

КЛИМАТИЧЕСКИЙ ТРАССЕР - ЧЕРНЫЙ УГЛЕРОД НА ПОЛЯРНОМ КРУГЕ

CLIMATE TRACER - BLACK CARBON IN THE POLAR CIRCLE

Аннотация. Антропогенное воздействие на климат Арктики становится все более очевидным. В апреле-августе 2019 проведены измерения массовой концентрации короткоживущего климатического трассера - черного углерода на аэрозольном инструментальном комплексе, установленном вблизи г. Салехард. Впервые определены концентрации черного углерода, эмитируемого транспортом и городским хозяйством города, в шлейфах промышленных эмиссий топливно-энергетического комплекса ЯНАО и во время лесных пожаров в июле 2019 г. Анализ концентраций по секторам, определяемым расположением источников эмиссий аэрозолей горения, выделяет пять направлений: наиболее чистое юго-западное, наиболее загрязненный сектор - город Салехард, арктический сектор полуострова Ямал, крупнейший промышленный комплекс ТЭК на востоке ЯНАО, промышленный комплекс на юге ЯНАО и ХМАО. Среднемесячные концентрации черного углерода BC_{cp} в атмосфере ~ 25 нг/м³ определили чистые фоновые значения, эмиссии ТЭК приводили к трехкратному увеличению BC_{cp} , эмиссии г. Салехард в среднем достигали 161 нг/м³. Во время лесных пожаров на Полярном круге средняя концентрация черного углерода в направлении районов интенсивных пожаров возрастала более чем в семь раз.

Abstract. The anthropogenic impact on the climate of the Arctic is becoming increasingly evident. In April-August 2019, the mass concentration of the short-lived climate tracer - black carbon was measured on an aerosol instrument complex installed near Salekhard. For the first time, the concentrations of black carbon emitted by transport and urban economy of the city were determined in the plumes of industrial emissions of the fuel and energy complex of the Yamal-Nenets Autonomous District and during forest fires in July 2019. Analysis of concentrations in sectors determined by the location of sources of combustion aerosol emissions identifies five areas: the cleanest southwest, the most polluted sector – the city of Salekhard, the Arctic sector of the Yamal Peninsula, the largest fuel and energy complex in the east of the Yamal-Nenets Autonomous District, the industrial complex in the south of the Yamal-Nenets Autonomous District and Khanty-Mansi Autonomous District. The average monthly concentrations of black carbon (BC) in the atmosphere of ~ 25 ng/m³ determined the pure background values, the emissions of the fuel and energy complex led to a threefold increase in the average monthly concentrations of black carbon, the emissions of Salekhard reached 161 ng/m³ on average. During forest fires in the Arctic Circle, the average concentration of black carbon in the direction of intense fire areas increased by more than seven times.

Ключевые слова: аэрозольные загрязнения, черный углерод, городские и промышленные эмиссии, лесные пожары, Арктика.

Keywords: aerosol pollution, black carbon, urban and industrial emissions, forest fires, the Arctic.

Введение

При сжигании углеводородного топлива и во время лесных пожаров в атмосферу выбрасываются мельчайшие аэрозольные частицы. В настоящее время вклад от сжигания природного ископаемого топлива в промышленных установках, отопительных и транспортных системах, при горении биомасс в природных пожарах лесов и при сжигании биотоплива для отопления домов составляет порядка 25% от всей эмиссии аэрозолей с поверхности Земли [1]. Агломераты частиц в эмиссиях сжигания углеводородного топлива имеют размеры 0.1-0.5 мкм, состоят из первичных наночастиц диаметром 20-40 нм [2]. Физико-химические характеристики дыма пожаров существенно зависят от фазы тления или открытого горения [3, 4]. Микроструктура микрокристаллитов графита является причиной поглощения солнечного излучения в видимом диапазоне. Измеренную спектрофотометрическим методом [5, 6] концентрацию хорошо поглощающего аэрозоля в атмосфере называют black carbon (BC), отсюда в русском переводе появилось название «черный углерод».

Микрочастицы в продуктах сжигания являются опасным веществом для здоровья людей, особенно в районах интенсивного транспорта и промышленной деятельности. Они адсорбируют вредные вещества и проникают в организм человека на клеточном уровне через дыхательные пути, вызывают и усиливают дыхательные, сердечно-сосудистые и аллергические заболевания [7].

