

Блокирующая роль Уральских гор в трансграничном переносе примесей из Европы в Азию

П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов^{1,2},
Б.Д. Белан¹, С.Б. Белан¹, Д.К. Давыдов¹, Г.А. Ивлев¹,
А.В. Козлов¹, Т.М. Рассказчикова¹, А.В. Фофонов^{1*}

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

²Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 2.06.2010 г.

Дан анализ распределения примесей в регионе, примыкающем к Уральским горам, с целью поиска над территорией Сибири следов западноевропейских выбросов. Показано, что трансграничный перенос примесей из Европы в Азию по прямым траекториям (вдоль круга широты) с запада на восток возможен только в свободной тропосфере, в слое выше 2 км. В пределах пограничного слоя атмосферы поступление примесей из Европы в Сибирь возможно только по траекториям, огибающим Уральские горы с севера или юга.

Ключевые слова: аэрозоль, блок, газы, распределение, трансграничный перенос; aerosol, block, gases, distribution, transboundary carry.

Введение

Возможные негативные изменения глобального климата и окружающей среды вызывают необходимость поиска источников и стоков антропогенных выбросов, которые могут приводить к таким изменениям. Немаловажное значение при этом имеет и исследование распространения и трансформации примесей в атмосфере в процессе переноса. Этой задаче посвящен Российско-французский проект YAK-AEROSIB, в выполнении которого принимают участие и авторы настоящей статьи. Поскольку давно установлено, что на территории Западной Европы из-за высокой концентрации промышленности существует повышенный фон антропогенных выбросов и в северном полушарии наблюдается западно-восточный перенос, то целью проекта YAK-AEROSIB является поиск над территорией Сибири следов западноевропейских выбросов. Контроль осуществляется по парниковым (CO₂, CH₄), окисляющим атмосферу (CO, NO₂, O₃) газам и аэрозолю. Кроме измерений применяются численное моделирование и метод обратных траекторий, который хорошо зарекомендовал себя в ряде работ [1, 2].

Однако выполненные к настоящему времени эксперименты по проекту, результаты которых опубликованы в [3–7], не выявили прямых траекторий поступления примесей из Западной Европы в Сибирь вдоль круга широты. Если антропогенные примеси и фиксировались, то они поступали в Сибирь по северным либо южным траекториям. Причиной такого распространения примесей, по-видимому, является блокирующая роль Уральских гор, о чем свидетельствуют приводимые ниже данные, полученные в экспериментах 2009 г. Настоящая статья посвящена анализу распределения примесей в регионе, примыкающем к Уральским горам.

1. Описание эксперимента

Работы выполнялись на самолете-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» [8]. Описание использованного комплекса оборудования приведено в [9].

Схема маршрута полета Новосибирск–Уфа–Анапа приведена на рис. 1. Здесь же показан и вертикальный профиль полета.

Из рис. 1 видно, что вначале (до Уфы) полет проходил зонально, вдоль круга широты, а затем имел юго-западное направление. По вертикали было сделано несколько подъемов и спусков в диапазоне высот от 500 до 6000 м. Такой профиль полета позволил восстановить вертикальные разрезы атмосферы, что отличает данный эксперимент от большинства самолетных экспериментов.

Вылет в Анапу выполнен 3 июля, обратно 10 июля 2009 г. На обратном маршруте схема вертикального эшелонирования была подобной.

* Павел Николаевич Антохин; Виктория Геннадьевна Аршинова; Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан; Денис Константинович Давыдов (denic@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (Atommyk@mail2000.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова; Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

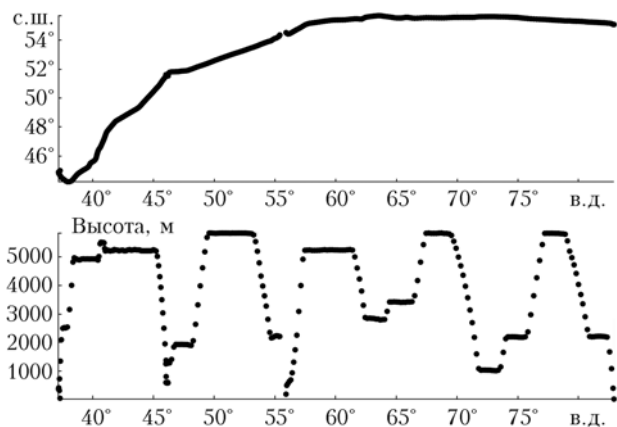


Рис. 1. Схема и вертикальный профиль полета по маршруту Новосибирск—Уфа—Анапа

2. Обработка данных и интерпретация результатов зондирования

Вначале остановимся на анализе вертикального распределения метеовеличин вдоль маршрута полета. Эти данные приведены на рис. 2 (*a* — в прямом направлении, *б* — в обратном).

