

УДК: 10.18522/2308-9709-2020-32-2
<https://new.jbks.ru/archive/issue-32/article-2>

Загрязняющие вещества как фактор деградации высокогорных ледников. Обзор

[Абакумов Е. В.¹](#), [Темботов Р. Х.²](#)

1. Санкт-Петербургский государственный университета, кафедра прикладной экологии
2. Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН

Загрязняющие вещества являются важным фактором, приводящим к деградации ледников. Одним из веществ, вносящих наибольший вклад в таяние снежного и ледяного покрова, является черный углерод. Он образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива, выбросов дизельных двигателей транспортного и промышленного назначения, а также лесных пожаров и сжигания сельскохозяйственных отходов. Выпадая на покров ледников, черный углерод уменьшает альбедо поверхности, что в свою очередь приводит к их нагреванию и дальнейшему таянию. Это чрезвычайно важно для горных районов. В этом обзоре рассмотрено влияние загрязняющих веществ, в том числе и черного углерода, на деградацию ледников горных регионов, на примере Центрального Кавказа. В работе показано, что горные ледники Центрального Кавказа постепенно, хотя и неравномерно, тают, и причиной является не только глобальное потепление, но и загрязняющие вещества, оседающие на их поверхности. Показаны пути переноса и источники загрязнения ледников. Выявлено, что основными источниками загрязняющих веществ на Центральном Кавказе являются воздушные массы из Ближнего Востока, Восточной и Южной Европы, а также северной Африки. В единственной работе, посвященной изучению черного углерода на Центральном Кавказе, говорится, что в первой половине 20-го века, антропогенные выбросы из Европы привели к увеличению концентраций черного углерода на Эльбурсе в 1,5 раза. Также показано, что основными региональными источниками черного углерода на Северном Кавказе являются лесные пожары и сжигание сельскохозяйственных отходов. Промышленное производство на Северном Кавказе слабо развито и не вносит существенного вклада в выбросы черного углерода и тем самым деградацию ледников Центрального Кавказа.

1.

Загрязняющие вещества присутствуют в атмосфере в виде аэрозолей – взвешенных в воздухе жидких или твердых частиц. Они влияют на формирование облаков, биогеохимический цикл, способствуют таянию ледников, ускоряют процесс изменения климата на планете и приводит к деградации окружающей среды [23, 24]. Аэрозоли, доставляемые воздушными массами к ледникам, формируют на их поверхности слои с повышенной концентрацией, которые скапливаются и способствуют их таянию. Одним из первичных аэрозолей имеющим сильную светопоглощающую способность и небольшой размер, позволяющий транспортировать его на большие расстояния, является черный углерод [33, 37].

Черный углерод является одним из климатообразующих веществ, который недолгое количество времени находится в атмосфере – от нескольких дней до нескольких лет [4, 19, 22]. Различные авторы [11, 20, 25] утверждают, что черный углерод является, вслед за углекислым газом, важнейшим искусственным вкладчиком в глобальное потепление и ускорение таяния ледников. Продолжительность нахождения в атмосфере углекислого газа очень велика и составляет около 100 лет. Поэтому, предпринятые меры по уменьшению выбросов углекислого газа проявят эффект только через десятки лет. Исходя из этого, идея сокращения выбросов других аэрозолей, таких как черный углерод, оказывающих значительное влияние на климат, но остающихся в атмосфере недолгое время, рассматривается в качестве альтернативы [8, 34].

В работах [35, 38] показано, что черный углерод улавливает в несколько сотен раз больше тепла, чем углекислый газ, и поэтому сокращение его выбросов является важной задачей в решении проблемы изменения климата. Черный углерод, выпадая на ледники, приводит к их нагреванию, увеличивая количество поглощенной солнечной энергии, уменьшая ее альбедо, а это в свою очередь приводит к их таянию. Изменение альбедо снежных и ледяных поверхности под воздействием атмосферных выпадений и, особенно, черного углерода, является важным фактором ускорения деградации ледников. Также, в более высоких слоях тропосферы проявляются и вторичные климатические эффекты, связанные с влиянием углеродосодержащих аэрозольных частиц на процессы образования облаков и осадков [3].

Черный углерод образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива и биомассы. В основном это происходит за счет: выбросов дизельных двигателей транспортного и промышленного назначения; выбросов в ходе процессов сжигания древесины и угля; выбросов промышленных производственных процессов (металлургия и нефтехимия); выбросов при нефте- и газодобыче, а также лесных пожаров и сжигании сельскохозяйственных отходов. Глобальные выбросы черного углерода составляют около 8 млн. тонн год, из которого 34 % составляет открытое сжигание биомассы [15, 30, 41]. В России два основных источника выбросов черного углерода, на которые приходится 2/3 выбросов: это лесные пожары и сжигание дров, угля и жидкого топлива отдельными лицами и небольшими котельными [35].

