

УДК 551.510.42

Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 3. Продукты лесных пожаров

П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов¹, Б.Д. Белан¹,
С.Б. Белан¹, Н.Г. Воронцовская², А.К. Головкин², Д.К. Давыдов¹,
Г.А. Ивлев¹, А.В. Козлов¹, А.С. Козлов³, С.Б. Малышкин³,
Г.С. Певнева², Т.М. Рассказчикова¹, Д.Е. Савкин¹, Д.В. Симоненков¹,
Т.К. Складнева¹, Г.Н. Толмачев¹, А.В. Фофонов^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт химии нефти СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 4

³Институт химической кинетики и горения СО РАН им. В.В. Воеводского
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

Поступила в редакцию 23.03.2017 г.

Для определения вклада лесных пожаров в содержание органического компонента аэрозоля использованы данные двух летних кампаний, выполнявшихся по маршруту Новосибирск – Якутск – Новосибирск в 2012 и 2013 гг. Кампания 2012 г. проходила в условиях обширных лесных пожаров на территории Сибири, кампания 2013 г., наоборот, в фоновых условиях. Анализ отобранных проб аэрозоля показал, что концентрация органических соединений при пожарах по сравнению с фоновыми условиями возрастает в среднем до 35 раз в приземном слое воздуха и от 3 до 23 раз в свободной атмосфере. Состав органической компоненты в свободной атмосфере изменяется при пожарах в зависимости от района. На участке Томск – Мирный в составе аэрозольных частиц преобладают *n*-алканы $n\text{-C}_{19}\text{H}_{40}$ – $n\text{-C}_{21}\text{H}_{44}$; от Мирного до Якутска основной максимум концентраций приходится на высокомолекулярные соединения $n\text{-C}_{19}\text{H}_{40}$ – $n\text{-C}_{25}\text{H}_{52}$; на участке Братск – Новосибирск в составе частиц преобладают низкомолекулярные *n*-алканы $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$ – $n\text{-C}_{18}\text{H}_{38}$.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, состав, углеводороды; atmospheric aerosol, composition, hydrocarbons.

Введение

Первые следы лесных пожаров на Земле были обнаружены в палеоклиматологических данных и датируются периодом 350–400 млн лет тому назад [1]. В процессе горения биомассы во время лесных пожаров в атмосферу выбрасывается огромное коли-

чество газообразных и аэрозольных веществ, которые оказывают существенное влияние на качество воздуха и радиационные характеристики климатической системы [2–4]. Как показывают многочисленные исследования, объем выбрасываемых продуктов сгорания существенно зависит от географического положения региона, времени года, погодных условий [5–10]. В силу этого имеющиеся оценки количества выбрасываемых веществ значительно отличаются друг от друга и регулярно уточняются [11–13]. При этом важно отметить, что ежегодные вариации площадей лесных пожаров и интенсивности поступления в воздух продуктов сгорания меньше, чем тенденция роста антропогенных выбросов по аналогичным соединениям [2].

Основные сведения о составе и концентрации загрязняющих веществ в атмосфере дают наземные измерения. Такие данные делают возможными расчеты эмиссий аэрозольных и газовых соединений и оценку качества воздуха. Более полную информацию получают из результатов самолетного зондирования, которые позволяют построить трехмерную картину распределения продуктов сгорания растительности.

* Павел Николаевич Антохин (apn@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Наталья Геннадьевна Воронцовская (voronetskaia@ipc.tsc.ru); Анатолий Кузьмич Головкин (golovko@ipc.tsc.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Александр Сергеевич Козлов (kozlov@kinetics.nsc.ru); Сергей Борисович Малышкин (msb@ngs.ru); Галина Сергеевна Певнева (pevneva@ipc.tsc.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

Однако из-за сложности метода самолетного зондирования и его высокой стоимости таких измерений относительно немного [14–19]. Тем не менее это не снижает актуальность применения и в дальнейшем самолетных методов исследования атмосферы, в частности для изучения состава продуктов сгорания и их распространения в различных слоях атмосферы в периоды лесных пожаров.

В России в последние десятилетия зафиксированы семь очень мощных эпизодов лесных пожаров: в 2002 и 2010 гг. на Европейской территории, в 2012 г. в Западной и Восточной Сибири, включая Якутию, в 2014–2016 гг. в Прибайкалье и Бурятии. Европейские пожары к настоящему времени достаточно подробно исследованы [20–26]. Анализ сибирских пожаров выполнен лишь частично [27, 28]. Поэтому целью настоящей статьи является исследование распределения органических аэрозольных примесей во время лесных пожаров на территории Сибири в 2012 г.

Использованные методы и характеристика периода эксперимента

Для крупномасштабного исследования состава воздуха в различных слоях тропосферы над Си-

бирью использовался самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик». Его полное описание приведено в работе [29]. Зондирование выполнялось 31 июля и 1 августа 2012 г. по маршруту Новосибирск – Томск – Мирный – Якутск – Братск – Новосибирск. Маршрут состоял из пяти этапов в связи с необходимостью дозаправки самолета в аэропортах вышеупомянутых городов. Во время перелетов между городами самолет выполнял несколько подъемов (до высоты ≈8,2 км) и снижений до минимально безопасной для выполнения горизонтального полета высоты. Схема полета показана на рис. 1.

Методические аспекты отбора проб с борта самолета, методики анализа и идентификации соединений обсуждались нами ранее в [30, 31]. Ввиду низкого содержания органической компоненты в составе аэрозоля отбор проб производился во всем высотном слое, без разделения на поддиапазоны.

Летом 2012 г. большая часть территории Сибири была охвачена многочисленными лесными пожарами, что обусловило значительное загрязнение атмосферы продуктами горения. О сложившейся пожарной ситуации можно судить по табличным и графическим данным, полученным в Красноярском региональном управлении Министерства по чрезвычайным ситуациям РФ, за 31 июля и 1 августа 2012 г. (табл. 1, рис. 2, цв. вкладка).

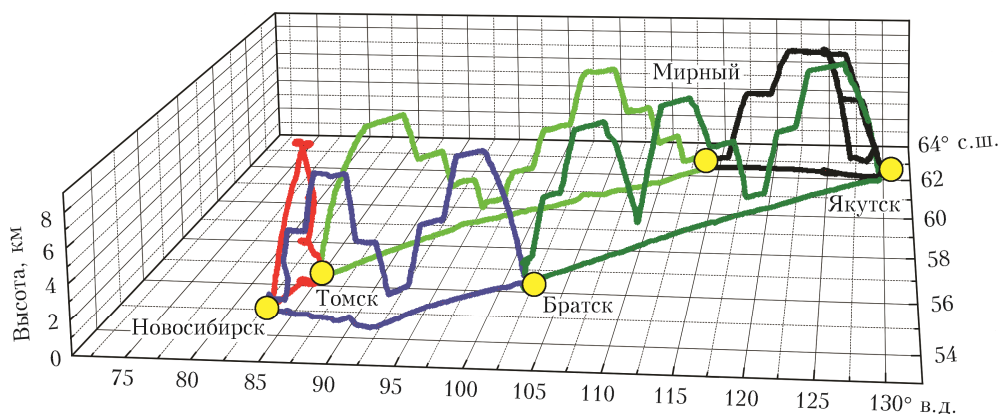


Рис. 1. Схема проведения зондирования атмосферы. Кружками показаны пункты посадок самолета на дозаправку

Таблица 1

Пожароопасная обстановка на территории Сибири 31.07 и 01.08.2012 г.

