

## Исследование суточной динамики характеристик воздуха в г. Томске в холодный период года

Н.В. Ужегова, П.Н. Антохин, Б.Д. Белан, Г.А. Ивлев,  
А.В. Козлов, А.В. Фофонов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 28.02.2011 г.

С помощью мобильной станции АКВ-2 исследуются суточные изменения термодинамических характеристик, газового и аэрозольного состава городского воздуха в холодное время года на примере г. Томска. Были проведены два маршрутных исследования по городу в дневное и вечернее время, а также в стационарном режиме суточное исследование вблизи одного из главных перекрестков города. Исследована суточная динамика метеовеличин и примесей воздуха, а также выявлены наиболее загрязненные районы города в разное время суток. Проведенный эксперимент показал, что зимой в условиях мощного антициклона в вечерние часы город особенно подвержен накоплению вредных примесей в атмосфере из-за уже сформировавшейся приземной температурной инверсии, но еще активного автомобильного движения. Суточное исследование на дорожной развязке показало довольно высокие концентрации  $\text{NO}_2$ , существенно превышающие среднесуточные предельно допустимые концентрации.

*Ключевые слова:* антропогенный, атмосфера, аэрозоль, воздух, газ, город, загрязнение, карта, мобильная станция, пригород, примеси, распределение; anthropogenic, atmosphere, aerosol, air, gas, city, pollution, a map, mobile station, urban, suburban, distribution.

### Введение

Развитие любого города радикально изменяет свойства атмосферы на его территории, что проявляется в изменении метеоусловий и повышении концентраций загрязнителей воздуха [1, 2]. В настоящее время существует достаточно много исследований пространственных и временных изменений температуры, влажности, газового и аэрозольного состава городского воздуха, подробный обзор которых был дан в нашей предыдущей работе [3]. Для изучения пространственного и временного изменения характеристик городского воздуха, помимо описанных в [3], используются и методы математического моделирования, которые опираются на данные измерений многочисленных постов наблюдений [4]. Это приводит к недостаточности начальных и граничных условий, что существенно увеличивает погрешность результатов моделирования и вызывает необходимость дополнительных экспериментальных измерений.

По нашему мнению, наиболее доступным методом пространственного исследования атмосферы города является использование мобильных станций в дополнение к уже существующим стационарным метеостанциям и постам наблюдений качества город-

ского воздуха [3]. С помощью мобильной станции достаточно легко получить пространственные распределения метеовеличин и концентрации примесей воздуха, что позволяет выявить наиболее загрязненные районы города [3, 5–7].

Целью данной статьи является исследование динамики характеристик городского воздуха в течение суток в г. Томске в холодный период года. Для этого мобильная станция использовалась в двух вариантах: измерение пространственных распределений исследуемых параметров в разное время суток и регистрация их суточного хода в заданных точках города.

### 1. Место и методы исследований

Для исследования использовалась мобильная станция АКВ-2 на шасси автомобиля ГАЗ-66 КУНГ, созданная в 2004 г. в Институте оптики атмосферы СО РАН [5]. Комплекс оборудования станции в автоматическом режиме позволяет каждую секунду измерять температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра, суммарную солнечную радиацию, дисперсный состав аэрозоля, концентрацию газов  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ . Движение мобильной станции по городу осуществляется в виде «змейки», охватывая все главные магистрали города. Проведение измерений по ходу движения мобильной станции АКВ-2 и оптимизация маршрута движения, обеспечивающая высокую плотность отсчетов, дают возможность построения карт распределения метеопараметров и примесей воздуха [6, 7].

\* Нина Викторовна Ужегова (unv@iao.ru, ninosh@mail.ru); Павел Николаевич Антохин (apn@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

Т а б л и ц а 1

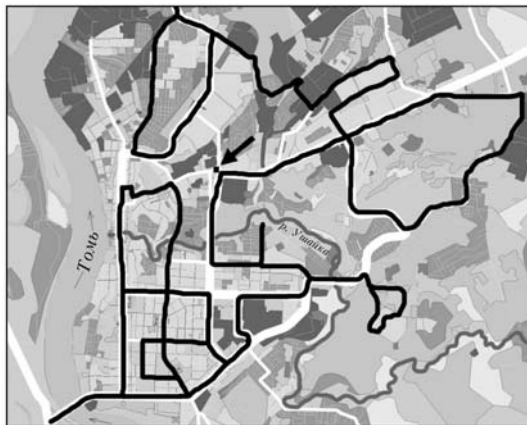
## Описание дней проведения экспериментов

Дата и время (местное)	Характер исследования	День недели	Синоптические процессы	Характеристики погоды
11.02.2010 12:20–16:20	Маршрутное исследование города днем	ЧТ	Малоградиентное барическое поле повышенного давления,	Ясно
11.02.2010 17:40 – 12.02.2010 18:40	Сутки в стационарном режиме на перекрестке	ЧТ–ПТ	давления, между двумя антициклонами	Без ветра
12.02.2010 20:00–23:00	Маршрутное исследование города вечером	ПТ		Без погодных явлений