2.

Для мониторинга деградации снежного и ледяного покрова особое значение имеют высокогорные ледники, так как на них антропогенное влияние ещё не достигло критических значений. В программе ООН по окружающей среде и Всемирной метеорологической организации указывается, что эффект потепления по причине загрязнения снега и льда, проявляется больше в горных областях [42].

Полученная с горных ледников в различных регионах информация свидетельствует о загрязнении атмосферы в индустриальный период. Например, увеличение кислотности и концентрации сульфатов и нитратов, наблюдаемые в Альпах в двадцатом веке, связаны с эмиссией диоксида серы и оксида азота, образовавшихся при сгорании ископаемого топлива. Сжигание биомассы и развитие сельского хозяйства вызвало рост концентрации аммония [39]. Проведенные на Тянь-Шане исследования позволили установить, что химический состав осадков на ледниках Средней Азии обуславливается региональными пыльными бурями и антропогенным загрязнением. Выявлено, что содержащиеся там концентрации аммония и нитратов связаны с воздушными массами, приходящими из индустриальных районов Сибири и Западного Казахстана [18]. Различные исследования, показали, что на горных ледниках возросло загрязнение снега и льда веществами, эмиссия которых в атмосферу связана с человеческой деятельностью [31]. В настоящее время хорошо изучены особенности переноса пыли из пустынь Северной Африки на ледники Европейских Альп [40]. Имеются данные о содержании минеральных частиц в ледниках Средней Азии [43], Гималаев [26, 27] и Алтая [36].

3.

Кавказ – единственная горная система России, сведения о ледниках которой имеются за период более ста лет. Центральный Кавказ является самой высокогорной частью большого Кавказа. На Центральном Кавказе расположен Эльбрус – самый крупный горно-ледниковый массив России. Он включает 16 крупных ледниковых потоков: Большой Азау, Малый Азау, Гарабаши, Терскол, Ирик, Ирикчат, Уллучиран, Карачаул, Уллумалгендерку, Уллукол, Микельчиран, Берджалычиран, Чунгурчатчиран, Бютк-тубе, Кюкюртюлю и Уллукам. Ледниковая шапка Эльбруса простирается в огромном диапазоне высот – от вершин (5642 м) до конца ледника Большой Азау (2542 м) [6; 7]. На Кавказе, как и в других горно-ледниковых районах Земли, наблюдается устойчивая деградация оледенения, в результате чего происходит изменение числа, площади и объема ледников. С середины XIX в. началось постоянное сокращение ледников Центрального Кавказа, и, хотя этот процесс был неравномерным, темпы его в целом постепенно увеличивались. В общем, за период с 1887 года, когда начались наблюдения, по 2007 год, площадь ледников Эльбруса сократилась на 27,5 км², а интенсивность сокращения в среднем составила 0,23 км² в год. За последние же 20 лет, баланс массы ледника на Эльбрусе оказался в два раза ниже, чем за весь период наблюдений [12]. Таким образом, деградация оледенения отмечается практически за весь период наблюдений [14; 7]. Но таяние ледников происходит не только из-за повышения температуры воздуха вследствие глобального потепления, но и различных загрязняющих веществ на их поверхности.

Географическое расположение делает ледники Центрального Кавказа очень интересными для исследований их загрязнения. Интерес заключается в том, что они с одной стороны расположены вблизи промышленного и сельскохозяйственного производства юга России, а с другой достигают высоты более 5000 м, где влияние локальных источников загрязнения крайне незначительно, тогда как воздействие глобального и регионального переноса аэрозолей возрастает [10].