Федеральный округ	Субъект	Количество термических точек	Количество пожаров	Площадь пожарных очагов, га	Площадь горения, га
<i>31.07.2012 г.</i>					
Сибирский	Новосибирская обл.	2	1	4258	31709
	Томская обл.	54	21	15215	145660
	Красноярский край	733	220	263303	2360094
	Иркутская обл.	20	8	14522	17722
Дальневосточный	Республика Саха (Якутия)	744	164	428675	1560742
<i>01.08.2012 г.</i>					
Дальневосточный	Республика Саха (Якутия)	800	200	531521	1847748
Сибирский	Иркутская обл.	29	13	22659	32203
	Красноярский край	274	118	109395	1796093
	Республика Хакасия	2	1	309	352
	Кемеровская обл.	1	1	207	558
	Новосибирская обл.	н/д	н/д	н/д	н/д

О синоптической обстановке в период проведения эксперимента можно судить по карте, приведенной на рис. 3.

Анализ синоптической ситуации показывает, что аэрозоль отбирался в основном в условиях малоградиентного барического поля. Эти условия определяют незначительную скорость переноса и рассеяния загрязняющих веществ, что приводит к их накоплению в регионе. Нам не удалось найти сведений о распространении продуктов горения в результате пожаров в 2012 г. на другие регионы. Следы же пожаров 2014 и 2015 гг. были обнаружены на значительном удалении, в других странах [32, 33]. Накопление примесей хорошо видно по данным спутникового зондирования (<http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov>) общего содержания оксида углерода и аэрозоля (аэрозольной оптической толщи), представленными на рис. 4 (цв. вкладка).

Результаты и их обсуждение

Для определения вклада лесных пожаров в содержание органического компонента аэрозоля воспользуемся данными двух летних кампаний, выполнявшихся в рамках проекта YAK-AEROSIB в 2012 и 2013 гг. Кампания 2012 г. проходила в условиях обширных лесных пожаров на территории Сибири, кампания 2013 г., наоборот, в фоновых условиях. Сравним данные для одинаковых участков, на которых проводился отбор проб.

Из табл. 2 следует, что концентрация идентифицированной части органического компонента аэро-

Концентрация идентифицированной части органического компонента ($\text{нг}/\text{м}^3$) в составе аэрозоля, отобранного по маршруту Томск – Мирный – Якутск – Братск – Новосибирск в 2012 и 2013 гг.

Участок маршрута	Томск – Мирный	Мирный – Якутск	Братск – Новосибирск
2012 г.	18,535	36,778	25,482
2013 г.	5,459	1,613	7,156
Отношение 2012/2013	3,37	22,80	3,56

золя (нормальных углеводов суммарно) в условиях лесных пожаров существенно выше, чем в фоновых. Наибольшего значения ($36,778 \text{ нг}/\text{м}^3$) она достигает на участке Мирный – Якутск. При этом в фоновых условиях на данном участке фиксировалась наименьшая концентрация ($1,613 \text{ нг}/\text{м}^3$). Таким образом, содержание органических соединений в период лесных пожаров превышает их количество в фоновых условиях в 22,8 раза. На участках Томск – Мирный и Братск – Новосибирск также наблюдается превышение концентраций органического компонента аэрозоля в условиях лесных пожаров в 3,37 и 3,56 раза соответственно. В работе [34] показано, что концентрация органического компонента в дымовых условиях в 8 раз больше, чем в фоновых. Это среднее значение по сравнению с нашими результатами.

Если сопоставлять абсолютные значения концентрации органического компонента, полученные в настоящей работе, с результатами других авторов [35–38], то она оказывается существенно меньше.

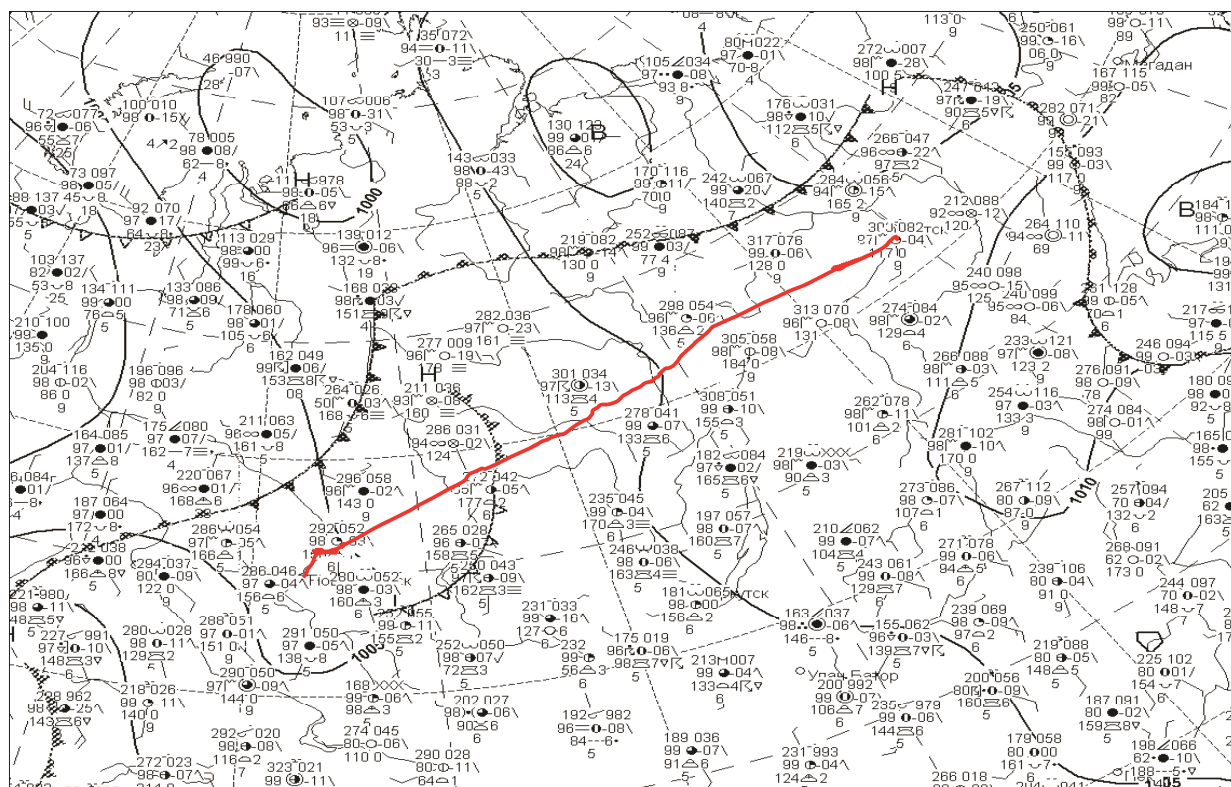


Рис. 3. Приземная карта погоды 31.07.2012 г.

Это может объясняться двумя причинами. В цитируемых работах отбор проб осуществлялся в приземном слое воздуха. Наши эксперименты проводились в свободной тропосфере и частично в пограничном слое атмосферы. По полученным ранее данным [39], изменение концентрации органического компонента с высотой происходит по экспоненциальному закону. Второй причиной может быть неполная идентификация органического компонента по используемым базам данных.

Перейдем к анализу органических соединений в составе аэрозольных частиц на выделенных выше участках маршрута.

На рис. 5 приведено вертикальное распределение счетной концентрации аэрозоля (NS) на участке Томск – Мирный. Видно, что на этом участке самолет-лаборатория пересек несколько шлейфов от лесных пожаров с максимальной счетной концентрацией 3250 см^{-3} . Обращает на себя внимание наличие слоев с повышенным содержанием аэрозоля в свободной тропосфере, на высотах 5, 6 и даже 8 км. Это существенно выше пограничного слоя атмосферы, который обычно ограничивается слоем инверсии, и требуется дополнительное воздействие для ее преодоления [40]. Возможно, что в данном случае происходит сложение термического эффекта из-за высокой температуры в очаге пожара и динамической вихревой компоненты [41].