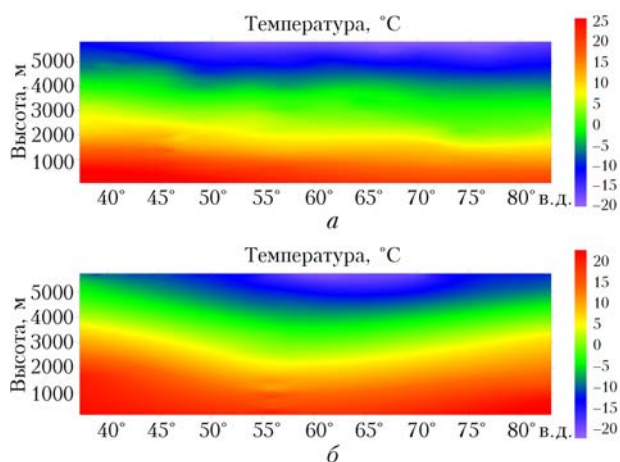


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры воздуха

Из рис. 2, *a* видно достаточно однородное распределение температуры атмосферы в первом полете. Можно отметить только различия в высоте слоя перемешивания над западными и восточными районами. Над западными он составляет около 2 км, над восточными 1,5–1,6 км, что является отражением различия в нагреве подстилающей поверхности в период эксперимента [10, 11]. За недельный период характер распределения температуры заметно изменился (рис. 2, *б*). Высота пограничного слоя выросла над западными и восточными районами и достигла уровня 3 км. В районе Уфы, как показал синоптический анализ, снижение происходило в холодном секторе циклона, где высота пограничного слоя оказалась значительно ниже — 2 км. В целом же полученные данные хорошо отражают известные закономерности распределения температуры воздуха в атмосфере [10, 11].

При достаточно однородном поле температуры поле относительной влажности оказалось не столь монотонным (рис. 3).

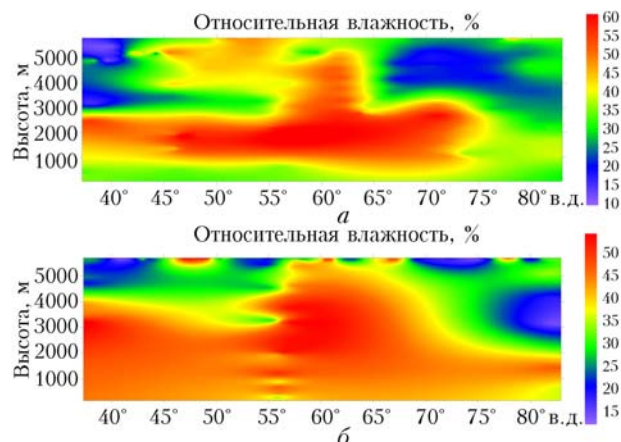


Рис. 3. Вертикальное распределение относительной влажности

В слое от 1 до 3 км виден заток влажного воздуха из западных районов вплоть до 75° в.д. в первом полете и далеко за 80° во втором. Кроме того, обращает на себя внимание, что в обоих зондированиях обнаруживается зона повышенной влажности около 60° в.д. Поскольку полеты проходили в разных синоптических условиях, а распределения подобны, то можно высказать предположение, что это является отражением действия местных факторов, а именно высокой увлажненности подстилающей поверхности Западно-Сибирской низменности [10, 11].

Более контрастно западно-восточный перенос проявляется в других, более консервативных примесях.

На обеих частях рис. 4 четко прослеживается поступление воздуха с высоким содержанием углекислого газа в свободной тропосфере из западных районов в восточные.

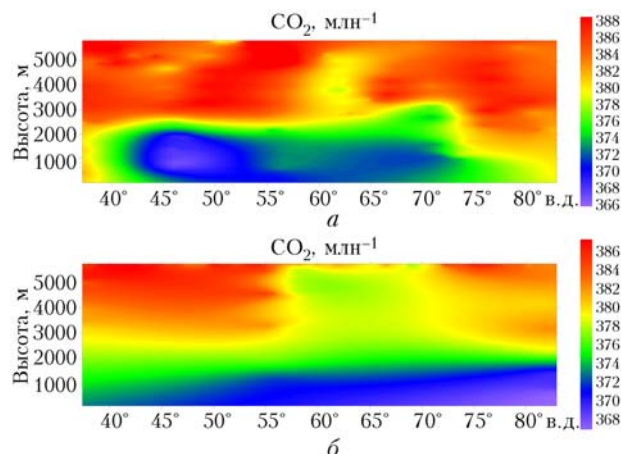


Рис. 4. Вертикальное распределение диоксида углерода

Поскольку зондирование проводилось летом, то в пограничном слое Зауралья, где много процессов, приводящих к его стоку из атмосферы (расти-

тельность), видно значительное уменьшение концентрации CO_2 . Это является отражением важности сибирских лесов в глобальном поглощении углекислого газа из атмосферы [12]. Причем, как это следует из рис. 4, б, этот процесс выходит за пределы пограничного слоя в свободную атмосферу.