Загрязнение ледников Центрального Кавказа начали изучать в конце 60-х годов [21]. В 1970–1990-х годах на ледниках Центрального Кавказа проводились исследования уровня концентрации антропогенных и естественных аэрозолей, химических соединений и микроэлементов. В снегу, фирне и льдах определялось содержание микрочастиц и тяжелых металлов [5; 13]. В работе [10] показаны результаты исследования образцов из ледовых кернов, пробуренных на Эльбрусе в 2009–2013 гг. В них было обнаружено, что на ледниках Кавказа формируются загрязненные горизонты и это происходит в результате дальнего переноса минеральных частиц. Химический анализ образцов снега из загрязненных горизонтов показал высокое содержание нитратов, аммония и сульфатов. Авторы работы связали это с поступлением пыли из сельскохозяйственных районов в Месопотамии. Также было обнаружено повышенное содержание Cu, Zn и Cd по сравнению с естественным фоном, этот факт они связали с повышенным региональным фоном этих элементов в Северной Африке и на Ближнем Востоке. Анализ содержания тяжёлых

металлов в снеге на южном склоне Эльбруса, приведенный в работе [9], показал, что летние снегопады обогащают снег тяжёлыми металлами в 2–3 раза больше, чем зимние и весенние. При этом примесь антропогенных металлов в привершинной области увеличена за счёт дальнего переноса.

В исследовании [29] приведены источники переноса загрязняющих веществ на ледники гор Эльбрус и Казбек, которые были определены с помощью космических снимков SEVIRI. Они показали, что местом зарождения почти всего потока воздушных масс является северная часть Атлантического океана. При этом воздушный поток по приближении к суше изгибается и заходит на территорию Северной Африки, где и собирает загрязняющие частицы. Выявлено, что источники появления загрязняющих веществ на ледники Эльбруса и Казбека незначительно отличаются по своему происхождению. На Эльбрус попадают вещества из Сирийской пустыни, Большого Нефуда, северной части Малого Нефуда и севера Месопотамии. Что касается источников частиц для Казбека, то они смещаются севернее и включают только север Сирийской пустыни. Авторы отмечают, что в обоих случаях вероятность поступления загрязняющих веществ из Ближнего Востока выше, чем из Африки.

4.

В 2017 году была опубликована первая работа [32], посвященная изучению черного углерода на ледниках Центрального Кавказа. В статье были представлены данные, полученные из ледяных кернов, пробуренных на высокогорной площадке горы Эльбрус. В ней показано изменение массовых концентраций и размеров черного углерода за период, охватывающий 1825—2013 годы. Было выявлено, что наибольшее влияние на количество черного углерода, оказали выбросы в Восточной Европе. Авторы выявили, что в первой половине 20-го века, антропогенные выбросы из Европы привели к увеличению концентраций черного углерода на Эльбрусе в 1,5 раза по отношению к его уровню в доиндустриальную эпоху. Данные, полученные из слоя этого керна за 2003 год, показали присутствие максимальной концентрации и более крупных частиц черного углерода в этом году. В свою очередь, другие исследователи [28], также работавшие с этим керном, отмечали, что именно в 2003 году происходило наиболее

интенсивное таяние ледника. Исходя из этого, можно предположить, что информация о концентрациях черного углерода необходима для определения таяния льдов и снега на ледниках.

Хотя загрязнение высокогорных ледников Кавказа происходит в основном за счет дальнего переноса, о чем говорится во многих работах [9; 10; 16], но все же свой вклад вносят и «местные» источники загрязнения. Потенциальными «местными» источниками черного углерода на ледниках Северного Кавказа являются лесные пожары, сельское хозяйство и промышленное производство. В России одним из наиболее важных источников черного углерода являются лесные пожары, они составляют от 40 до 56 % общей эмиссии черного углерода в стране [15]. Хотя леса Центральной и Восточной Сибири, а также Дальнего Востока являются основными эмитентами черного углерода, но происходящие в лесах Северного Кавказа пожары также вносят существенный вклад. Так, только от низовых пожаров в среднем в год на Северном Кавказе выбрасываются от 80 до 250 тонн черного углерода, а от верховых пожаров – от 250 до 800 тонн. Запасы доступного для горения органического вещества на землях, покрытых лесом, в Северо-Кавказском федеральном округе составляют в среднем 179,9 т/га, это больше чем в других регионах России [15].

5.

На Северном Кавказе хорошо развито сельское хозяйство. Так Ставропольский край является одним из лидеров по производству сельскохозяйственной продукции [17], а основным видом деятельности большинства северокавказских республик также является сельское хозяйство. На Северном Кавказе интенсивно развито растениеводство, так, к примеру, валовой сбор зерновых культур составляет около 10 % от общего сбора по всей России [2]. Это хорошо для экономики региона, но негативно сказывается на экологической ситуации, так как сельхозпроизводители, стремясь сократить свои затраты на утилизацию соломы, просто сжигают ее. Сельскохозяйственные палы являются одной из главных причин загрязнения атмосферы черным углеродом на Северном Кавказе. Ведь в результате неполного сгорания 1 тонны растительной биомассы образуется около 100 кг газообразных и летучих веществ, в том числе и черного углерода.

