

Лесные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке: эмиссии и атмосферный перенос черного углерода в Арктику

А.А. Виноградова¹, Н.С. Смирнов², В.Н. Коротков², А.А. Романовская^{2*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²Институт глобального климата и экологии Федеральной службы

по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Российской академии наук

107258, г. Москва, ул. Глебовская, 20-Б

Поступила в редакцию 14.01.2015 г.

По данным официальной статистики Федерального агентства лесного хозяйства РФ выполнены оценки выбросов черного углерода (black carbon – BC) в атмосферу в результате природных пожаров на территории Сибири и Дальнего Востока за период 2000–2013 гг. Учитывается статистика различных типов пожаров (верховые, низовые, на нелесных и не покрытых лесом землях), их сезонные и межгодовые вариации. Оценены эмиссии BC для разных типов пожаров – по федеральным округам, в сумме составившие (27 ± 8) кт/год с территории Сибири и Дальнего Востока, разброс годовых значений от 3,5 до 94 кт. Средние (за 14 лет) пространственные распределения пожарных эмиссий BC на сетке ($1^\circ \times 1^\circ$) для каждого сезона используются для расчета вкладов природных пожаров в содержание BC в окружающей среде разных районов азиатского побережья Северного Ледовитого океана. Показано, что на азиатское побережье Российской Арктики антропогенного черного углерода поступает значительно (более чем на порядок) больше, чем от природных пожаров, при пятикратном превышении антропогенных эмиссий над пожарными на территории Сибири и Дальнего Востока.

Ключевые слова: черный углерод, сажа, природные пожары, эмиссии с территории России, дальний атмосферный перенос, Арктика; black carbon, soot, nature forest fires, Russian BC emissions, long-range atmospheric transport, the Arctic.

Введение

Природные пожары – неуправляемое горение биомассы, которое, в зависимости от масштабов бедствия, может оказывать существенное влияние на состав приземной атмосферы не только в региональном, но и в глобальном масштабах. Одним из продуктов неполного сгорания биомассы, как и других углеродсодержащих веществ (в частности ископаемого топлива), является черный углерод (black carbon – BC), адсорбирующий солнечную радиацию во всех длинах волн. В русскоязычной литературе часто используется термин сажа и не акцентируется внимание на том, что она хотя и состоит в основном из BC, но включает также органический углерод и другие примеси.

Аэрозольные частицы, содержащие BC, являются климатически значимыми короткоживущими

составляющими атмосферы (Short Lived Climate Forcers – SLCF): они поглощают солнечную энергию и излучают инфракрасную (тепловую) радиацию, а также при выпадении на земную поверхность уменьшают ее альбедо, что изменяет радиационный баланс в приповерхностном слое атмосферы [1, 2]. Эти эффекты наиболее критичны для территорий, покрытых снегом и льдом (в полярных областях и горных районах), где исходные величины альбедо наиболее высоки. Суммарное радиационное возмущающее воздействие (радиационный форсинг) частиц черного углерода в Арктике в результате прямого поглощения солнечной радиации, взаимодействия с облаками и их разогрева, а также изменения альбедо снега и льда оценивается величинами от 0,64 [3] до 1,1 (0,17–2,1) Вт/м² [4].

Необходимо иметь в виду, что при лесных пожарах в атмосферу поступает не только черный углерод, но и другие соединения, в частности органический углерод [1, 5], который может оказывать охлаждающее воздействие на атмосферу. Эти взаимосвязанные и противоположно направленные эффекты следует учитывать при разработке мер по

* Анна Александровна Виноградова (anvinograd@yandex.ru); Николай Сергеевич Смирнов (smns-80@rambler.ru); Владимир Николаевич Коротков (korotkovv@list.ru); Анна Анатольевна Романовская (an_roman@mail.ru).

сокращению выбросов климатически значимых составляющих атмосферы.

Образование черного углерода происходит не только при природных пожарах, но и в процессе горения органических соединений [6], например при работе дизельных установок, отоплении помещений углем, дровами, мазутом и приготовлении пищи с использованием печей и плит.

В странах с большими лесными территориями, в частности в России, пожары могут давать значительный вклад в общую эмиссию ВС в атмосферу [1, 7, 8]. Однако для территории России существуют только косвенные оценки атмосферных эмиссий черного углерода как антропогенного происхождения, так и выбрасываемого при природных пожарах [9–11]. В [12] имеются некоторые инвентаризационные данные об антропогенных эмиссиях сажи с территории России (от стационарных источников и транспорта), которые проанализированы в [13]. Согласно [1, 8, 14] выбросы от лесных пожаров в РФ составляют от 40 до 56% общей эмиссии черного углерода в стране, 30% привносит сжигание топлива на местном уровне (биомассы, угля, древесины и т.п.), еще примерно по 10% приходится на травяные палы, промышленность и транспорт. В глобальном масштабе вклад России оценивается примерно в 4–5% суммарного выброса черного углерода, а вклад пожаров на ее территории в глобальную эмиссию черного углерода от природных пожаров оценен в 12–13%. Однако все эти оценки выбросов черного углерода в атмосферу крайне ненадежны, в первую очередь по причине применяемых удаленных косвенных методов их определения, а также в силу чрезвычайно большой изменчивости интенсивности, количества и пространственного положения природных пожаров год от года.

В отличие от метана, озона и гидрофторуглеродов, также являющихся SLCF, черный углерод пока не включен в список объектов регулярного мониторинга в России (как по выбросам в атмосферу, так и по наличию в воздухе и выпадению на поверхность). Таким образом, имеется насущная необходимость в оценке выбросов черного углерода в РФ и создании системы его мониторинга, как расчетного, так и экспериментального.

