

Изменение состава воздуха при прохождении атмосферных фронтов в районе Томска

Б. Д. Белан*, Г. О. Задде**, А. П. Плотников*,
Т. М. Рассказчикова*, Т. К. Складнева*

Анализируется изменение концентраций аэрозольных частиц, озона и оксида углерода при прохождении через пункт измерений атмосферных фронтов. Показано, что в их зоне концентрация газов меняется скачкообразно. Знак изменения определяется направлением движения фронтов, а амплитуда может варьироваться от 20 до 65% в зависимости от географического типа фронта. Ход концентрации аэрозольных частиц более сложный и имеет в зоне фронта максимумы и минимумы, которые, по-видимому, отражают действие процессов генерации и стока частиц.

Установлено, что наиболее существенные изменения оптических свойств атмосферы связаны с образованием и перемещением основных объектов общей циркуляции: фронтальных разделов, циклонов, антициклонов, ложбин и гребней. Подробный обзор таких взаимосвязей имеется в [6], где также предполагается, что реализуются эти взаимосвязи через вариации газового и аэрозольного состава воздуха. Однако, несмотря на многочисленные исследования состава воздуха, выполненные в самых разных физико-географических районах, закономерности его изменения в основных синоптических объектах все еще мало изучены.

Возможно, это происходит потому, что измерения состава воздуха имеют в большинстве случаев эпизодический характер. В силу многообразия синоптических ситуаций, реализующихся в конкретном эпизодическом эксперименте, за ограниченный период времени не удается набрать статистически обеспеченного материала для какого-либо одного синоптического объекта. Этот вывод базируется на нашем опыте эксплуатации автоматического поста для измерения состава воздуха, названного TOR-станцией по наименованию подпроекта по исследованию тропосферного озона (Tropospheric Ozone Research) проекта EUROTRAC. Полное описание автоматического поста, режима его работы и технические характеристики приведены в [1]. Пост начал постоянную работу в декабре 1992 г. [1]. Только через 3 года эксплуатации станции в круглосуточном режиме с частотой регистрации раз в час можно было набрать 70-80 случаев наблюдений в однотипной синоптической ситуации.

В настоящей работе по результатам измерения аэрозольного и газового состава на TOR-станции за период с 1993 по 1998 г. рассматривается изменение состава воздуха при прохождении атмосферных фронтов.

Еще в 1948 г. С. П. Хромов показал [8], что внутри какой-либо воздушной массы фактор мутности распределяется относительно однородно

* Институт оптики атмосферы Сибирского отделения Российской академии наук.

** Томский государственный университет.

и скачкообразно изменяется в зоне фронтов, однако детальных характеристик этого скачкообразного изменения не привел. В [9] теоретически предсказано, что изменение концентрации озона в зоне холодного фронта должно быть скачкообразным, и высказывается необходимость экспериментальной проверки этого прогноза. Авторы [11] разработали классификацию воздушных масс, основанную на учете концентрации продуктов сгорания C_2H_2 и CO . Следовательно, можно полагать, что переход из одной воздушной массы в другую должен сопровождаться резким изменением состава воздуха.

Положение фронта определялось по приземным картам и картам барической топографии. В связи с тем, что фронт представляет собой сложное образование с предфронтальными и постфронтальными облачными полями, зонами осадков, усилением и конвергенцией скорости ветра и достаточно узкой (10—20 км) полосой приземной линии фронта [5], а измерения состава воздуха проводились в одной точке с интервалом 1 ч, то для каждого из рассмотренных случаев анализировались данные измерений в момент прохождения приземной линии фронта через пункт наблюдений, а также данные ежечасных измерений в течение 5 ч до и после этого момента. Всего за указанный период было проанализировано 442 случая, которые по типам фронтов распределялись следующим образом: холодные — 185, теплые — 155, окклюзии — 102.

Поскольку концентрации газов и аэрозольных частиц имеют суточный и годовой ход [2, 3], для сопоставимости результатов измерений в разное время суток и различные сезоны все данные о концентрациях газов и аэрозоля нормировались на значение, соответствующее моменту прохождения линии фронта. Таким образом, все данные о динамике состава воздуха при прохождении фронта представляют собой относительные величины.

На рис. 1а видно, что при прохождении холодного фронта концентрации O_3 и CO в его зоне скачкообразно уменьшаются при переходе от теплой воздушной массы к холодной. Концентрация O_3 в среднем изменяется на 30%, CO — примерно на 50%. За фронтом концентрации газов стабилизируются и в дальнейшем почти не изменяются. Очевидно, что такой ход концентраций озона и CO обусловлен как направлением градиента концентрации газов от теплой воздушной массы к холодной, так и наличием вблизи линии фронта зон осадков, вызывающих их вымывание [7, 10].