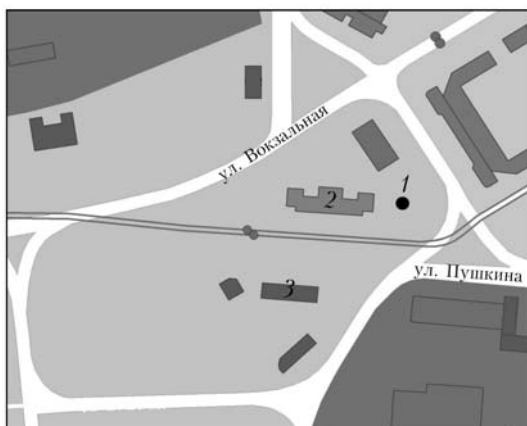
Т а б л и ц а 2

## Синоптические ситуации для холодных месяцев 2009–2010 гг. в г. Томске

Месяц, год	Общее количество суток с антициклональными условиями	Средний период существования антициклона над городом, сут	Максимальный период существования антициклона над городом, сут	Количество фронтов
Декабрь 2009	9	1,8	2	20
Январь 2010	23	3,3	8	9
Февраль 2010	15	3,8	7	11
Март 2010	8	2	4	18



а



б

Рис. 1. Маршрут движения мобильной станции АКВ-2 по г. Томску; стрелкой указан пункт суточного исследования мобильной станции на транспортной развязке «4-я поликлиника» (а); схема транспортной развязки: 1 – пункт суточного исследования мобильной станции; 2 – гуманитарный лицей; 3 – поликлиника № 4 (б)

В табл. 1 представлено описание дней проведения экспериментов. Вначале было проведено маршрутное исследование качества городского воздуха днем.

Насколько эти условия типичны, можно судить по данным табл. 2.

Затем мобильную станцию установили вблизи одного из главных перекрестков города, где в течение суток непрерывно проводились измерения в стационарном режиме. В завершение было проведено маршрутное исследование качества городского воздуха вечером. На рис. 1, а представлена схема движения мобильной станции по городу, стрелкой обозначено место суточного исследования качества воздуха (ост. «4-я поликлиника»).

Выбор места определялся высокой интенсивностью движения и повышенным среднесуточным содержанием загрязняющих веществ в воздухе. На рис. 1, б в укрупненном масштабе показано место расположения мобильной станции и размещенных рядом объектов.

## 2. Результаты измерений и обсуждение

В период проведения исследований синоптическая ситуация в регионе складывалась следующим образом. За неделю до начала измерений над всей территорией Западной Сибири, Урала и части Восточной Сибири установился мощный арктический антициклон. На момент проведения эксперимента антициклон разделился на две части. При этом в период измерений в г. Томске наблюдалось малоградиентное барическое поле повышенного давления между двумя антициклонами (рис. 2), характеризующееся безоблачным небом, штилем и низкой температурой воздуха (до  $-35^{\circ}\text{C}$ ).

