

УДК 551.510.41

МОНИТОРИНГ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧЕРНОГО УГЛЕРОДА В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ В РАЙОНЕ ПЕЧОРО-ИЛЫЧСКОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА

¹Виноградова А.А., ¹Копейкин В.М., ²Смирнов Н.С.

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва,
e-mail: anvinograd@yandex.ru;

²Печоро-Илычский государственный природный биосферный заповедник, Якша

Приводятся результаты непрерывного круглогодичного мониторинга содержания черного углерода (black carbon – BC) в приземном воздухе на территории Печоро-Илычского биосферного заповедника – с октября 2017 г. по сентябрь 2018 г. с временным разрешением в одни сутки. Средние значения концентрации BC (плюс-минус стандартное отклонение) составляют (296 ± 172) нг/м³ и (175 ± 82) нг/м³ в холодную часть года в приземном воздухе в поселке Якша и вне его соответственно, и (81 ± 38) нг/м³ – в теплую часть года вне поселка. Таким образом, вклад поселка в содержание BC в атмосфере можно оценить примерно в 120 нг/м³. Анализ траекторий дальнего переноса воздушных масс к пункту наблюдений показал, что основные источники BC для района Печоро-Илычского заповедника удалены от него на расстояния до 500 км. Это антропогенные источники, связанные с промышленностью и отоплением в городах и поселках Свердловской области, Пермского края, Удмуртской Республики, Республики Коми, с добычей углеродсодержащего топлива на территориях ЯНАО и ХМАО, а также летом – с лесными пожарами на территориях всех ближайших регионов. Рассматриваются распределения эмиссии BC в атмосферу от антропогенных источников и пожаров – на координатной сетке $1^\circ \times 1^\circ$ по спутниковым данным. Сравнение измеренных среднемесячных величин концентрации BC в приземном воздухе с оценками этой же характеристики по спутниковым наблюдениям (реанализ MERRA-2) показывает хорошее соответствие, что можно считать взаимной верификацией и подтверждением достоверности данных измерений *in situ* и дистанционных наблюдений.

Ключевые слова: Печоро-Илычский заповедник, загрязнение, черный углерод в атмосфере, спутниковая информация, реанализ MERRA-2

MONITORING OF BLACK CARBON CONCENTRATION IN NEAR SURFACE AIR IN THE PECHORA-ILYCH BIOSPHERE RESERVE

¹Vinogradova A.A., ¹Kopeykin V.M., ²Smirnov N.S.

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow,
e-mail: anvinograd@yandex.ru;

²Pechora-Ilych State Nature Biosphere Reserve, Yaksha

The results of continuous monitoring of black carbon (BC) in the surface air on the territory of Pechora-Ilych Nature Biosphere Reserve from October 2017 till September 2018 are presented. Air sampling was carried out during the year with a time resolution of one day. The mean concentrations (\pm standard deviation) are (296 ± 172) ng/m³ and (175 ± 82) ng/m³ in the cold part of the year in and outside the settlement Yaksha, respectively, and (81 ± 38) ng/m³ in the warm part of the year outside Yaksha. Thus, the input of the settlement Yaksha to air BC concentration is about 120 ng/m³. Analysis of the trajectories of long-range air masses transport to the observation point showed the main BC sources placed at distances up to 500 km from the point of observation. They are a lot of anthropogenic sources associated with industries, transportation, and heating in Sverdlovskaya region, Perm Krai, Udmurt Republic, Republic of Komi, with oil/gas mining in YANAO and KHMAO, as well as summer wildfires on the territories of these regions. The distributions of BC emissions into the atmosphere from anthropogenic sources and wildfires are analyzed on $1^\circ \times 1^\circ$ coordinate grid. Comparison of monthly averaged measured BC concentrations in surface air with estimates of the same characteristic from satellite observations (from MERRA-2 reanalysis data) shows good agreement, which can be considered as a joint verification and validation of data measured *in situ* and remote observations.