Оценки глобальных климатических моделей прямого радиационного эффекта BC от всех источников сжигания топлива и биомасс достигают 2 Вт/м², что лишь в два-три раза ниже парникового эффекта эмиссии диоксида углерода [8]. BC признан вторым после диоксида углерода короткоживущим климатическим трассером со временем жизни порядка недели. Предсказывается, что благодаря антропогенной эмиссии BC глобальный эффект ежегодного увеличения усредненной температуры поверхности Земли составляет 0.4K [9]. Показано значительное влияние дыма лесных пожаров Сибири на концентрацию и варьированность в атмосфере черного углерода, достигающего 15% массы аэрозолей [10].

Арктический регион наиболее чувствителен к быстрым климатическим изменениям. Скорость роста температуры воздуха в Арктике превысила в два раза скорость увеличения глобальной средней температуры за последние 100 лет [9]. Явление загрязнения атмосферы Арктики, названное Арктической Дымкой, стало известным в 1950-е годы. Исследования, проведенные в последующие 20 лет показали [11], что наблюдаемая зимой дымка является следствием переноса воздушных масс из средних широт в Арктику [12].

Экосистема Арктики особенно подвержена сильному воздействию аэрозольной компоненты в эмиссиях источников сжигания природного топлива и биомасс. BC, осаждающаяся на поверхности, способен

изменять отражательную способность снега и льда, что приводит к раннему снеготаянию и сокращению площади арктических льдов. Оценивается, что эмиссия в Арктику с российских территорий составляет 10-15% от мировой эмиссии углеродосодержащих аэрозолей, более 50% эмитируется к северу от 60 с.ш. [13]. По модельным оценкам, сжигание попутного нефтяного газа (ПНГ) в факелах составляет основной источник антропогенных эмиссий BC Сибирского региона (36.2%), за которым следуют эмиссии жилищного фонда (25.0%), транспорта (20.3%), промышленности (13.1%) и теплостанций (5.4%) [14]. Вывод о значительном вкладе промышленных эмиссий в высокую концентрацию черного углерода в акватории Карского моря подтвердился в морских экспедициях в периоды выноса воздушных масс из районов Ямало-Ненецкого и Ханта-Мансийского автономных округов [15, 16].

Однако оценка экологического состояния атмосферы и изменения природной среды в регионах российской Арктики сильно усложнены существующим недостатком знаний об источниках эмиссий, количестве и составе аэрозольных загрязнений, определяющих степень воздействия на экосистему Арктики. Утилизация ПНГ в факелах, как источник загрязнений воздуха, в нефтедобывающих регионах остается наименее изученной среди всех эмиссий при сжигании природного топлива как по полному количеству эмитированных продуктов, так и по фракции черного углерода [17]. Оценка последствий воздействия сжигания ПНГ в факелах на растительный покров проводится с помощью тепловых космических снимков [18], на снежный покров – методами анализа концентраций загрязнений в окрестностях факела [19].

В Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) в настоящее время наблюдается повышение эффективности всех видов экономической деятельности, интенсификация производства нефтегазового комплекса, увеличение объемов используемых природных ресурсов. В округе открыто 235 месторождений углеводородного сырья, из которых 63 находится в промышленной разработке, работает 59 нефтегазовых предприятий. Согласно данным Ямалстата по состоянию на 01.01.2014 ежегодные выбросы вредных веществ от сжигания ПНГ в ЯНАО составляют более 732 тыс. тонн вредных веществ. Более половины всей эмиссии приходится на оксид углерода, более трети – на углеводороды и летучие органические соединения, остальную часть выбросов (5%) составляют твердые вещества, окислы азота, сернистого ангидрида. Однако оценок эмиссий черного углерода не производится. На Полярном круге находится город Салехард, где оценки степени загрязнения воздуха эмиссиями черного углерода ранее не проводились. Значительные территории субарктической и арктической зоны ЯНАО находятся за Полярным кругом, куда в зимне-весеннее время происходит преимущественный перенос воздушных масс. В июле 2019 года на Полярном круге случились самые интенсивные природные пожары, по

данным Атмосферной службы мониторинга (СAMS) в 100 раз превышающие уровень ежегодно наблюдаемых пожаров.