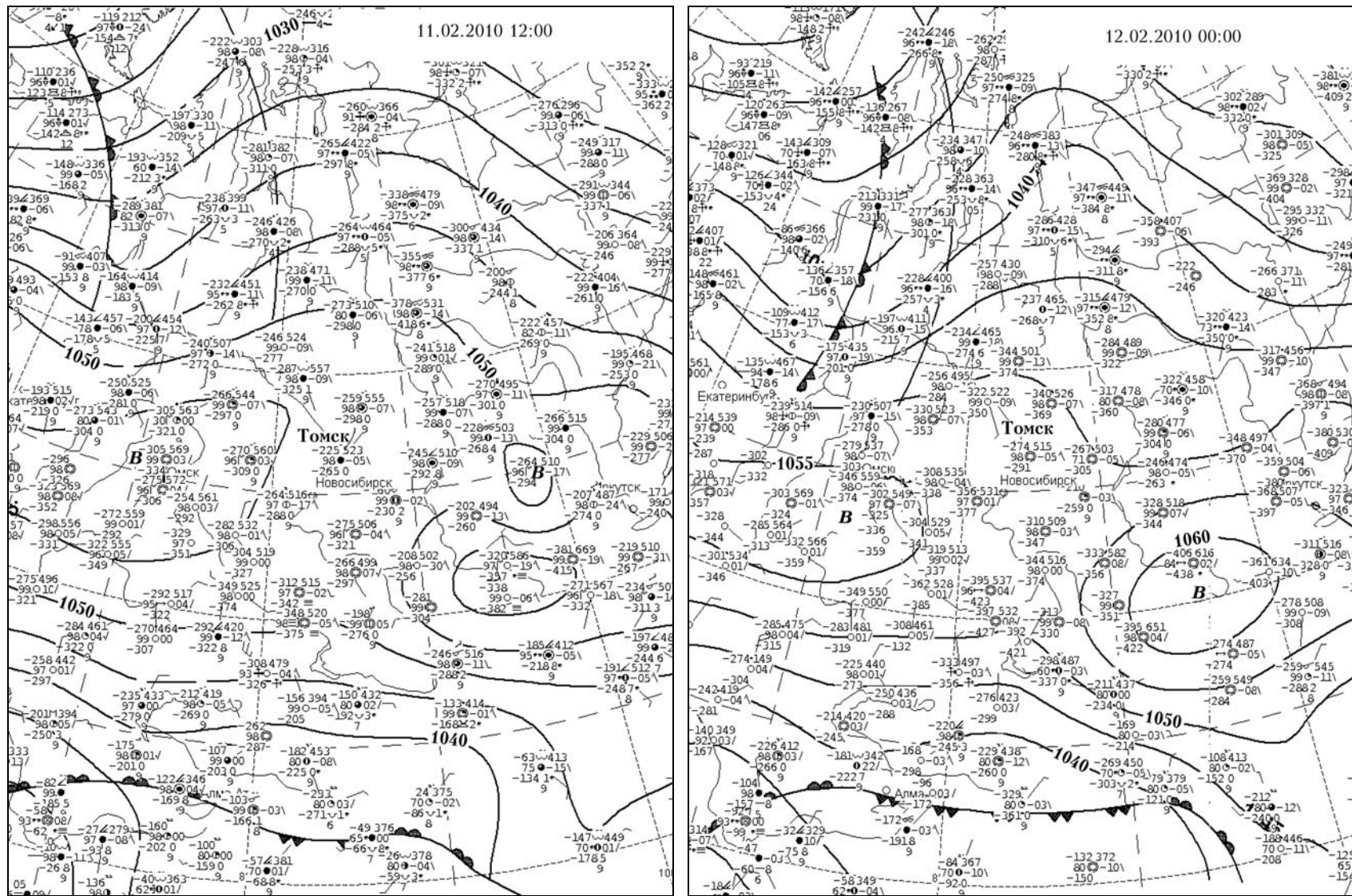


Рис. 2. Синоптическая ситуация в период проведения исследования

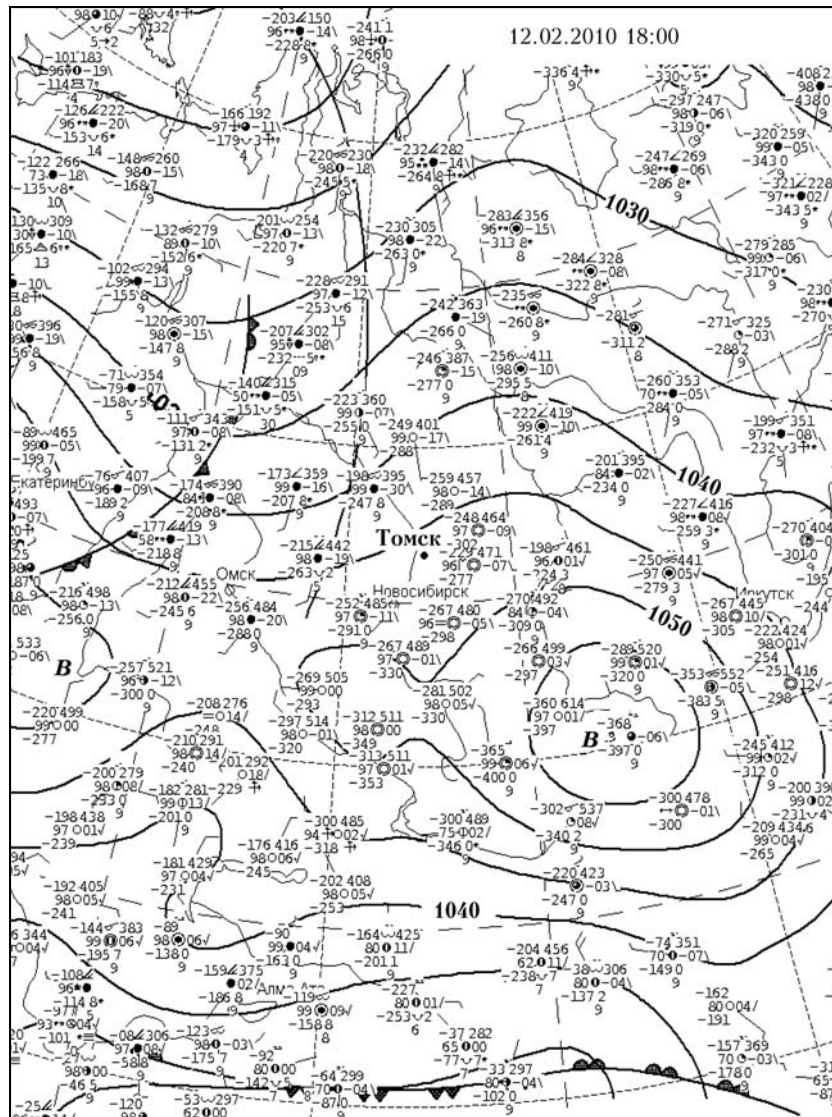


Рис. 2 (продолжение)

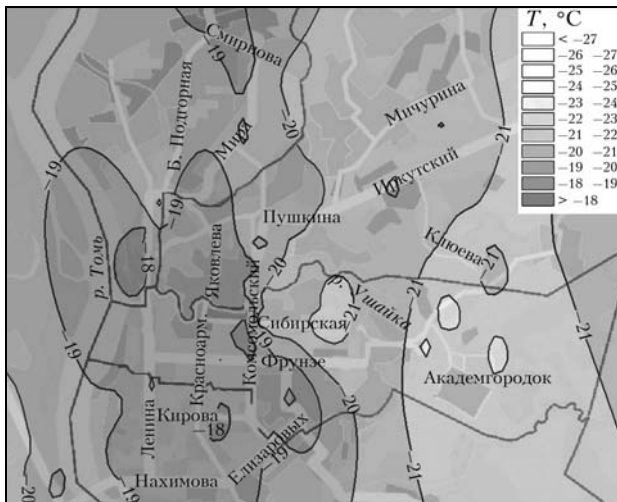
Статистическая оценка синоптических условий данного региона за последние 15 лет показала, что подобные стабильные антициклональные условия для зимних месяцев являются характерными [8, 9]. В табл. 2 приведены данные по количеству суток с антициклональными условиями и прохождению атмосферных фронтов в г. Томске на примере зимы 2010 г.