В отличие от сельского хозяйства, промышленное производство на Северном Кавказе развито очень слабо. Это отражается и на количестве выбросов в атмосферу. Так, по оценкам [17], в Северо-Кавказском федеральном округе отмечается наименьшее количество выбросов в атмосферу загрязняющих веществ. Например, в 2016 году количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферу составило 149,6 млн. тонн, что составляет всего лишь около 3 % от общего по России. Что касается выбросов от стационарных источников, то на регион приходится всего лишь около 1 % от общероссийских. Полученные в работе [1] данные свидетельствуют о том, что основным фактором загрязнения атмосферы на Северном Кавказе являются не производственные предприятия, а автотранспорт, который вносит от 66 до 96 % в загрязнение атмосферы региона.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что наибольшее загрязнение ледников Центрального Кавказа происходит за счет дальнего переноса веществ, с чем согласны и другие авторы [10]. А «местный» вклад в загрязнение ледников происходит в основном по причине лесных пожаров и сжигания сельскохозяйственных отходов. Промышленное производство Северо-Кавказского региона очень слабо развито и не вносит существенного вклада в загрязнение атмосферы черным углеродом, приводящим к деградации ледников Центрального Кавказа.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-05-50107.

Список литературы

1. Баширова А.А. Анализ экологической ситуации субъектов Северо-Кавказского федерального округа в рамках реализации стратегии регионального развития // Региональные проблемы преобразования экономики, 2011. С. 57-66.
2. Вартанова М.Л. Оценка современного состояния производства сельскохозяйственной продукции в субъектах Северо-Кавказского федерального округа // Региональные проблемы преобразования экономики, 2016. №6. С. 26-39.
3. Виноградов А.А. Эмиссии антропогенного черного углерода в атмосферу: распределение по территории России // Оптика атмосферы и океана, 2014. №12. С. 1059-1065.
4. Горчакова И.А. 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.
5. Залиханов М.Ч., Керимов А.М., Степанов Г.В., Черняк М.М. Загрязнение ледников Центрального Кавказа // МГИ, 1992. Вып. 75. С. 15-22.
6. Золотарёв Е.А., Харьковец Е.Г. Оледенение Эльбруса в конце XX в. (цифровая ортофотокарта Эльбруса на 1997 г.) // МГИ, 2000. вып. 89. С. 175- 181.
7. Золотарёв. Е.А., Алейников А.А., Харьковец Е.Г. Оледенение Эльбруса в XX столетии // МГИ, 2005. вып. 98. С. 162 -166.
8. Кароль И.Л., Киселев А.А. Климат будущего: взгляд из настоящего // Природа, 2011. №1. С. 3-9.
9. Керимов А.М., Рототаева О.В., Хмелевской И.Ф. Распределение тяжёлых металлов в поверхностных слоях снежно-фирновой толщи на южном склоне Эльбруса // Лёд и Снег, 2011. № 2 (114). С. 24-34.
10. Кутузов С.С., Михаленко В.Н., Шахгеданова М., Жино П., Козачек А.В., Лаврентьев И.И., Кудерина Т.М., Попов Г.В. Пути дальнего переноса пыли на ледники Кавказа и химический состав снега на Западном плато Эльбруса // Лёд и Снег, 2014; 54(3). С. 5-15. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-3-5-15>.
11. Макаров В.И., Попова С.А. Многолетние исследования динамики концентрации чёрного (элементного) углерода в атмосфере Новосибирской области // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2016. Т. 4, № 2. С. 141-144.
12. Рототаева О.В., Носенко Г.А., Керимов А.М., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Никитин С.А., Керимов А.А., Тарасова Л.Н. Изменения баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) на рубеже XX-XXI вв // Лёд и Снег, 2019. Т. 59. № 1 С. 5-22.
13. Рототаева О.В., Керимов А.М., Хмелевской И.Ф. Содержание макроэлементов в ледниках южного склона Эльбруса // МГИ, 1999. Вып. 87. С. 98-105.
14. Рототаева О.В., Носенко Г.А., Хмелевской И.Ф., Тарасова Л.Н. Балансовое состояние ледника Гарабаши (Эльбрус) в 80-х и 90-х годах XX столетия // МГИ, 2003. Вып. 95. С. 111-121.
15. Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. Выбросы черного углерода от природных пожаров на землях лесного фонда Российской Федерации в 2007-2012 гг. // Метеорология и гидрология, 2015. №7. С. 5-17.
16. Хайрединова А.Г., Кутузов С.С., Жино П., Михаленко В.Н. Сравнительный анализ коротких кернов Казбека и Эльбруса для получения информации об окружающей среде // Современные подходы к изучению экологических проблем в физической и социально-экономической географии: материалы X междунар. молодежн. школы-конф. Курск: 11-й Формат. 2017. С. 110-121.
17. Черногаева Г.М., Жадановская Е.А., Журавлева Л.Р., Малеванов Ю.А. Загрязнение окружающей среды в регионах России в начале XXI века. М.: «Полиграф-Плюс», 2019. 232 с.
18. Aizen V.B., Aizen E.M., Melack J.M., Kreutz K.J., Cecil L.D. Association between atmospheric circulation patterns and firn-ice core records from the Inilchek glacierized area, central Tien Shan, Asia // Journ. of Geophys. Research., 2004. V. 109. № D08304. P. 1-18.
19. Bachmann J. BLACK CARBON: A Science/Policy Primer. Vision air consulting, LLC. PEW Center on Global Climate Change. December, 2009. 47 pp.
20. Bond, T. C., Zarzycki, C., Flanner, M. G., and Koch, D. M.: Quantifying immediate radiative forcing by black carbon and organic matter with the Specific Forcing Pulse // Atmos. Chem. Phys., 2011. 11. P. 1505-1525,