Данная работа посвящена изучению степени загрязнения атмосферы ЯНАО продуктами сжигания природного топлива и биомасс, эмитируемыми в результате хозяйственной деятельности в городской среде, во время переноса шлейфов промышленных эмиссий теплоэнергетического комплекса и интенсивных лесных пожаров на Полярном круге. Впервые проведены измерения вблизи г. Салехард, количественно определены концентрации черного углерода, степень воздействия эмиссий климатического трассера – черного углерода на состояние атмосферы на Полярном круге.

Объекты и методы исследования

Для исследования степени загрязнения атмосферы продуктами сжигания, эмитируемыми городскими, промышленными источниками и лесными пожарами на Полярном круге, в 4-х км на юго-восток от города Салехард был организован научно-исследовательский аэрозольный пост (НИАП) (рис.1). Непрерывные измерения концентрации черного углерода производились при помощи аэталометра АЕ33 (Magee Scientific). Название "Aethalometer" является производным от греческого глагола 'aethaloun' (αεθαλον), означает «почернеть от сажи». Аэталометрический метод основан на регистрации

ослабления излучения видимого спектра собранными на фильтре аэрозольными частицами непосредственно в процессе их осаждения из воздушного потока. Аэталометр измеряет ослабление интенсивности света, проходящего через пятно на фильтрующей ленте (рис.2), на семи длинах волн в диапазоне от инфракрасного до ультрафиолетового. В процессе измерений определяется величина ослабления АТН (attenuation) как $ATN=100*\ln(I_0/I)$, где I_0 - интенсивность падающего света, а I - интенсивность света, прошедшего через фильтр. Особенностью аэталометра АЕ33 является одновременное измерение по двум каналам с разными скоростями прокачки воздуха из одного и того же входного воздушного потока, что обеспечивает оценку нелинейности поглощения при высоких нагрузках на фильтре компенсационной поправкой поглощения света частицами. Массовая концентрация ВС вычисляется по изменению оптического поглощения на длине волны 880 нм, другие аэрозольные частицы (органические, минеральные) в данном диапазоне поглощают значительно меньше [20].

Измерения массовой концентрации ВС были проведены с апреля по август 2019 г., сопровождались сбором данных о метеорологических параметрах (направлении и скорости ветра) с метеорологического ресурса gr5.ru. Ежеминутные данные усреднялись в течение каждого часа. Произведено осреднение ВС для 3-х часовых интервалов метео данных при каждом направлении ветра.



Рис. 1. Расположение НИАП измерений черного углерода вблизи г. Салехард



Рис. 2. Аэталометр АЕ33 для измерения концентрации черного углерода на Научно-исследовательском аэрозольном посту вблизи г. Салехард



Рис. 3. Пятна осажденных из атмосферы частиц на ленте аэталометра АЕ 33

С 19 апреля по 7 августа 2019 года в 4-х км на юго-восток от города Салехард проводились непрерывные измерения оптических свойств аэрозолей. Определена высокая варьируемость концентрации черного углерода, от 3 до 688 нг/м³. Анализ концентраций по секторам, определяемым расположением источников эмиссий аэрозолей горения различной степени интенсивности, выделил пять направлений:

наиболее чистое юго-западное, наиболее загрязненный сектор - город Салехард, арктический сектор полуострова Ямал, крупнейший индустриальный комплекс ТЭК на востоке ЯНАО и индустриальный комплекс на юге ЯНАО и ХМАО.

На рис. 4-6 приведены диаграммы розы ветров и пространственные распределения концентрации ВС по секторам для трех периодов измерений; апреля – мая,

