

## Эпизоды аномально высокой концентрации черного углерода в приземном воздухе в районе станции Тикси, Якутия

А.А. Виноградова<sup>1</sup>, Т.Б. Титкова<sup>2</sup>, Ю.А. Иванова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

<sup>2</sup>Институт географии РАН  
119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29

Поступила в редакцию 11.07.2018 г.

Анализируются данные измерений концентрации черного углерода (black carbon – BC) в 2012–2014 гг. в приземном воздухе в районе арктической международной обсерватории Тикси, расположенной вблизи дельты р. Лены. Выявлены вариации концентрации BC разных масштабов и разной длительности. Показано, что аномальные максимумы концентрации BC (выше 1000 нг/м<sup>3</sup>) встречаются редко, преимущественно в «теплое» время года (май – сентябрь), продолжительность их не превышает 2 сут. Наиболее длительные эпизоды высокой концентрации BC связаны с дальним атмосферным переносом продуктов горения от районов природных пожаров. Во время этих эпизодов в приземной атмосфере значительно изменяются температура воздуха и радиационный баланс. Повышение температуры приземного воздуха (при климатической норме 10–11 °С) в дни поступления дымового аэрозоля от ближайших пожаров в июле может достигать 10 °С.

*Ключевые слова:* атмосфера, черный углерод, Арктика, Тикси, дальний перенос в атмосфере, источники черного углерода, радиационный баланс, температура воздуха; atmosphere, black carbon (BC), Arctic, Tiksi, long-range atmospheric transport, BC sources, radiative balance, near surface air temperature.

### Введение

Климатические изменения, происходящие на планете в XXI в., наиболее ярко проявляются в Арктике [1], при этом климат арктического региона заметно влияет на климат всего Северного полушария [2]. Черный углерод (black carbon – BC), содержащийся на аэрозольных частицах, является одной из короткоживущих (по сравнению с парниковыми газами) климатообразующих составляющих атмосферы (Short Lived Climate Component) [3]. Непосредственно с поглощением солнечного излучения связан прямой радиационный эффект BC в атмосфере (фактически – ее нагрев), в то время как некоторые другие свойства частиц углерода (например, его гигроскопичность) приводят к проявлению вторичных радиационных эффектов, обусловленных ростом и кластеризацией аэрозольных частиц, образованием капель и облаков.

Черный углерод появляется в воздухе как результат выбросов при неполном сгорании углеродсодержащих веществ на поверхности планеты. Поэтому источники атмосферного BC могут быть как антропогенные (промышленные предприятия, транс-

порт, бытовое оборудование, факелы сжигания попутного газа при нефте- и газодобыче), так и природного/антропогенного происхождения (травяные или лесные пожары). Все эти источники BC представлены на территории Северной Евразии очень неравномерно в пространстве и во времени, и их эмиссии в атмосферу могут быть перенесены воздушными массами в Арктику [4–6].

Измерения концентрации BC в приземном воздухе проводятся лишь в некоторых пунктах Евразии – как в Арктике [7–9], так и в более южных широтах (Томск [10], Москва [11], Пекин [12], Белое море [13]). При этом используемые аппаратура и методика анализа различны, что дает ряды данных с разным временным разрешением (от 5 мин до 1 нед). Такие данные могут использоваться для разных целей: от оценки среднего уровня содержания BC в атмосфере и пространственных полей его возможных источников до выявления отдельных источников, локализованных в пространстве и во времени, и оценок атмосферных параметров при наличии дымового аэрозоля.

Российская Арктика, охватывающая огромную территорию, недостаточно обеспечена станциями, осуществляющими регулярный мониторинг состава и состояния окружающей среды. В связи с этим наблюдения, которые проводятся с начала 2010-х гг. в международной обсерватории Тикси [14], предос-

\* Анна Александровна Виноградова (anvinograd@yandex.ru); Татьяна Борисовна Титкова (ttitkova@yandex.ru); Юлия Алексеевна Иванова (ulia\_sml@mail.ru).

тавляют уникальную информацию о составе атмосферы и ее параметрах. В частности, с 2010 г. на станции круглогодично измеряется концентрация ВС в приземном слое воздуха с помощью скоростного аэталометра Rack Mount Chassis фирмы Magee Scientific (<https://www.supplyfx.com/company/12836-magee-scientific-corporation>). Параллельно с измерениями концентрации ВС ведутся измерения оптических и микрофизических параметров атмосферы [7, 15] в рамках системы AERONET (<http://www.aeronet.gsfc.nasa.gov>), одной из платформ которой является ст. Тикси. Такое сочетание наблюдаемых характеристик дает редкую возможность для моделирования и оценки радиационных эффектов в атмосфере данного района, для уточнения значений целого ряда показателей атмосферы, связанных с наличием в воздухе ВС и дымового аэрозоля.

В данной работе проводится сопоставление результатов измерения концентрации ВС и некоторых метеорологических параметров атмосферы в районе ст. Тикси совместно с анализом путей дальнего переноса воздушных масс и возможных источников наблюдаемого аэрозоля. Анализируется влияние кратковременных эпизодов аномально высокого содержания ВС в приземном воздухе на радиационные и температурные эффекты в нижней тропосфере.

## Исходные данные и сопутствующая информация

Метеостанция Тикси расположена в районе впадения р. Лены в море Лаптевых, вблизи пгт Тикси (Якутия) (71,6° с.ш., 128,9° в.д., высота 15 м над ур. м.) (<http://www.polarf.ru/stations/216/>). В нашей работе использованы значения температуры воздуха и потоков нисходящей и уходящей длинноволновой и коротковолновой радиаций, измеренные на уровне 2 м от поверхности земли с интервалом 1 ч (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/iasoa/stations/tiksi>).