Результаты анализа состава проб, отобранных по показанным на рис. 5 профилям, для фоновых и дымовых условий приведены на рис. 6.

Видно, что состав *n*-алканов в фоновых и дымовых условиях приблизительно одинаков и находится в диапазоне $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$ – $n\text{-C}_{24}\text{H}_{50}$. Вместе с тем в фоновых условиях максимум концентрации приходится

на гексадекан ($n\text{-C}_{16}\text{H}_{34}$), а в дымовых – на более высокомолекулярные алканы ($n\text{-C}_{19}\text{H}_{40}$ – $n\text{-C}_{21}\text{H}_{44}$). Насколько это закономерно, рассмотрим ниже.

На участке маршрута от Мирного до Якутска характер вертикального распределения аэрозоля изменился (рис. 7). Здесь в пограничном слое атмосферы (до 2,5 км) наблюдалась плотная дымка с концентрацией частиц $500\text{--}1400 \text{ см}^{-3}$. Шлейфы, с концентрацией до 4300 см^{-3} , наблюдались в средней тропосфере на уровнях от 3 до 5 км. Учитывая, что для переноса продуктов сгорания на эти высоты требуется достаточно много времени [40, 41], можно классифицировать такие шлейфы как «старые». Соответственно изменился и состав соединений, обнаруженных в аэрозоле (рис. 8).

Рис. 8 показывает, что на участке Мирный – Якутск концентрация органического компонента в фоновых условиях значительно меньше. Сужается также и диапазон соединений, входящих в состав аэрозоля ($n\text{-C}_{13}\text{H}_{28}$ – $n\text{-C}_{23}\text{H}_{48}$). В продуктах сгорания, наоборот, гомологический ряд алканов расширяется до $n\text{-C}_{29}\text{H}_{60}$. Максимум концентрации смещается в сторону более высокомолекулярных соединений и приходится на $n\text{-C}_{23}\text{H}_{48}$.

На следующем участке маршрута от Братска до Новосибирска также изменились высотное распределение аэрозоля и состав органических соединений (рис. 9 и 10).

На рис. 9 видно, что шлейфы лесных пожаров фиксировались на данном этапе полета вблизи верхней границы пограничного слоя атмосферы. В этом плане их можно назвать «свежими». Соответственно изменился и состав органических соединений, входящих в аэрозольные частицы (см. рис. 10).

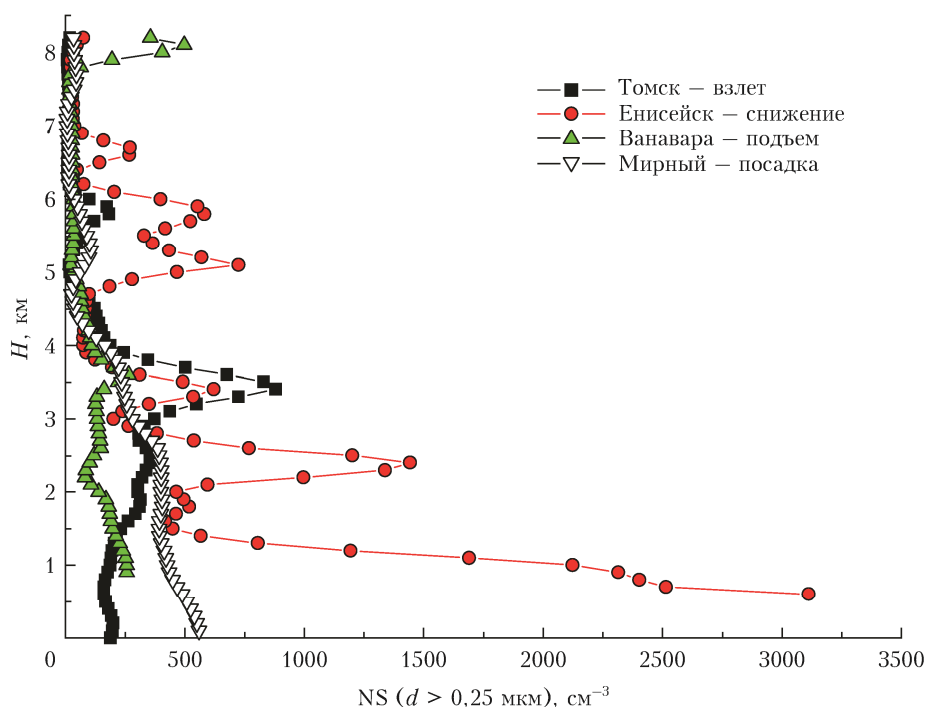


Рис. 5. Вертикальное распределение счетной концентрации аэрозоля на участке маршрута Томск – Мирный

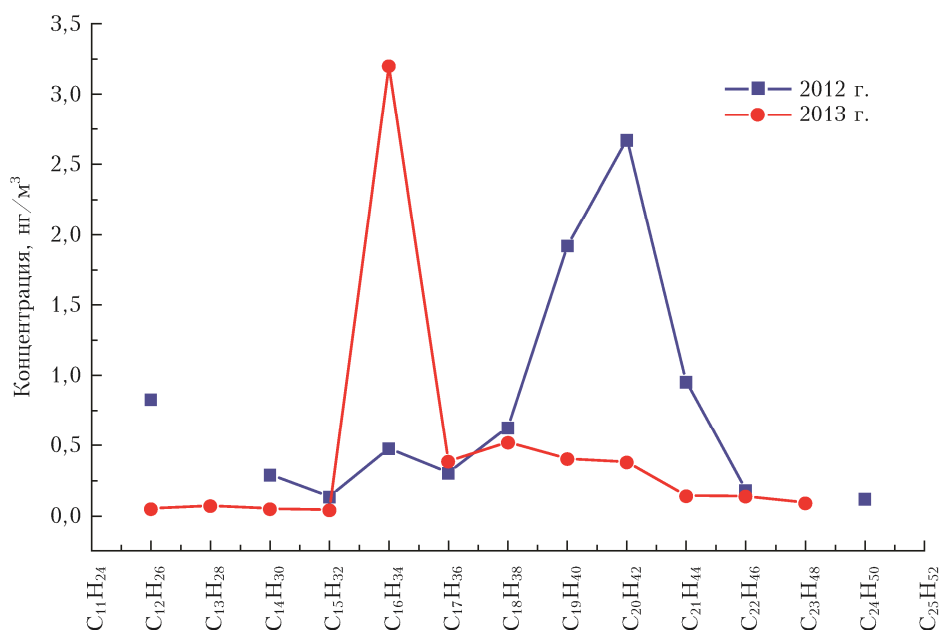


Рис. 6. Концентрации органических соединений (*n*-алканов) в составе аэрозоля на участке маршрута Томск – Мирный

