

ВЛИЯНИЕ СВЕТОПОГЛАЩАЮЩИХ ЧАСТИЦ НА ДЕГЛЯЦИАЦИЮ ЛЕДНИКОВ ПОЛЯРНЫХ И ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2020 Е.В. Абакумов¹, Р.Х. Темботов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург (Россия)

²Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН, г. Нальчик (Россия)

Поступила 26.04.2020

Абакумов Е.В., Темботов Р.Х. Влияние светопоглощающих частиц на дегляциацию ледников полярных и горных территорий. Светопоглощающие частицы являются одними из наиболее важных факторов, приводящим к дегляциации ледников. При исследованиях светопоглощающих частиц, чаще всего упоминается черный углерод. Он является одним из короткоживущих климатически значимых факторов и образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива, выбросов дизельных двигателей транспортного и промышленного назначения, а также лесных пожаров и сжигании 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 полярных и горных районов. Поэтому, данная работа посвящена влиянию черного углерода на дегляциацию ледников полярных регионов, на примере Антарктиды и горных регионов, на примере Центрального Кавказа. В работе показано, что хотя некоторые авторы считают ледовый покров Антарктиды увеличивающимся, многие авторы не согласны с этим утверждением и в подавляющем большинстве работ указывают на их сокращение. Основной причиной сокращения Антарктического льда считается повышение температуры вследствие глобального потепления, но также многие авторы указывают на влияние различных светопоглощающих веществ, таких как черный углерод, оседающих на поверхности и уменьшающих альбедо ледяного покрова, тем самым приводя к их таянию. Что касается работ посвященным горным ледникам Центрального Кавказа, то в них нет противоречий на счет изменения баланса ледников. Во всех работах указывается, на постепенное, хотя и неравномерное таяние ледников, которое ускорилось за последние 60 лет. В литературе на данный момент имеется одна единственная работа, посвященная черному углероду на Центральном Кавказе. В ней показаны данные полученные из ледяных кернов, пробуренных на высокогорной площадке г. Эльбрус. В работе говорится, 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 (до 1850 года). Интересные данные были получены из слоя керна за 2003 год, которые показали присутствие максимальной концентрации и более крупных частиц черного углерода в этом году. В свою очередь, другие исследователи, также работавшие с этим керном, отмечали, что именно в 2003 году происходило интенсивное таяние снега. Исходя из всего вышесказанного, можно предположить, что информация о концентрациях и размерах светопоглощающих частиц может предоставить важную информацию, необходимую для определения таяния ледников полярных и горных регионов.

Ключевые слова: черный углерод, деградация ледников, альбедо, снежный покров, Антарктида, Центральный Кавказ.

Abakumov E.V., Tembotov R.K. The effect of light-absorbing particles on the deglaciation of glaciers in the polar and mountainous territories. Light-absorbing particles are among the most important factors leading to the deglaciation of glaciers. In light-absorbing particle reseaches, black carbon is most commonly mentioned. It is one of the short-lived climate-relevant factors and is generated by incomplete fossil fuel combustion, emissions of transport and industrial diesel engines, and

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

Абакумов Евгений Васильевич, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной экологии, e_abakumov@mail.ru; *Темботов Рустам Хасанбиевич*, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории почвенно-экологических исследований, tembotov.rustam@mail.ru

forest fires and agricultural waste incineration. Falling on the cover of glaciers, black carbon reduces the albedo of the surface, which in turn leads to their heating and further thawing. This is extremely important for polar and mountainous regions. Therefore, this work is devoted to the influence of black carbon on the deglaciation of glaciers of polar regions, on the example of Antarctica and mountain regions, on the example of the Central Caucasus. The paper shows that while some authors consider Antarctica's ice cover to be increasing, many authors disagree with this claim and the vast majority of the works point to their reduction. The main reason for the reduction of Antarctic ice is considered to be the increase in temperature due to global warming, but also many authors point to the influence of various light-matching substances, such as black carbon, settling on the surface and reducing the albedo of the ice sheet, thus causing them to melt. As for the works devoted to mountain glaciers of the Central Caucasus, there are no contradictions in them at the expense of changing the balance of glaciers. All works indicate the gradual thawing of glaciers, which has accelerated over the past 60 years. There is currently one single work in the literature on black carbon in the Central Caucasus. It shows data obtained from ice cores drilled on the high mountain site of Elbrus. The paper states that in the first half of the 20th century, anthropogenic emissions from Europe led to an increase in black carbon concentrations on Elbrus, 1.5 times its level in the pre-industrial era (before 1850). Interesting data came from the core layer for 2003, which showed the presence of maximum concentration and larger black carbon particles this year. In turn, other researchers who also worked with this core noted that it was in 2003 that there was an intense melting of snow. On the basis of all the above, it can be assumed that information on concentrations and sizes of light-containing particles can provide important information necessary for determining melting of glaciers in polar and mountain regions.