Счетная концентрация аэрозольных частиц в зоне холодного фронта изменяется по более сложному закону (рис. 1а). Перед фронтом она, как и концентрация O_3 и CO , убывает, отражая вымывающее действие осадков. Вблизи самой линии фронта (40—60 км) концентрация аэрозольных частиц начинает расти и достигает почти тех же значений, что и в теплой воздушной массе на расстоянии 100—180 км перед линией фронта. (Здесь и далее переход от времени к расстоянию сделан исходя из средней скорости перемещения фронта (40—60 км/ч) [5].) После чего концентрация аэрозоля заметно уменьшается в холодной воздушной массе, на расстоянии 240—300 км за линией фронта.

Такое изменение концентрации аэрозольных частиц обусловлено тем, что перед холодным фронтом второго рода, как правило, выпадают обильные осадки, сопровождающиеся турбулентностью. Это приводит к тому,

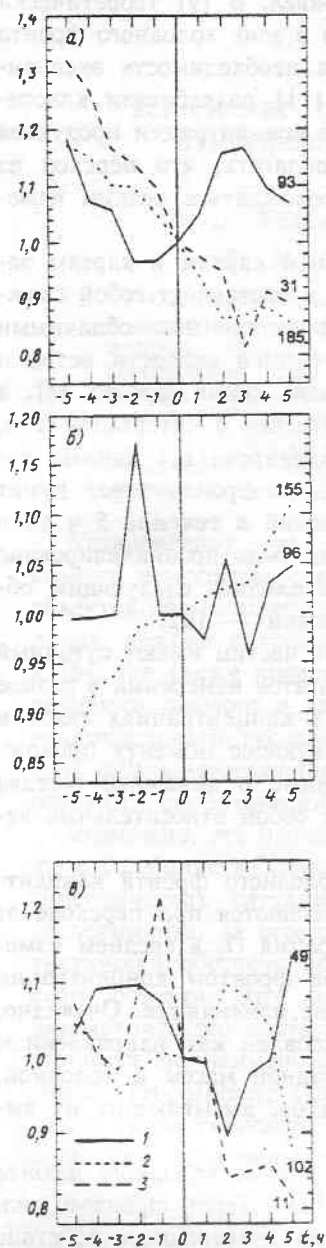


Рис. 1. Изменение счетной концентрации аэрозольных частиц диаметром $d \geq 0,4$ мкм (1), озона (2) и оксида углерода (3) при прохождении через пункт измерений холодного (а), теплого фронтов (б) и окклюзии (в). Цифры у кривых — число случаев.

что часть аэрозольных частиц вымывается из атмосферы, а часть рассеивается в большом объеме. Рост их концентрации в тылу фронта также создается двумя встречными процессами: усилением скорости ветра вблизи линии фронта и связанной с нею динамической турбулентностью, ограниченными сверху фронтальной инверсией. Это приводит к тому, что поднятый вновь вторичный аэрозоль рассеивается в значительно меньшем объеме. После прохождения фронта, когда возмущения в нижнем слое ослабевают, аэрозольные частицы начинают подчиняться законам их формирования, наблюдающимся в однородной воздушной массе. Теплый фронт должен иметь градиенты, направленные в противоположную сторону, по отношению к холодному фронту. Это хорошо видно из хода концентрации озона, представленного на рис. 1б (для CO надежной оценки получить не удалось).

На рис. 1б видно, что концентрация озона при переходе из холодной воздушной массы в теплую увеличивается почти на 35%. При этом вид кривой не так монотонен, как для холодного фронта. По-видимому, сказываются различия в интенсивности атмосферных процессов, которая обычно меньше на теплых фронтах [5, 8].

В отличие от изменения концентрации озона в зоне теплого и холодного фронтов, имеющих противоположный, почти зеркальный характер, ход счетной концентрации аэрозольных частиц такой закономерности не подчиняется (рис. 1а, б). И если максимум концентрации озона перед прохождением теплого фронта можно объяснить тем же механизмом, что и ее максимум в тылу холодного фронта, то вторичный максимум, наблюдающийся после прохождения теплого фронта, на расстоянии 80—120 км за линией фронта, нуждается в дополнительном изучении. Проверка исходного массива показала, что он носит не случайный характер и имеет значимость на уровне 99%. Возможно, что его появление связано с тем же, постфронтальным, усилением ветра и турбулентности. Для проверки этого предположения запланирован специальный эксперимент.

Наиболее же сложный характер изменения состава воздуха наблюдается в зоне фронтов окклюзии (рис. 1в), что очевидно, так как при этом типе фронтов происходит взаимодействие трех воздушных масс [5, 8].