Целью данной работы и дальнейших исследований авторов является оценка выбросов черного углерода в атмосферу от природных пожаров на территории России и их вклада в состав объектов окружающей среды в Российской Арктике.

Исходные материалы и методы

В данном исследовании в качестве источников ВС в воздухе подробно изучаются пожары на азиатской территории России (АТР) – а именно в Сибири и на Дальнем Востоке с их обширными таежными лесами, содержащими большое количество биомассы на единицу площади. В [15, 16] было показано, что наибольший вклад в общую площадь пожарных нарушений в России оказывают регионы Сибирского и Дальневосточного федеральных округов.

Лесные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке: эмиссии и атмосферный перенос черного углерода в Арктику 513
3. Оптика атмосферы и океана, № 6.

Оценки выбросов черного углерода при пожарах проводились по схеме, описанной в [16]. Использовались данные [17] дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства РФ (Рослесхоз) за 2000–2013 гг. – по площадям земель лесного фонда, поврежденных пожарами, для субъектов РФ. Учитывались как общая площадь, поврежденная огнем, так и площади пожарных нарушений на покрытых лесом землях (площади лесных гарей, на которых было повреждено более 75% древостоя). При этом были выделены площади, пройденные пожарами трех типов: лесными (низовыми и верховыми), а также пожарами на землях, не покрытых лесной растительностью (гари, вырубки, прогалины, погибшие древостои), или на нелесных землях (просеки, поляны и др.). Исходные данные о площадях пожаров включают данные дистанционного зондирования, а также данные аэровизуальной съемки и наземного обследования. Общая точность этих данных оценивается в $\pm 30\%$.

Рассчитывались запасы доступного для горения топлива, к которому относятся биомасса, подстилка и мертвая древесина, согласно методике и с использованием специальной программы, разработанной Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН) [18, 19]. Исходными данными для расчетов послужили данные Государственного лесного реестра (площади всех категорий не покрытых лесом земель, площади и запасы древесины по группам возраста и по преобладающим породам деревьев и кустарников) по состоянию на 01.01.2011 г. в дифференциации по субъектам РФ.

Выбросы черного углерода от лесных пожаров рассчитывались по формуле [20]:

$$Q_{fire} = AM_B C_f G_{ef} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где Q_{fire} – количество выбросов черного углерода от пожара, т; A – площадь пожара, га; M_B – масса доступного для горения топлива, включающая биомассу, подстилку и валежную древесину, т/га; C_f – безразмерный коэффициент сгорания ($0,43 \pm 0,21$ для верхового пожара, $0,15 \pm 0,08$ для низового пожара, $0,5 \pm 0,25$ для подземного пожара и $0,34 \pm 0,17$ для не покрытых лесом земель лесного фонда в бореальных лесах [20]); G_{ef} – коэффициент выбросов черного углерода, г/кг сжигаемого сухого вещества ($0,56 \pm 0,19$ для верховых, низовых пожаров и пожаров на не покрытых лесом землях, $0,20 \pm 0,11$ для подземных пожаров и $0,91 \pm 0,41$ для нелесных земель лесного фонда [21]).

Временная и пространственная статистика пожаров

Исходный массив данных о пожарных эмиссиях ВС в атмосферу с территории АТР включает 24 региона (таблица). Напомним, что различия эмиссий между регионами могут быть обусловлены не только разницей параметров пожаров, но и существенными различиями площадей территорий самих регионов.

Средние выбросы черного углерода в атмосферу от пожаров (т/мес) на территории субъектов РФ, которые включены в анализ, в период 2000–2013 гг.

Регион	Весна	Лето	Осень
Алтайский край	11,94	7,40	3,39
Амурская область	721,39	876,14	79,53
Еврейская область	37,11	10,30	15,74
Забайкальский край	564,62	650,52	77,73
Иркутская область	44,20	809,10	23,11
Камчатский край	0,50	9,75	1,00
Кемеровская область	9,52	12,17	0,50
Красноярский край	56,42	771,07	57,17
Магаданская область	0,13	104,86	1,93
Омская область	124,57	15,00	3,09
Приморский край	93,41	7,72	14,91
Республика Алтай	2,07	0,65	0,50
Республика Бурятия	107,22	395,33	13,25
Республика Коми	0,23	52,65	0,18
Республика Саха (Якутия)	4,23	1310,94	456,15
Республика Тыва	21,52	36,57	10,19
Республика Хакасия	14,67	2,41	0,15
Сахалинская область	0,64	8,06	0,86
Томская область	4,70	190,94	3,87
Тюменская область	132,10	20,40	7,02
Хабаровский край	150,70	350,70	97,53
Ханты-Мансийский автономный округ	0,82	341,07	5,86
Чукотский автономный округ	0	31,28	4,32
Ямало-Ненецкий автономный округ	0,05	145,83	0,68

Рис. 1 показывает сезонные и межгодовые различия эмиссий ВС с территорий всех субъектов РФ, включенных в анализ (таблица). Видно практически полное отсутствие на АТР значимых пожаров в зимние месяцы (декабрь, январь, февраль) (рис. 1, а). Выраженный минимум эмиссии ВС в июле связан, по-видимому, с максимальным количеством осадков в этом месяце в большинстве рассматриваемых регионов [22]. В целом за рассматриваемые 14 лет можно констатировать наличие положительного тренда годовой эмиссии ВС от пожаров с территории АТР (рис. 1, б), однако его достоверность невелика из-за большой межгодовой изменчивости выбросов.