Keywords: black carbon, glacier degradation, albedo, snow cover, Antarctic, Central Caucasus.

Вызванное деятельностью человека загрязнение атмосферы светопоглощающими веществами, к которым относится черный углерод, способствует таянию ледников, ускоряет процесс изменения климата на планете и приводит к деградации окружающей среды. Поэтому, в настоящее время предпринимаются меры по сокращению выбросов черного углерода. Большое внимание к роли черного углерода в глобальных изменениях климата уделено за последние десять лет [1-4].

Термин черный углерод, который до недавнего времени в русскоязычной научной литературе называли сажей, является буквальным переводом английского «black carbon», которое по смыслу отражает ее основное свойство, поглощение видимого солнечного излучения [5]. По мнению различных авторов [2, 6], черный углерод является вторым фактором по вкладу в глобальное потепление и ускоряющим таяния ледников, после углекислого газа. Установлено, что черный углерод улавливает в несколько сотен раз больше тепла, чем углекислый газ, поэтому во всем мире, с учетом таяния ледников и сокращения полярных ледяных шапок уменьшение выбросов является одной из основных задач в решении проблемы изменения климата [7]. Черный углерод, выпадая на снежный и ледовый покров, приводит к ее нагреванию, увеличивая количество поглощенной солнечной энергии, уменьшая ее альбедо. Изменение альбедо поверхности под воздействием атмосферных выпадений и особенно, черного углерода является важным фактором ускорения деградации ледников. Это наиболее значимо

для полярных и горных территорий, так как значение альбедо на снежных поверхностях при не загрязненных условиях составляет 98%. При загрязнении, отражается только от 90 до 97%. Такое незначительное изменение, увеличивает количества поглощенной солнечной энергии и работает как ускоритель таяния льда и снега [8].

Антарктический ледяной покров, неотъемлемая часть Земли, выполняющая важную роль для всего человечества, так в Антарктиде содержится 80-90% запасов пресной воды. Ледники Антарктиды, как в прибрежной части, так и внутри материка, часто меняются в зависимости от колебаний климата. В настоящее время, поведение Антарктического льда остается неясным и противоречивым. Ученые до сих пор спорят о том, сокращается или растет его масса. Полученные в результате исследований 1956-1958 гг. новые сведения о режиме Антарктических ледников, указывало о превышении аккумуляции снега над его расходом [9]. Это исходило из сравнения данных об аккумуляции снега на всем пространстве Антарктики и весьма редких сведений о его расходе в краевой части. С тем, что ледяной покров Антарктиды увеличивается, были согласны в работе Звалли и др. [10], в которой было показано, что чистый прирост составлял 112 миллиардов тонн льда в год с 1992 по 2001 год. В дальнейшем, прирост замедлился в период с 2003 по 2008 год и составил 82 миллиарда тонн льда в год. Авторы подсчитали, что массовый прирост Восточной Антарктиды оставался стабильным с 1992 по 2008 год и составлял 200 миллиардов тонн в год, то-

гда как потери льда в прибрежных районах Западной Антарктики и Антарктического полуострова увеличивались всего на 65 миллиардов тонн в год. Эти данные не согласуются с официальными выводами оценочных докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата при ООН, в которой утверждается, что средняя скорость сокращения массы льда Антарктического ледникового покрова увеличилась с 30 Гт. год⁻¹ в 1992–2001 гг. до 147 Гт. год⁻¹ в 2002–2011 гг. [11]. Большая группа авторов в работе [12], также не согласны с выводами Звалли и соавторов и отмечают, что в период с 1992 по 2011 год ледовые щиты Гренландии, Восточной Антарктиды, Западной Антарктики и Антарктического полуострова изменились по массе на –142, +14, –65 и –20 гигатонн в год⁻¹, соответственно. Таким образом, авторы утверждают, что ледяной щит Антарктиды испытывает, в общем, постоянную и ускоряющуюся потерю льда. То же самое утверждают и другие авторы [13–15]. Несмотря на противоречия в вопросе уменьшения или увеличения баланса массы льда, все же в основном, исследователей придерживается мнения, что ледяной покров Антарктиды сокращается. И таяние снежного и ледяного покрова происходит не только из-за повышения температуры воздуха вследствие глобального потепления, но и различных светопоглощающих веществ, таких как черный углерод на их поверхности.

Изучением черного углерода в Антарктиде, занимались многие авторы. Так в исследовании [16] изучили роль осаждения черного углерода в потемнении полярного снега в разные сезоны и оценили коэффициент очистки черного углерода в Арктике и Антарктике на основе одновременных измерений его концентраций в атмосфере и на снегу. Исследование выявили отчетливую пространственно-временную изменчивость черного углерода в снегу, хотя концентрации, как правило, были низкие. Было получено, что в течение летних сезонов черный углерод в снегу в Арктике была выше, чем в Антарктиде. Одновременно с этим был рассчитан коэффициент поглощения, который также показал большую изменчивость на сравниваемых территориях. Относительно более высокие значения коэффициента поглощения над Антарктидой по сравнению со значениями над Арктикой, по мнению авторов, четко указывают на разницу в механизмах удаления черного углерода из атмосферы в различных полярных средах. В работе показано, что при измерении спектрального входящего и отраженного излу-

чения, значения альбедо варьируются от 0,64 до 0,79.

