

УДК 504.75

Расчет аэрозольных выбросов от пожаров Томской области на основе дистанционных данных

М.Н. Алексеева¹, К.Н. Пустовалов², Е.А. Головацкая², И.Г. Яценко^{1*}

¹Институт химии нефти СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 4

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 3.02.2020 г.

Рассмотрены площади потери лесов от пожаров в Верхнекетском р-не Томской обл. Вычислены объемы выбросов загрязняющих веществ в результате пожаров. Установлено, что в Верхнекетском р-не дымовые аэрозоли от исследуемых пожаров 2012 и 2016 гг. по своей массе значительно превосходят техногенные выбросы от стационарных источников. По лидарным данным CALIOP установлены высоты поднятия дыма от 1,3 до 4,3 км, что не противоречит проведенным расчетам на основе модельных формул.

Ключевые слова: пожары, гари, потеря лесов, загрязняющие вещества, аэрозоли, данные лидара CALIOP; fires, burning, forest loss, pollutants, aerosols, CALIOP lidar data.

Введение

В настоящее время Томская обл. относится к группе регионов с наибольшим риском потерь лесного покрова [1]. Под потерями мы понимаем как необратимые изменения – сокращение площадей лесов в результате строительства, расчистки под сельское хозяйство или добычи полезных ископаемых, так и обратимые – вырубку и гари, где со временем происходит восстановление лесного покрова [2]. Наибольшие потери лесного покрова зафиксированы на правом берегу р. Оби, что связано с объемом общей заготовки и вывоза древесины в Томской обл., приходящимся на Первомайский, Верхнекетский и Асиновский р-ны (более 60% от общего объема) [3]. В настоящее время мониторинг лесов проводится с использованием онлайн-платформы Global Forest Watch (GFW) с открытым исходным кодом в режиме, близком к реальному времени [4, 5].

Как известно, в случае пожаров необходимо учитывать не только потерю объема древесины, но и значительные выбросы загрязняющих веществ. При длительном горении обширных лесоболотных территорий происходит задымление населенных пунктов, загрязнение атмосферы выбросами диоксида углерода и окислов азота. В дымовых аэрозолях содержатся различные токсиканты, в том числе тяжелые металлы и радионуклиды [6]. При сильных

пожарах дымовые аэрозоли, несущие различные загрязняющие вещества, могут подниматься на высоту до 5–8 км и переноситься на значительные расстояния [6, 7]. Так, в 2012 г. среднее расстояние переноса дымовой эмиссии от горящих лесов северной части Томской обл. и Красноярского края в г. Новосибирск составило 400 км [7].

Применение космических снимков перспективно для мониторинга лесов, получения информации об их состоянии, оценки лесных пожаров по площади и выбросам загрязняющих веществ. [8]. Актуальность этой темы обусловлена совместным применением данных лидара CALIOP и стандартных методик для оценки параметров аэрозолей и эмиссий загрязняющих веществ от пожаров. Цель настоящей работы – вычисление аэрозольных выбросов от пожаров в Верхнекетском р-не на основе модельных расчетов и лидарных данных CALIPSO.

Объект исследования

Площадь Верхнекетского р-на составляет 4305 тыс. га, из них 2740 тыс. га занято лесом [9]. Из статистических данных GFW [10] следует, что в период с 2001 по 2018 г. Верхнекетский р-н потерял 307 тыс. га древесного покрова, это эквивалентно снижению древесного покрова на 11% по сравнению с 2000 г. и эмиссии 87,7 млн. т CO₂.

Как видно на рис. 1, площади природных пожаров в 2012 и в 2016 гг., приведенные в [11], значительно больше, чем площади потерь леса по данным [10]. Например, в 2012 г. в Верхнекетском р-не выгорело 781,47 км², тогда как потери леса по данным GFW составили всего 163 км² (см. рис. 1).

* Мария Николаевна Алексеева (amn@ipc.tsc.ru); Константин Николаевич Пустовалов (const.pv@yandex.ru); Евгения Александровна Головацкая (golovatskayaea@gmail.com); Ирина Германовна Яценко (sric@ipc.tsc.ru).