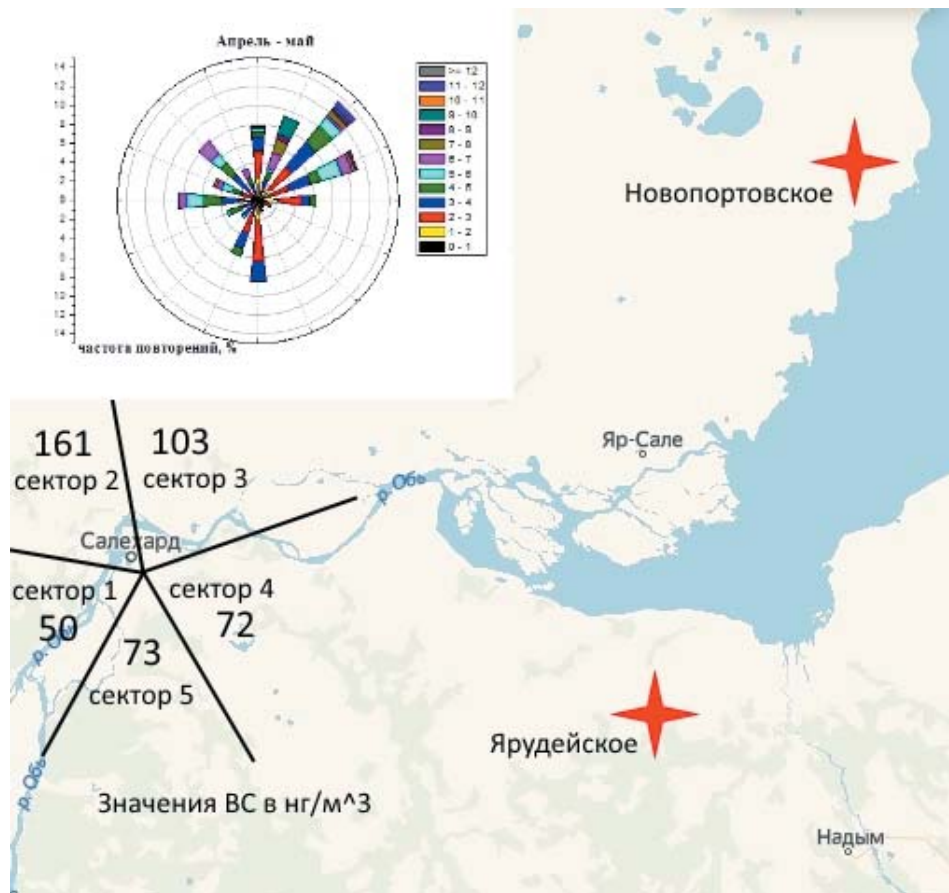


Рис. 4. Роза ветров (сверху, в таблице справа скорость ветра в м/с) и диаграмма распределения ВС по секторам (снизу) для апреля-мая 2019 г