Концентрация ВС в приземном воздухе (далее — [BC]) вблизи метеостанции измеряется непрерывно и фиксируется каждые 5 мин аэталометром Rack Mount Chassis фирмы Magee Scientific. Данные этих измерений приведены на сайте <ftp://ftp1.esrl.noaa.gov/psd3/arctic/tiksi/aerosol/aethalometer>, а их частичный анализ в контексте сравнения со всеми имеющимися аналогичными наблюдениями в Арктике — в работе [7]. В настоящей статье в анализ включены данные для светлого (для Тикси) времени года — 5 мес (март — сентябрь) за 3 года измерений (2012–2014 гг.). Для противопоставлений используются результаты за январь тех же лет.

Источники выбросов ВС в атмосферу, их предполагаемая природа, географическое положение, величины эмиссий анализировались по данным базы GFED (<http://www.globalfiredata.org>) с небольшими поправками для антропогенных выбросов, сформированными на сайте <http://acs.engr.utk.edu/Data.php>. Рассматривались эмиссии ВС за месяц на грубой сетке  $1 \times 1^\circ$  на азиатской части России в пределах координат 52–74° с.ш., 60–179° в.д. Более удален-

ные территории практически не оказывают влияния на состав атмосферы в районе Тикси [16].

Анализ дальнего переноса воздушных масс (ВМ) к пункту наблюдений (ПН) проводился по обратным траекториям движения ВМ, рассчитанным с помощью модели HYSPLIT (<http://www.ready.arl.noaa.gov>) [17]. Рассматривались траектории длительностью 3 сут (интервал расчетов 1 ч, архив метеопараметров REANALYSIS).

## Основные результаты

### Концентрация ВС в приземном воздухе

Несколько типичных временных разверток измеренной [BC] за месяц приведены на рис. 1. Все они представляют собой примерно постоянную (для каждого месяца) величину, которую заметно превышают отдельные кратковременные пики, когда значения [BC] в максимумах в 50–100 раз и более превышают величину медианы (за соответствующий месяц). Некоторые статистические показатели рассматриваемых данных (по месяцам) приведены в табл. 1.

На рис. 2 показаны вариации среднего и медианного (за месяц) значений [BC] в Тикси — для января и пяти теплых месяцев. Эти величины хорошо соответствуют полученным ранее [18]. В январе [BC] выше, чем в теплое время года, поскольку скорость осаднения примеси над заснеженной поверхностью значительно ниже, чем над травяными и лесными территориями [19]. В результате в холодное время года ВС переносится в атмосферу на более дальние расстояния и большее число источников ВС влияет на загрязнение изучаемого района. Отрицательные значения [BC], появляющиеся при низких значениях измеряемой величины на пределе чувствительности прибора, исключались из анализа. Коэффициент корреляции между величиной медианы и количеством отрицательных значений (за месяц) составляет  $-0,72$  (по 18 парам). В январе, когда концентрация ВС выше (табл. 1), по этому признаку отбраковано менее 1% измерений, тогда как в более теплые месяцы количество отрицательных значений доходило до 17%.

Июль и август 2014 г. (рис. 2, а) сильно выделяются по средним значениям: [BC] в июле даже превысила январское значение того же года, что обусловлено наличием аномально высоких значений [BC] (рис. 1 и табл. 1), вполне сравнимых с концентрациями ВС в городах [11, 12, 20] и вблизи пожаров [21]. При этом в отношении медианных величин эти месяцы ничем не выделяются. Заметим, что при таких высоких ( $1000\text{--}10000 \text{ нг/м}^3$ ), но редких максимальных значениях [BC] средняя (за месяц) величина не описывает никакой реальной ситуации, а наиболее часто встречающиеся условия примерно соответствуют медианному значению [BC] в воздухе.

Периоды с максимальными концентрациями ВС ( $> 1000 \text{ нг/м}^3$ ), которые будем далее называть «эпизодами», распределены неравномерно по месяцам