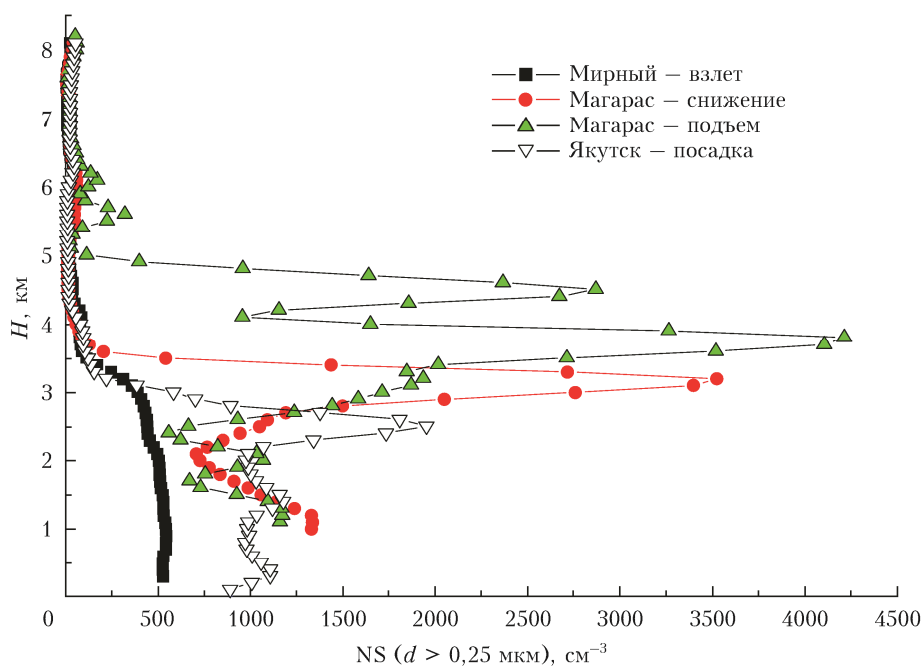


Рис. 7. Вертикальное распределение счетной концентрации аэрозоля на участке маршрута Мирный – Якутск

Рис. 10 демонстрирует, что на этом участке полета в дымовых продуктах в основном содержатся алканы $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26} - n\text{-C}_{18}\text{H}_{38}$. Это заметно отличается от данных, полученных для дымовых условий на других участках маршрута.

Идентифицированные нами соединения согласуются с результатам других авторов, исследовавших состав органических соединений в дымовых условиях [42–44]. Вместе с тем вариации состава органических соединений на разных участках полета показывают большую изменчивость и не позволяют уверенно выявить какую-нибудь закономерность.

Так, на участке Томск – Мирный в составе частиц преобладали углеводороды с средними молекулярными массами ($n\text{-C}_{19}\text{H}_{40} - n\text{-C}_{21}\text{H}_{44}$); от Мирного до Якутска основной максимум концентраций наблюдается в области более высокомолекулярных алканов ($n\text{-C}_{19}\text{H}_{40} - n\text{-C}_{25}\text{H}_{52}$). На участке Братск – Новосибирск в составе частиц преобладают легкие соединения ($n\text{-C}_{12}\text{H}_{26} - n\text{-C}_{18}\text{H}_{38}$). Наиболее вероятно это является отражением возраста дымовых продуктов. Как показано в цикле работ по измерениям характеристик дыма в большой аэрозольной камере [45–48], при «старении» дымовых продуктов проис-

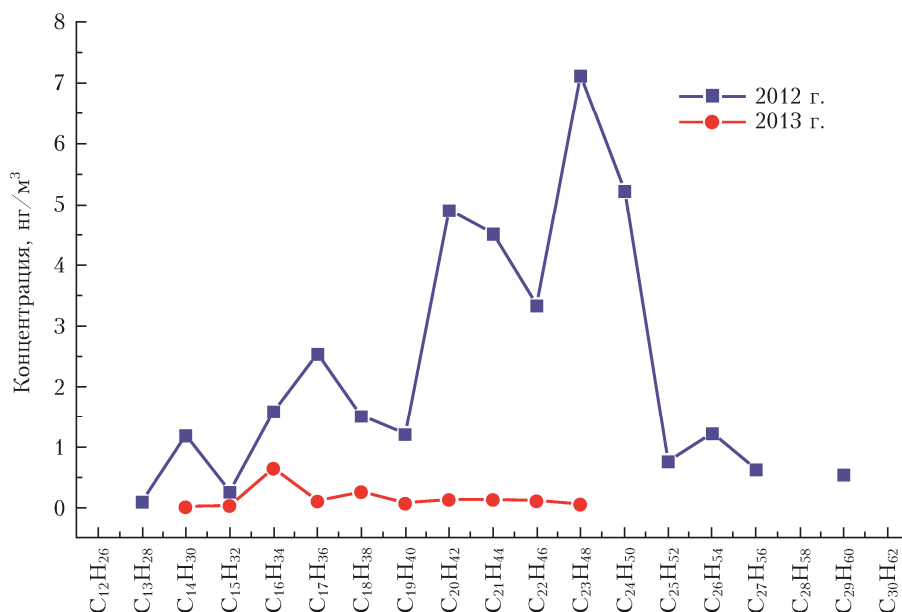


Рис. 8. Концентрации органических соединений (*n*-алканов) в составе аэрозоля на участке маршрута Мирный – Якутск

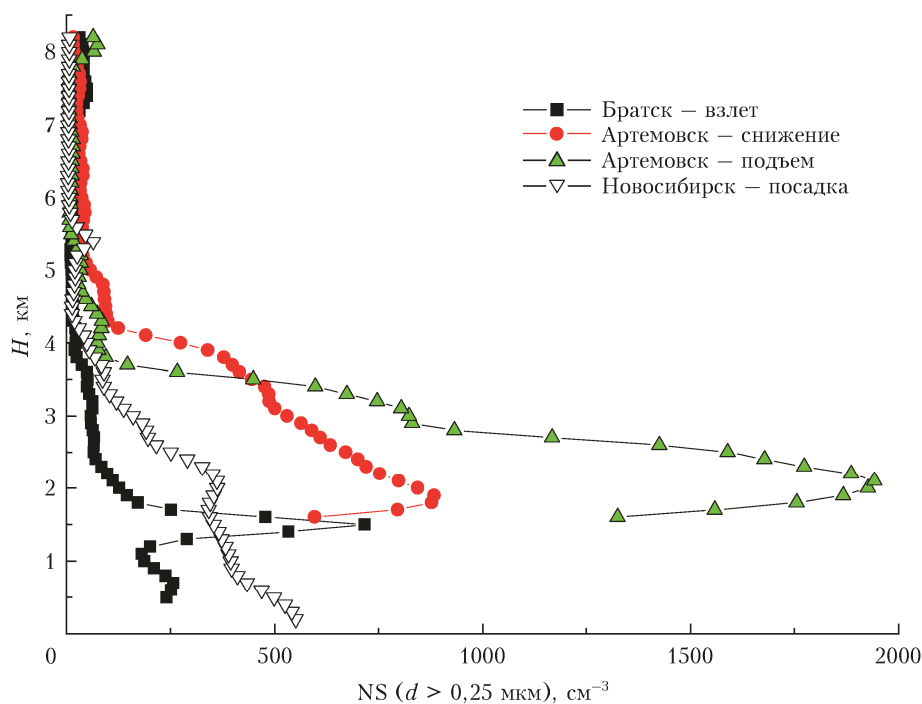


Рис. 9. Вертикальное распределение счетной концентрации аэрозоля на участке маршрута Братск – Новосибирск

ходят конденсация органических и неорганических соединений, трансформация поверхности частиц за счет химических реакций, их укрупнение. Подобный вывод содержится и в [49].

В районе Якутска при плотной дымке не наблюдалось очагов пожаров, т.е. поступления свежих продуктов вблизи маршрута не было. Между Братском и Новосибирском, наоборот, полет проходил вблизи очагов пожаров. Вероятно, по мере переноса продуктов сгорания происходит их трансформация из «свежих», более легких, в «старые», более тяжелые соединения. А возможно, это связано с видовым раз-

личием сгораемой растительности. Однако для однозначного ответа на эти вопросы необходимы специально поставленные эксперименты. Например, на рис. 11 приведены данные, полученные в приземном слое над п. Демьянское, отобранные с интервалом в три дня: первая проба – в фоновых условиях, вторая – при поступлении дыма от лесных пожаров.