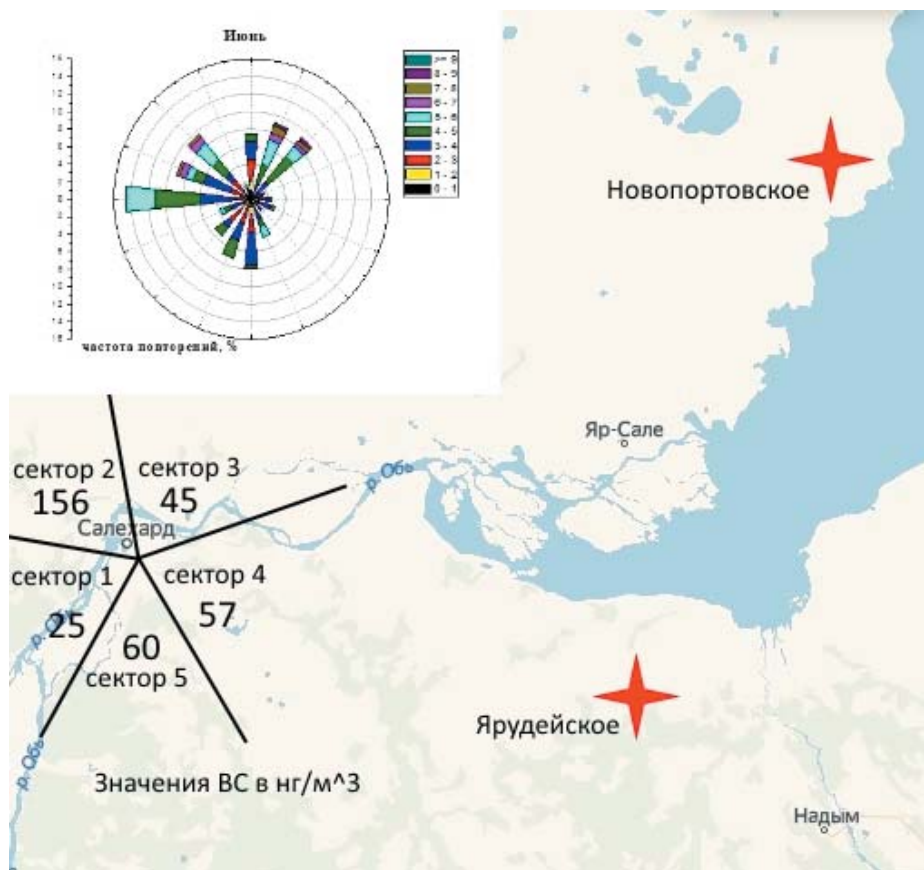


Рис. 5. Роза ветров (сверху, в таблице справа скорость ветра в м/с) и диаграмма распределения ВС по секторам (снизу) для июня 2019 г.

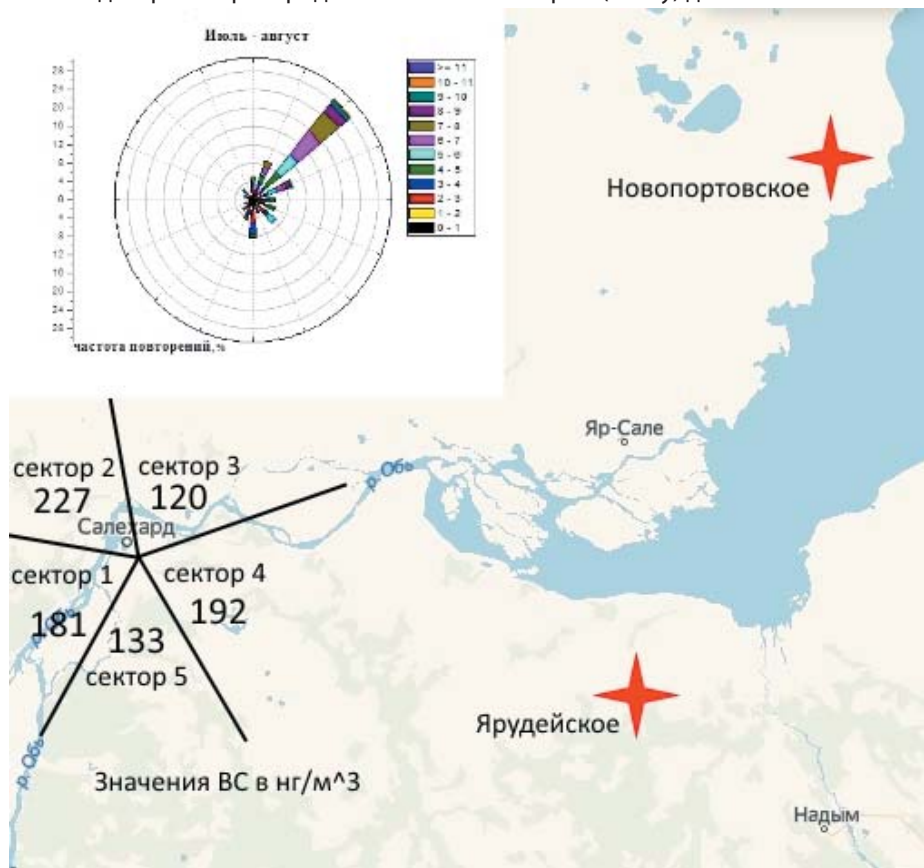


Рис. 6. Роза ветров (сверху, в таблице справа скорость ветра в м/с) и диаграмма распределения ВС по секторам (снизу) для июля-августа 2019 г.

июня и июля-августа. Совместный анализ направления ветра и концентрации ВС показал наиболее чистый сектор 1 (220-270 градусов) – юго-западное направление ЯНАО, Шурышкарский район, где отсутствуют объекты ТЭК и крупные населенные пункты. Значения ВС определены на самом низком уровне среди других секторов, в диапазоне от 3 до 95 нг/м³. В среднем значение ВС в секторе 1 за апрель - май было 50 нг /м³, в июне – 25 нг /м³.