Заметные различия от года к году сезонной структуры пожарной эмиссии ВС (см. рис. 1, б) позволили выделить годы, когда значительные пожары приходились: 1) только на лето (2003, 2006, 2009, 2011, 2012); 2) на лето и еще больше на осень (2002); 3) на лето и еще больше на весну (2008); 4) на остальные годы с минимальными пожарами во все сезоны. Рис. 2 и 3 демонстрируют пространственные распределения средних эмиссий ВС от пожаров за годы, соответствующие этим четырем группам, в разные сезоны.

Диаграммы были получены при расчетах пространственного распределения эмиссий черного углерода Q_{fire} на сетке ($1^\circ \times 1^\circ$) с учетом географического положения и площади каждого региона

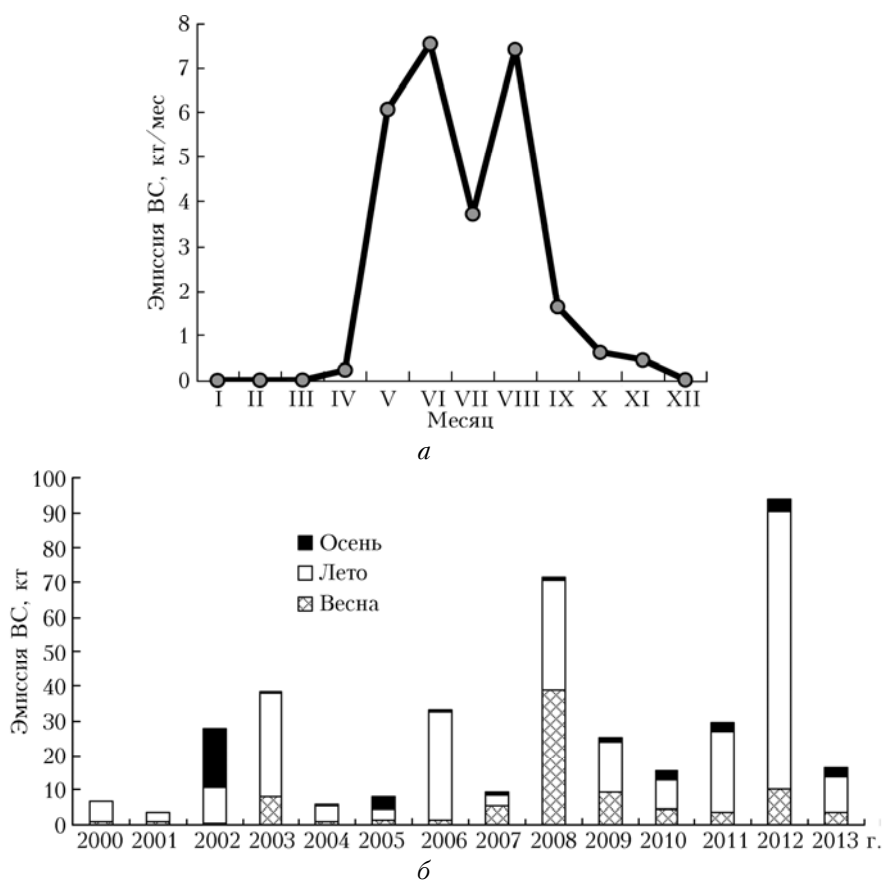


Рис. 1. Эмиссии черного углерода с территорий рассмотренных регионов (таблица): а – внутригодовые (среднемесячные) вариации; б – межгодовые (трехмесячные и суммарные годовые) вариации