Вероятно, в [10] не учитывались потери при неполном выгорании леса, а также площади горения торфяников и иных земель. Однако крупные пожары в районе зачастую продолжаются несколько дней, а процент отмершей древесины и последующего отпада деревьев составляет 60–90%.

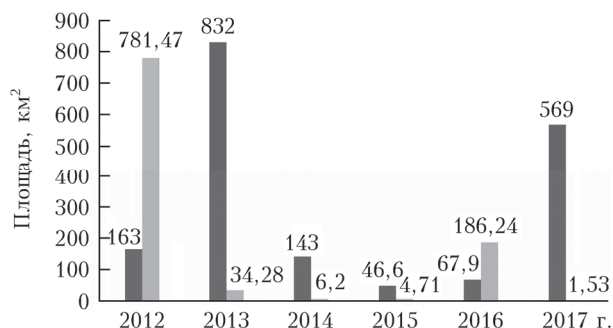


Рис. 1. Площади потерь леса по данным GFW (темно серые столбики) [10] и лесных пожаров в Верхнетомском р-не по данным глобального атласа пожаров (светло-серые столбики) [11]

В соответствии с лесным планом [9] насаждения Верхнетомского р-на характеризуются низкой продуктивностью (средний класс бонитета 3,9). Средний класс пожароопасности составляет 3,8, что соответствует средней и слабой степени опасности возгорания.

Методы исследования

В Томской обл. в 2012 г. в связи с аномально жарким летом обширная площадь была охвачена

пожарами. Например, на метеостанции Новый Васюган в июне – июле 2012 г. среднесуточная температура воздуха поднималась выше 30° С, достигая максимального значения 36,9° С [12]. Согласно данным Рослесхоза с мая по октябрь 2012 г. на исследуемой территории было зафиксировано 162 дня, когда на фоне сложившихся метеорологических условий наблюдался пятый класс пожароопасной ситуации. С июня по сентябрь чрезвычайный класс пожарной опасности сохранялся в тайге ежедневно. Основной причиной возникновения лесных пожаров в 2012 г. был человеческий фактор: в 31 случае тайга горела по вине местного населения. На спутниковых изображениях с датами съемки 30 июля 2012 г. и 18 июля 2016 г. видны очаги пожаров в окрестностях Белого Яра (рис. 2 и 3).

Ниже представлены формулы расчета некоторых характеристик лесных пожаров. Вычисление высоты подъема продуктов горения (конвективной колонки) от пожара проводится по формуле [13]:

$$Z_m = 7X^{0,25}R_0, \quad (1)$$

где $X = 0,002$; R_0 – радиус, вычисленный исходя из площади пожара.

Тепловая мощность пожара вычисляется по формуле

$$W = \pi R_0^2 q_m, \quad (2)$$

где q_m – средняя мощность тепловыделения пожаров, Вт/м². По данным [13], $q_m = 10^4$ Вт/м².

В связи с развитием дистанционных методов исследований в нашей работе для оценки параметров аэрозолей от пожаров предложено использование