Следует отметить, что в антициклонах в ночные часы создаются наиболее благоприятные условия для образования приземных слоев температурной инверсии вследствие радиационного охлаждения подстилающей поверхности [10]. При этом зимой температурные инверсии могут существовать как ночью, так и днем, создавая благоприятные условия для накопления вредных загрязняющих веществ в приземном слое воздуха. Таким образом, можно предположить, что погодные условия, препятствующие естественному очищению городского воздуха от загрязнений, являются характерными для континентальных городских городов в холодный период года.

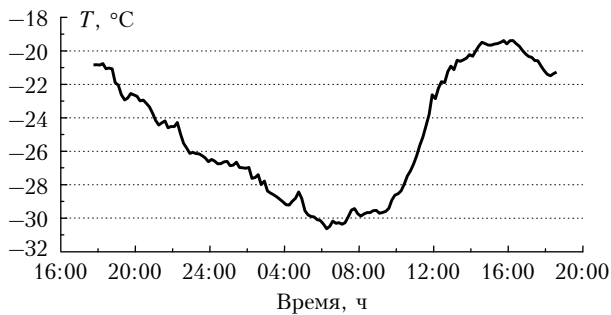
### **Температурный и влажностный режимы**

Исследование распределения температуры воздуха показало, что в Томске круглосуточно наблюдается остров тепла (ОТ). При этом наиболее интенсивный ОТ образуется в вечернее время, разница температуры в центре ОТ и на периферии города в представленном измерении достигала 8 °С. Вечерний максимум данной разницы температур характерен для большинства городов в холодное время года [1]. Причиной этому служат повышенные антропогенные выбросы тепла. На рис. 3 показаны распределения температуры в дневное и вечернее время.

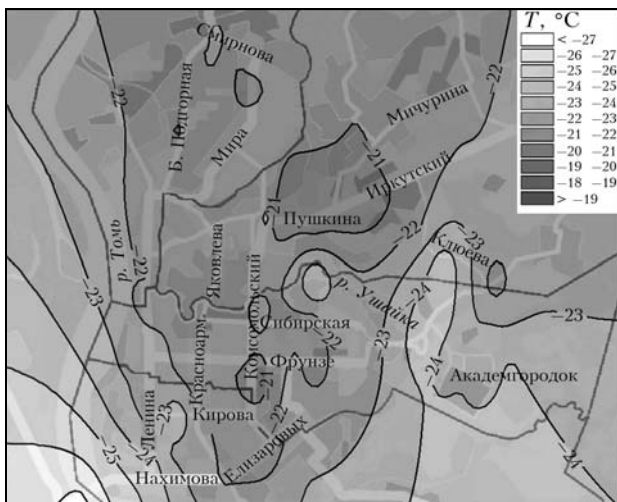
Видно, что дневной и вечерний ОТ отличаются не только интенсивностью, но и размерами, а также положением центра. В вечернем распределении температуры (рис. 3, в) видно, что самая теплая область ОТ охватывает густонаселенные жилые кварталы города с центром на ул. Пушкина.



*a*



*б*

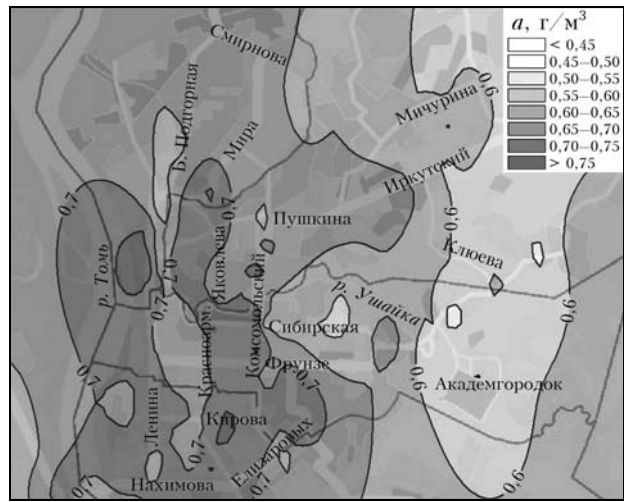


*б*

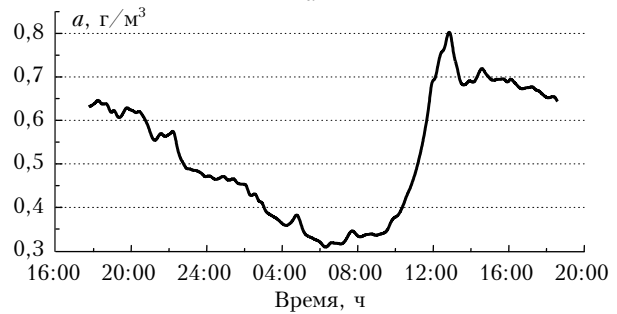
Рис. 3. Распределение температуры воздуха на территории города днем (*a*) и вечером (*б*); суточный ход температуры воздуха на одном из самых загруженных перекрестков г. Томска (*б*)

Днем городской ОТ менее интенсивный (рис. 3, *a*). Разницы температур воздуха между центром города и окраинами не превышают 3 °C. При этом центр ОТ в дневное время смещается в район расположения университетов, больших торговых центров и офисных зданий.