Keywords: Pechora-Ilych Nature Reserve, pollution, black carbon in the atmosphere, satellite information, MERRA-2 reanalysis

Изучение процессов антропогенного загрязнения природных экосистем удаленных территорий чрезвычайно важно как для понимания сопутствующих природных явлений, так и с точки зрения оценки состояния окружающей среды, выявления источников и минимизации последствий загрязнения. Черный углерод (black carbon – BC) – один из короткоживущих климатически значимых компонентов атмосферы [1] – об-

разуется в результате неполного сгорания углеродсодержащих веществ, в частности органического топлива. В холодную часть года источники BC в атмосфере преимущественно антропогенные (отопление, транспорт, энергетика и т.д.), тогда как летом к ним добавляются природные пожары, сильно модулирующие поле эмиссий BC как в пространстве, так и в разные месяцы и годы. Влияние атмосферного BC на кли-

мат обусловлено поглощением черными частицами солнечной радиации (прямые радиационные эффекты) и его физическими и химическими свойствами, меняющими состав и микрофизику атмосферы (косвенные эффекты) [2, 3].

Измерения концентрации ВС в атмосфере проводятся как в городах [4, 5], так и в труднодоступных районах [6–8], но редко непрерывно в течение года и более [8–10]. Кроме того, в последние годы очень расширилась сеть спутникового мониторинга параметров и состава атмосферы, выходные данные которой теперь включают и содержание ВС в приземной атмосфере [11].

Цель работы: анализ и обсуждение результатов непрерывного мониторинга концентрации ВС в приземной атмосфере, полученных в течение года (октябрь 2017 – сентябрь 2018) в новой точке наблюдений в центральной России (Печоро-Илычский биосферный заповедник), а также их сравнение с данными реанализа спутниковой информации.

в поселке Якша, а затем (примерно через два месяца) перенесен на 1,8 км восточнее в ближайший лесной массив. Высота размещения воздухозаборника над землей в обоих случаях составляет примерно 2 м. Пробы атмосферного аэрозоля отбираются путем непрерывного прокачивания воздуха через перхлорвиниловые фильтры АФА-ХП-20, длительность сбора каждой пробы одни сутки, смена фильтра производится около 8 часов по местному времени. Определение массы черного углерода, собранного на фильтр, производится в Москве фотометром, разработанным в ИФА им. А.М. Обухова РАН [9], по ослаблению экспонированным фильтром излучения в красной области спектра (0,6–0,8 мкм).

Результаты измерения концентрации ВС, перенос воздушных масс и источники ВС

На рис. 2 приведены результаты ежедневных измерений концентрации ВС в приземном воздухе в районе пос. Якша. Вертикальной чертой рисунок разделен



Рис. 1. Положение пункта наблюдений (звёздочка) на схеме

Объект исследований, методы и подходы

Работы по отбору проб воздуха проведены вблизи поселка Якша на территории Печоро-Илычского государственного природного биосферного заповедника [12] (далее – ПИГПБЗ), вдали от крупных промышленных центров и больших городов (рис. 1). Климат этого района довольно суров – снег лежит больше полугода (с середины октября почти до конца апреля), средняя температура воздуха в январе $-17,6^{\circ}\text{C}$, в июле $+16,5^{\circ}\text{C}$.

Пробоотборник атмосферного аэрозоля сначала был установлен непосредственно

на две области: когда наблюдения проводились в поселке и вне его. Средние (за первые 2 месяца и последующие 5 холодных месяцев) значения плюс-минус стандартное отклонение составляют (296 ± 172) $\text{нг}/\text{м}^3$ и (175 ± 82) $\text{нг}/\text{м}^3$ соответственно. Достоверность различия этих значений около 90% (по критерию Стьюдента). Разницу в загрязнении воздуха черным углеродом в холодное время года между двумя пунктами – около $120 \text{ нг}/\text{м}^3$ – можно отнести на вклад местных источников ВС, расположенных в самом поселке, где отопление дровяное. В теплую часть года концентрация ВС в воздухе

(81 ± 38) нг/м³, что примерно вдвое ниже, чем в холодное время года. Относительное стандартное отклонение круглый год выше 40%, что говорит о больших межсуточных вариациях измеряемой концентрации ВС.

Средние распределения направлений поступления воздушных масс к пункту отбора аэрозольных проб (по 5-суточным траекториям переноса воздушных масс, рассчитанным с помощью программы HYSPLIT на сайте [13]) представлены на диаграмме рис. 3. В целом в течение года воздух в пункт наблюдений поступал преимущественно из западного и южного секторов, особенно в холодную часть года. Одна-

ко условия циркуляции атмосферы сильно менялись от месяца к месяцу. Именно вариации процессов циркуляции атмосферы, при условии постоянства пространственного распределения мощностей источников эмиссии ВС в атмосферу (рис. 4) определяют колебания величины концентрации ВС в пункте наблюдений.