Самым загрязненным сектором 2 оказался сектор 280-340 градусов выноса городских эмиссий из г. Салехард, значение ВС за указанный период варьировались от 33 до 597 нг/м³. Среднее значение в апреле-мае достигло 161 нг/м³, в июне - 156 нг/м³. Наблюдается 4-х кратное превышение средних концентрации ВС для самого загрязненного сектора городских эмиссий из г. Салехард относительно самого чистого сектора 1 Шурышкарского района ЯНАО.

Сектор 3 (350-50 градусов) – направление полуострова Ямал. Ближайший крупный объект ТЭК Новопортовское нефтяное месторождение находится на удалении 280 км. Значения ВС за указанный период варьировались от 25 до 244 нг/м³. В апреле - мае и июне средние значения в секторе 3 наблюдались 103 и 45 нг/м³.

Сектор 4 (60-150 градусов) – направление индустриальный ТЭК ЯНАО. Ближайший крупный объект ТЭК Ярудейское нефтяное месторождение находится на удалении 200 км. Значения ВС варьировались в диапазоне от 17 до 203 нг/м³. В апреле - мае и июне средние значения в секторе 4 наблюдались 72 и 57 нг/м³.

Сектор 5 (160-210 градусов) – направление юг ЯНАО - ХМАО, крупные объекты ТЭК отсутствуют. Значения ВС лежат в диапазоне от 11 до 145 нг/м³. В апреле - мае и июне средние значения в секторе 5 наблюдались 73 и 60 нг/м³.

По данным МЧС ЯНАО наиболее интенсивные пожары, охватившие площадь 200 га, наблюдались в

июле-августе 2019 г. Как и ожидалось, продукты горения лесных массивов значительно увеличили наблюдаемые концентрации ВС во всех секторах (рис.4 в). Площадь возгорания по состоянию на 31.07.2019 составляла 1839 га, на 30.06.2019 была 61 га. Среднемесячная концентрация увеличилась по всем направлениям и варьировалась от 14 до 688 нг/м³. Выделились несколько эпизодов с пиковыми одночасовыми значениями ВС: 3-5 июля - 688 нг/м³, 14-15 июля - 959 нг/м³, 17-18 июля - 1581 нг/м³, 30-31 июля - 1205 нг/м³ и 2-3 августа 440 нг/м³, показывая беспрецедентно высокие для северного Полярного круга уровни загрязнения атмосферы в летний период. По сравнению с периодом отсутствия природных пожаров по всем секторам произошло увеличение концентрации ВС от 1.5 до 5 раз, в чистом секторе 1 – в 7 раз.

Заключение

Впервые получены количественные данные о влиянии городских эмиссий, эмиссий теплоэнергетического комплекса и лесных пожаров на концентрацию климатического трассера - черного углерода на Полярном круге. Анализ данных вблизи г. Салехард показывает низкий уровень концентрации менее 25 нг/м³ при направлении ветра с юго-запада, более чем в три раза в среднем увеличение концентрации при направлении ветра со стороны городского массива Салехарда, и периодическое увеличение при направлении ветра с юго - западного направления, со стороны всего региона ЯНАО. Лесные пожары в июле 2019 г. на Полярном круге привели к возрастанию концентрации черного углерода в среднем в 7 раз по отношению к фоновым арктическим значениям.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 180560084.