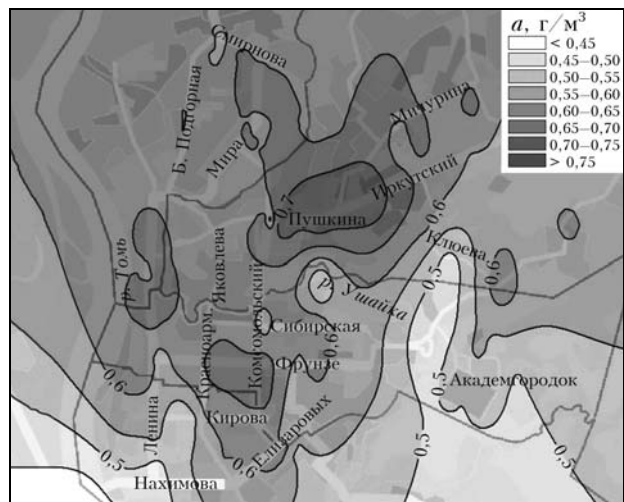
В суточном ходе температуры воздуха вблизи одного из оживленных перекрестков города (рис. 3, *б*)



*a*



*б*



*б*

Рис. 4. Распределение абсолютной влажности воздуха на территории города днем (*a*) и вечером (*б*); суточный ход абсолютной влажности воздуха на одном из самых загруженных перекрестков г. Томска (*б*)

можно заметить, что кроме общего хода температуры с минимумом в предрассветные часы и максимумом после полудня наблюдаются заметные температурные колебания. Данные колебания с периодом от 10 мин до 0,5 ч можно объяснить характерным изменением направления локального переноса воздуха в месте расположения мобильной станции (измерительная аппаратура располагалась в 50 м от дороги).

Максимальные колебания температуры с амплитудой 1–2 °С относительно сглаженного суточного хода наблюдаются в часы наибольшего скопления транспорта и могут характеризовать величину данного антропогенного вклада.

Характер распределения абсолютной влажности воздуха аналогичен распределению температуры. Как днем, так и вечером регистрируется антропогенный приток водяного пара в городе (рис. 4).

Максимумы абсолютной влажности наблюдались на главных перекрестках города, что свидетельствует об определяющем влиянии транспорта как антропогенного источника водяного пара в городе. Как и в случае с температурой воздуха, разница абсолютной влажности в центре и на периферии города наиболее ярко проявляется в вечерние часы, достигая 0,35 г/м<sup>3</sup>, тогда как днем она не превышает 0,15 г/м<sup>3</sup>.

Суточный ход абсолютной влажности воздуха (рис. 4, б) хорошо коррелирует с ходом температуры. При этом колебания абсолютной влажности с амплитудой 0,05–0,1 г/м<sup>3</sup> относительно общего хода практически полностью совпадают с колебаниями температуры и также могут характеризовать величину данного антропогенного вклада.

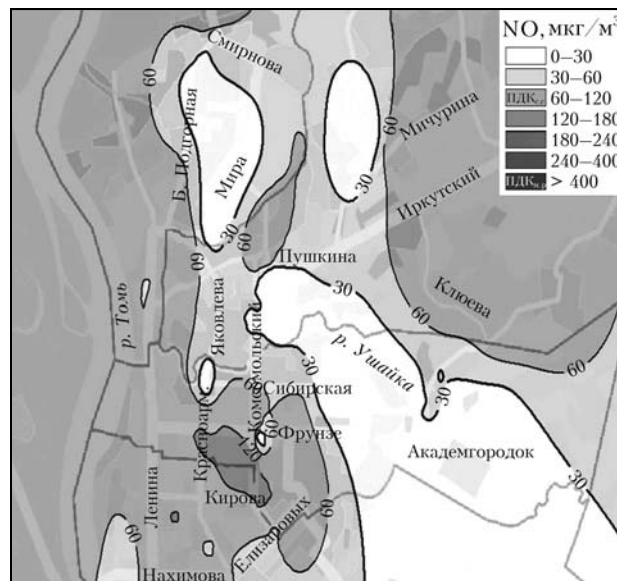
### Газовый и аэрозольный состав

Как было отмечено выше, зимой в условиях мощного антициклона в вечерние часы городская атмосфера особенно подвержена накоплению вредных примесей из-за сформировавшейся приземной температурной инверсии и активного автомобильного движения. Это хорошо подтверждается результатами исследования распределения NO в атмосфере Томска. Маршрутные исследования NO показали, что вечером в центре города концентрации NO в 5–6 раз выше, чем днем (рис. 5).