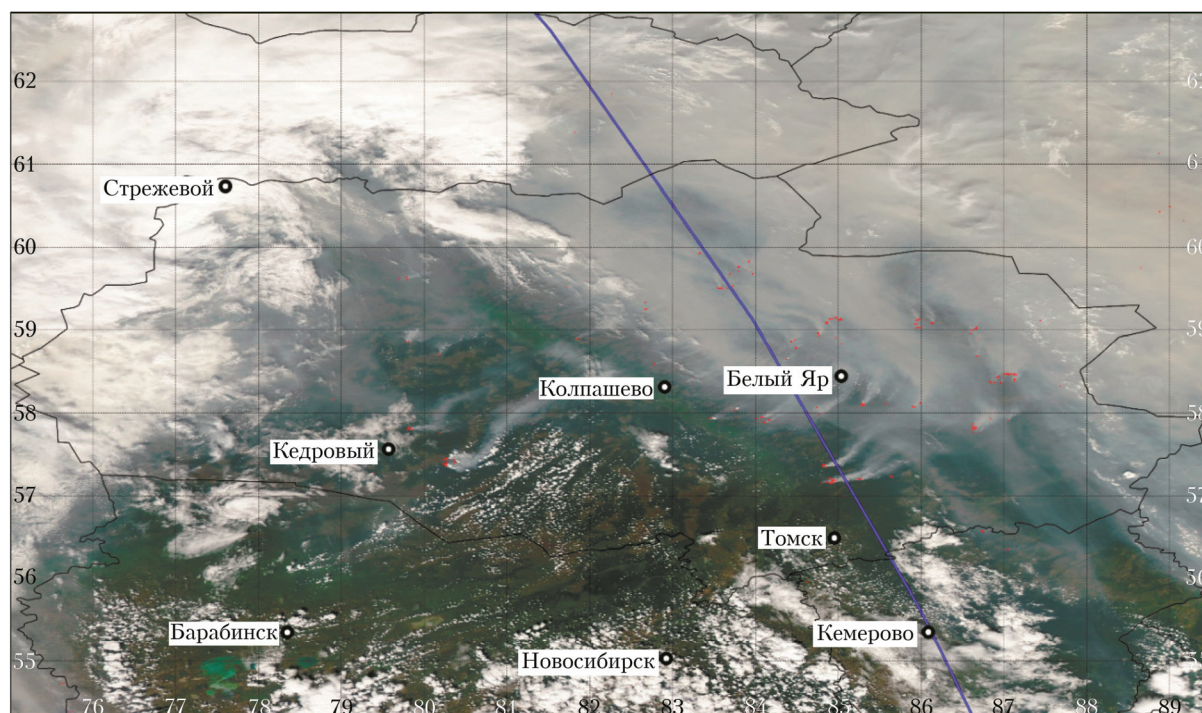


Рис. 2. Спутниковое изображение в видимой части спектра; точки – очаги пожаров по данным MODIS (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>), полученным при дневном пролете спутника Aqua; линия – трек ближайшего пролета спутника CALIPSO за 30 июля 2012 г., см. цветной рисунок на сайте iao.ru/ru/content/vol.33-2020/iss.09