- <https://doi.org/10.5194/acp-11-1505-2011>.
21. Davitaya F.F. Dust content as a factor affecting glaciation and climatic change // *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, 1969. V. 59. № 3. P. 552–560.
 22. Garrett T.J. and Zhao C. Increased Arctic cloud longwave emissivity associated with pollution from mid-latitudes // *Nature*, 2006. V. 440. P. 787–789.
 23. Ginoux P., Prospero J.M., Gill T.E., Hsu N.C., Zhao M. Global scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products // *Rev. Geophysics*, 2012. V. 50. P. 1–36.
 24. IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
 25. Jacobson, M. Z. Investigating cloud absorption effects: Global absorption properties of black carbon, tar balls, and soil dust in clouds and aerosols // *J. Geophys. Res.*, 2012. 117, D06205, doi:10.1029/2011JD017218.
 26. Kang S., Zhang Y., Zhang Y., Grigholm B., Kaspari S., Qin D., Ren J., Mayewski P. Variability of atmospheric dust loading over the Central Tibetan Plateau based on ice core glaciochemistry // *Atm. Environment.*, 2010. V. 44. I. 25. P. 2980–2989.
 27. Kaspari S., Mayewski P.A., Handley M., Kang S., Hou S., Sneed S., Maasch K., Qin D. A High Resolution Record of Atmospheric Dust Composition and Variability since a.d. 1650 from a Mount Everest Ice Core // *Journ. of Climate*, 2009. V. 22. P. 3910–3925.
 28. Kozachek A., Mikhalenko V., Masson-Delmotte V., Ekaykin A., Ginot P., Kutuzov S., Legrand M., Lipenkov V., and Preunkert S. Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt Elbrus ice cores // *Clim. Past Discuss.*, 2016. doi:10.5194/cp-2016-62.
 29. Kutuzov S., Shahgedanova M., Mikhalenko V., Ginot P., Lavrentiev I., Kemp S. High-resolution provenance of desert dust deposited on Mt. Elbrus, Caucasus in 2009–2012 using snow pit and firn core records // *The Cryosphere*, 2013. V. 7. P. 1481–1498.
 30. Lamarque J.F., Bond T.C., Eyring V., Granier C., Heil A., Klimont Z., Lee D., Liousse C., Mieville A., Owen B., Schultz M.G., Shindell D., Smith S.J., Stehfest E., Aardenne J.V., Cooper O.R., Kainuma M., Mahowald N., McConnell J.R., Naik V., Rishi K., and Vuuren D.P. Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010.10, P. 7017–7039.
 31. Lee K., Hur S.D., Hou S., Hong S., Qin X., Ren J., Liu Y., Rosman K.J., Barbante C., Boutron C.F. Atmospheric pollution for trace elements in the remote high-altitude atmosphere in central Asia as recorded in snow from Mt. Qomolangma (Everest) of the Himalayas // *Sci. Total Environment.*, 2008. V. 404. № 1. P. 171–181.
 32. Lim S., Fain X., Ginot P., Mikhalenko V., Kutuzov S., Paris, J.-D., Kozachek A., and Laj P. Black carbon variability since preindustrial times in the eastern part of Europe reconstructed from Mt. Elbrus, Caucasus, ice cores // *Atmos. Chem. Phys.*, 2017. 17. P. 3489–3505, <https://doi.org/10.5194/acp-17-3489-2017>.
 33. Marrakech communiqué / CCAC 8th High Level Assembly – November 2016, Marrakech, 3pp.
 34. Molina M., Zaelke D., Madhava Sarma K., Andersen A.O., Ramanathan V., Kaniaru D. Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO2 emissions // *Proceedings of National Academy of Sciences*, 2009. V. 106. No. 49. P. 20616–20621.
 35. National report on the actions on black carbon and methane emissions reduction in accordance with the Framework for Action on Enhanced Black Carbon and Methane Emissions Reductions (April 24, 2015, Iqaluit, Canada).
 36. Olivier S., Blaser C., Brüttsch S., Frolova N., Gäggeler H.W., Henderson K.A., Palmer A.S., Papina T., Schwikowski M. Temporal variations of mineral dust, biogenic tracers, and anthropogenic species during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai // *Journ. of Geophys. Resear ch.*, 2006. V. 111. № D05309. P. 1–13.
 37. Ramanathan V. and Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon // *Nat. Geosci.*, 2008. 1. P. 221–227.
 38. Report to Congress on Black Carbon». Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act, 2010. EPA-450/R-12-001. USA, March. 2012. 388 pp.
 39. Schwikowski M., Brüttsch S., Gäggeler H.W., Schotterer U. A high resolution air chemistry record from an Alpine ice core: Fiescherhorn glacier, Swiss Alps // *Journ. of Geophys. Research.*, 1999. V 104 (D11). P. 13709–13719.
 40. Sodemann H., Palmer A.S., Schwierz C., Schwikowski M., Wernli H. The transport history of two Saharan dust events archived in an Alpine ice core // *Atmos. Chem. Phys.*, 2006. V. 6. P. 667–668.
 41. Stier P., Seinfeld J.H., Kinne S., Feichter J. and Oucher O. B. Impact of nonabsorbing anthropogenic aerosols on clear-sky atmospheric absorption // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2006. V. 111. D18201. doi:10.1029/2006JD007147.
 42. UNEP and WMO. Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone, Nairobi, Kenya. 2011. <https://www.ccacoalition.org/en/resources/marrakech-communique>.
 43. Wake C.P., Mayewski P.A., Li Z., Han J., Qin Q. Modern eolian dust deposition in Central Asia // *Tellus. B.* 1994. V. 46. P. 220–233.