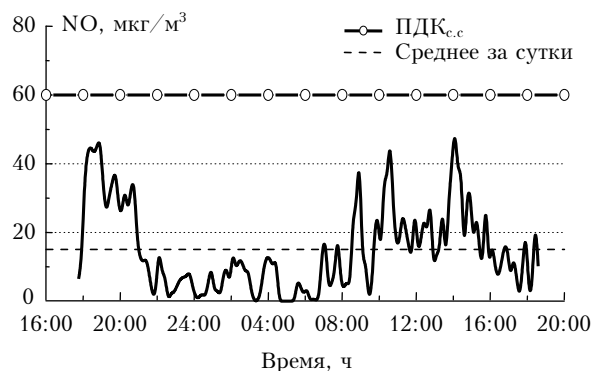
На одном из наиболее оживленных перекрестков на пл. Ленина вечером было зафиксировано превышение максимально-разового значения предельно допустимой концентрации (ПДК<sub>м.р.</sub>), что в Томске наблюдалось крайне редко.

В суточном ходе NO на развязке «4-я поликлиника» (рис. 5, б) в ночное время зафиксированы значения концентрации NO, близкие к нулю, и ее существенное увеличение во время движения транспорта. При этом даже в дневное и вечернее время были зафиксированы значения концентрации, не превышающие среднесуточное значение предельно допустимой концентрации (ПДК<sub>с.с.</sub>). Это может быть связано с тем, что маршрутные исследования (рис. 5, а, в) проводились непосредственно на магистралях, а в стационарном режиме мобильная станция была установлена в 50 м от дорожной развязки (см. рис. 1, б). Как известно, концентрация NO максимальна непосредственно у источника выбросов (в частности, на дороге с интенсивным движением) и быстро убывает при удалении от источника.

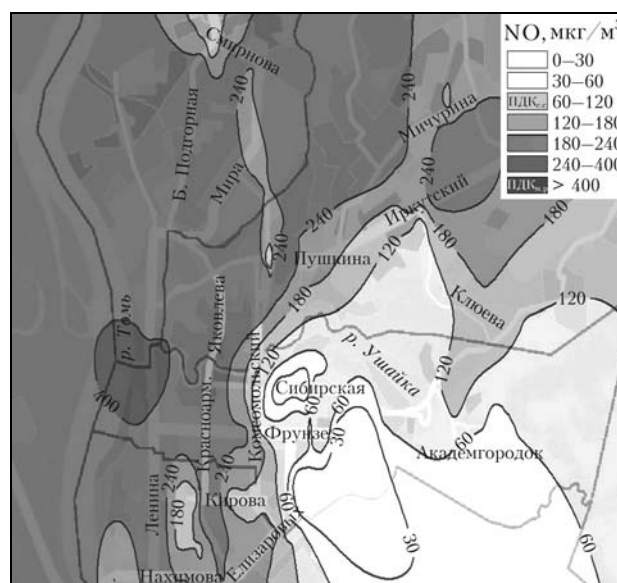
В ходе химических реакций за счет окисления молекулы NO озон в шлейфах выбросов образуется NO<sub>2</sub> [11]. Концентрация NO<sub>2</sub> весь период измерений на развязке была в 3 раза выше ПДК<sub>с.с.</sub> и превышала ПДК<sub>м.р.</sub> (действующую до 2006 г.) в среднем на 35% (рис. 6, б).