Неоднородным является и поле озона, приведенное на рис. 5.

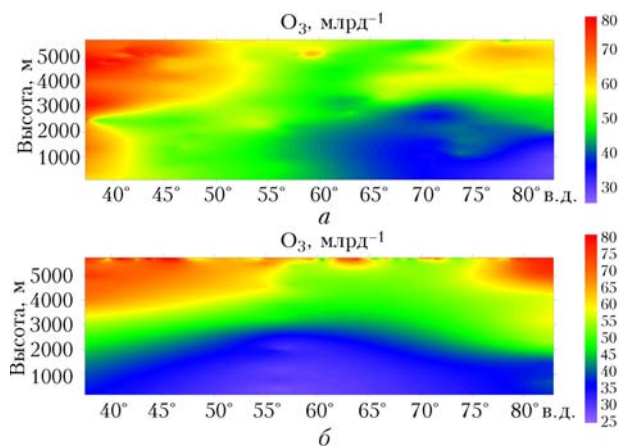
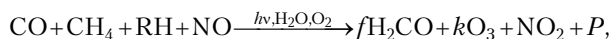


Рис. 5. Вертикальное распределение озона

Вертикальный разрез отражает хорошо известный факт увеличения содержания озона с высотой, что определяется расположением источника его генерации в стратосфере [13]. Вместе с тем в пограничном слое виден градиент концентрации, направленный с запада на восток. Это отражает фотохимическую генерацию озона в районах, обогащенных газами-предшественниками, и перенос его в системе западно-восточного переноса.

Одним из газов-предшественников озона является оксид углерода, о чем можно судить из брутто-уравнения [14]:



где f — стехиометрический коэффициент преобразования углеводородов; k — коэффициент выхода озона, зависящий от концентрации оксидов азота, которые переключают цепи его генерации; P — продукты фотохимических реакций, представляющие собой аэрозольные частицы, возникающие при взаимодействии газовых компонентов.

Физический смысл брутто-уравнения прозрачен: первичные примеси (CO — оксид углерода, CH_4 — метан, RH — неметановые углеводороды, NO — оксид азота), попадая в реальную атмосферу, в которой имеются водяной пар H_2O и кислород O_2 , под действием ультрафиолетового солнечного излучения $h\nu$ преобразуются в более токсичные соединения (H_2CO — формальдегид, O_3 — озон, NO_2 — диоксид азота и P — аэрозоль, часто содержащий такие токсичные соединения, как пероксиацетилнитраты (ПАН) и др.). Это брутто-уравнение не отражает промежуточных соединений — гидроксильных групп HO_x и переключающую роль

оксидов азота, зато наглядно показывает, из чего образуется тропосферный озон и какие факторы его определяют. Видно, что выход озона будет зависеть от двух составляющих: от концентрации исходных соединений, газов-предшественников и от интенсивности и спектрального состава солнечной радиации.

Из рис. 5 видно, что западнее Уральских гор, где имеются мощные источники газов-предшественников, концентрация озона заметно выше, чем над восточными районами. Виден также барьер, который представляют собой горы, протянувшиеся перпендикулярно набегающему потоку. Выше уровня 3 км наблюдается перенос воздуха, обогащенного озоном, из Европы в Азию в свободной тропосфере.

Одним из газов, являющихся источником озона и переходящих затем в парниковый газ CO_2 , является оксид углерода. Его распределение вдоль маршрута полета показано на рис. 6.