1. Bashirova A.A. Analiz e` kologicheskoy situacii sub``ektov severo-Kavkazskogo federal`nogo okruga v ramkax realizacii strategii regional`nogo razvitiya // Regional`ny`e problemy` preobrazovaniya e`konomiki. 2011. S. 57-66.
2. Vartanova M.L. Ocenka sovremennogo sostoyaniya proizvodstva sel`skoxozyajstvennoj produkcii v sub``ektax Severo-Kavkazskogo federal`nogo okruga // Regional`ny`e problemy` preobrazovaniya e`konomiki. 2016. №6. S. 26-39.
3. Vinogradov A.A. E`missii antropogennogo chernogo ugleroda v atmosferu: raspredelenie po territorii Rossii // Optika atmosfery` i okeana. 2014. №12. S. 1059-1065.
4. Gorchakova I.A. Radiacionny`j i temperaturny`j e`ffekty` dy`movogo ae`rozolya v Moskovskom regione v period letnix pozharov 2010 g. // Izv. RAN. Fiz. atmosf. i okeana. 2012. T. 48. №5. S. 558-565.
5. Zalixanov M.Ch., Kerimov A.M., Stepanov G.V., Chernyak M.M. Zagryaznenie lednikov Central`nogo Kavkaza // MGI. 1992. vy`p. 75. S. 15-22.
6. Zolotaryov E.A., Xar`kovecz E.G. Oledenenie E`l`brusa v konce XX v. (cifrovaya ortofotokarta E`l`brusa na 1997 g.). MGI. 2000. vy`p. 89, S. 175-181.
7. Zolotaryov E.A., Alejnikov A.A., Xar`kovecz E.G. Oledenenie E`l`brusa v XX stoletii. MGI, 2005, vy`p. 98, S. 162 — 166.
8. Karol` I.L., Kiselev A.A. Klimat budushhego: vzglyad iz nastoyashhego. Priroda. 2011. №1. S. 3-9.
9. Kerimov A.M., Rototaeva O.V., Xmelevskoj I.F. Raspredelenie tyazhyoly`x metallov v poverxnostny`x sloyax snezhno-firnovoj tolshhi na yuzhnom sklone E`l`brusa // Lyod i Sneg. 2011. № 2 (114). S. 24-34.
10. Kutuzov S.C., Mixalenko V.N., Shaxgedanova M., Zhino P., Kozachek A.V., Lavrent`ev I.I., Kuderina T.M., Popov G.V. Puti dal`nego perenosa py`li na ledniki Kavkaza i ximicheskij sostav snega na Zapadnom plato E`l`brusa. Lyod i Sneg. 2014; 54(3). S. 5-15. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-3-5-15>.
11. Makarov V.I., Popova S.A. Mnogoletnie issledovaniya dinamiki koncentracii chyornogo (e`lementnogo) ugleroda v atmosfere Novosibirskoj oblasti // Intere`kspo Geo-Sibir`. 2016. T. 4, № 2. S. 141-144.
12. Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Kerimov A.M., Kutuzov S.S., Lavrent`ev I.I., Nikitin S.A., Kerimov A.A., Tarasova L.N. Izmeneniya balansa massy` lednika Garabashi (E`l`brus) na rubezhe XX-XXI vv. Lyod i Sneg. 2019. T. 59. № 1. S. 5-22.
13. Rototaeva O.V., Kerimov A.M., Xmelevskoj I.F. Soderzhanie makroe`lementov v lednikax yuzhnogo sklona E`l`brusa // MGI. 1999. Vy`p. 87. S. 98-105.
14. Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Xmelevskoj I.F., Tarasova L.N. Balansovoe sostoyanie lednika Garabashi (E`l`brus) v 80-x i 90-x godax XX stoletiya // MGI. 2003. Vy`p. 95. S. 111-121.
15. Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A. Vy`brosy` chernogo ugleroda ot prirodny`x pozharov na zemlyax lesnogo fonda Rossijskoj Federacii v 2007-2012 gg. // Meteorologiya i gidrologiya. 2015. № 7. S. 5-17.