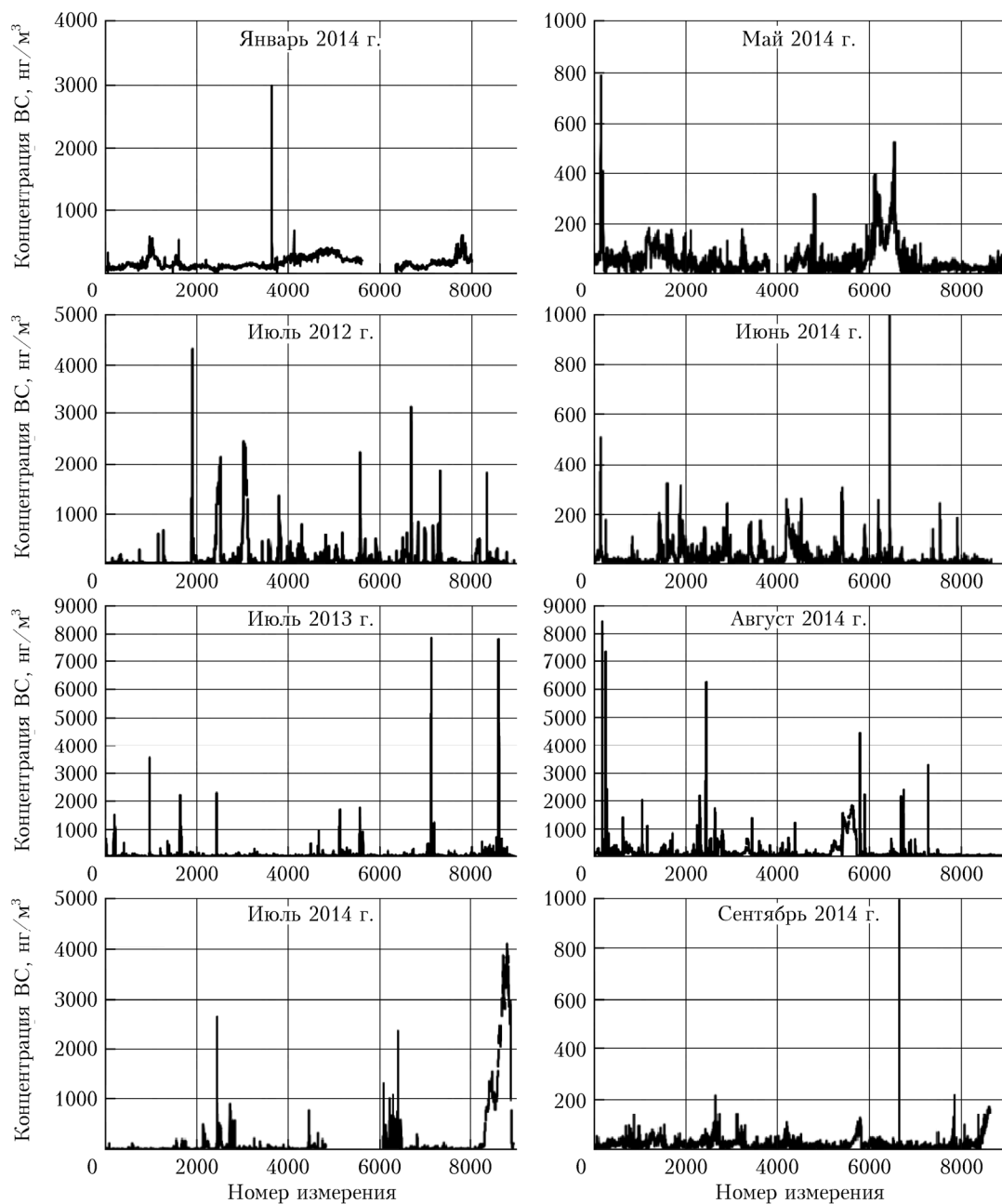


Рис. 1. Концентрация ВС в приземном воздухе на ст. Тикси – измерения, развертки во времени за месяц

Таблица 1  
**Статистические характеристики (за 3 года) исходных данных о концентрации ВС  
 в приземном воздухе в Тикси для 6 мес**

Месяц	Концентрация ВС, нг/м <sup>3</sup>			Процент отрицательных значений	Количество эпизодов разной длительности		
	Средняя	Медиана	Максимум		< 1 ч	1–12 ч	> 12 ч
Январь	202	162	7473	0,5	2	1	0
Май	72	44	13704	4,3	7	1	0
Июнь	54	15	4588	15,8	7	5	0
Июль	99	15	7882	16,8	21	2	3
Август	84	19	10651	15,3	42	4	1
Сентябрь	45	12	14835	17,0	5	2	0

Примечания. Эпизод – временной отрезок, когда концентрация ВС держится выше 1000 нг/м<sup>3</sup>.

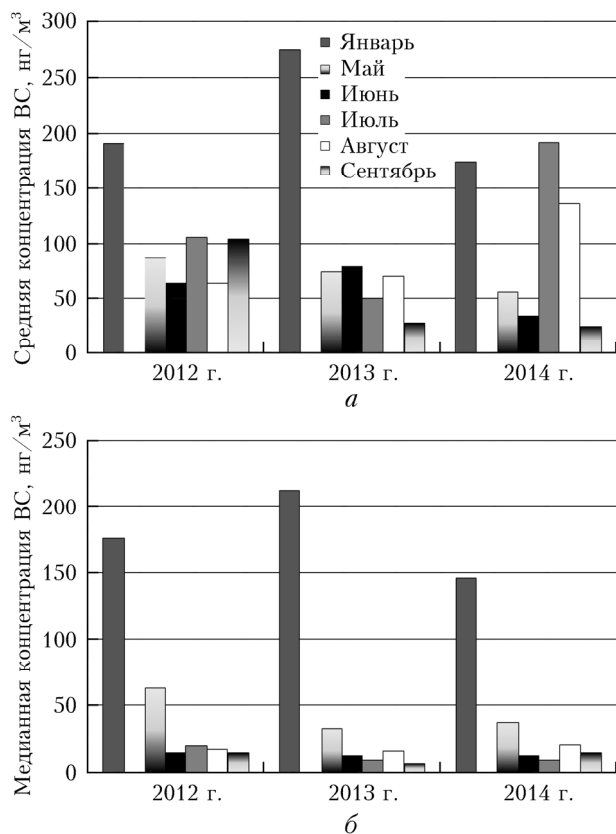


Рис. 2. Концентрация ВС в приземном воздухе в Тикси: средние (а) и медианные (б) значения по месяцам

и внутри них, однако более часто эпизоды встречаются в летние месяцы, сильно различаясь также по длительности (см. табл. 1). Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в атмосфере района наблюдений в этих условиях меняются очень сильно (см. данные сайта <http://www.aeronet.gsfc.nasa.gov> и их анализ в [7]).