Зона влияния источников эмиссий ВС примерно охватывает территорию с географическими координатами в пределах $(52-72)^\circ\text{с.ш.}$, $(46-66)^\circ\text{в.д.}$ Средние эмиссии ВС в атмосферу от антропогенных источников и от пожаров в этой зоне показаны на рис. 4 – по данным [14, 15].

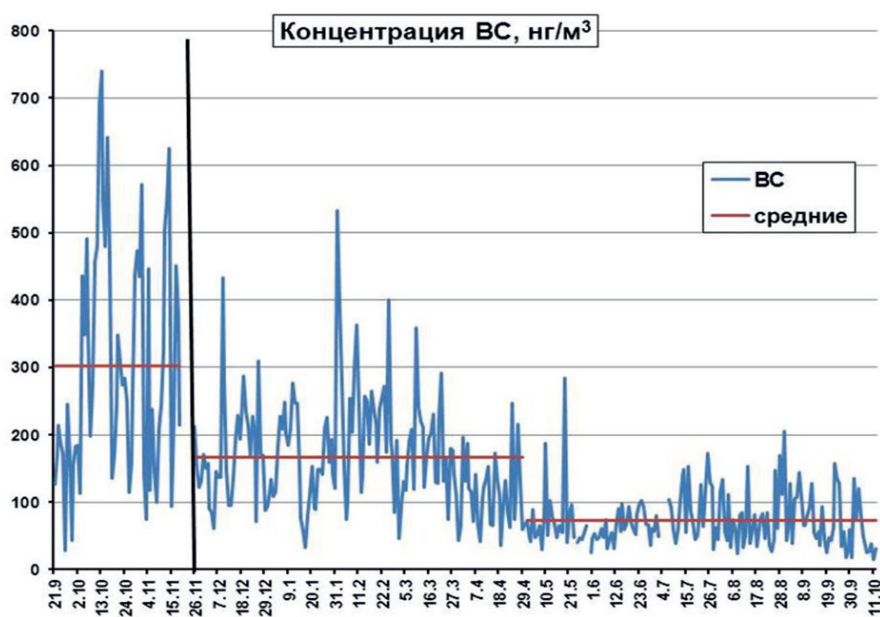


Рис. 2. Ежесуточные величины концентрации ВС в приземном воздухе пункта наблюдений. Вертикальная черта – время изменения положения точки отбора проб, красные горизонтальные прямые – средние значения для разных временных отрезков (см. текст)

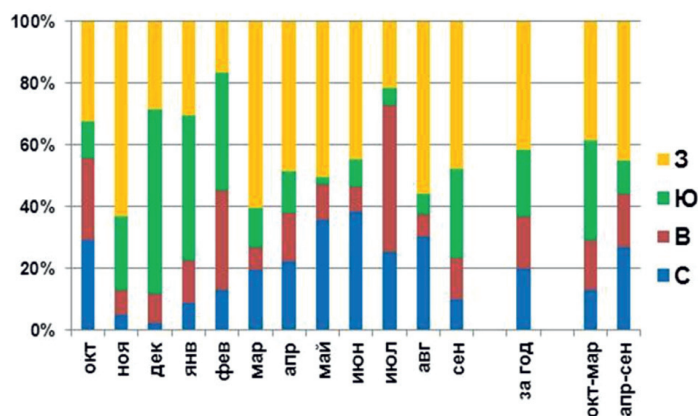


Рис. 3. Средние распределения воздушных масс, приходящих к району отбора проб, по сторонам горизонта (З – запад, Ю – юг, В – восток, С – север): по месяцам, за год и за холодное и теплое полугодия