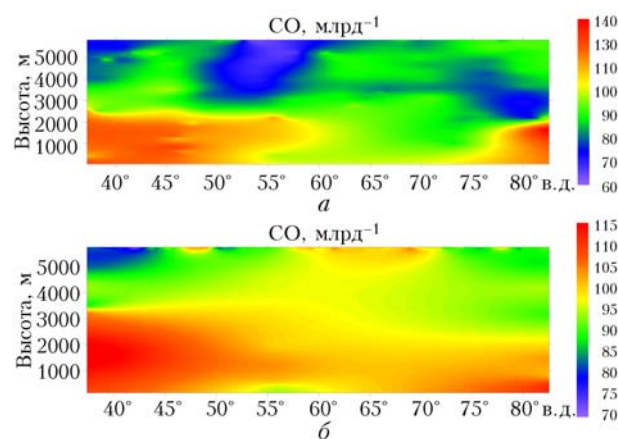


Рис. 6. Вертикальное распределение оксида углерода

Видно, что концентрация оксида углерода над регионом имеет очень низкие значения, характерные для фоновых районов [15–18]. Соответственно и генерация озона в нижних слоях атмосферы минимальна. Вместе с тем наблюдается очень четкий градиент концентрации, направленный из западных районов в восточные. Это, по-видимому, отражает наличие мощного антропогенного источника, каким является Западная Европа.

Хорошим индикатором переноса примесей является атмосферный аэрозоль. На рис. 7 четко прослеживается поступление воздуха с высоким содержанием аэрозоля в пределах пограничного слоя из западных районов в восточные. Здесь также можно отметить блокирующую роль Уральских гор, что проявляется в нижнем 2-км слое воздуха. Максимум концентрации в районе Новосибирска, скорее всего, обусловлен антропогенным вкладом, так как высота этой области не превышает уровень внутреннего слоя перемешивания [19].

Данные рис. 7 также указывают на то, что прямые траектории поступления примесей из Европы в Азию возможны только выше пограничного слоя атмосферы, в свободной тропосфере.

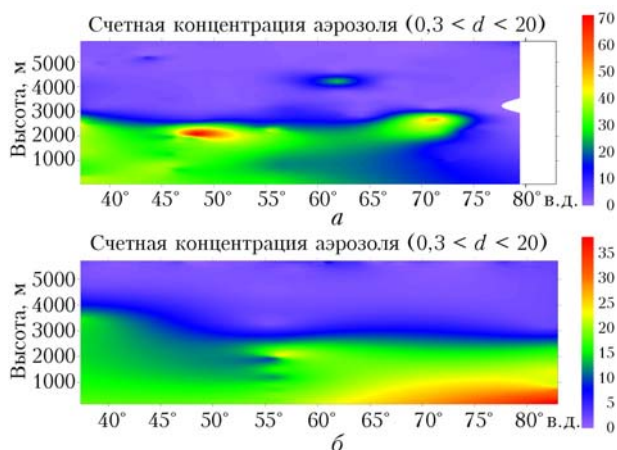


Рис. 7. Вертикальное распределение счетной концентрации аэрозоля ($0,3 < d < 20$ мкм)

Заключение

Следует отметить, что исследованию возмущающего действия гор на воздушный поток, набегающий на перпендикулярно расположенный хребет, посвящено достаточно много теоретических работ (см., например, [20–23]). В них, как правило, рассматриваются вихревые образования за препятствием. Перенос примесей за механической преградой, каковой являются горы, не анализируется. Процесс огибания преграды воздушным потоком, содержащим примеси, более или менее качественно рассмотрен в [24]. Экспериментальных работ, кроме эпизодического зондирования [25], обнаружить не удалось.

Приведенные выше данные указывают на то, что трансграничный перенос примесей из Европы в Азию по прямым траекториям (вдоль круга широты) с запада на восток возможен только в свободной тропосфере в слое выше 2 км. В пределах пограничного слоя атмосферы поступление примесей из Европы в Сибирь возможно только по траекториям, огибающим Уральские горы с севера или юга.

Работа выполнена при поддержке программ: Президиума РАН № 16 «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы», Отделения наук о Земле РАН № 5 «Наноразмерные частицы в природе и в техногенных продуктах: условия нахождения, физические и химические свойства и механизмы образования», гранта РФФИ № 08-05-92499, госконтрактов Роснауки № 02.518.11.7153, 02.740.11.0674 и 14.740.11.0204.

1. Виноградова А.А., Малков И.П., Назаров Б.И., Полиссар А.В. Об определении путей переноса антропогенного аэрозоля в северные районы // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1988. Т. 24, № 7. С. 680–686.
2. Виноградова А.А., Максименков Л.О., Погарский Ф.А. Изменения атмосферной циркуляции и загрязнения окружающей среды в Сибири от промышленных районов Норильска и Урала в начале XXI в. // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 527–534.