### **Источники ВС при его аномально высоких концентрациях**

Как видно из табл. 1 и рис. 1, наиболее длинные эпизоды высокой [ВС] зарегистрированы в июле 2012 г. (два эпизода 9 и 11 июля – каждый длительностью чуть менее суток), а также в июле и в августе 2014 г. (30–31 июля и 19–20 августа, длительность каждого 1,5–2 сут). Объединяя два эпизода 2012 г., следующие один за другим с интервалом в сутки, в один, далее будем говорить об этих 3 мес и зарегистрированных в них трех эпизодах высокой концентрации ВС.

Довольно легко вывести качественную закономерность, которая определяет длительность каждого эпизода. Чем больше площадь источника и чем меньше скорость поперечного смещения траекторий (устойчивее циркуляционные процессы в атмосфере), тем дольше загрязнения от этого источника поступают в ПН. В этом смысле пожары (мощные площадные источники ВС) должны давать самые большие интегральные вклады черного углерода в атмосферу

станции Тикси, где нет близких крупных «точечных» источников антропогенного ВС (городов, факелов нефте- и газодобывающих установок и т.д.).

На рис. 3 (цв. вкладка) приведены примеры траекторий движения ВМ к ПН в Тикси совместно с расположением источников эмиссий ВС в атмосферу – для эпизодов длительностью более 12 ч. Рис. 3, а–д показывает, как развивался эпизод в июле 2012 г. с переносом примесей из районов мощных пожаров. На рис. 3, е показаны траектории не только за время эпизода (19–20 августа 2014 г.), но и за ближайšie к нему 2 сут, когда траектории не проходили над территориями с пожарами.

В конце июля 2014 г. (рис. 3, ж) происходил устойчивый перенос воздуха и загрязнений с востока, где были расположены не самые сильные, но необычно близкие к пункту наблюдений пожары (на рисунке траектории частично скрывают цвет ячеек), а также несколько антропогенных источников ВС (не показаны на рисунке). В результате общая эмиссия ВС с территории (69–72° с.ш., 128–142° в.д.), охватываемой показанным шлейфом траекторий, составляла, по данным сайта GFED (<http://www.globalfiredata.org>), около 11 т/мес (при отношении антропогенных эмиссий к пожарным примерно 1:2). За 2 сут эпизода от этих источников, расположенных на расстояниях 100–500 км от ПН, в атмосферу могло поступить до 0,8 т ВС. Достаточной простой подсчет показывает, что при равномерном распределении этого вещества на площади шлейфа в приземном слое высотой 100 м концентрация ВС равнялась бы ~500 нг/м<sup>3</sup>, что хорошо согласуется с наблюдаемой во время эпизода средней [ВС] – около 2000 нг/м<sup>3</sup> (табл. 2).

Таким образом, даже такой грубый (по временному и пространственному разрешению) подход показывает, что источниками самых длительных эпизодов высокой концентрации ВС в Тикси являются пожары, и позволяет идентифицировать их положение с точностью до градуса широты и долготы. Случаи более коротких моментов высокой концентрации ВС в приземном воздухе в Тикси требуют для их идентификации более тонкого пространственно-временного разрешения источников эмиссий ВС в атмосферу. Однако вряд ли эти короткие случаи могут значимо модулировать радиационные и более инерционные температурные эффекты в атмосфере.

### **Отклики в температуре и радиационных потоках**

Рассмотрим более подробно данные наблюдений за приземной температурой воздуха и потоками падающей и уходящей коротковолновой и длинноволновой радиаций для месяцев, включающих три эпизода, которые рассматривались в предыдущем разделе. Понятно, что радиационные эффекты, связанные с наличием ВС в атмосфере, тем значительнее (дольше, больше и т.д.), чем длиннее эпизод и выше [ВС] в приземном воздухе, а также чем интенсивнее солнечное излучение. Следовательно, из-за внутрисуточных и внутригодовых изменений инсо-

ляции важно, в какое именно время суток образуется повышенная [BC] в воздухе и в каком месяце это происходит. Радиационные процессы формирует вся атмосфера, поэтому более корректно учитывать информацию о вертикальном распределении BC в атмосфере. Однако в данной работе анализируется только приземный слой атмосферы, его характеристики и состав можно рассматривать (при анализе радиационных эффектов) как нижнюю границу атмосферы (НГА). В одной и той же точке наблюдений временные вариации радиационных параметров приземного воздуха определяются углом наклона Солнца, а также состоянием атмосферы (облачность, влажность, оптические параметры) и самой поверхности (альбедо), отражающей излучение. Кроме того, температура воздуха зависит от адвективных потоков тепла (температуры ВМ), приносимых к ПН воздушными массами при их движении над поверхностью.

Табл. 2 и рис. 4 позволяют сопоставить некоторые характеристики приземной температуры воздуха и радиационного баланса (RB) на НГА за эти 3 мес с эпизодами высокой [BC]. Расчет RB на НГА осуществлялся по измеренным потокам падающего ( $F^{\downarrow}$ ) и уходящего ( $F^{\uparrow}$ ) излучения:  $RB = F^{\downarrow} - F^{\uparrow}$  отдельно для коротковолновой (SW) и длинноволновой (LW) частей спектра и в сумме. Именно эта энергия идет на нагрев (при отрицательных значениях – на охлаждение) самого нижнего слоя воздуха и поверхности.