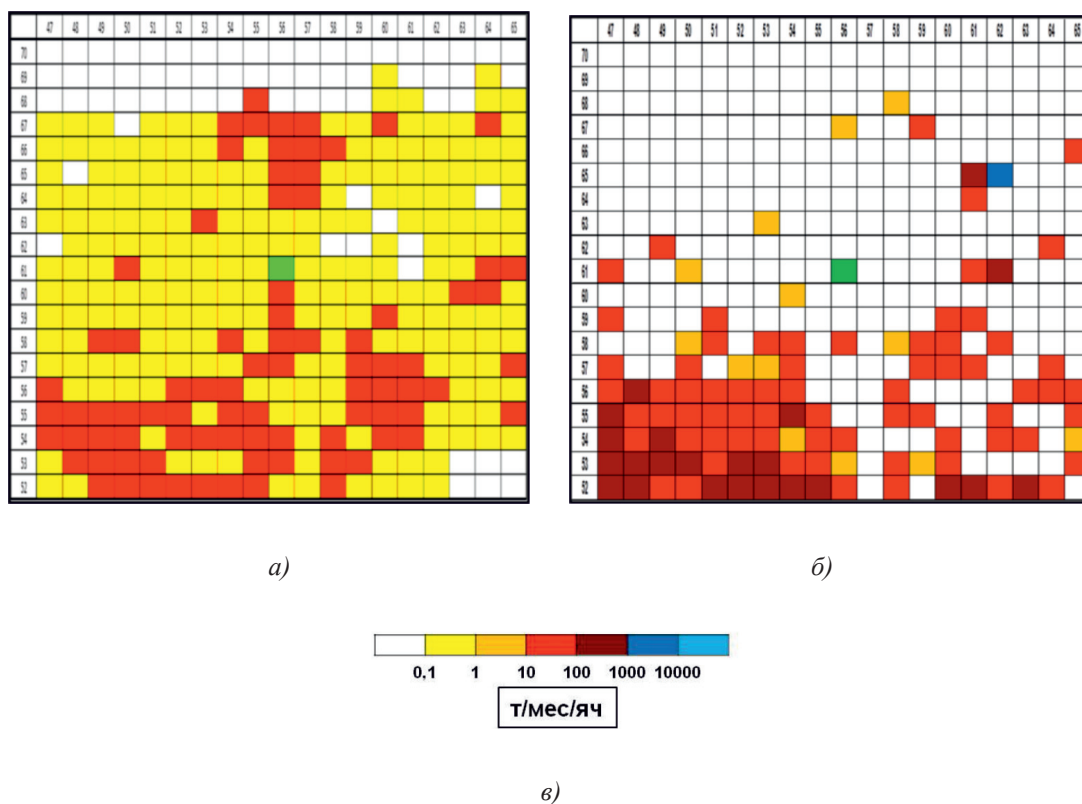


Рис. 4. Мощности эмиссий ВС в атмосферу в центре России на географической сетке $1^\circ \times 1^\circ$: а – антропогенные (в среднем за 2010–2014 гг.); б – от пожаров (в июле – августе 2018 г.); в – шкала, т/мес/яч. Пункт наблюдений расположен в зеленой ячейке

Сопоставляя распределения траекторий, рассчитанных по программе HYSPLIT, с распределениями источников ВС, можно выявить основные удаленные от пункта наблюдений источники, ответственные за загрязнение изучаемого района. Для ПИГПБЗ это промышленные районы севера Свердловской области (Нижний Тагил, Красноуральск, Ревда, Алапаевск и др.) и Пермского края (Березники, Краснокамск, Соликамск, Красновишерск и др.), северо-западные районы ХМАО и ЯНАО (г. Салехард, Воркута, Нягань, Нарьян-Мар и др.), а также факелы сжигания попутного газа при добыче нефти и газа), города и поселки Республики Коми (Троице-Печорск, Ухта, Сыктывкар и др.). Изредка в район наблюдений черный углерод поступает от источников Удмуртской Республики и Татарстана. Для конкретных дней лета 2018 г. с максимальными значениями концентрации ВС в заповеднике можно по рис. 4, б, также определить положение конкретных пожаров, ответственных за это загрязнение. Расположение и интенсивность пожаров сильно разнятся год от года, что должно сказываться на меж-

годовых вариациях концентрации ВС в теплое время.

В работе [16], где обсуждаются результаты измерений ВС в ПИГПБЗ только за холодное полугодие, приводится сводная таблица измеренных величин концентрации ВС в разных районах мира и России, из которой очевидно, что полученные в данном исследовании значения вполне реальны и закономерно отражают ситуацию, свойственную центральным непромышленным районам России. Результаты измерений ВС в приземном воздухе за год, которые обсуждаются в данной работе, также хорошо вписываются в общую картину распределения этого показателя по территории России.