3. Paris J.-D., Ciais P., Nédélec P., Ramonet M., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Golytsin G. S., Granberg I., Athier G., Boumard F., Cousin J.-M., Cayez G., Stohl A. The YAK-AEROSIB transcontinental aircraft campaigns: new insights on the transport of CO₂, CO and O₃ across Siberia and in the Northern Hemisphere // Tellus B. 2008. V. 60, N 4. P. 551–568.
4. Paris J.-D., Arshinov M.Yu., Ciais P., Belan B.D., Nédélec P. Large-scale aircraft observations of ultra-fine and fine particle concentrations in the remote Siberian troposphere: New particle formation studies // Atmos. Environ. 2009. V. 43, N 6. P. 1302–1309.
5. Paris J.-D., Stohl A., Nédélec Ph., Arshinov M., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Law K.S., Belan B.D., Ciais Ph. Wildfire smoke in the Siberian Arctic in summer: source characterization and plume evolution from airborne measurements // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9, N 23. P. 9315–9327.
6. Paris J.-D., Stohl A., Ciais P., Nédélec P., Belan B.D., Arshinov M.Y., Ramonet M. Source-receptor relationships for airborne measurements of CO₂, CO and O₃ above Siberia: a cluster-based approach // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10, N 4. P. 1671–1687.
7. Paris J.-D., Ciais Ph., Nédélec Ph., Stohl A., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Carouge C., Golitsyn G., Granberg I.G. New insights on the chemical composition of the siberian air shed from the YAK-AEROSIB aircraft campaigns // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2010. V. 91, N 5. P. 1–17.
8. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И. Самолет-лаборатория АН-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5, № 10. С. 1012–1021.
9. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Шаманаев В.С., Шмargunov В.П. Самолет-лаборатория АН-30 «Оптик-Э»: 20 лет исследования окружающей среды // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 950–957.
10. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 360 с.
11. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 360 с.
12. Ершов Ю.И. Органическое вещество биосферы и почвы. Новосибирск: Наука, 2004. 104 с.
13. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 3. Содержание озона в тропосфере. Механизмы и факторы, его определяющие // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 7. С. 600–618.
14. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 1. Свойства и роль в природных и техногенных процессах // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 4. С. 299–322.
15. Delmas R.Y., Legrand M. Trends recorded in Greenland in relation with northern hemisphere anthropogenic pollution // IGACTiv Newslett. 1998. N 14. P. 19–22.
16. Assonov S.S., Brenninkmeijer C.A.M., Jöckel P., Mulvaney R., Bernard S., Chappellaz J. Evidence for CO increase in the SH during the 20th century based on firn air samples from Berkner Island, Antarctica // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7, N 2. P. 295–308.
17. Atmosphere trace gases that are radiatively active and significance to global change // Earth Quest. 1990. V. 4, N 2. P. 10–11.
18. Кароль И.Л. Современное состояние проблемы малых примесей в атмосфере и оценка их влияния на изме-

- нение глобального климата // Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука, 2002. С. 36–44.
19. *Белан Б.Д.* Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 8. С. 1044–1054.
 20. *Mesinger P.* A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models // Riv. Meteorol. Aeronaut. 1984. V. 44, N 1–4. P. 195–201.
 21. *McCauley M.P., Sturman A.P.* A study of orographic blocking and barrier wind development upstream of the Southern Alps, New Zealand // Meteorol. Atmos. Phys. 1999. V. 70, N 3–4. P. 121–131.
 22. *Botte V., Kay A.* A model of the wind-driven circulation in Lake Baikal // Dyn. Atmos. and Oceans. 2002. V. 35, N 2. P. 131–152.
 23. *Hertenstein R.F., Kuettner J.P.* Rotor types associated with steep lee topography: influence of the wind profile // Tellus A. 2005. V. 57, N 2. P. 117–135.
 24. *Скореп P.* Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: Мир, 1980. 552 с.
 25. *Елохов А.С., Груздев А.Н., Еланский Н.Ф.* Вариации общего содержания NO₂ над приполярным Уралом по наблюдениям с самолета // Изв. АН СССР, Физ. атмосф. и океана. 1988. Т. 24, № 7. С. 687–693.

P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, T.M. Rasskazchikova, and A.V. Fofonov. **The blocking role of the Ural mountains in the transboundary transfer of impurities from Europe to Asia.**

Present article is devoted to the analysis of distribution of impurity in the region adjoining the Ural mountains with the purpose of searching above territory of Siberia of traces of the West-European emissions. It is shown, that transboundary carry of impurity from Europe to Asia along direct trajectories (along a circle of latitude) from the west to the east is possible only in free troposphere, in a layer of 2 km higher. Within the limits of a boundary layer of the atmosphere the transfer of impurity from Europe to Siberia is probable only on the trajectories, which envelope the Ural mountains from the north or the south.