Литература

1. T. C. Bond, E. Bhardwaj, R. Dong, R. Jogani, S. Jung, C. Roden, et al., "Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850–2000," *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 21, 2007.
2. О. Поповичева, А. Старик, «Авиационные сажевые аэрозоли: физико-химические свойства и последствия эмиссии в атмосферу (обзор),» *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, vol. 43, pp. 147-164, 2007.
3. О.Б. Поповичева, Р.Ф. Рахимов, В.П. Шмаргунов, Е.Д. Киреева, Н.М. Персианцева, М.А. Тимофеев, Guenter Engling, Kostas Eleftheriadis, Lila Diapouli, М.В. Панченко, Ralf Zimmermann, Juergen Schnelle-Kreis, «Оптико-микрорфизические и физико-химические характеристики дымов горения Сибирских биомасс: Эксперименты в аэрозольной камере. » *Оптика атмосферы и океана*, vol. 29, pp. 323-331, 2016.
4. Р. Ф. Рахимов, В. С. Козлов, М. В. Панченко, А. Г. Тумаков, and В. П. Шмаргунов, «Свойства атмосферного аэрозоля в дымовых шлейфах лесных пожаров по данным спектрофелометрических измерений,» *Оптика атмосферы и океана*, vol. 27, pp. 126-133, 2014.
5. В. Козлов, В. Шмаргунов, and В. Польшкин, «Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами,» *Приборы и техника эксперимента*, pp. 155-157, 2008.
6. L. Drinovec, G. Močnik, P. Zotter, A. Prévôt, C. Ruckstuhl, E. Coz, et al., "The "dual-spot" Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 8, pp. 1965-1979, 2015.
7. C. A. Pope III and D. W. Dockery, "Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect," *Journal of the air & waste management association*, vol. 56, pp. 709-742, 2006.
8. T. C. Bond and R. W. Bergstrom, "Light Absorption by Carbonaceous Particles: An Investigative Review," *Aerosol Science and Technology*, vol. 40, pp. 27-67, 2006/01/01 2006.
9. P. K. Quinn, A. Stohl, S. Arnold, A. Baklanov, T. K. Berntsen, J. H. Christensen, et al., "AMAP assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers," 2015.
10. Ю. Самсонов, С. Попова, О. Беленко, and О. Чанкина, «Химический состав и дисперсные характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в бореальных лесах Сибири,» *Оптика атмосферы и океана*, vol. 21, pp. 523-531, 2008.
11. T. Novakov and H. Rosen, "The Black Carbon Story: Early History and New Perspectives," *AMBIO*, vol. 42, pp. 840-851, November 01 2013.
12. L. Barrie, D. Fisher, and R. Koerner, "Twentieth century trends in Arctic air pollution revealed by conductivity and acidity observations in snow and ice in the Canadian high Arctic," *Atmospheric Environment* (1967), vol. 19, pp. 2055-2063, 1985.
13. D. Koch, M. Schulz, S. Kinne, C. McNaughton, J. Spackman, Y. Balkanski, et al., "Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, pp. 9001-9026, 2009.
14. K. Huang, J. S. Fu, V. Y. Prikhodko, J. M. Storey, A. Romanov, E. L. Hodson, et al., "Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 120, pp. 11,306-11,333, 2015.
15. О. Б. Поповичева, А. П. Макштас, В. В. Мовчан, Н. М. Персианцева, М. А. Тимофеев, and Н. М. Ситников, «Аэрозольная составляющая приводного слоя атмосферы по данным наблюдений экспедиции «Север-2015»,» *Проблемы Арктики и Антарктики*, pp. 57-65, 2017.
16. A. Stohl, Z. Klimont, S. Eckhardt, K. Kupiainen, V. P. Shevchenko, V. M. Kopeikin, et al., "Black carbon in the Arctic: the underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 13, pp. 8833-8855, 2013.
17. А. Соловьянов, «Сжигание попутного нефтяного газа и окружающая среда,» *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*, pp. 21-28, 2012.
18. П. Кирюшин, А. Книжников, К. Кочи, Т. Пузанова, and С. Уваров, «Попутный нефтяной газ в России: «Сжигать нельзя, перерабатывать»,» 2013.
19. В. Ф. Рапута, «Экспериментальные и численные исследования аэрозольных выпадений примесей в окрестности нефтегазового факела,» *Сибирский журнал чистой и прикладной математики*, vol. 13, pp. 96-102, 2013.
20. J. Sandradewi, A. S. Prévôt, S. Szidat, N. Perron, M. R. Alfarra, V. A. Lanz, et al., "Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter," *Environmental science & technology*, vol. 42, pp. 3316-3323, 2008.

Сведения об авторах:

Кобелев Василий Олегович – научный сотрудник (на момент написания статьи) сектора эколого-биологических исследований ГКУ ЯНАО «Научный Центр изучения Арктики»
E-mail: 79220950065@ya.ru

Поповичева Ольга Борисовна – ведущий научный сотрудник Научно-исследовательский институт ядерной физики им. М.В.Скобелевца МГУ им.М.В.Ломоносова, кандидат физико-математических наук
E-mail: polga@mics.msu.su

Синицкий Антон Иванович – директор (на момент написания статьи) ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», кандидат геолого-минералогических наук
E-mail: geolosoph@gmail.com