Видно, что при поступлении дыма в воздухе повысилась концентрация всех соединений – от *n*-C₁₄H₃₀ до *n*-C₂₈H₅₈, т.е. всего диапазона от низко- до высокомолекулярных *n*-алканов. Общая концентрация органических соединений повысилась от 46,58

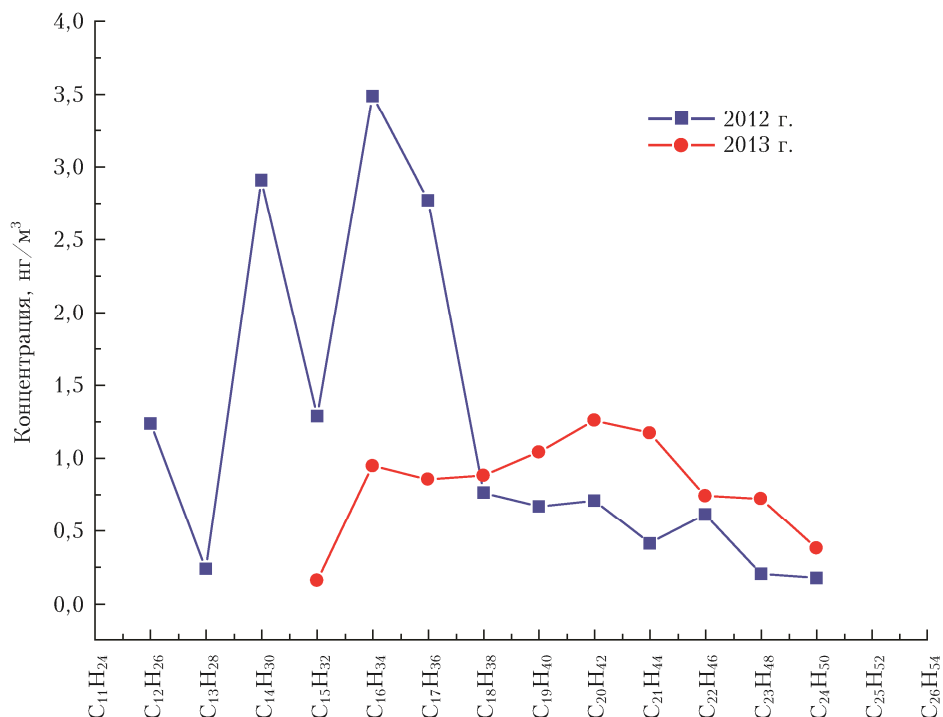


Рис. 10. Состав органических соединений (*n*-алканов) в составе аэрозоля на участке маршрута Братск – Новосибирск

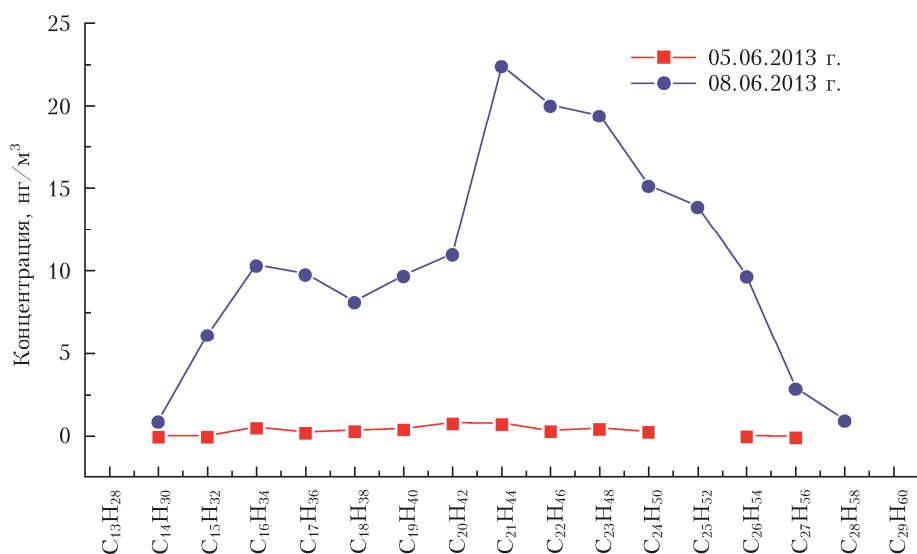


Рис. 11. Молекулярно-массовые распределения *n*-алканов аэрозолей приземного слоя воздуха в п. Демьянское в июне 2013 г.

до 160,79 ng/m^3 , т.е. в 35 раз. Возможно, что в реальной атмосфере работают оба предложенных механизма: выход продуктов зависит от вида растительности и происходит их трансформация при переносе в воздухе.

Заключение

Концентрация органических соединений при пожарах по сравнению с фоновыми условиями в Сибирском регионе возрастает в среднем до 35 раз в приземном слое воздуха и от 3 до 23 раз в свободной атмосфере.

Состав органической компоненты в свободной атмосфере изменяется при пожарах в зависимости от района. На участке Томск – Мирный в составе аэрозольных частиц преобладают *n*-алканы *n*-C₁₉H₄₀ – *n*-C₂₁H₄₄; от Мирного до Якутска основной максимум концентраций приходится на диапазон высокомолекулярных соединений *n*-C₁₉H₄₀ – *n*-C₂₅H₅₂; на участке Братск – Новосибирск в составе частиц преобладают низкомолекулярные *n*-алканы *n*-C₁₂H₂₆ – *n*-C₁₈H₃₈.

Работа выполнена при поддержке Комплексной программы фундаментальных научных исследований Сибирского отделения РАН «Интеграция и разви-

тие» на 2017 г., проектов IX.135–6 «Исследование изменений компонент воздуха Сибирского региона, определяющих динамику радиационно значимых характеристик атмосферы» и IX.135–9. «Наночастицы: условия образования в атмосфере», а также гранта РФФИ № 14-05-00526.

