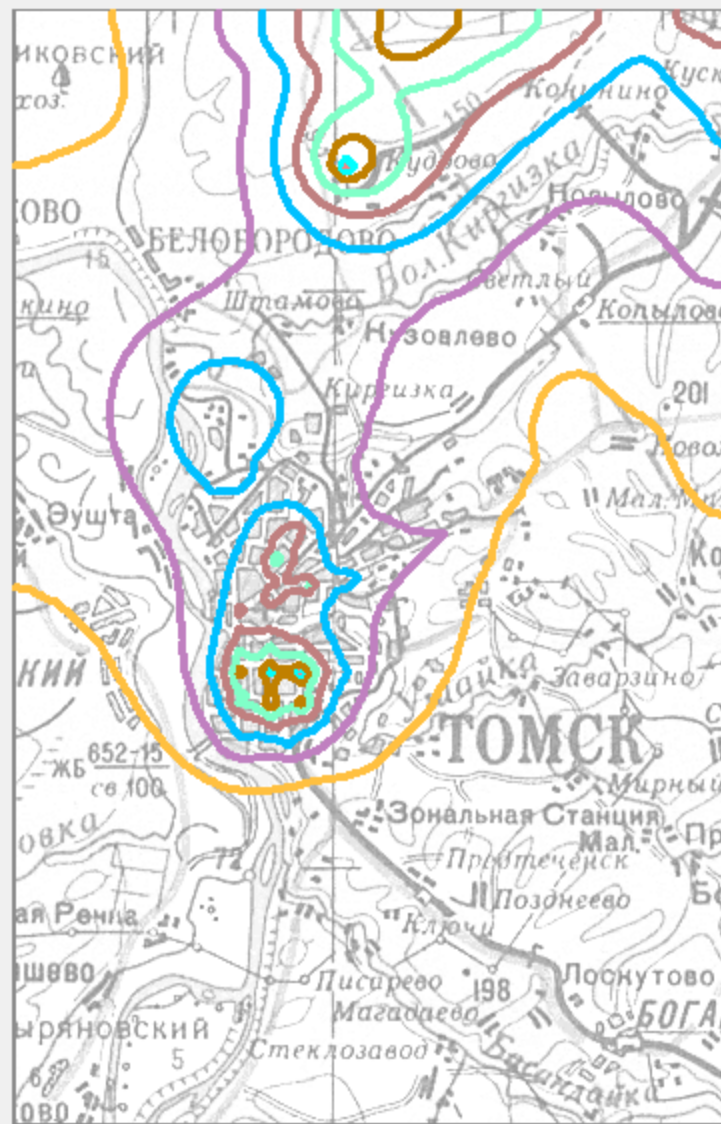
**Уровень загрязнения  
повышенный.**

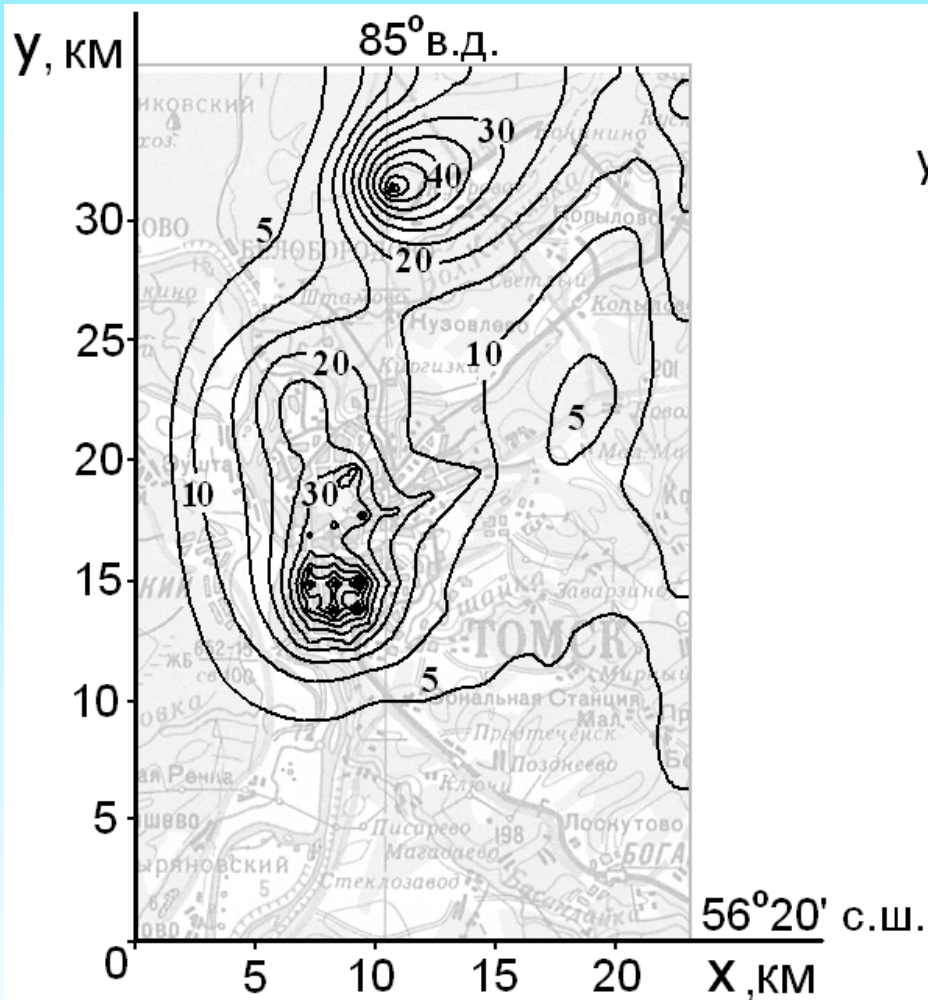
**Средняя по городу  
прогностическая  
концентрация  
составила 19,0 мкг/м<sup>3</sup>.**

Маркеры изолиний (мкг/м<sup>3</sup>)

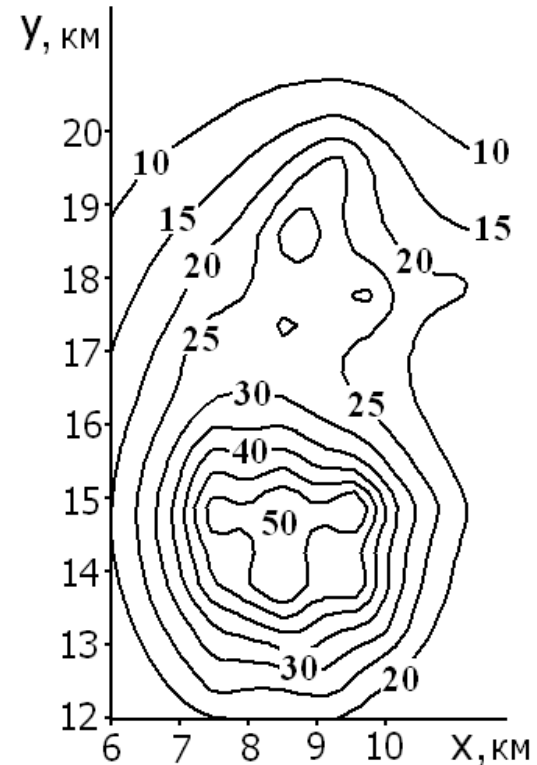


Выход





а)



б)

Прогностическое поле концентрации формальдегида ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ ) при западном ветре на уровне  $Z=2$  м;

а) по области в целом; б) фрагмент центральной части города в варианте оценки вклада выбросов автотранспорта.

# Заключение

- Возможности модели позволяют получать относительные оценки вклада отдельных предприятий или групп источников (в т.ч. выбросов автотранспорта) в общее загрязнение городской атмосферы. Алгоритм может быть использован как компонент экспертных систем или систем поддержки принятия управленческих решений, в частности, при разработке профилактических мероприятий, способствующих повышению качества атмосферного воздуха.
- Построена гибридная статистико-гидродинамическая модель прогноза формальдегидного загрязнения, адаптированная к условиям г.Томска. Статистический компонент модели дает среднюю по городу прогностическую концентрацию, детализация пространственного распределения проводится на основе гидродинамического метода. Испытания модели на независимом материале показали оправдываемость не менее 70%.
- Алгоритм прогноза реализован в виде программного пакета с интерфейсом, позволяющим осуществлять ввод исходных данных и визуализировать прогностическое поле концентрации.

**Спасибо за внимание !**