На рис. 1в видно, что для аэрозольных частиц характерно повышение концентрации в предфронтальной зоне и ее уменьшение в тыловой. Подобный же ход наблюдается для концентрации CO , с небольшим минимумом в дальней предфронтальной зоне (за 5—3 ч до прохождения фронта).

Для концентрации озона характерен сложный ход с двумя максимумами и двумя минимумами. Такое разнообразие, по-видимому, отражает индивидуальный характер фронтов окклюзии и указывает на то, что они должны также анализироваться индивидуально.

Поскольку атмосферные фронты отличаются не только направлением движения и способом образования, но и географическими признаками, так как разделяют воздушные массы, сформированные в различных географических районах, то целесообразно проанализировать изменение состава воздуха, вводя географический признак. В качестве примера приведем изменение концентраций аэрозольных частиц, озона и оксида углерода при прохождении холодных арктических и полярных фронтов (рис. 2).

На рис. 2 видно, что выявленные выше особенности в целом сохраняются для холодных фронтов. Различия заключаются лишь в амплитуде изменения концентраций. Так, для концентраций аэрозольных частиц и CO она на арктических фронтах составляет 37 и 65% соответственно; на полярных — 20 и 36% соответственно. Концентрация озона, наоборот, изменяется больше при прохождении полярных (34%), чем арктических (25%) фронтов. Возможно, что здесь находит отражение выявленная в [4] закономерность загрязнения воздушных масс при их перемещении над Евразией.

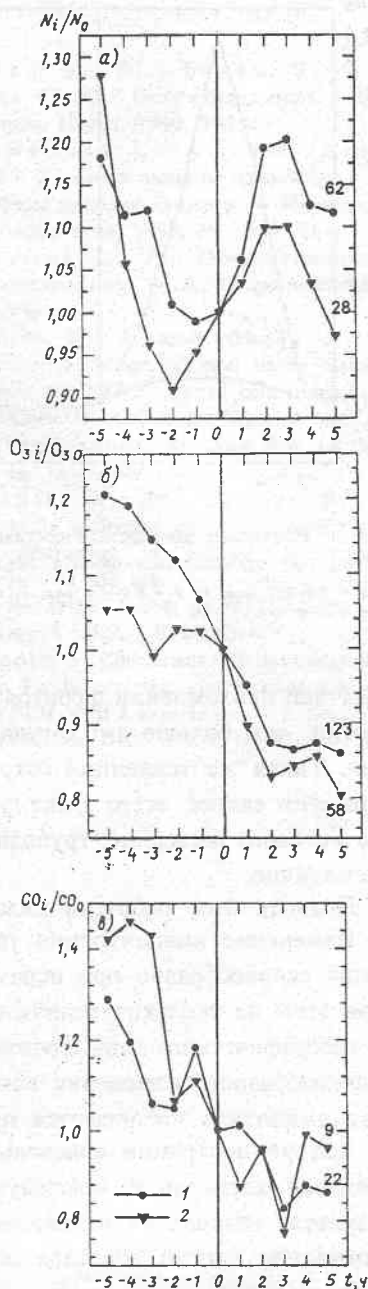


Рис. 2. Изменение счетной концентрации аэрозольных частиц (а), озона (б) и оксида углерода (в) при прохождении холодных арктических (1) и полярных (2) фронтов.

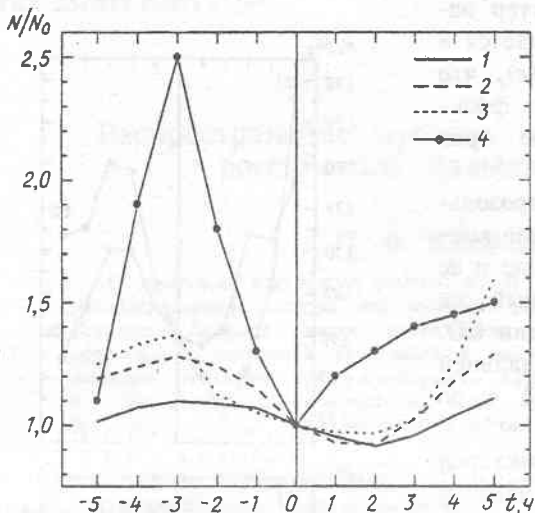


Рис. 3. Изменение дисперсного состава аэрозольных частиц при прохождении фронта окклюзии.

1) $d = 0,4-0,5$ мкм; 2) $d = 0,9-1,0$ мкм; 3) $d = 1,5-2,0$ мкм; 4) $d = 2-4$ мкм.

золя при прохождении фронтов окклюзии. Видно, что чем больше диаметр частиц, тем больше амплитуда относительного изменения их концентрации. Такая же тенденция сохраняется и для других типов фронтов. Это отражает скорее всего факт усиления скорости ветра в зоне фронтов, без которого попадание грубодисперсных частиц в атмосферу весьма проблематично.