16. Xajredinova A.G., Kutuzov S.S., Zhino P., Mixalenko V.N. Sravnitel`ny`j analiz korotkix kernov Kazbeka i E`l`brusa dlya polucheniya informacii ob okruzhayushhej srede // Sovremenny`e podxody` k izucheniyu e`kologicheskix problem v fizicheskoy i social`no-e`konomicheskoy geografii: materialy` X mezhdunar. molodezhn. shkoly`-konf. Kursk: 11-j Format, 2017. S. 110-121.
17. Chernogaeva G.M., Zhadanovskaya E.A., Zhuravleva L.R., Malevanov Yu.A. Zagryaznenie okruzhayushhej sredy` v regionax Rossii v nachale XXI veka. M.: «Poligraf-Plyus», 2019. 232 s.
18. Aizen V.B., Aizen E.M., Melack J.M., Kreutz K.J., Cecil L.D. Association between atmospheric circulation patterns and firn-ice core records from the Inilchek glacierized area, central Tien Shan, Asia // Journ. of Geophys. Research. 2004. V. 109. № D08304. P. 1-18.
19. Bachmann J. «BLACK CARBON: A Science/Policy Primer». Vision air consulting, LLC. PEW Center on Global Climate Change. December. 2009. 47 pp.
20. Bond, T. C., Zarzycki, C., Flanner, M. G., and Koch, D. M.: Quantifying immediate radiative forcing by black carbon and organic matter with the Specific Forcing Pulse, Atmos. Chem. Phys., 11. 2011. P. 1505-1525, <https://doi.org/10.5194/acp-11-1505-2011>.
21. Davitaya F.F. Dust content as a factor affecting glaciation and climatic change // Ann. Assoc. Amer. Geogr. 1969. V. 59. № 3. P. 552-560.
22. Garrett T.J. and Zhao C. Increased Arctic cloud longwave emissivity associated with pollution from mid-latitudes // Nature. 2006. V. 440. P. 787-789.
23. Ginoux P., Prospero J.M., Gill T.E., Hsu N.C., Zhao M. Global scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products // Rev. Geophysics. 2012. V. 50. P. 1-36.
24. IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
25. Jacobson, M. Z. (2012), Investigating cloud absorption effects: Global absorption properties of black carbon, tar balls, and soil dust in clouds and aerosols, J. Geophys. Res., 117, D06205, doi:10.1029/2011JD017218.
26. Kang S., Zhang Y., Zhang Y., Grigholm B., Kaspari S., Qin D., Ren J., Mayewski P. Variability of atmospheric dust loading over the Central Tibetan Plateau based on ice core glaciochemistry // Atm. Environment. 2010. V. 44. I. 25. P. 2980-2989.
27. Kaspari S., Mayewski P.A., Handley M., Kang S., Hou S., Sneed S., Maasch K., Qin D. A High Resolution Record of Atmospheric Dust Composition and Variability since a.d. 1650 from a Mount Everest Ice Core // Journ. of Climate. 2009. V. 22. P. 3910-3925.
28. Kozachek, A., Mikhalenko, V., Masson-Delmotte, V., Ekaykin, A., Ginot, P., Kutuzov, S., Legrand, M., Lipenkov, V., and Preunkert, S. Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt Elbrus ice cores,