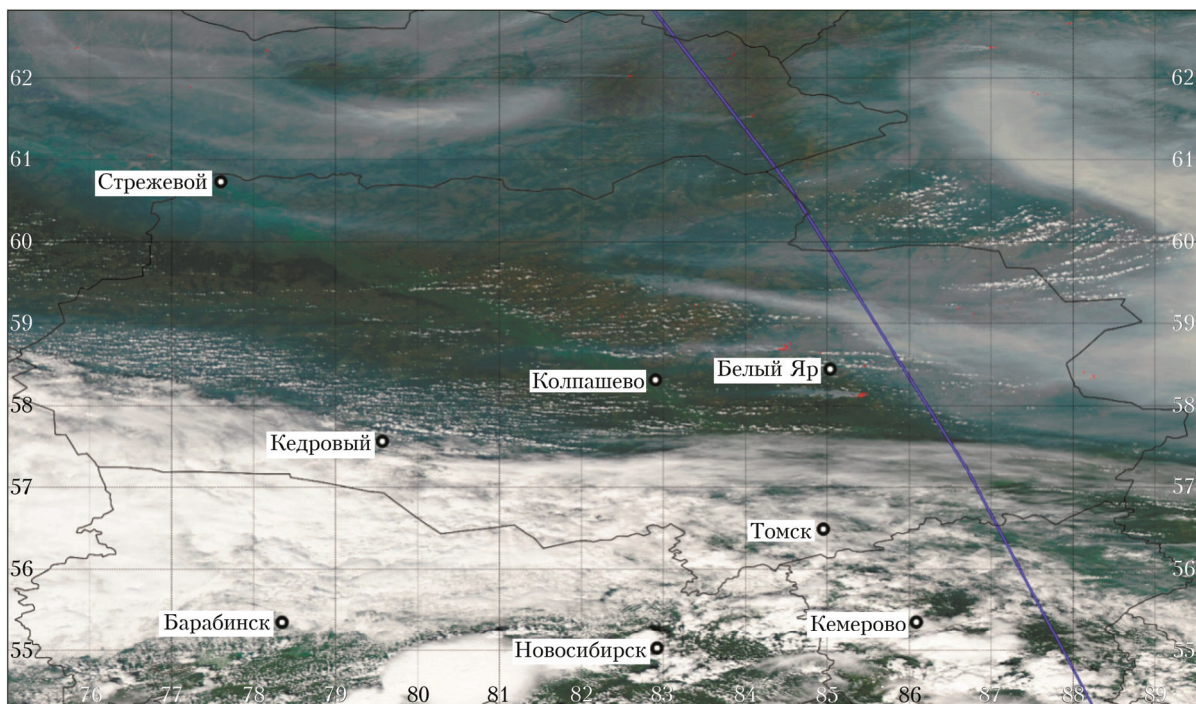


Рис. 3. Спутниковое изображение в видимой части спектра за 18 июля 2016 г. Обозначения аналогичны рис. 2, см. цветной рисунок на сайте iao.ru/ru/content/vol.33-2020/iss.09

данных лидара CALIOP, установленного на спутнике CALIPSO.

CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) – американо-французский исследовательский спутник, запущенный 28 апреля 2006 г. в рамках программы NASA EOS (Earth Observing System – система наблюдения Земли) для изучения глобального радиационного воздействия аэрозолей и облаков на климат [14]. Один из трех приборов, установленных на спутнике, – CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization), лидар с ортогональной поляризацией для наблюдения облаков и аэрозолей. Он предназначен для получения вертикальных профилей упругого рассеяния от облачного слоя в разное время суток, а также для описания распределения в атмосфере водяных паров, аэрозолей и пыли. Подсистема передатчика прибора пропускает лазерный свет одновременно на длинах волн 532 и 1064 нм с частотой импульсов 20,16 Гц. CALIOP использует три канала приемника: первый измеряет интенсивность обратного рассеяния на 1064 нм, второй и третий – ортогонально поляризованные компоненты сигнала обратного рассеивания на 532 нм. Прибор имеет вертикальное разрешение 30–60 м, горизонтальное – 333 м.

Результаты и обсуждения

Расчеты высот поднятия дыма от пожаров выполнялись исходя из профилей подтипов аэрозоля CALIOP и формул (1) и (2).

На рис. 4, а приведены пожары, непосредственно влияющие на распределение аэрозолей по про-

филю съемки от 30 июля 2012 г. с лидара CALIOP. Пожары, обозначенные как А и Б, расположены на небольшом удалении от линии профиля, однако на рис. 2 видно, что дым от этих пожаров пересекает профиль. Пожар, обозначенный как В, расположен на траектории спутника CALIPSO.

На рис. 4, б видно, что в границах профиля, расположенного между точками с координатами (55,97° с.ш., 85,78° в.д.) и (61,87° с.ш., 82,06° в.д.), в атмосфере до 5 км присутствуют пыль, загрязненный континентальный аэрозоль, загрязненная пыль и поднятый дым. Высоты подъема продуктов горения от пожаров, произошедших с 22 июля по 28 августа 2012 г., условно обозначенных А, Б и В (рис. 4, а), и от пожаров Г и Д (рис. 5, а), произошедших с 6 июля по 5 августа 2016 г., были рассчитаны по формуле (1) и приведены в табл. 1. Далее вычисленные значения высоты были нанесены на профиль подтипов аэрозоля лидара CALIOP (рис. 4, б).

Пожар в точке А в Кривошеинском р-не начался 26 июля и закончился 7 августа 2012 г., двигался со скоростью 3,5 м/мин в восточном направлении. Площадь гари на месте смешанного леса составила 13,5 км². По спутниковым данным, дым от пожара поднимался на высоту от 2,1 до 3,1 км (рис. 4, б). Вычисленная по формуле (1) высота подъема продуктов горения составила 3,2 км.

Пожар в точке Б в Верхнекетском р-не начался 23 июля и закончился 6 августа 2012 г., двигался со скоростью 2,7 м/мин в юго-западном направлении. По спутниковым данным CALIOP, дым от пожара поднимался на высоту от 2 до 3 км. По результатам модельного расчета конвективная колонка аэрозолей составила 2,7 км.