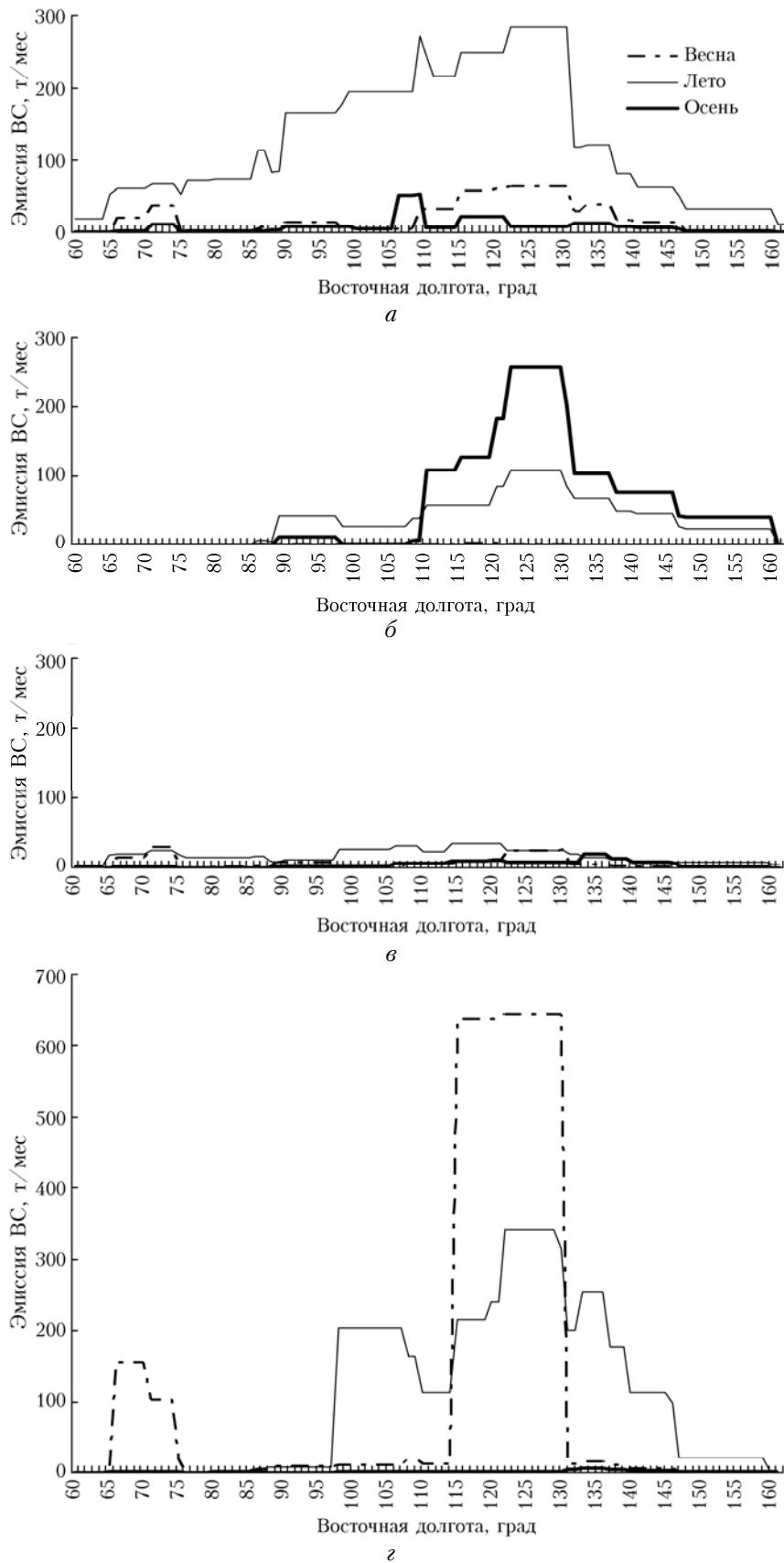


Рис. 2. Долготные распределения пожарных эмиссий ВС с территории от 50 до 70° с.ш. для разных типов пожаров: максимальные – летом (а), летом и осенью (б), летом и весной (в); минимальные (г). Масштабы приблизительно совпадают

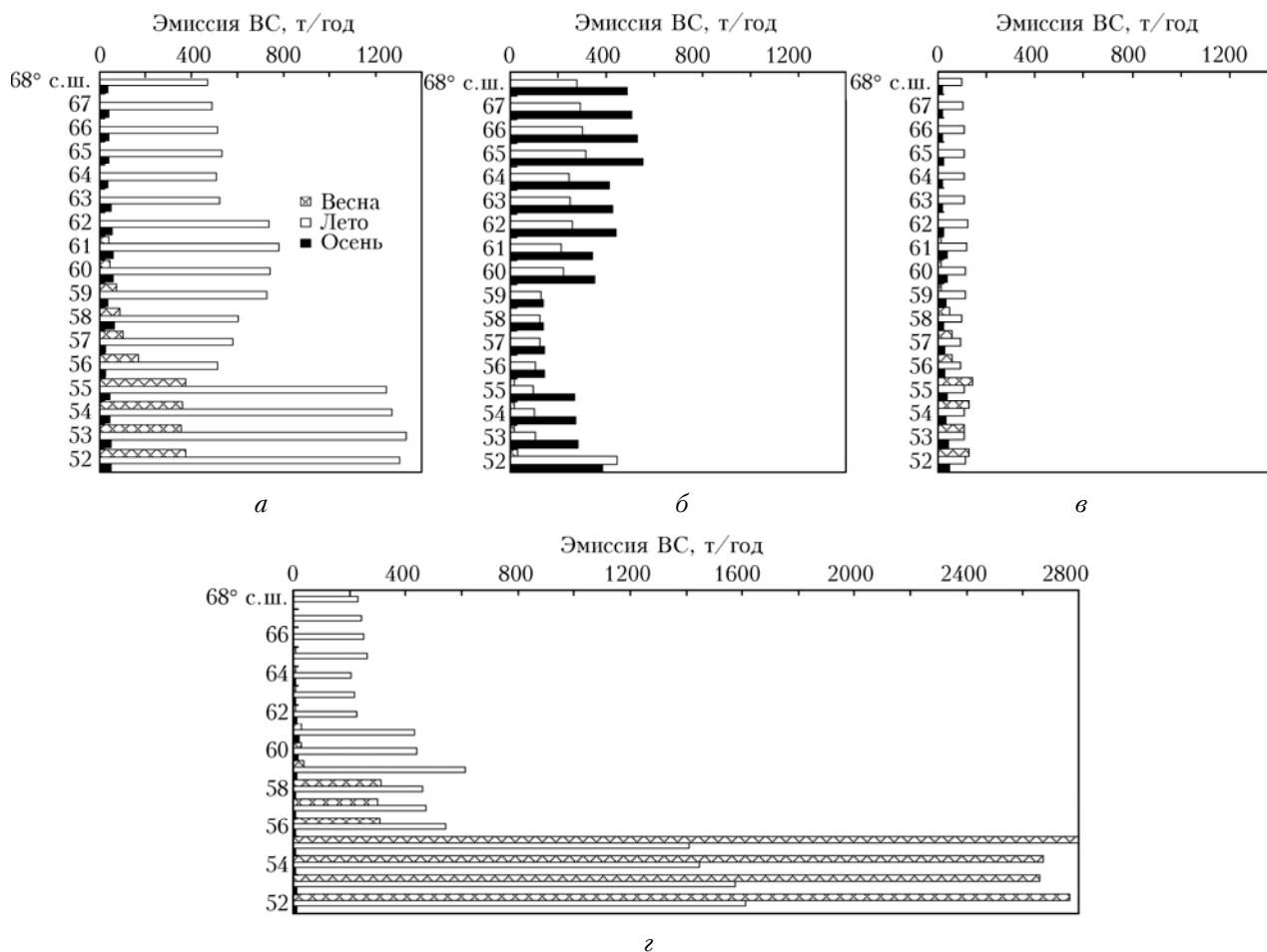


Рис. 3. Широтные распределения пожарных эмиссий ВС с территории от 60 до 160° в.д. для разных типов пожаров: максимальные – летом (*а*), летом и осенью (*б*), летом и весной (*в*); минимальные (*г*). Масштабы приблизительно совпадают

(по данным [23, 24]). Именно такого типа распределения необходимы для использования в различных (климатических, экологических и др.) модельных расчетах. Эмиссия каждого региона распределялась по его площади равномерно, поскольку данные о местах локализации основных пожаров отсутствуют. Предполагалось, что на АТР на широтах севернее 68° с.ш. пожаров практически не бывает, что соответствует визуальным наблюдениям.