1. *Andreae M.O.* Biomass burning: Its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate // *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications* / J.S. Levine (ed.). MIT Press, Cambridge, Mass., 1991. P. 3–21.
2. *Lamarque J.-F., Bond T.C., Eyring V., Granier C., Heil A., Klimont Z., Lee D., Liousse C., Mieville A., Owen B., Schultz M.G., Shindell D., Smith S.J., Stehfest E., Van Aardenne J., Cooper O.R., Kainuma M., Mahowald N., McConnell J.R., Naik V., Riahi K., van Vuuren D.P.* Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: Methodology and application // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10, N 15. P. 7017–7039.
3. *Ito A., Sudo K., Akimoto H., Sillman S., Penner J.E.* Global modeling analysis of tropospheric ozone and its radiative forcing from biomass burning emissions in the twentieth century // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112, D24307. DOI: 10.1029/2007JD008745.
4. *Rap A., Spracklen D.V., Mercado L., Reddington C.L., Haywood J.M., Ellis R.J., Phillips O.L., Artaxo P., Bonal D., Restrepo Coupe N., Butt N.* Fires increase Amazon forest productivity through increases in diffuse radiation // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42, N 11. P. 4654–4662. DOI: 10.1002/2015GL063719.
5. *Ito A., Ito A., Akimoto H.* Seasonal and interannual variations in CO and BC emissions from open biomass burning in Southern Africa during 1998–2005 // *Global Biogeochem. Cycles.* 2007. V. 21, GB2011. DOI: 10.1029/2006GB002848.
6. *Van Drooge B.L., Sicard M., Stohl A., Fontal M., Bravo N., Munoz A., Lange D., Fernandez P., Grimalt J.O.* Detection and simulation of wild fire smoke impacting a Mediterranean urban atmosphere // *Atmos. Pollut. Res.* 2016. V. 7, N 3. P. 494–502.
7. *Yang M.Y.M., Vay S.A., Stoh A., Choi Y., Diskin G.S., Sachse G.W., Blake D.R.* Chemical composition of tropospheric air masses encountered during high altitude flights (11.5 km) during the 2009 fall Operation Ice Bridge field campaign // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, D17306. DOI: 10.1029/2012JD017858.
8. *Strode S.A., Pawson S.* Detection of carbon monoxide trends in the presence of interannual variability // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118, N 21. P. 12257–12273. DOI: 10.1002/2013JD020258.
9. *Vasileva A., Moiseenko K.* Methane emissions from 2000 to 2011 wildfires in Northeast Eurasia estimated with MODIS burned area data // *Atmos. Environ.* 2013. V. 71. P. 115–121.
10. *Williamson G.J., Prior L.D., Jolly W.M., Cochrane M.A., Murphy B.P., Bowman D.M.J.S.* Measurement of inter- and intra-annual variability of landscape fire activity at a continental scale: The Australian case // *Environ. Res. Lett.* 2016. V. 11, N 3. 035003.
11. *Allen G.* Rebalancing the global methane budget // *Nature (Gr. Brit.).* 2016. V. 538, N 7623. P. 46–48.
12. *Schwietzke S., Sherwood O.A., Bruhwiler L.M.P., Miller J.B., Etiope G., Dlugokencky E.J., Michel S.E., Arling V.A., Vaughn B.H., White J.W.C., Tans P.P.* Upward revision of global fossil fuel methane emissions based on isotope database // *Nature (Gr. Brit.).* 2016. V. 538, N 7623. P. 88–91.
13. *Abbott B.W., Jones J.B., Schuur E.A.G., Chapin III F.S., Bowden W.B., Bret-Harte M.S., Epstein H.E., Flannigan M.D., Harms T.K., Hollingsworth T.N., Mack M.C., McGuire A.D., Natali S.M., Rocha A.V., Tank S.E., Turetsky M.R., Vonk J.E., Wickland K.P., Aiken G.R., Alexander H.D., Amon R.M.W., Benscoter B.W., Bergeron Y., Bishop K., Blarquez O., Bond-Lamberty B., Breen A.L., Buffam I., Cai Y., Carcaillet Ch., Carey S.K., Chen J.M., Chen H.Y.H., Christensen T.R., Cooper L.W., Cornelissen J.H.C., de Groot W.J., DeLuca T.H., Dorrepaal E., Fetcher N., Finlay J.C., Forbes B.C., French N.H.F., Gauthier S., Girardin M.P., Goetz S.J., Goldammer J.G., Gough L., Grogan P., Guo L., Higuera P.E., Hinzman L., Hu F.S., Hugelius G., Jafarov E.E., Jandt R., Johnstone J.F., Karlsson J., Kasischke E.S., Kattner G., Kelly R., Keuper F., Kling G.W., Kortelainen P., Kouki J., Kuhry P., Laudon H., Laurion I., Macdonald R.W., Mann P.J., Martikainen P.J., McClelland J.W., Molau U., Oberbauer S.F., Olefeldt D., Paré D., Parisien M.-A., Payette S., Peng C., Pokrovsky O.S., Rastetter E.B., Raymond P.A., Reynolds M.K., Rein G., Reynolds J.F., Robards M., Rogers B.M., Schädel C., Schaefer K., Schmidt I.K., Shvidenko A., Sky J., Spencer R.G.M., Starr G., Striegl R.G., Teisserenc R., Tranvik L.J., Virtanen T., Welker J.M., Zimov S.* Biomass offsets little or none of permafrost carbon release from soils, streams, and wildfire: An expert assessment // *Environ. Res. Lett.* 2016. V. 11, N 3. 034014.
14. *Bian H., Colarco P.R., Chin M., Chen G., Rodriguez J.M., Liang Q., Blake D., Chu D.A., da Silva A., Darmenov A.S., Diskin G., Fuelberg H.E., Huey G., Kondo Y., Nielsen J.E., Pan X., Wisthaler A.* Source attributions of pollution to the Western Arctic during the NASA ARCTAS field campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 9. P. 4707–4721.
15. *Palmer P.I., Parrington M., Lee J.D., Lewis A.C., Rickard A.R., Bernath P.F., Duck T.J., Waugh D.L., Tarasick D.W., Andrews S., Aruffo E., Bailey L.J., Barrett E., Bauguutte S.J.-B., Curry K.R., Carlo P.D., Chisholm L., Dan L., Forster G., Franklin J.E., Gibson M.D., Griffin D., Helmig D., Hopkins J.R., Hopper J.T., Jenkin M.E., Kindred D., Kliever J., Le Breton M., Matthiesen S., Maurice M., Moller S., Moore D.P., Oram D.E., O'Shea S.J., Owen R.C., Pagniello C.M.L.S., Pawson S., Percival C.J., Pierce J.R., Punjabi S., Purvis R.M., Remedios J.J., Rotermund K.M., Sakamoto K.M., da Silva A.M., Strawbridge K.B., Strong K., Taylor J., Trigwell R., Tereszchuk K.A., Walker K.A., Weaver D., Whaley C., Young J.C.* Quantifying the impact of BOREAL forest fires on Tropospheric oxidants over the Atlantic using Aircraft and Satellites (BORTAS) experiment: Design, execution and science overview // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 13. P. 6239–6261.
16. *O'Shea S.J., Allen G., Gallagher M.W., Bauguutte S.J.-B., Illingworth S.M., Le Breton M., Muller J.B.A., Percival C.J., Archibald A.T., Oram D.E., Parrington M., Palmer P.I., Lewis A.C.* Airborne observations of trace gases over boreal Canada during BORTAS: Campaign climatology, air mass analysis and enhancement ratios // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 24. P. 12451–12467.
17. *Law K.S., Stohl A., Quinn P.K., Brock C.A., Burkhardt J.F., Paris J.-D., Ancellet G., Singh H.B., Roiger A., Schlager H., Dibb J., Jacob D.J., Arnold S.R., Pelon J., Thomas J.L.* Arctic Air Pollution. New Insights from POLARCAT-IPY // *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2014. V. 95, N 12. P. 1873–1895.
18. *Virkkula A., Pohja T., Aalto P.P., Keronen P., Schobesberger S., Clements C.B., Petäjä T., Nikmo J., Kulmala M.*