На рис. 4 приведены временные вариации температуры воздуха на ст. Тикси на высоте 2 м от поверхности земли. Хорошо видно (рис. 4, а), что интегральный (за 5 мес) нагрев приземного слоя атмосферы был максимален в 2012 г. (с максимумом среднемесячной температуры в июле), что может быть связано с глобальными особенностями чрезвычайно жаркого лета этого года в Сибири и на Дальнем Востоке и, как следствие, мощными пожарами на этой территории (см. эмиссии BC на рис. 3, а–д и анализ ситуации в [22]). Наиболее холодным был летний сезон 2013 г. Абсолютный измеренный максимум (за рассматриваемые месяцы) температуры (25,6 °C) приходится на август 2012 г. Каждый месяц максимальные значения среднесуточной температуры воздуха превышают соответствующие средние значения примерно на два стандартных отклонения от среднего. За 15 рассмотренных месяцев средняя разница между температурами дневного и ночного времени суток составляла  $(2,2 \pm 0,4)$  °C, разброс величины представлен стандартным отклонением этой разницы от среднего значения.

Рассмотрим табл. 2, сравнивая эпизоды по высоким (Эпи), средним (Ср) за весь месяц и условно «фоновым» (Фон) показателям. Все 3 мес отличаются друг от друга, хотя во всех эпизодах источниками BC были пожары на территории Сибири (см. выше) и фоновые значения [BC] для всех 3 мес различаются не слишком сильно (см. табл. 2). Самый мощный эпизод (средняя [BC] эпизода – около  $2000 \text{ нг/м}^3$ ) наблюдался в конце июля 2014 г., когда абсолютный максимум концентрации BC превысил месячную медиану в 100 с лишним раз, а средняя концентрация в эпизоде была выше фонового значения в 20 раз (см. табл. 2). При этом средняя [BC] была выше фонового значения примерно вдвое. Два оставшихся эпизода (в августе 2014 и июле 2012 г.) были слабее и довольно похожи между собой по показателям [BC], но не по показателям RB.

Внутри каждого месяца колебания среднесуточных значений  $T$  (см. рис. 4, б) и RB (на рисунке не приведены) не очень значительны и эпизоды не выделяются. Это свидетельствует о значимой роли

Таблица 2

**Некоторые статистические показатели среднесуточных значений концентрации черного углерода, радиационного баланса и температуры в приземном воздухе в районе ст. Тикси – для 3 мес с максимально длинными эпизодами аномально высокой концентрации BC**

Параметр	Показатель	Июль 2014 г.	Август 2014 г.	Июль 2012 г.
[BC]	Фон ([BC] $\pm$ СКО), $\text{нг/м}^3$	$49 \pm 58$	$76 \pm 73$	$61 \pm 59$
	Эпи, $\text{нг/м}^3$	1875	843	620
	Ср/Фон	3,6	1,6	1,6
	Эпи/Фон	38	11	10
	МАХ/Мед	114	21	18
RB	Фон, $\text{Вт/м}^2$	77	41	88
	Ср/Фон	1,006	0,96	1,006
	Эпи/Фон	1,08	0,37	1,08
	Эпи – Ср, $\text{Вт/м}^2$	6	-26	7
$T$	Фон ( $T \pm$ СКО), °C	$9,1 \pm 4,0$	$9,9 \pm 2,8$	$11,8 \pm 4,3$
	Ср/Фон	1,08	1,02	1,02
	Эпи/Фон	2,1	1,4	1,3
	Эпи – Ср, °C	9,6	3,8	4,1

Примечание. Ср – среднее значение за месяц; Эпи – среднее значение за 2 сут эпизода; Фон – среднее значение за 29 дней вне эпизода; МАХ – максимальное измеренное значение за месяц; Мед – медианное значение за месяц,  $T$  – температура.