Из рис. 2 и 3 хорошо видно, что пространственные распределения эмиссий ВС по территории АТР сильно различаются в разные сезоны год от года. Экстремальные весенние пожары (см. рис. 2, *г* и 3, *г*) характерны для самых южных территорий Забайкалья, их эмиссии ВС вдвое и больше превосходят эмиссии ВС на тех же территориях во время интенсивных летних пожаров (см. рис. 2, *а* и 3, *а*). Наоборот, экстремальные осенние пожары происходят преимущественно в более северных районах (см. рис. 2, *б*), главным образом в Якутии (см. рис. 3, *б*). По выбросам ВС они приблизительно соответствуют средним показателям летних пожаров на той же территории (см. рис. 2, *а* и 3, *а*).

В работе [13] приведены результаты оценок средних годовых эмиссий антропогенного черного

углерода с территорий субъектов РФ, а также рассчитанное пространственное распределение антропогенных эмиссий ВС по ячейкам сетки (1° × 1°) на территории России от 30 до 180° в.д. и от 50 до 70° с.ш. Сравнение оценок пожарных и антропогенных эмиссий черного углерода показывает, что среднемесячные эмиссии ВС от пожаров (рассчитанные за 9 мес) для большинства регионов меньше среднемесячных антропогенных эмиссий (оцененных по годовым данным из [12] в предположении постоянства среднемесячных величин). Учитывая довольно резкую внутригодовую изменчивость среднемесячных величин пожарных эмиссий (см. рис. 1, *а*), можно сделать качественный вывод, что в целом за год выбросы черного углерода в атмосферу с территории России имеют преимущественно антропогенный характер.

Среднемесячные эмиссии ВС (пожарная и антропогенная) сравнимы между собой только для пяти регионов: Амурская и Иркутская области, республика Бурятия, Красноярский край и Якутия. При этом заметим, что три первых расположены на юге АТР, где, видимо, должны быть сравнительно равными вклады пожарных и антропогенных эмиссий в процессах поступления черного углерода

в окружающую среду. Два последних региона имеют очень большие площади, что выравнивает (в среднем) их эмиссии, рассчитанные на единицу площади, с соседними территориями.

Суммарная средняя (за рассмотренные годы) эмиссия черного углерода от пожаров с территории АТР составила, по нашим оценкам, (27 ± 8) кт/год, медианное значение — около 21 кт/год при разбросе годовых значений от 3,5 до 94 кт. При этом, опираясь на данные [13], эмиссия антропогенного черного углерода в атмосферу от всех рассмотренных регионов АТР составляет около 140 кт/год, т.е. пожарные эмиссии примерно в 5 раз ниже антропогенных.

Сравнение эффектов пожарных и антропогенных эмиссий ВС в отношении загрязнения окружающей среды севера АТР

В качестве районов-акцепторов распространяющегося в атмосфере черного углерода рассматриваются территории азиатского побережья Северного Ледовитого океана (СЛО) — природные заповедники Гыданский (ГЗ) в эстуарии р. Оби, Усть-Ленский (УЛЗ) в дельте р. Лены и о. Врангеля (ВР). Для количественной оценки атмосферного переноса ВС с АТР на азиатское побережье СЛО использовался подход, разработанный ранее в [25, 26], где для северных заповедников России рассчитаны пространственные распределения функции чувствительности к эмиссиям источников Z . Эта функция учитывает средние (за 2001–2010 гг.) сезонные особенности атмосферной циркуляции и процессов осаждения примеси, переносимой на субмикронных аэрозольных частицах. Проблемы параметризации этих процессов при изучении дальнего атмосферного переноса ВС обсуждаются в [25].

Значение Z_{ij} для каждой ячейки (ij) сетки ($1^\circ \times 1^\circ$) численно равно эмитированной с территории этой ячейки за 1 с доле примеси Q_{ij} , которая оказывается в 1 м^3 воздуха в приземном слое перемешивания в регионе-акцепторе. Таким образом, концентрация примеси C_{ij} в приземном воздухе региона-акцептора, полученная в результате выбросов примеси в ячейке ij , вычисляется просто:

$$C_{ij} = Q_{ij}Z_{ij}. \quad (2)$$

Суммируя вклады от всех ячеек, получаем среднюю (за 10 лет) концентрацию примеси в воздухе в районе конкретного заповедника. Если значения функции чувствительности и/или распределения эмиссии примеси дифференцированы по сезонам, получаем и атмосферную концентрацию примеси, дифференцированную по сезонам. Отметим, что величина Z резко уменьшается при удалении от пункта наблюдений, поскольку в нее заложена экспоненциальная зависимость количества примеси, осаждаемой на поверхность по мере пространства от источника. Поэтому чем дальше источники, тем, в общем случае, меньше примесей они способны внести в район наблюдений. Таким

образом, из качественных выводов предыдущего раздела уже понятно, что в целом вклад пожарных эмиссий черного углерода с АТР в загрязнение окружающей среды Российской Арктики должен быть меньше, чем эффект антропогенных эмиссий с тех же территорий. Рассмотрим этот вопрос количественно.