- Airborne measurements of aerosols and carbon dioxide during a prescribed fire experiment at a boreal forest site // *Boreal Environ. Res.* 2014. V. 19, suppl. B. P. 153–181.
19. Basso L.S., Gatti L.V., Gloor M., Miller J.B., Domingues L.G., Correia C.S.C., Borges V.F. Seasonality and interannual variability of CH₄ fluxes from the eastern Amazon Basin inferred from atmospheric mole fraction profiles // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121, N 1. P. 168–184. DOI: 10.1002/2015JD023874.
 20. Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В. Оценки эмиссий монооксида углерода от природных пожаров в Северной Евразии в приложении к задачам регионального атмосферного переноса и климата // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2010. Т. 46, № 3. С. 307–320.
 21. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б., Березина Е.В., Елохов А.С., Иванов В.А., Панкратова Н.В., Постыляков О.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 6. С. 729–738.
 22. Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Миллер Е.А., Миляев В.А., Попиков А.П., Семутникова Е.Г., Тарасова О.А., Шальгина И.Ю. Загрязнение воздуха на Европейской части России и Украине в условиях жаркого лета 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 6. С. 757–766.
 23. Чубарова Н.Е., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловецова О.А. Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных и торфяных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмосковье // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 6. С. 790–800.
 24. Фокеева Е.В., Сафронов А.Н., Ракитин В.С., Юрганов Л.Н., Гречко Е.И., Шумский Р.А. Исследование влияния пожаров в июле–августе 2010 г. на загрязнение окисью углерода атмосферы Москвы и окрестностей // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 6. С. 739–756.
 25. Krol M., Peters W., Hooghiemstra P., George M., Clerbaux C., Hurtmans D., McInerney D., Sedano F., Bergamaschi P., El Hajj M., Kaiser J.W., Fisher D., Yershov V. How much CO was emitted by the 2010 fires around Moscow? // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 9. P. 4737–4747.
 26. Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Сизов Н.И., Акименко Р.М., Упэнэк Л.Б. Фоновая составляющая окиси углерода в приземном воздухе (станция мониторинга «Обнинск») // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2016. Т. 52, № 3. С. 281–287.
 27. Складнева Т.К., Ивлев Г.А., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Симоненков Д.В. Радиационный режим Томска в условиях дымной мглы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 3. С. 215–222.
 28. Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Васильева А.В., Хайманн М. Источники и вариации тропосферного СО в Центральной Сибири: численные эксперименты и наблюдения на высотной мачте ZOTTO // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2016. Т. 52, № 1. С. 51–63.
 29. Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсук В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сиков Г.П., Симоненков Д.В., Сеницын Д.С., Толмачев Г.Н., Филиппов Д.В., Фофонов А.В., Чернов Д.Г., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
 30. Воронцовская Н.Г., Певнева Г.С., Головки А.К., Козлов А.С., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. Углеводородный состав тропосферного аэрозоля юга Западной Сибири // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 6. С. 496–505; *Voronetskiy N.G., Pevneva G.S., Golovko A.K., Kozlov A.S., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N.* Hydrocarbon composition of tropospheric aerosol in the South of Western Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 6. P. 547–557.
 31. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронцовская Н.Г., Головки А.К., Давыдов Д.К., Козлов А.С., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофонов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 1. Географические особенности и временная динамика // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 716–722.
 32. Jung J., Lyu H., Lee M., Hwang T., Lee S., Oh S. Impact of Siberian forest fires on the atmosphere over the Korean Peninsula during summer 2014 // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 11. P. 6757–6770.
 33. Laing J.R., Jaffe D.A., Hee J.R. Physical and optical properties of aged biomass burning aerosol from wildfires in Siberia and the Western USA at the Mt. Bachelor Observatory // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 23. P. 15185–15197.
 34. Engling G., He J., Betha R., Balasubramanian R. Assessing the regional impact of Indonesian biomass burning emissions based on organic molecular tracers and chemical mass balance modeling // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 15. P. 8043–8054.
 35. Takahama S., Schwartz R.E., Russell L.M., Macdonald A.M., Sharma S., Leaitch W.R. Organic functional groups in aerosol particles from burning and non-burning forest emissions at a high-elevation mountain site // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 13. P. 6367–6386.
 36. Corrigan A.L., Russell L.M., Takahama S., Äyälä M., Ehn M., Junninen H., Rinne J., Petäjä T., Kulmala M., Vogel A.L., Hoffmann T., Ebben C.J., Geiger F.M., Chhabra P., Seinfeld J.H., Worsnop D.R., Song W., Auld J., Williams J. Biogenic and biomass burning organic aerosol in a boreal forest at Hyytiälä, Finland, during HUMPPA-COPEC 2010 // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 24. P. 12233–12256.
 37. Brito J., Rizzo L.V., Morgan W.T., Coe H., Johnson B., Haywood J., Longo K., Freitas S., Andreae M.O., Artaxo P. Ground-based aerosol characterization during the South American Biomass Burning Analysis (SAMBBA) field experiment // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 22. P. 12069–12083.
 38. Smolyakov B.S., Makarov V.I., Shinkorenko M.P., Porova S.A., Bizin M.A. Effects of Siberian wildfires on the chemical composition and acidity of atmospheric aerosols of remote urban, rural and background territories // *Environ. Pollut.* 2014. V. 188. P. 8–16.
 39. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Воронцовская Н.Г., Головки А.К., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофонов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 2. Вертикальное распределение // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 9. С. 733–739.
 40. Будыко М.И., Голицын Г.С., Израэль Ю.А. Глобальные климатические катастрофы. М.: Гидрометеопиздат, 1986. 160 с.
 41. Ингель Л.Х. К теории конвективных струй и термиков в атмосфере // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2016. Т. 52, № 6. С. 676–680.
 42. Hornbrook R.S., Blake D.R., Diskin G.S., Fried A., Fuelberg H.E., Meinardi S., Mikoviny T., Richter D., Sa-

- chse G.W., Vay S.A., Walega J., Weibring P., Weinheimer A.J., Wiedinmyer C., Wisthaler A., Hills A., Riemer D.D., Apel E.C. Observations of nonmethane organic compounds during ARCTAS – Part 1: Biomass burning emissions and plume enhancements // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 21. P. 11103–11130.
43. Yee L.D., Kautzman K.E., Loza C.L., Schilling K.A., Coggon M.M., Chhabra P.S., Chan M.N., Chan A.W.H., Hersey S.P., Crouse J.D., Wennberg P.O., Flagan R.C., Seinfeld J.H. Secondary organic aerosol formation from biomass burning intermediates: Phenol and methoxyphenols // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 16. P. 8019–8043.
44. Urban R.C., Alves C.A., Allen A.G., Cardoso A.A., Campos M.L.A.M. Organic aerosols in a Brazilian agro-industrial area: Speciation and impact of biomass burning // *Atmos. Res.* 2016. V. 169. P. 271–279.
45. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Панченко М.В. Оптико-микрофизические свойства смешанных дымов от нескольких разнесенных источников // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 8. С. 675–683.
46. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Оптические и микрофизические свойства смешанного дыма по данным поляризационных спектро-нефелометрических измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 1. С. 59–68.
47. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Панченко М.В., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Свойства атмосферного аэрозоля в дымовых шлейфах лесных пожаров по данным спектро-нефелометрических измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 2. С. 126–133; *Rakhimov R.F., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Tumakov A.G., Shmargunov V.P.* Properties of atmospheric aerosol in smoke plumes from forest fires according to spectronephelometer measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 3. P. 275–282.
48. Поповичева О.Б., Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П., Куреева Е.Д., Персианцева Н.М., Тимофеев М.А., Engling G., Elephteriadis K., Diapouli L., Панченко М.В., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J. Оптико-микрофизические и физико-химические характеристики дымов горения сибирских биомасс: эксперименты в аэрозольной камере // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 4. С. 323–331; *Popovicheva O.B., Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P., Kireeva E.D., Persiantseva N.M., Timofeev M.A., Engling G., Elephteriadis K., Diapouli L., Panchenko M.V., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J.* Optical-microphysical and physical-chemical characteristics of smokes from Siberian biomass burning: Experiment in aerosol chamber // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 6. P. 492–500.
49. Forrister H., Liu J., Scheuer E., Dibb J., Ziemba L., Thornhill K.L., Anderson B., Diskin G., Perring A.E., Schwarz J.P., Campuzano-Jost P., Day D.A., Palm B.B., Jimenez J.L., Nenes A., Weber R.J. Evolution of brown carbon in wildfire plumes // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42, N 11. P. 4623–4630.