Сравнение с данными реанализа спутниковой информации MERRA-2

Интересно сравнить полученные результаты непосредственного мониторинга концентрации ВС в приземном воздухе в пункте наблюдений с данными реанализа спутниковой информации (MERRA-2 [11]) – рис. 5. Видно, что средние месячные результаты сходятся в целом очень

неплохо. Это можно считать взаимной верификацией спутниковых и измеренных данных и подтверждением их достоверности. Таким образом, для оценок сезонных и межгодовых вариаций концентрации ВС в приземной атмосфере можно пользоваться спутниковой информацией, которая открыта для использования в [11].

и посёлках (с их промышленностью, транспортом и бытовым отоплением) Пермского края, Удмуртской Республики, Республики Коми. Результаты измерений ВС в приземном воздухе ПИГПБЗ, которые обсуждаются в данной работе, хорошо вписываются в общую картину распределения этого показателя по территории России.

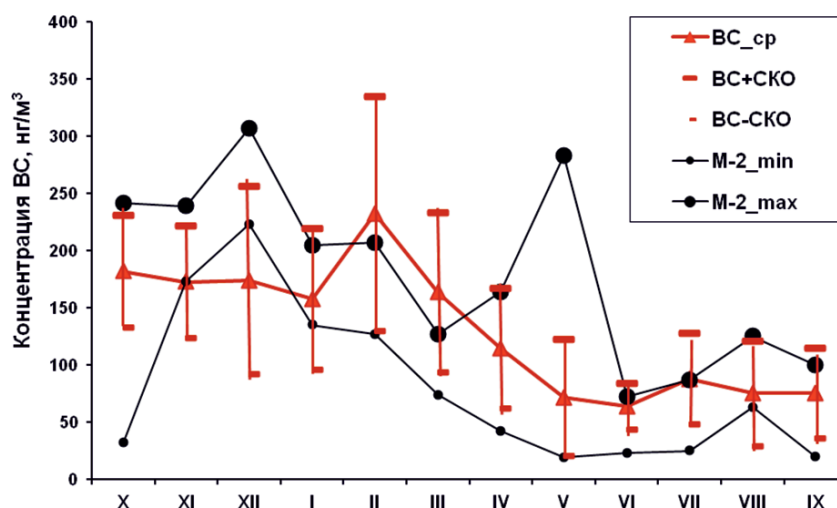


Рис. 5. Средние значения концентрации ВС по месяцам: BC_{cp} – результаты измерения со стандартными отклонениями ($BC+CKO$, $BC-CKO$ – вертикальные границы); $M-2_{min}$ и $M-2_{max}$ – минимальные и максимальные оценки реанализа MERRA-2

Выводы

– Представлена точка круглогодичного ежедневного мониторинга (с временным разрешением в одни сутки) концентрации ВС в приземном воздухе труднодоступного района Северного Урала (на территории Печоро-Илычского природного заповедника), где получены новые данные об уровне содержания черного углерода (BC) в приземной атмосфере и об источниках этого загрязнения. Проведен анализ результатов измерений в течение года – с октября 2017 по сентябрь 2018 г. Средние значения концентрации ВС (плюс-минус стандартное отклонение) составляют в холодную половину года (296 ± 172) ng/m^3 и (175 ± 82) ng/m^3 в приземном воздухе в поселке Якша и вне его соответственно, а в теплую часть года (81 ± 38) ng/m^3 вне поселка.

– Основные антропогенные источники ВС в атмосфере в районе Печоро-Илычского заповедника удалены от пункта наблюдений на расстояние не больше 500 км и расположены на территориях Свердловской области, районов добычи углеродсодержащего топлива ЯНАО и ХМАО, в городах

– Сравнение среднемесячных результатов измерений концентрации ВС в приземном воздухе с оценками этой же характеристики по спутниковым данным (реанализ MERRA-2) показывает удовлетворительное соответствие, что можно считать их взаимной верификацией и подтверждением достоверности.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ – грант № 17-05-00245. Авторы благодарят организаторов сайта Лаборатории воздушных ресурсов за возможность свободно использовать модель HYSPLIT.

Список литературы / References

1. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway. 2015. 116 p.

2. Панченко М.В., Журавлева Т.Б., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Польшкин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Оценка радиационных эффектов аэрозоля в фоновых и задымленных условиях атмосферы Сибири на основе эмпирических данных // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 45–54.