Подводя итог работе в целом, можем сделать следующие выводы.

Изменение концентрации газов в зоне атмосферных фронтов происходит скачкообразно при переходе из одной воздушной массы в другую. При этом на сколько увеличится (уменьшится) их концентрация зависит от географического типа фронта и направления его движения. Амплитуда скачкообразного изменения концентраций газов от 20 до 65%. Наибольшая амплитуда наблюдается при прохождении холодных фронтов.

Ход концентрации аэрозольных частиц в зоне фронтов имеет более сложный характер с максимумами и минимумами, которые отражают результат нескольких одновременно действующих механизмов, а именно: вымывание частиц аэрозоля осадками, рассеивание примеси турбулентными движениями и подъем вторичных и грубодисперсных частиц при усилении ветра. Для концентрации частиц аэрозоля характерно появление предфронтального "валика" в непосредственной близости от приземной линии фронта. Амплитуда изменений их счетной концентрации весьма существенно изменяется в зависимости от дисперсного состава частиц. Так, если в среднем она составляет 20—60%, то для грубодисперсной фракции ($d > 2$ мкм) может достигать 250%.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 96-05-64332, 98-05-79155, 98-05-03161).

Поскольку данные для других сочетаний по признакам фронтов подобны, то приводить их здесь нецелесообразно. Они отличаются не по характеру, а по амплитуде изменений.

Помимо счетной концентрации аэрозольных частиц на TOR-станции измерялся и их дисперсный состав [2]. Это позволяет анализировать не только ход общей концентрации аэрозольных частиц, но и изменение их дисперсного состава при прохождении атмосферных фронтов.

На рис. 3 показано изменение концентрации различных фракций аэро-

Литература

1. Аршинов М. Ю., Белан Б. Д. и др. Автоматический пост для мониторинга малых газовых составляющих атмосферного воздуха. — *Метеорология и гидрология*, 1999, № 3, с. 110—118.
2. Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Ковалевский В. К., Толмачев Г. Н. Результаты климато-экологического мониторинга на TOR-станции.
3. Атмосферный аэрозоль. — *Оптика атмосферы и океана*, 1995, т. 8, № 8, с. 1185—1190.
3. Белан Б. Д., Мелешкин В. Е., Мелешкина И. Е., Толмачев Г. Н. Результаты климато-экологического мониторинга на TOR-станции.
4. Газовый состав приземного воздуха. — *Оптика атмосферы и океана*, 1995, т. 8, № 6, с. 875—884.
4. Виноградова А. А. Элементный состав атмосферного аэрозоля Восточной Арктики. — *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 1996, т. 32, № 4, с. 479—486.
5. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология. — Л., Гидрометеиздат, 1991, 616 с.
6. Зуев В. Е., Белан Б. Д., Задде Г. О. Оптическая погода. — Новосибирск, Наука, 1990, 192 с.
7. Румянцев С. А., Ролдугин В. К. Удаление озона из приземного слоя атмосферы водными каплями. — *Метеорология и гидрология*, 1998, № 10, с. 38—44.
8. Хромов С. П. Основы синоптической метеорологии. — Л., Гидрометеиздат, 1948, 700 с.
9. Barry R. J. and Chang J. S. Theoretical prediction of local ozone maxima associated with the passage of cold fronts./ In: Proc. 18th NATO/CCMS Int. Technol. Meet Air Pollut. Model. and Its Appl., New York, London, 1991, pp. 161—168.
10. Sander R. and Crutzen P. J. Model study indicating halogen activation and ozone destruction in polluted air masses transported to the sea. — *J. Geophys. Res.*, 1996, vol. D101, No. 4, pp. 9121—9138.
11. Smyth S., Bradslaw J., and Sandholm S. Comparison of free tropospheric western Pacific air mass classification schemes for the PEM-West A experiment. — *J. Geophys. Res.*, 1996, vol. D101, No. 1, pp. 1742—1762.

Поступила
13 V 1999

AIR COMPOSITION CHANGE ASSOCIATED WITH THE PASSAGE OF FRONTS

B. D. Belan, G. O. Zadde, A. P. Plotnikov,
T. M. Rasskazchikova, and T. K. Sklyadneva

Aerosol, ozone, and carbon oxide concentration change during the passage of atmospheric fronts is analyzed. The gas concentration is shown to vary sharply. The sign of change is determined by the direction of the front motion. The amplitude varies from 20 to 65% and depends on the geographic type of front. The course of the aerosol concentration is more complicated and has maximums and minimums in the frontal zone, which evidently reflects the process of particle generation and sink.