а

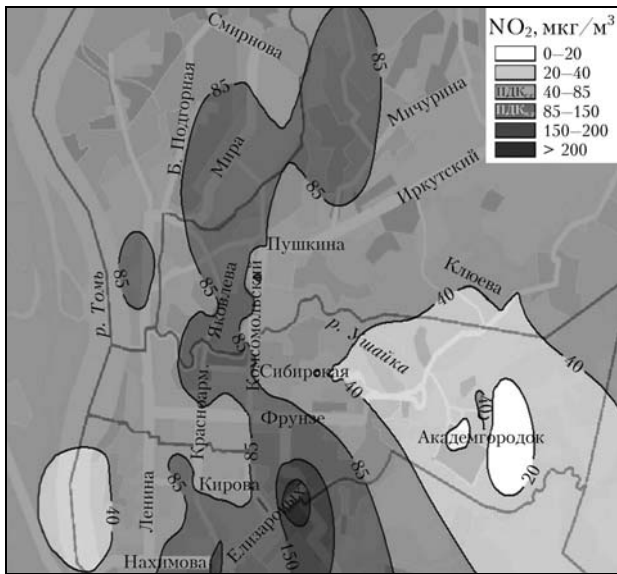


б

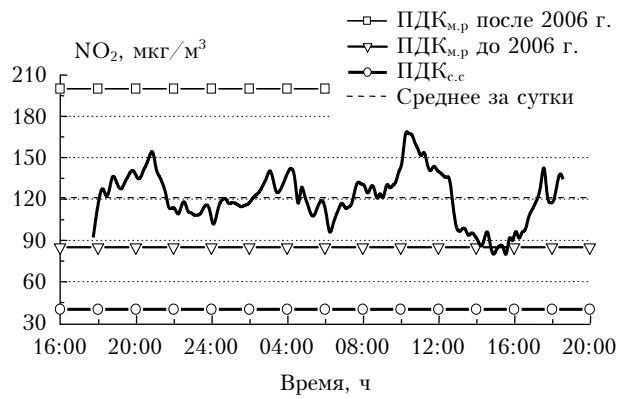


в

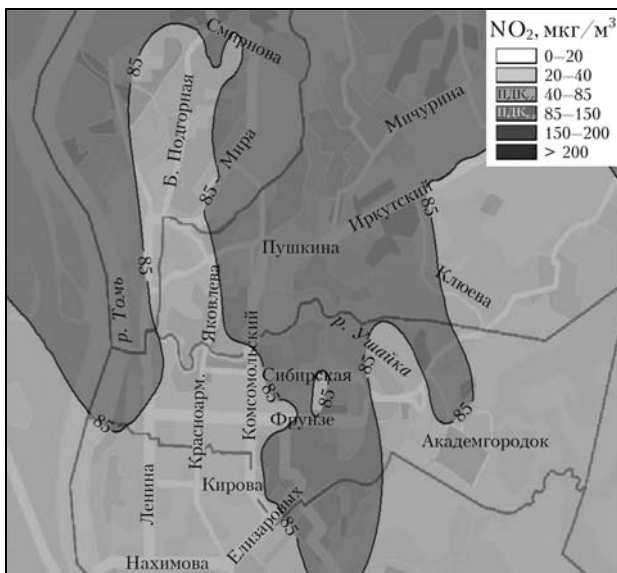
Рис. 5. Распределение концентрации оксида азота на территории города днем (а) и вечером (в); суточный ход концентрации оксида азота на одном из самых загруженных перекрестков г. Томска (б)



а

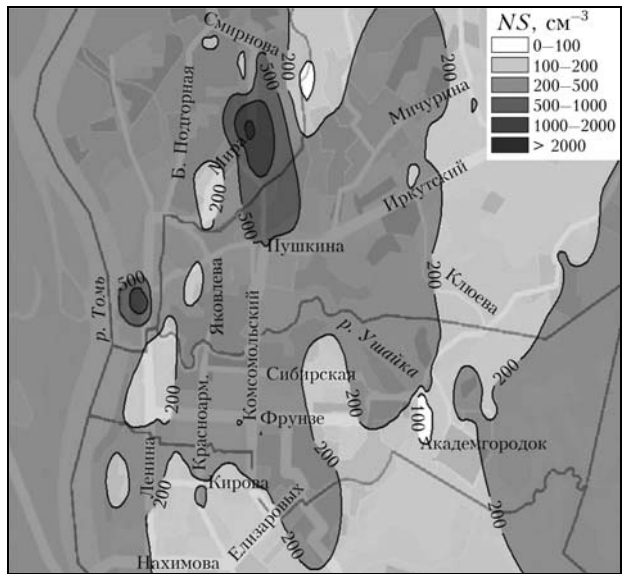


б

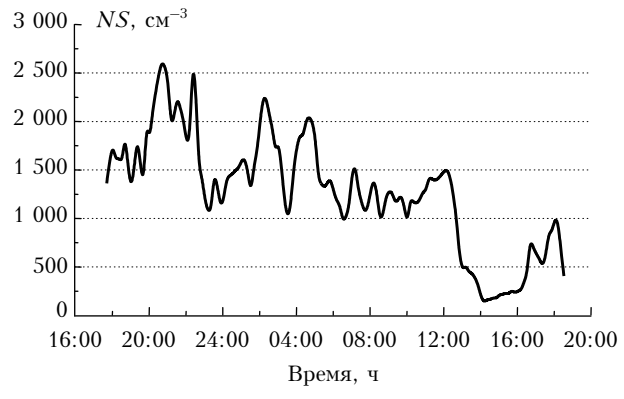


б

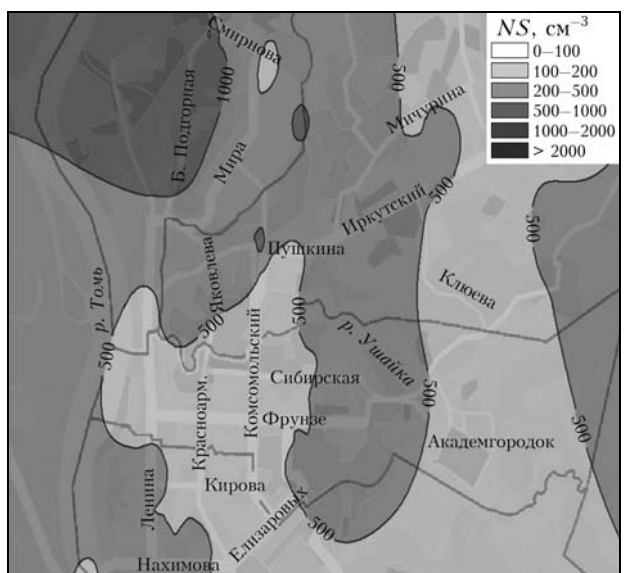
Рис. 6. Распределение концентрации диоксида азота на территории города днем (а) и вечером (б); суточный ход концентрации диоксида азота на одном из самых загруженных перекрестков г. Томска (б)