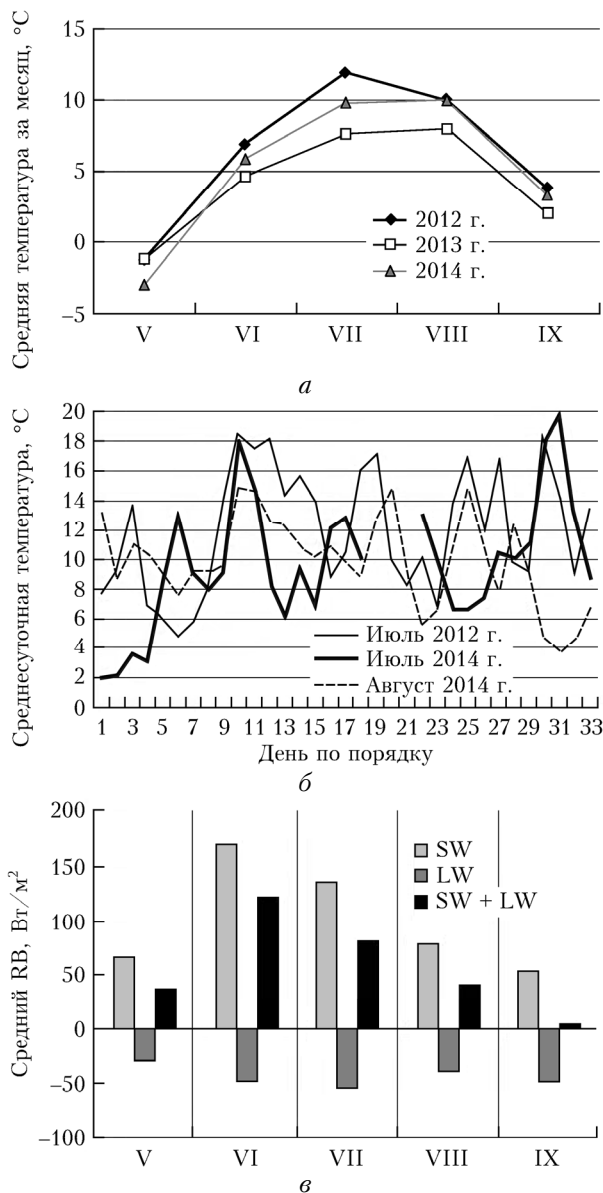


Рис. 4. Временные вариации в приземном воздухе: *a* – средняя температура; *б* – среднесуточная температура июня, июля и августа; *в* – средний (за 3 года) RB коротковолновой (SW), длинноволновой (LW) и суммарной радиации в теплые месяцы

других факторов, кроме концентрации BC, в формировании температурного и радиационных полей в приземном воздухе. В годовом ходе максимум среднего значения RB за месяц всегда приходится на июнь (рис. 4, *в*). В арктических широтах в рассматриваемые месяцы LW-радиация уносит значительную долю (от 20 до 45%) энергии от поверхности, уменьшая RB на НГА. Но суммарный баланс остается положительным. При этом во время обоих июльских эпизодов RB был выше фоновых уровней, а в августе 2014 г. он оказался почти втрое ниже фона. В результате август выделяется отрицательным превышением RB во время эпизода над фоновым уровнем, т.е. выхолаживанием НГА за счет радиационных процессов во время эпизода.

Однако и в августе 2014 г., как и в июльях 2012 и 2014 гг., температура в эпизодах была заметно выше средней и фоновой (см. табл. 2). Отметим, что наиболее сильный (из трех рассматриваемых) эпизод в июле 2014 г. ярко проявился в максимальном превышении приземной температуры над фоновым (в 2 раза) и средним уровнями (почти на 10 °C). В двух других эпизодах эта разница составила 3–4 °C. Подчеркнем, что эти цифры не являются оценкой прямого температурного эффекта от наличия в воздухе дымового аэрозоля. В общем случае какая-то часть этого превышения обусловлена просто тем фактом, что воздух, поступающий из районов пожаров (см. рис. 3, *ж*), имеет заведомо более высокую температуру. Климатическая норма приземной температуры воздуха в Тикси составляет 10–11 °C (<https://www.global-weather.ru>).

Таким образом, радиационные процессы не обязательно являются определяющими при формировании поля температуры вблизи поверхности. Возможно, что в августе, когда радиационное нагревание НГА ослабевает (по сравнению с июлем) из-за более низкого угла Солнца (RB в августе примерно вдвое ниже, чем в июле, рис. 4, *в*), эффект от поступления теплых воздушных потоков становится определяющим. Другие параметры, которые влияют на температуру НГА (облачность, влажность и т.д.), требуют дальнейшего рассмотрения и осмысления применительно к изучаемым данным.

## Заключение

Анализ экспериментальных данных о концентрации черного углерода в приземном воздухе, полученных на метеорологической станции Тикси в 2012–2014 гг., показал повышенные концентрации BC в холодное время года по сравнению с теплыми месяцами (до 10 раз по медианным значениям за месяц). Выявлены эпизоды аномально высокой концентрации BC (отдельные максимумы превышают медианные величины в 100 раз и более) различной длительности (от менее 1 ч до 1–2 сут), наблюдавшиеся преимущественно в теплые месяцы (май–сентябрь).

Сопоставление с результатами траекторного анализа переноса воздушных масс к району наблюдений показало, что высокие концентрации BC связаны с поступлением воздуха с территорий интенсивных природных пожаров (база GFED спутниковых данных об эмиссиях BC в атмосферу). Идентифицировано пространственное положение пожаров, являвшихся источниками BC в случаях повышенной концентрации этой примеси в районе Тикси. Задача численных модельных расчетов дальнего атмосферного переноса BC в Тикси в данной работе не стояла, но решение ее вполне реально, а наличие большого массива измерений поможет в дальнейшем уточнить ряд параметров, необходимых для расчетов дальнего переноса BC в атмосфере северных районов.

Сложность процессов формирования поля температуры в атмосфере не позволяет однозначно связать величины этих параметров с содержанием BC

в приземной атмосфере и оценить радиационные эффекты, обусловленные наличием в воздухе дымового аэрозоля. Специальные расчеты этих эффектов с использованием данных AERONET будут продолжением данной работы. Однако превышение температуры приземного воздуха во время наиболее длительных эпизодов высокой концентрации ВС, по сравнению с днями вне этих эпизодов, может достигать 10 °С (при климатической норме для июля в районе Тикси 10–11 °С).

Во время летних эпизодов с аномально высокой концентрацией ВС в приземном воздухе поправки к температуре воздуха, вносимые за счет изменения атмосферных радиационных процессов дымовым аэрозолем, могут быть вполне сопоставимы с поправками за счет адвекции тепла при переносе воздуха из районов пожаров.

Авторы благодарны организаторам сайтов <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>, <ftp://ftp1.esrl.noaa.gov>, <http://www.globalfiredata.org>, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/iasoa>, <http://acs.engr.utk.edu/Data.php>, <http://ready.arl.noaa.gov> за информацию и возможность ее свободного использования. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 17-05-00245 и 18-05-60183).