В [26] приведены распределения функции Z для четырех сезонов и выбранных трех заповедников. Подставляя в (2) для каждого сезона пожарные эмиссии Q_{fire} , пересчитанные для ячеек пространственной сетки, в качестве Q_{ij} и значения Z_{ij} из [26] и суммируя результаты по всем ячейкам, получаем для каждого заповедника сезонные вариации средней (за 10 лет) концентрации ВС в воздухе от пожаров на территории АТР. Аналогично, подставляя в (2) средние годовые эмиссии антропогенной сажи Q_{ij} из [13], получаем средние антропогенные концентрации ВС в воздухе каждого заповедника. Результаты этих расчетов объединены на рис. 4.

Видно, что в любом заповеднике средние концентрации в воздухе антропогенного черного углерода на порядок и более превосходят вклады любых пожаров. Максимальны пожарные вклады осенью при осенних пожарах, которые, как отмечалось, происходят в более северных районах АТР. Наиболее южные регионы, где, как говорилось выше, эмиссии ВС от пожаров и антропогенных источников примерно одинаковы, не оказывают решающего влияния из-за своей удаленности.

На рис. 4 показаны также сезонные изменения средних (в 2000-е гг.) потоков на поверхность черного углерода, принесенного воздушными массами от природных пожаров и от антропогенных источников. Качественный вид этих зависимостей несколько отличается от аналогичных зависимостей для атмосферных концентраций из-за влияния сезонных различий в осадках. Но и здесь антропогенный ВС преобладает над ВС от пожаров более чем на порядок (наименьшие различия осенью).

Рис. 4 демонстрирует соотношения средних (за 2000-е гг.) величин. Конечно, в условиях современных климатических аномалий разные годы могут приносить различные сюрпризы и для конкретных районов севера соотношения вкладов антропогенных и пожарных эмиссий в конкретные месяцы могут оказаться иными.

Отметим, что учет неоднородностей в пространственном распределении пожаров по территориям таких больших субъектов, как Якутия и Красноярский край, скорее всего, приведет к уменьшению вклада ВС в северные районы, поскольку очевидно, что все-таки число и интенсивность пожаров (следовательно, и выбросы черного углерода) должны быть больше в южных, более теплых районах.

Поскольку использованные распределения функции Z рассчитывались в предположении переноса примеси воздушными массами в пределах приземного слоя перемешивания, в дальнейшем возможно уточнение модельного описания этих процессов для верховых пожаров путем иной параметризации переноса примеси в более высоких слоях атмосферы.