P.N. Antohin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, N.G. Voronetskaya, A.K. Golovko, D.K. Davydov, G.A. Iulev, A.V. Kozlov, A.S. Kozlov, S.B. Malyshkin, G.S. Pevneva, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmacheva, A.V. Fofonov. **Organic aerosol in air of Siberia and the Arctic. Part 3. Forest fire products.**

The contribution of wildfires into the content of the organic component of aerosol is studied on the basis of data of two flight campaigns carried out along the route Novosibirsk – Yakutsk – Novosibirsk in 2012 and 2013. The campaign of 2012 took place under conditions of extensive wildfires in Siberia, the campaign of 2013, on the contrary, in background conditions. The analysis of the selected aerosol samples shows that concentration of organic compounds during fires increases on the average by 35 times in the surface air layer and from 3 to 23 times in the free atmosphere in comparison with the background conditions. The composition of the organic component in the free atmosphere during fires changes depending on the region. At the Tomsk – Mirnyi segment, alkanes $n\text{-C}_{19}\text{H}_{40}$ – $n\text{-C}_{21}\text{H}_{44}$ prevailed in the aerosol samples; from Mirnyi to Yakutsk, the main concentration peak fell in the range of high-molecular compounds $n\text{-C}_{19}\text{H}_{40}$ – $n\text{-C}_{25}\text{H}_{52}$; at the Bratsk – Novosibirsk segment, low-molecular alkanes $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$ – $n\text{-C}_{18}\text{H}_{38}$ prevailed in the aerosol composition.

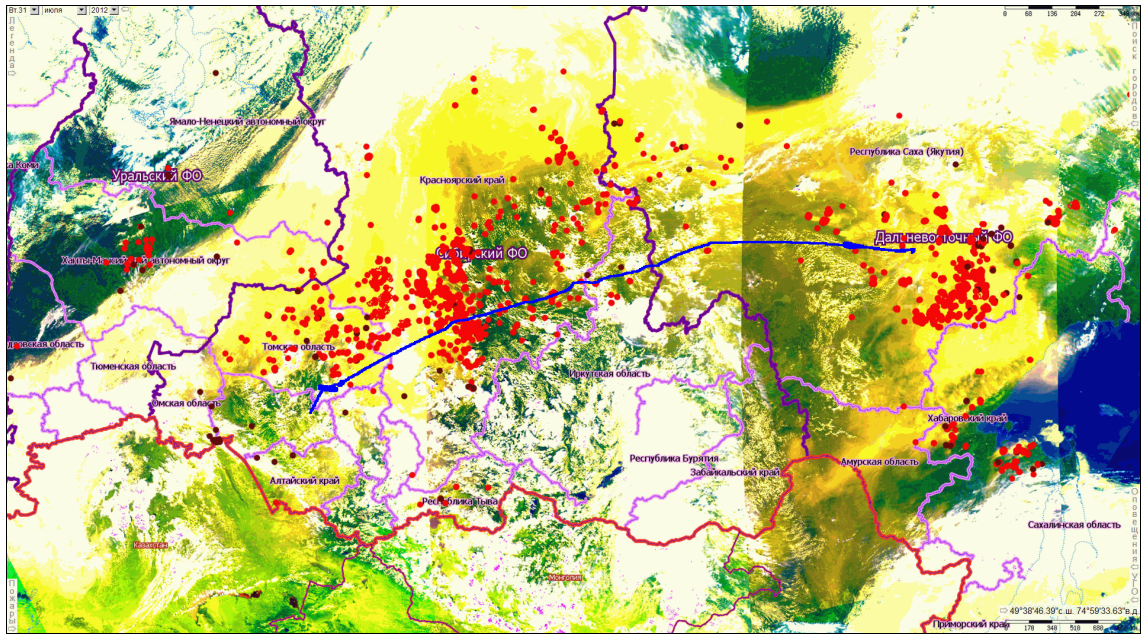


Рис. 2. Карта термических точек и дымов от пожаров 31.07.2012 г. и маршрут полета самолета-лаборатории Новосибирск – Томск – Мирный – Якутск

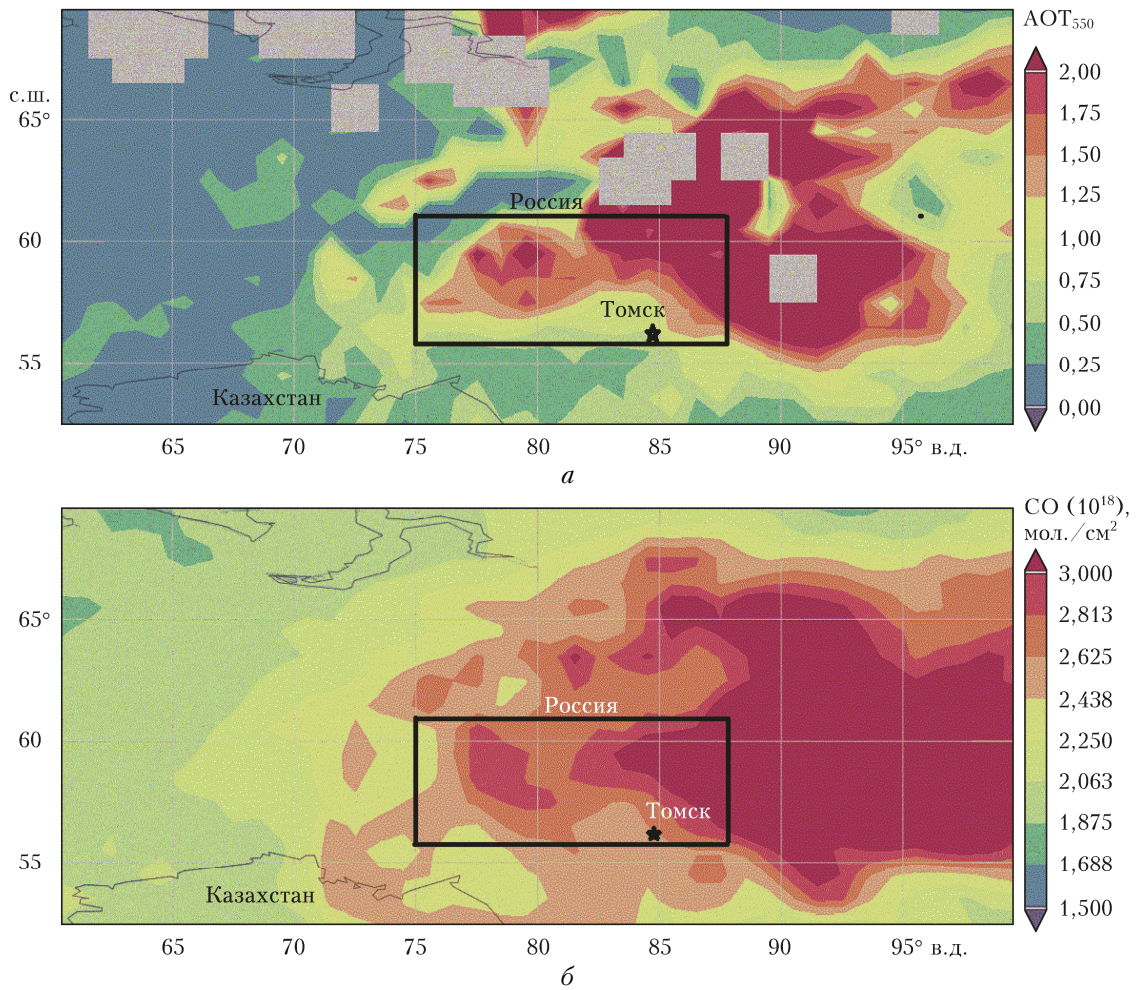


Рис. 4. Пространственное распределение АОТ (а) и СО (б) 29 июля – 6 августа 2012 г.