Panchenko M.V., Zhuravleva T.B., Kozlov V.S., Nasrtdinov I.M., Pol'skin V.V., Terpugova S.A., Chernov D.G. Estimation of Aerosol Radiation Effects under Background and Smoke-

- haze Atmospheric Conditions over Siberia from Empirical Data. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. vol. 41. no. 2. P. 104–111. DOI: 10.3103/S1068373916020047.
3. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Bernsten 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. vol. 118. no. 11. P. 5380–5552. DOI: 2169-897X/13/10.1002/jgrd.50171.
4. Копейкин В.М. Наблюдение сажевого аэрозоля в атмосфере над Россией в международных экспедициях TROICA // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20. № 7. С. 641–646.
- Kopeykin V.M. Observation of the submicron aerosol content in the atmosphere over Russia in the TROICA international experiments // *Optika atmosfery i okeana*. 2007. vol. 20. № 7. P. 641–646 (in Russian).
5. 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_{2.5}, data from two urban sites in Guadalajara, Mexico during 2008. *Atmospheric Pollution Research* 2011. vol. 2. P. 358–365. DOI: 10.5094/APR.2011.040.
6. 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. vol. 18. no. 16. P. 11599–11622. DOI: 10.5194/acp-18-11599-2018.
7. Popovicheva O., Diapouli E., Makshtas A., Shonija N., Manousakas M., Saraga D., Uttae T., Eleftheriadis K. East Siberian Arctic background and black carbon polluted aerosols at HMO Tiksi. *Sci. Total Environ.* 2019. vol. 655. no. 3. P. 924–938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.165.
8. Gong S.L., Zhao T.L., Sharma S., Toom-Sauntry D., Lavoué D., Zhang X.B., Laitch W.R., Barrie L.A. Identification of trends and interannual variability of sulfate and black carbon in the Canadian High Arctic: 1981–2007. *J. Geophys. Res.* 2010. vol. 115. no. D7. D07305. DOI: 10.1029/2009JD012943.
9. Копейкин В.М., Емиленко А.С., Исаков А.А., Лоскутова О.В., Пономарева Т.Я. Изменчивость сажевого и субмикронного аэрозоля в Московском регионе в 2014–2016 гг. // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. № 1. С. 5–10.
- Kopeykin V.M., Emilenko A.S., Isakov A.A., Loskutova O.V., Ponomareva T.Ya. et al. Variability of Soot and Fine Aerosol in the Moscow Region in 2014–2016. *Atmos. Ocean Opt.* 2018. vol. 31. no. 3. P. 243–249. DOI: 10.1134/S1024856018030089.
10. Eleftheriadis K., Vratolis S., Nyeki S. Aerosol black carbon in the European Arctic: Measurements at Zeppelin station, Ny-Ålesund, Svalbard from 1998–2007. *Geophys. Res. Lett.* 2009. vol. 36. no. 2. L02809. DOI:10.1029/2008GL035741.
11. Access NASA Earth Science Data [Electronic resource]. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni> (date of access: 16.10.2019).
12. Печоро-Ильчский государственный природный биосферный заповедник. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pechora-reserve.ru> (дата обращения: 16.10.2019).
- Pechora-Ilych State Nature Biosphere Reserve. [Electronic resource]. URL: <https://www.pechora-reserve.ru> (date of access: 16.10.2019).
13. Air Resources Laboratory [Electronic resource]. URL: <http://www.arl.noaa.gov> (date of access: 16.10.2019).
14. Air Quality Engineering & Climate Studies Research Group [Electronic resource]. URL: <http://acs.engr.utk.edu/Data.php> (date of access: 16.10.2019).
15. Global Fire Emissions Database. [Electronic resource]. URL: <http://www.globalfiredata.org> (date of access: 16.10.2019).
16. Виноградова А.А., Копейкин В.М., Смирнов Н.С., Васильева А.В., Иванова Ю.А. Черный углерод в приземном воздухе в районе Печоро-Ильчского заповедника: измерения и источники // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32. № 6. С. 430–436. DOI: 10.15372/AOO20190602.
- Vinogradova A.A., Kopeykin V.M., Smirnov N.S., Vasileva A.V., Ivanova Yu.A. Black carbon in near-surface air in Pechora-Ilych nature reserve: measurements and sources. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019. vol. 32. no. 5. P. 521–527. DOI: 10.1134/S102485601905018X.