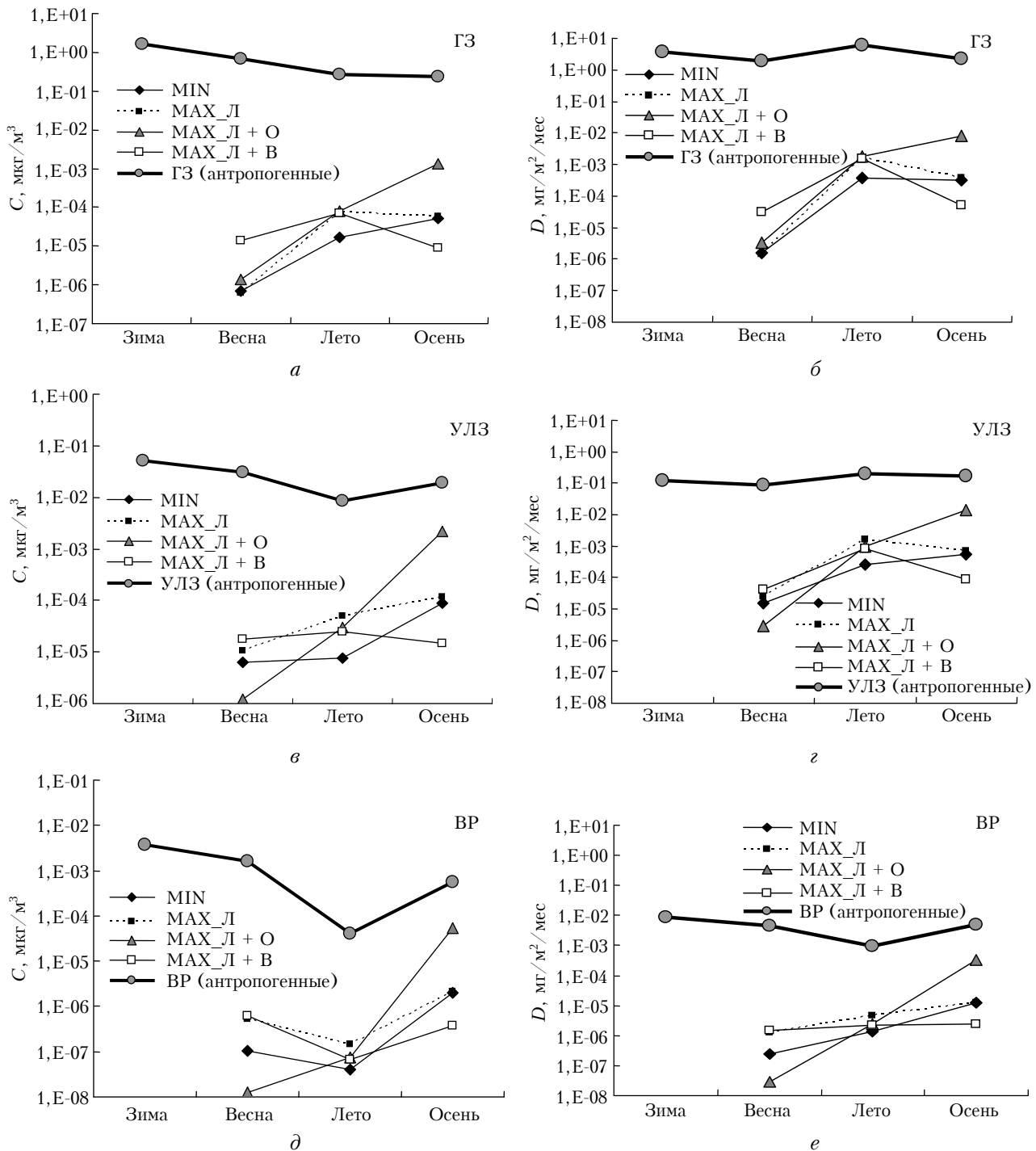


Рис. 4. Сравнение средних месячных вкладов пожарных и антропогенных эмиссий в концентрацию ВС в воздухе (C – *a, c, d*) и в поток ВС на поверхность (D – *b, d, e*) в районах северных заповедников Гыданский, Усть-Ленский, о. Врангеля

В этом случае можно ожидать более эффективного переноса на дальние расстояния, но, при уменьшении величин эмиссии (только от верховых лесных пожаров), эффект трудно предсказать количественно.

Заклучение

Выполнены оценки выбросов черного углерода от природных пожаров на территории Сибири

и Дальнего Востока за период 2000–2013 гг. с учетом статистики различных типов пожаров (верховые, низовые, на нелесных и не покрытых лесом землях). Рассчитаны их сезонные и межгодовые вариации.

Средние за 14 лет эмиссии ВС от пожаров с территории Сибири и Дальнего Востока в сумме составили (27 ± 8) кт в год. Это примерно в 5 раз меньше величины атмосферных выбросов антропогенно-

го черного углерода с той же территории. Таким образом, в целом за год выбросы черного углерода в атмосферу с азиатской территории России имеют преимущественно антропогенное происхождение.

Расчитаны средние (за 14 лет) пространственные распределения пожарных эмиссий ВС на сетке ($1^\circ \times 1^\circ$) на территории Сибири и Дальнего Востока для каждого сезона, которые могут быть использованы для различных климатических, экологических, экономических и других модельных оценок.

Оценены вклады природных пожаров в содержание ВС в приземном воздухе и в потоках вещества на поверхность при дальнем переносе в атмосфере в разные районы азиатского побережья Северного Ледовитого океана. Показано, что количество черного углерода, поступающего от пожаров в Сибири и на Дальнем Востоке через атмосферу в азиатскую часть Российской Арктики, значительно меньше (более чем на порядок) вклада от антропогенных атмосферных эмиссий ВС с тех же территорий.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 14-05-93089 Норв_а).

1. Quinn P.K., Stohl A., Arneth A., Berntsen T., Burkhardt J.F., Christensen J., Flanner M., Kupiainen K., Lihavainen H., Shepherd M., Shevchenko V., Skov H., Vestreng V. The Impact of Black Carbon on Arctic Climate (2011). Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2011. 72 p.
2. Горчакова И.А., Мохов И.И. Радиационный и температурный эффекты дымового аэрозоля в московском регионе в период летних пожаров 2010 г. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 558–565.
3. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
4. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118, N 11. P. 5380–5552. DOI: 10.1002/jgrd.50171.
5. 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 атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 523–531.
6. Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A.N. Black carbon in the Arctic: The underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // Atmos. Phys. Chem. 2013. V. 13, N 17. P. 8833–8855. DOI: 10.5194/acp-13-8833-2013.
7. Jacobson M.Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107, N 19. P. ACH 16-1–ACH 16-22. DOI: 10.1029/2001JD001376.
8. U.S. EPA. Report to Congress on Black Carbon. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2012. URL: <http://www.epa.gov/blackcarbon/>
9. 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](http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.031).
10. 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.
11. Wang Q., Jacob D.J., Fisher J.A., Mao J., Leiben-sperger E.M., Carouge C.C., Le Sager P., Kondo Y., Jimenez J.L., Cubison M.J., Doherty S.J. Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter-spring: Implications for radiative forcing // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 12. P. 12453–12473. DOI: 10.5194/acp-11-12453-2011.
12. Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2010 год / Под ред. А.Ю. Недре. СПб.: ОАО «НИИ Атмосфера», 2011. 560 с.
13. Виноградова А.А. Эмиссии антропогенного черного углерода в атмосферу: распределение по территории России // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1059–1065.
14. Generoso S., Bey I., Attie J.-L., Breon F.-M. A satellite and model-based assessment of the 2003 Russian fires: Impact on the Arctic region // J. Geophys. Res. D. 2007. V. 112, N 15. P. 1–16. DOI: 10.1029/2006JD008344.
15. Швиденко А.З., Щенащенко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
16. Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. К методике оценки выбросов черного углерода от природных пожаров в лесах Российской Федерации // Метеорол. и гидрол. 2015. В печати.
17. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства РФ (Рослесхоз). URL: <http://www.aviales.ru/>
18. Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н. Динамика бюджета углерода лесов России за два прошедших десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.
19. Методика информационно-аналитической оценки бюджета углерода лесов на региональном уровне [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cepl.rssi.ru/programms.htm>
20. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. Т. 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. МГЭИК, 2006. С. 2.1–2.69.
21. Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., Alvarado M.J., Reid J.S., Karl T., Crounse J.D., Wennberg P.O. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 9. P. 4039–4072. DOI: 10.5194/acp-11-4039-2011.
22. Доклады об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2005–2013 гг. М.: Федеральная

- служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), 2006–2014. URL: <http://climatechange.igce.ru/>
23. *Географический атлас офицера*. Изд. доп. М.: УНИИНТЕХ, 2008. 424 с.
24. *Статистика регионов России*. URL: <http://www.gks.ru>
25. *Виноградова А.А., Веремейчик А.О.* Модельные оценки содержания антропогенной сажи (black carbon) в атмосфере Российской Арктики // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 6. С. 443–451.
26. *Виноградова А.А.* Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // *Геофизические процессы и биосфера*. 2014. Т. 13, № 4. С. 5–20.