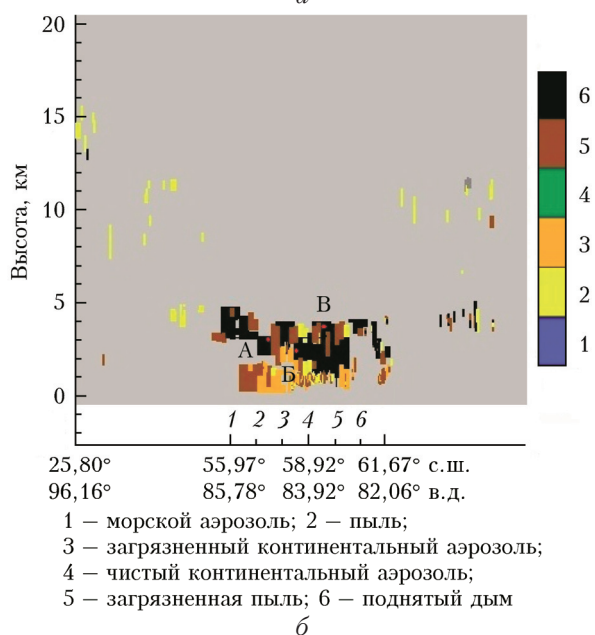
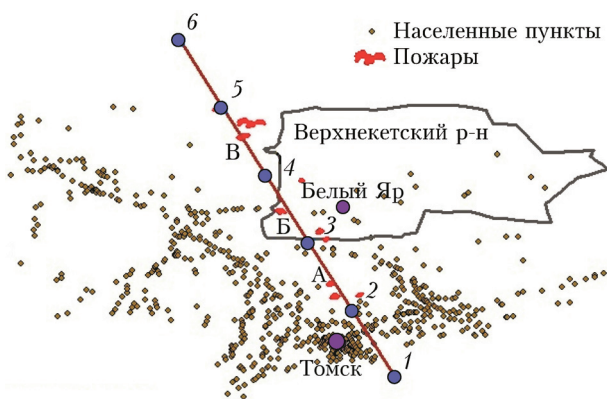


Рис. 4. Пожары, источники аэрозоля и траектория CALIPSO 30 июля 2012 г. (а); профиль подтипов аэрозоля по данным лидара CALIOP (б), цифрами 1–6 по оси абсцисс обозначены точки, соответствующие траектории движения спутника, см. цветной рисунок на сайте iao.ru/ru/content/vol.33-2020/iss.09

Пожар в точке В в Каргасокском р-не начался 24 июля и закончился 12 августа 2012 г., двигался со скоростью 4 м/мин в юго-западном направлении. Всего выгорело 31,3 км² смешанного леса. Дым от пожара поднимался на высоту от 1,3 до 4 км. Вычисленная по формуле (1) высота подъема продуктов горения составила 3,9 км.

Рассмотрим рис. 5 с указанными пожарами Г и Д в 2016 г. По спутниковым данным CALIOP, на профиле между точками 4 и 5 в конвективной колонке присутствуют пыль и загрязненный континентальный аэрозоль в незначительных количествах (рис. 5, б). Однако на профиле между точками 2 и 4 отмечается их преобладание, что объясняется антропогенным влиянием на состав аэрозоля от населенных пунктов (рис. 5, а). На профиле от 18 июля 2016 г. между точками 2 и 5 также присутствует поднятый дым, что объясняется влиянием пожаров и дальним переносом дымового облака.