- Clim. Past Discuss. 2016. doi:10.5194/cp-2016-62.
29. Kutuzov S., Shahgedanova M., Mikhaleiko V., Ginot P., Lavrentiev I., Kemp S. High-resolution provenance of desert dust deposited on Mt. Elbrus, Caucasus in 2009–2012 using snow pit and firn core records // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 1481–1498.
 30. Lamarque J.F., Bond T.C., Eyring V., Granier C., Heil A., Klimont Z., Lee D., Liousse C., Mieville A., Owen B., Schultz M.G., Shindell D., Smith S.J., Stehfest E., Aardenne J.V., Cooper O.R., Kainuma M., Mahowald N., McConnell J.R., Naik V., Rishi K., and Vuuren D.P.v. (2010) Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, P. 7017–7039.
 31. Lee K., Hur S.D., Hou S., Hong S., Qin X., Ren J., Liu Y., Rosman K.J., Barbante C., Boutron C.F. Atmospheric pollution for trace elements in the remote high-altitude atmosphere in central Asia as recorded in snow from Mt. Qomolangma (Everest) of the Himalayas // *Sci. Total Environment*. 2008. V. 404. № 1. P. 171–181.
 32. Lim, S., Faïn, X., Ginot, P., Mikhaleiko, V., Kutuzov, S., Paris, J.-D., Kozachek, A., and Laj, P.: Black carbon variability since preindustrial times in the eastern part of Europe reconstructed from Mt. Elbrus, Caucasus, ice cores, *Atmos. Chem. Phys.* 2017. 17. P. 3489–3505, <https://doi.org/10.5194/acp-17-3489-2017>.
 33. Marrakech communiqué / CCAC 8th High Level Assembly – November 2016, Marrakech, 3pp.
 34. Molina M., Zaelke D., Madhava Sarma K., Andersen A.O., Ramanathan V., Kaniaru D. Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions. *Proceedings of National Academy of Sciences*. 2009. V. 106. No. 49. P. 20616–20621.
 35. National report on the actions on black carbon and methane emissions reduction in accordance with the Framework for Action on Enhanced Black Carbon and Methane Emissions Reductions (April 24, 2015, Iqaluit, Canada).
 36. Olivier S., Blaser C., Brüttsch S., Frolova N., Gäggeler H.W., Henderson K.A., Palmer A.S., Papina T., Schwikowski M. Temporal variations of mineral dust, biogenic tracers, and anthropogenic species during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai // *Journ. of Geophys. Resear ch*. 2006. V. 111. № D05309. P. 1–13.
 37. Ramanathan, V. and Carmichael, G.: Global and regional climate changes due to black carbon, *Nat. Geosci.*. 2008 1. P. 221–227.
 38. Report to Congress on Black Carbon». Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act, 2010. EPA-450/R-12-001. USA, March. 2012. 388 pp.
 39. Schwikowski M., Brüttsch S., Gäggeler H.W., Schotterer U. A high resolution air chemistry record from an Alpine ice core: Fiescherhorn glacier, Swiss Alps // *Journ. of Geophys. Research*. 1999. V 104 (D11). P. 13709–13719.
 40. Sodemann H., Palmer A.S., Schwierz C., Schwikowski M., Wernli H. The transport history of two Saharan dust events archived in an Alpine ice core // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6. P. 667–668.
 41. Stier P., Seinfeld J.H., Kinne S., Feichter J. and Ouchterlony O. B. Impact of nonabsorbing anthropogenic aerosols on clear-sky atmospheric absorption // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.*, 2006. V. 111. D18201. doi:10.1029/2006JD007147.
 42. UNEP and WMO. Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone, Nairobi, Kenya. 2011. <https://www.ccacoalition.org/en/resources/marrakech-communiqué>.
 43. Wake C.P., Mayewski P.A., Li Z., Han J., Qin Q. Modern eolian dust deposition in Central Asia // *Tellus. B*. 1994. V. 46. P. 220–233.