A.A. Vinogradova, N.S. Smirnov, V.N. Korotkov, A.A. Romanovskaya. **Forest fires in Siberia and Far East (Russia): Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic.**

Black carbon (BC) emissions to the atmosphere from forest fires in Siberia and Far East (Russia) are presented for the period 2000–2013 from official data of Federal Forestry Agency of Russian Federation (<http://www.rosleshoz.gov.ru/>). The different types of forest fires (crown and creeping fires, fires on nonforested and unforested lands) are analyzed, as well as their seasonal and spatial variations. The total annual BC emission from the territory is estimated as high as (27 ± 8) kt, with annual value variations of (3.5–94) kt from year to year. Seasonal spatial distributions of BC emissions on grid cells ($1^\circ \times 1^\circ$) averaged through 14 years were calculated. Despite only 5-time excess evaluation of anthropogenic emissions over the forest fires ones, the BC impact through the atmosphere from the forest fire BC emissions to the Russian Arctic environment is considerably (more than 10 times) less than the anthropogenic contribution.

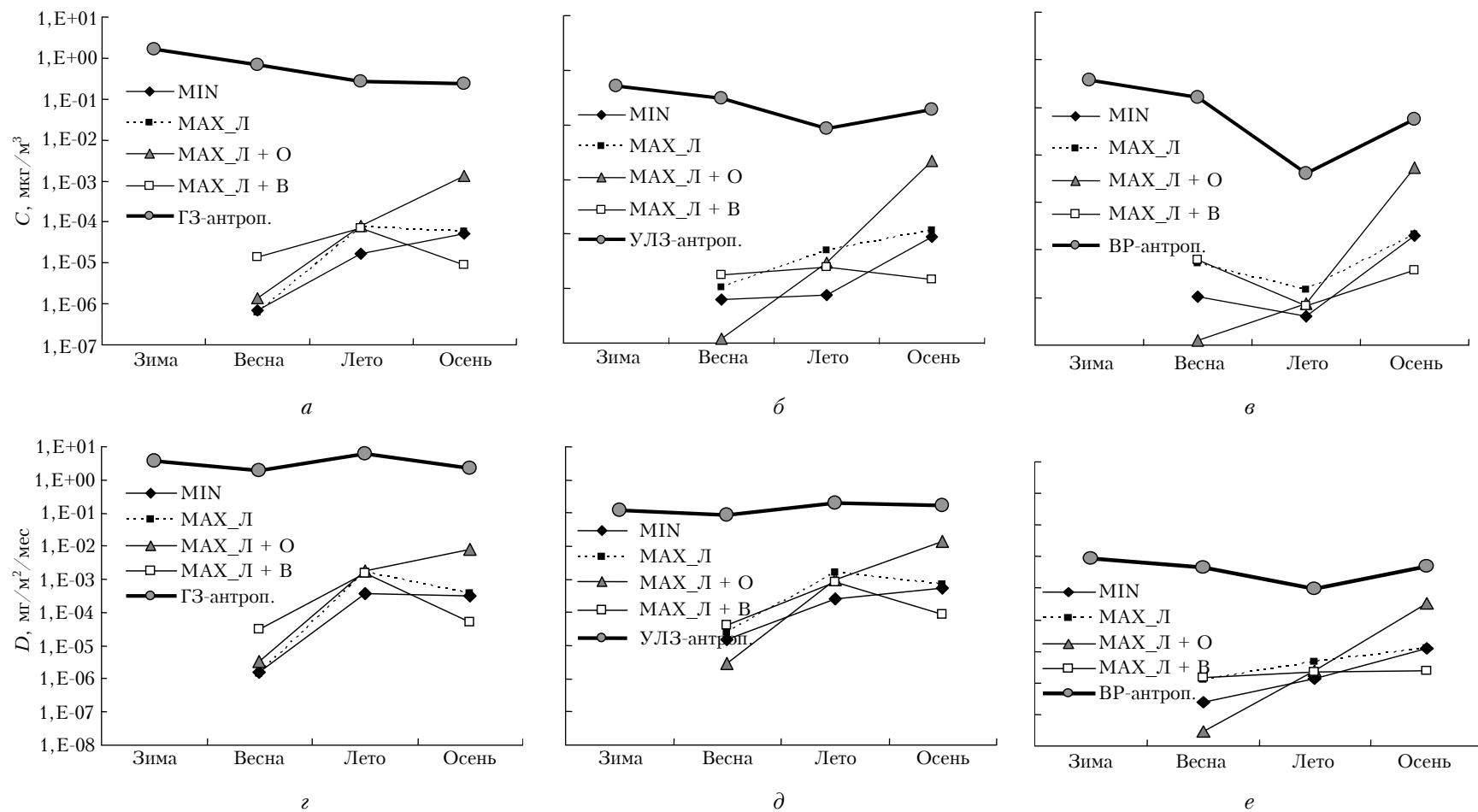


Рис. 4. Сравнение средних месячных вкладов пожарных и антропогенных эмиссий в концентрацию ВС в воздухе (C – верхняя строка) и в поток ВС на поверхность (D – нижняя строка) в районах северных заповедников (ГЗ – Гыданский, УЛЗ – Усть-Ленский, ВР – о. Врангеля)