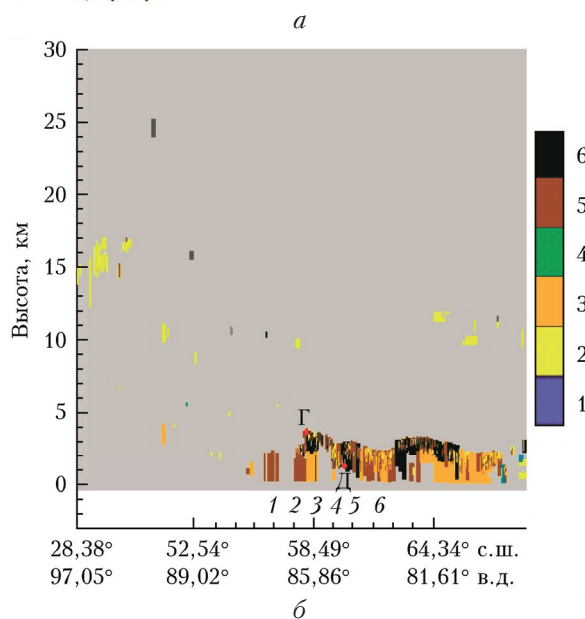
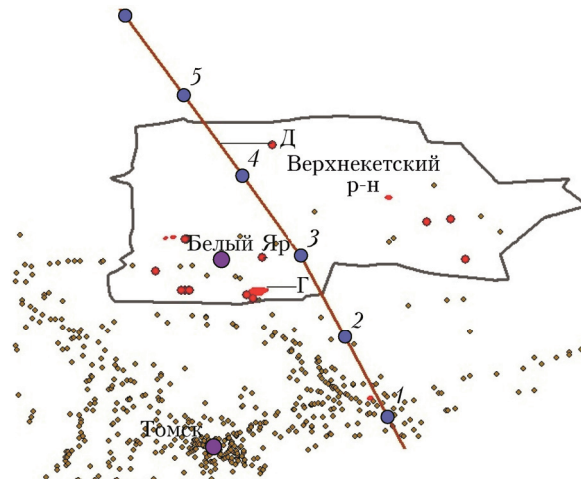


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, для 18 июля 2016 г., см. цветной рисунок на сайте iao.ru/ru/content/vol.33-2020/iss.09

Таблица 1
Расчет высоты подъема аэрозолей от пожаров А–Д по траектории спутника

Пожар	Площадь пожара, км ²	W, Вт	Z _m , км
А	13,5	6,7 · 10 ¹⁰	3,2
Б	7,3	3,6 · 10 ¹⁰	2,7
В	31,3	1,6 · 10 ¹¹	3,9
Г	43,5	4,4 · 10 ¹¹	4,3
Д	0,5	2,4 · 10 ⁹	1,3

Пожар в точке Г в Верхнекетском р-не, начался 6 июля и закончился 5 августа 2016 г., двигался в юго-западном направлении со скоростью 4 м/мин. В результате выгорело 43 км² смешанного леса. Согласно расчетам дым от пожара поднимался на высоту 4,3 км, тогда как на профиле лидара CALIOP высоты составляют от 2,3 до 4 км. Пожар с обозначением Д начался 11 и закончился 19 июля 2016 г.

Всего выгорело 0,5 км² смешанного леса. По расчетам дым от пожара поднимался на высоту 1,3 км, что не противоречит профилю лидара CALIOP, по которому высоты составляют от 1 до 1,9 км.

Методы оценки объемов эмиссий углерода, углекислого и других парниковых газов основываются на комплексном анализе данных выгоревших территорий, а именно показателей степени повреждения растительности и количества сгорающих растительных материалов. Дым от сгорающих растительных материалов представляет собой аэрозольно-газовую смесь, в состав которой входят оксиды углерода, азота, серы и частицы сажи, золы, пепла, смолы.

Общий объем выбросов загрязняющих веществ M_i каждого компонента газовой смеси аэрозоля от пожаров 2012 и 2016 гг. на территории Верхнекетского р-на определялся по формуле [15]:

$$M_i = m_{\text{лгм}} \cdot K_{\alpha i}, \quad (4)$$

где $m_{\text{лгм}}$ – масса сгорающих растительных материалов; K_{α} – коэффициент для каждого из компонентов дымового аэрозоля [15].

Масса сгорающих растительных материалов рассчитывается по формуле [16]:

$$m_{\text{лгм}} = S_{\text{д}} \cdot A_{\text{лгм}} \cdot K_{\text{н}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{д}}$ – площадь, занимаемая деревьями; $A_{\text{лгм}}$ – масса древесины и лесных горючих материалов, сосредоточенная на единице лесной территории; $K_{\text{н}}$ – коэффициент недожога.