1. Алексеев Г.В. Арктическое измерение глобального потепления // Лед и Снег. 2014. Т. 54, № 2. С. 53–68.
2. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Oslo, Norway: AMAP, 2015. 116 p.
3. Quinn P.K., Bates T.S., Baum E., Doubleday N., Fiore A.M., Flanner M., Fridlind A., Garrett T.J., Koch D. Short-lived pollutants in the Arctic: Their climate impact and possible mitigation strategies // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8. P. 1723–1735.
4. Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. Лесные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке: эмиссии и атмосферный перенос черного углерода в Арктику // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 438–445; Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A. Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 566–574.
5. Hirdman D., Sodemann H., Eckhardt S., Burkhardt J.F., Jefferson A., Mefford T., Quinn P.K., Sharma S., Strom J., Stohl A. Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10, N 2. P. 669–693.
6. Cheng M.-D. Geolocating Russian sources for Arctic black carbon // Atmos. Environ. 2014. V. 92, N 4. P. 398–410. DOI: [org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.031](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.031).
7. Schmeisser L., Backman J., Ogren J.A., Andrews E., Asmi E., Starkweather S., Uttal T., Fiebig M., Sharma S., Eleftheriadis K., Vratolis S., Bergin M., Tunved P., Jefferson A. Seasonality of aerosol optical properties in the Arctic // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18, N 16. P. 11599–11622.
8. Tomasi C., Kokhanovsky A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., O'Neill N.T., Stone R.S., Holben B.N., Nyeki S., Wehrli C., Stohl A., Mazzola M., Lanconelli C., Vitale V., Stebel K., Aaltonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber B.A., Radionov V.F., Zielinski T.,

- Petelski T., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Xue Y., Mei L., Istomina L., Wagener R., McArthur B., Sobolewski P.S., Kivi R., Courcoux Y., Larouche P., Brocardo S., Piketh S.J.* Aerosol remote sensing in polar region // Earth-Sci. Rev. 2015. V. 140. P. 108–115. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.001> (last access: 10.06.2018).
9. Копейкин В.М., Репина И.А., Гречко Е.И., Огородников Б.И. Измерение содержания сажевого аэрозоля над водной поверхностью в Южном и Северном полушариях // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 444–450; Kopeikin V.M., Repina I.A., Grechko E.I., Ogorodnikov B.I. Measurements of soot aerosol content in the near-water atmospheric layer in the Southern and Northern Hemispheres // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 6. P. 500–507.
  10. Yausheva E.P., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P. Long-term variability of aerosol and Black Carbon concentrations in the atmospheric surface layer as results of 20-year measurements at the IAO Aerosol Station // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. P. 10466 3I.
  11. Голицын Г.С., Гречко Е.И., Ван Генчен, Ван Пусай, Джола А.В., Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ракутин В.С., Сафронов А.Н., Фокеева Е.В. Исследование загрязнения атмосферы Москвы и Пекина окисью углерода и аэрозолем // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 8–19.
  12. Емиленко А.С., Копейкин В.М. Сравнение синхронных измерений концентрации сажи и субмикронного аэрозоля в регионах с различной степенью антропогенной нагрузки // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 535–540; Emilenko A.S., Kopeikin V.M. Comparison of synchronous measurements of soot and submicron aerosol concentrations in region with different anthropogenic loadings // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 4. P. 421–427.
  13. Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Виноградова А.А., Лисицын А.П., Макаров В.Н., Попова С.А., Сивонен В.В., Сивонен В.П. Элементный и органический углерод в атмосферном аэрозоле над северо-западным побережьем Кандалакшского залива Белого моря // Докл. РАН. 2015. Т. 461, № 1. С. 70–74.
  14. Backman J., Schmeisser L., Virkkyla A., Ogren J.A., Asmi E., Starkweather S., Sharma S., Eleftheriadis K., Uttal T., Jefferson A., Bergin M., Makshas A., Tunved P., Fiebig M. On Aethalometer measurement uncertainties and multiple scattering correction factor for the Arctic // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10. P. 5039–5062. DOI: [10.5194/amt-10-5039-2017](https://doi.org/10.5194/amt-10-5039-2017).
  15. Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivakhov V., Makshas A. Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. P. 1271–1287. DOI: [10.5194/acp-16-1271-2016](https://doi.org/10.5194/acp-16-1271-2016).
  16. Виноградова А.А., Васильева А.В. Модельные оценки концентрации черного углерода в приземном воздухе северных районов России // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 6. С. 467–475; Vinogradova A.A., Vasilevaa A.V. Black carbon in air over northern regions of Russia: Sources and spatiotemporal variations // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 6. P. 533–541.
  17. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT 4 modelling system for trajectories // Aust. Meteorol. Mag. 1998. V. 47, N 4. P. 295–308.
  18. Fukasawa T., Ohta S., Murao N., Yamagata S., Makarov V.N. Aerosol observations in the Siberian Arctic //

- Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol. 1997. V. 11. P. 150–160.
19. *Виноградова А.А.* Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 4. С. 5–20.
20. *Limon-Sanchez M.T., Carbajal-Romero P., Hernandez-Mena L., Saldarriaga-Norena H., Lopez-Lopez A., Cosio-Ramirez R., Arriaga-Colina J.L., Smith W.* Black carbon in PM<sub>2.5</sub>, data from two urban sites in Guadalajara, Mexico during 2008 // Atmos. Pollut. Res. 2011. V. 2. P. 358–365.
21. *Самсонов Ю.Н., Попова С.А., Беленко О.А., Чанкина О.В.* Химический состав и дисперсные характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в бореальных лесах Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 523–531.
22. *Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A., Semoutnikova E.G., Emilenko A.S., Isakov A.A., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Verichev K.S., Kurbatov G.A., Ponomareva T.Ya.* Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, N 15. P. 5698–5721.