а



б



б

Рис. 7. Распределение счетной концентрации аэрозоля NS на территории города днем (а) и вечером (б); суточный ход счетной концентрации аэрозоля на одном из самых загруженных перекрестков г. Томска (б)

В суточном ходе были выявлены два явных пика концентрации  $\text{NO}_2$  с 09:00 до 12:00 и с 18:00 до 21:00, которые соответствуют утреннему и вечернему «часам пик». Маршрутные исследования показали, что максимальные концентрации  $\text{NO}_2$  днем наблюдаются в центральной части города (рис. 6, а), а вечером в «спальных районах» (рис. 6, в). Это также подтверждает определяющий вклад выбросов транспорта в увеличение концентрации  $\text{NO}_2$  в городском воздухе.

Исследования счетной концентрации аэрозоля ( $NS$ ) показали, что основной вклад в данную характеристику вносят субмикронные частицы (до 0,6 мкм), являющиеся в том числе продуктом сгорания топлива. Счетная концентрация аэрозоля вечером (рис. 7, в) в среднем по городу в 2 раза выше, чем днем (рис. 7, а).

Это связано с дневным разрушением температурных инверсий и соответствующим выносом аэрозоля в более высокие слои атмосферы. В суточном ходе  $NS$  вблизи оживленного перекрестка (рис. 7, б), так же как и в изменениях абсолютной влажности и концентрации  $\text{NO}_2$ , в 12:30 наблюдается резкое уменьшение концентрации частиц в приземном слое воздуха. Также стоит отметить, что наиболее выраженные максимумы в суточной динамике  $NS$  хорошо коррелируют с локальными максимумами в изменении температуры и абсолютной влажности воздуха, что говорит об их антропогенном происхождении.

### Заключение

Проведенный эксперимент показал, что зимой в условиях мощного антициклона в вечерние часы город особенно подвержен накоплению вредных примесей в атмосфере. Причинами этого являются сформировавшаяся приземная температурная инверсия и выбросы автотранспорта.

Исследование суточной динамики на дорожной развязке показывает высокие концентрации  $\text{NO}_2$ , существенно превышающие среднесуточные ПДК.

В суточной динамике температуры, абсолютной влажности и счетной концентрации аэрозоля вблизи оживленного перекрестка наблюдаются коррелированные колебания данных характеристик с перио-

дом от 10 мин до 0,5 ч, которые можно объяснить характерным изменением направления локального переноса воздуха в месте расположения мобильной станции.

Работа выполнена при поддержке программ Президиума РАН № 4, ОНЗ РАН № 5, грантов РФФИ № 11-05-00470, 11-05-00516, госконтрактов Минобрнауки РФ № 02.740.11.0674 и 14.740.11.0204.

1. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 248 с.
2. Oke T.R. Boundary Layer Climates. Methuen & Co. Ltd., 1987. 433 p.
3. Ужегова Н.В., Антохин П.Н., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Фофанов А.В. Выделение антропогенного вклада в изменение температуры, влажности, газового и аэрозольного состава городского воздуха // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 589–596.
4. Панасенко Е.А., Старченко А.В. Определение городских районов-загрязнителей атмосферного воздуха по данным наблюдений // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 3. С. 279–283.
5. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Ужегова Н.В., Фофанов А.В. Мобильная станция АКВ-2 и ее применение на примере г. Томска // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 643–648.
6. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Пирогов В.А., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Ужегова Н.В., Фофанов А.В. Сравнительная оценка состава воздуха промышленных городов Сибири в холодный период // Геогр. и природ. ресурсы. 2005. Спец. выпуск. С. 152–157.
7. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Мариняйте И.И., Пененко В.В., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Фофанов А.В., Ходжер Т.В. Сравнительная оценка состава воздуха промышленных городов Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 5. С. 428–437.
8. Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Скляднева Т.К. Синоптический режим Томска за 1993–2004 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 10. С. 887–892.
9. Рассказчикова Т.М., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Белан Б.Д. Счетная концентрация аэрозоля в различных воздушных массах и синоптических условиях // Тез. «Аэрозоли Сибири». Томск, 2010. С. 57.
10. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 711 с.
11. Белан Б.Д. Тропосферный озон. Ч. 6. Компоненты озоновых циклов // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 4. С. 358–379.

#### *N.V. Uzhegova, P.N. Antokhin, B.D. Belan, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, A.V. Fofonov. Daily variations of Tomsk air characteristics in cold season.*

Daily variations of thermodynamics characteristics, gas and aerosol composition of city air in cold season using the AKV-2 mobile station is studied in the paper by the example of Tomsk. Two area mapping were made in the daytime and in the evening, as well as diurnal measuring at a fixed point near a busy city crossroad. We have researched daily dynamics of meteorological characteristics and air pollutants by means of the mobile station and revealed the most polluted districts in different times of day. The experiment has shown that air pollutants are accumulated in city atmosphere in conditions of steady winter anticyclone, especially in the evening, because the surface temperature inversion is already arisen, but traffic is still busy. Diurnal research near a busy crossroad has shown that the  $\text{NO}_2$  concentration significantly exceeds the maximum daily-average permissible concentration.