Коэффициент недожога, предложенный в [16], принимается исходя из потерь лесных горючих материалов. Для низовых устойчивых пожаров, характерных для Верхнекетского р-на, коэффициенты недожога указаны в табл. 2.

Всего при сгорании 1 кг растительных горючих материалов в атмосферу выбрасывается 135 г оксида углерода, 4 г углекислого газа, 0,4 г оксида азота, 1,4 г сажи и 75 г метана [15].

В табл. 3 приведены результаты расчета выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от лесных пожаров в Верхнекетском р-не в 2012 и 2016 гг.; всего поступило 1402 и 249 тыс. т соответственно; в выбросах преобладали оксид углерода и диоксид углерода (табл. 3).

В целом в Верхнекетском р-не выбросы загрязняющих веществ от крупных пожаров значительно превышают выбросы от стационарных источников. Так, по данным Облкомприроды [18, 19], в 2012 и 2016 гг. в рассматриваемом районе от стационарных источников в атмосферу поступило 1068 и 1148 т загрязняющих веществ, что меньше в 1312 и в 216 раз объемов выбросов от пожаров (табл. 3).

Заключение

Таким образом, по усовершенствованной методике нами вычислены объемы выбросов загрязняющих веществ в результате пожаров. Так, за 2012 г. в Верхнекетском р-не в атмосферу поступило более 1800 тыс. т загрязняющих веществ. На профиле лидарных данных CALIOP показаны высоты поднятия дыма, которые составляют от 1,3 до 4,3 км, что не противоречит нашим модельным расчетам.

Полученные данные отражают объемы потери лесов. Проведенные расчеты убедительно свидетельствуют о необходимости принятия мер по сохранению лесов в рамках международных обязательств по спасению биологического разнообразия, смягчению глобальных изменений климата и сертификации лесного покрова.

Таблица 2

Запас лесных насаждений [17] на территории Верхнекетского р-на

Лесные насаждения	Запас фитомассы, кг/м ²	Коэффициент недожога
Кустарниковый березовый подрост	6,5	0,55
Спелые березовые леса III класса бонитета	9	0,55
Смешанные хвойно-мелколиственные леса	9,2	0,57
Заболоченные сосновые леса IV класса бонитета	8	0,35
Сосновые леса IV класса бонитета	12	0,35
Пихтовые леса	12,35	0,85
Еловые леса III класса бонитета	12,5	0,6

Таблица 3

Масса выбросов вредных веществ в атмосферу при пожарах 2012 и 2016 гг. на территории Верхнекетского р-на

Год	Площадь гарей, км ²	Масса сгораемых органических материалов, тыс. т	Выброс загрязняющих веществ, тыс. т						
			CO	CO ₂	NO _x	Сажа	Дым (ультра-дисперсные частицы SiO ₂)	CH ₄	Всего
2012	826	4383	592	412	2	6	61	329	1402
2016	192	779	105	73	0,3	1	11	58	249

Расчеты выбросов загрязняющих веществ и высоты поднятия дымовых аэрозолей выполнены в рамках государственного задания ИХН СО РАН (Проект V.46.2.1), финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Лидарные данные представлены в рамках госбюджетной темы АААА-А17-117013050031-8.