*A.A. Vinogradova, T.B. Titkova, Yu.A. Ivanova.* **Passages of anomalies in black carbon surface air concentration at Tiksi station, Yakutiya.**

Measurement data (2012–2014) on black carbon (BC) concentration in surface air at International Station Tiksi, placed near the River Lena's Delta, have been analyzed. We revealed BC concentration variations of different magnitudes and durations. Abnormal high values of BC concentration (more than 1000 ng/m<sup>3</sup>) are registered rarely, more often in the warm part of a year (May–September), for no longer than two days. The longest episodes are associated with long-range atmospheric transport of combustion products from wildfires. During such episodes with abnormal BC concentrations, the surface air temperature and radiative balance vary noticeably in the surface air. Heat air mass advection from fire zones plays a significant role in forming air temperature field. The air temperature in such episodes may increase up to 10 °C (whereas climatic value for July is 10–11 °C).



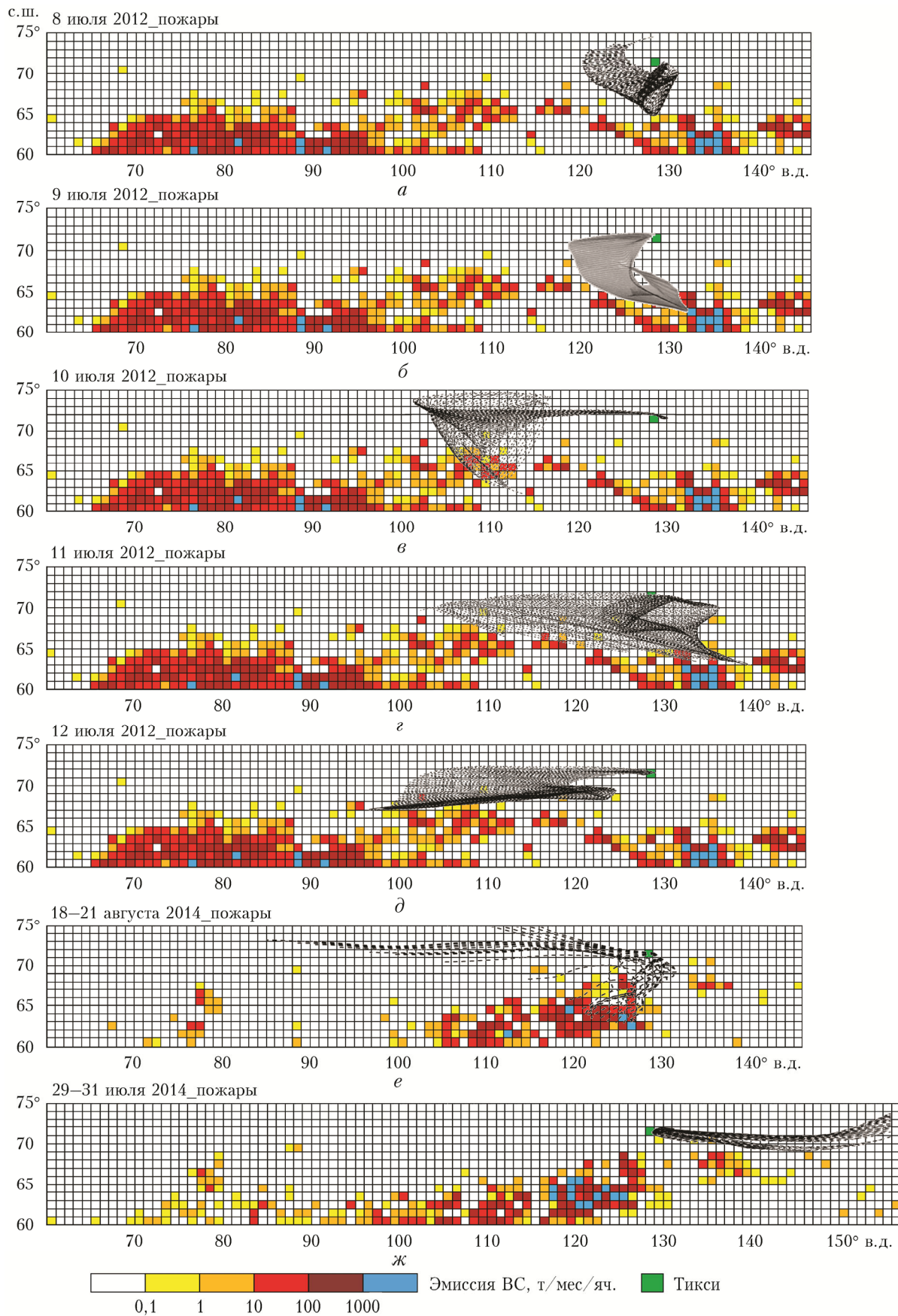


Рис. 3. Сопоставление пространственных распределений эмиссий ВС (т/мес/яч.) с территории Сибири и траекторий переноса воздушных масс (черные кривые) к ст. Тикси (зеленая ячейка) во время эпизодов: развитие эпизода в июле 2012 г. по суткам (а–д); эпизоды целиком: август 2014 г. (е); июль 2014 г. (ж)