1. «Гринпис» опубликовал карту уничтоженных в России лесов [Электронный ресурс]. URL: <https://sakhaday.ru/news/grinpis-opublikoval-kartu-unichtozhennyh-v-russii-lesov/> (дата обращения: 28.01.2020).
2. Дебков Н.М., Оплетев А.С. Динамика лесного покрова Томской области с 2000 по 2014 г. // Электронный архив УГЛУТУ. 2018. № 2. С. 27–35.
3. Стратегия развития лесной отрасли Томской области на период до 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://pandia.ru/text/77/407/77615.php> (дата обращения: 28.01.2020).
4. Milodowski D.T., Mitchard T.A., Williams M. Forest loss maps from regional satellite monitoring systematically underestimate deforestation in two rapidly changing parts of the Amazon [Electronic resource]. URL: <https://apps.webofknowledge.com> (last access: 28.01.2020).
5. Assessing Harvested Sites in a Forested Boreal Mountain Catchment through Global Forest Watch [Electronic resource]. URL: <https://apps.webofknowledge.com> (last access: 28.01.2020).
6. Евсеева Н.С. Экологическая геоморфология. Опасные природные процессы. Томск: Изд-во Томс. ун-та, 2017. 278 с.
7. Бизин М.А., Попова С.А., Чанкина О.В., Макаров В.И., Шинкоренко М.П., Смоляков Б.С., Куценогий К.П. Влияние лесных пожаров на массовую концентрацию, дисперсный и химический состав аэрозоля в региональном масштабе // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 484–489.
8. Алексеева М.Н., Головацкая Е.А., Яценко И.Г. Загрязнение атмосферы от пожаров осушенных торфяников Томской области // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 12. С. 971–977.
9. Лесной план Томской области на 2019–2028 гг. [Электронный ресурс]. URL: <https://deples.tomsk.gov.ru/documents/front/view/id/11898> (дата обращения: 28.01.2020).
10. Потери лесов в Верхнекетском районе [Электронный ресурс]. URL: https://www.globalforestwatch.org/map/6/53.35/110.15/ALL/grayscale/loss,forestgain,forest2000?tab=analysis-tab&begin=2001-01-01&end=2018-01-01&threshold=30&dont_analyze=true (дата обращения: 28.01.2020).
11. Глобальный атлас пожаров [Электронный ресурс]. URL: <https://daac.ornl.gov> (дата обращения: 28.01.2020).
12. Оценка роли климатических факторов в возникновении и распространении лесных пожаров на территории Томской области // Вестн. Томс. гос. ун-та. 2015. № 395. С. 233–240.
13. Копылов Н.П., Хасанов И.Р. Прогнозирование параметров загрязнения атмосферы при крупных пожарах // Материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Центр стратегических исследований гражданской защиты МЧС России. 2003. С. 302–308.
14. CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document [Электронный ресурс]. URL: <https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/> (last access: 28.01.2019).
15. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров [Электронный ресурс]. Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды. URL: <https://pandia.ru/text/79/451/14615.php> (дата обращения: 11.02.2019).
16. Белькова Т.А., Перминов В.А., Алексеев Н.А. К вопросу о совершенствовании методики оценки экологического ущерба от лесных пожаров // Безопасность жизнедеятельности: наука, образование: сб. ст. по материалам VII Межрегиональной науч.-практ. конф., 23–24 ноября 2016 г., Южно-Сахалинск. 2017. С. 137–140.
17. Лесохозяйственный регламент Верхнекетского лесничества. Утвержден приказом Департамента лесного хозяйства Томской области от 20.12.2013 № 129 [Электронный ресурс]. URL: <https://deples.tomsk.gov.ru/lesohozjajstvennyye-reglamenti> (дата обращения: 28.01.2020).
18. Экологический мониторинг: Состояние окружающей среды Томской области в 2012 г. / Департамент природн. ресурсов и охраны окружающей среды, ОГУ «Облкомприрода» Администрации Томс. обл. Томск: Дельтаплан, 2013. 158 с.
19. Экологический мониторинг: Состояние окружающей среды Томской области в 2017 г. / Департамент природн. ресурсов и охраны окружающей среды, ОГУ «Облкомприрода» Администрации Томс. обл. Томск: Дельтаплан, 2018. 158 с.

M.N. Alekseeva, K.N. Pustovalov, E.A. Golovatskaya, I.G. Yashchenko. Calculation of aerosol emissions from fires of the Tomsk Region based on remote data.

The dynamics of forest loss from fires in the Verkhneketsky district of the Tomsk region is considered. The volumes of pollutant emissions resulting from fires are calculated. It was established that in the Verkhneketsky region smoke aerosols from the fires of 2012 and 2016 in terms of mass significantly exceed technogenic emissions from stationary sources. It is shown that smoke from fires spreads over a distance of more than 30 km. According to CALIOP lidar data, smoke elevations were estimated to be from 1.3 to 4.3 km, which does not contradict the calculations based on model formulas.