В работе [17] показано, что черный углерод, приносимый в Антарктиду из других частей света, не оказывает сильного влияние на таяние ледников. Авторы статьи изучали, влияние черного углерода на таяние льда Антарктиды, как приносимая ветром с других континентов, так и производимая станциями и транспортом полярников. Особо ученых интересовало, как загрязнение воздуха сказывается на сохранении Сухих долин – областей на территории Земли Виктории, в которых из-за сильного ветра почти нет ни снега, ни льда. Друг от друга Сухие долины отделены ледниками. Образцы, взятые с одного из таких ледников, показали, что содержание принесенного с других континентов черного углерода слишком мало, чтобы заметно снизить альбедо льда. Исследователи отмечают, что заметную опасность представляют местные источники черного углерода – ее концентрация в воздухе вблизи станций достигает довольно высоких значений при сильном ветре.

Человеческая деятельность на самой Антарктиде, вносит значительными вклад в загрязнение черным углеродом, на это указывается в работе, проведенной на восьми участках вдоль трансекты длиной 1,7 км от станции Палмер в Антарктиде [18]. Концентрации черного углерода увеличивались в связи с близостью к станции Палмер от 1,2 до 16,5 мг черного углерода и были выше, чем в других исследованиях черного углерода на снегу, например, в сухих долинах Мак-Мердо, находящихся также в Антарктиде. Повышенные концентрации черного углерода вблизи станции, по мнению авторов работы показывают, что локальное воздействие станции распространяется не менее чем на 1 км, аналогичное обнаружению по ветру от станции Южного полюса [19,20]. В работе [21] проведенной с 19 ноября 1995 г. по 6 февраля 1996 г. в точке, расположенной в 650 метрах от станции Мак-Мердо на побережье Антарктиды, также указывается на увеличение концентрации черного углерода вблизи станций. Обнаруженные на исследуемой точке концентрации черного углерода выше, чем в других отдаленных районах Антарктики, и авторы предполагают, что это увеличение происходит из-за загрязнения привносимых ветрами со станции. На антропогенное воздействие при повышении уровня концентрации черного углерода указывают и в работе, проведенной на двух местах Майтри и Ларсеманн Хиллз в Восточной Антарктиде [22]. В ней показано, что концентрация черного углерода в Ларсеманн Хиллз, где вмешательство человека минималь-

ное, почти в 6 раз меньше чем на Майтри. На влияние человеческой деятельности при увеличении концентрации указывают и данные полученные из ледяных кернов, полученных в Гренландии, которые показывают, что концентрации эритроцитов в северном полушарии достигли пика в начале 20-го века в результате сжигания ископаемого топлива [23].

На присутствие черного углерода в Антарктиде указывают перечисленные выше работы. А о том, как содержание черного углерода на снежных и ледяных поверхностях Антарктиды влияет на изменение альbedo и дегляциации покрова говорится в работе [20]. В ней представлен количественный набор данных отражательной способности снега *in situ*, измеренного и смоделированного альbedo, а также концентраций черного углерода и микроэлементов от чистого до сильно загрязненного выбросами снега на Антарктиде. Более 380 спектров отражения снега и 28 образцов поверхностного снега были собраны на семи различных участках в летний сезон 2014-2015. Полученные данные, показали огромное варьирование концентраций черного углерода на снеге. Альbedo варьировалось от 0,85 в нетронутым снеге до 0,62 в загрязненном снегу. Авторы выявили, что светопоглащающие частицы усиливают поглощение поверхности благодаря черному углероду и микроэлементам, от 1 W m^{-2} для чистого снега до 70 W m^{-2} для снега с высоким содержанием черного углерода и микроэлементов и тем самым происходит интенсивное таяние снежного и ледяного покрова.

Следует отметить, что черный углерод вредит не только арктическим льдам, но и горным ледникам. Таяние ледников по причине загрязнения снега и льда, проявляется больше в горных областях, таких как Гималаи, Тибет, Кавказ и другие регионы. Об этом говорится в программы ООН по окружающей среде и Всемирной метеорологической организации [24].

Сведения о ледниках Кавказа имеются, практически за столетие [25-28]. На Кавказе, как и в других горных районах, наблюдается устойчивая деградация оледенения, в результате чего происходит изменение числа, площади и объема ледников. Много информации о сокращении ледников Центрального Кавказа имеются за период 1957-2007 годы, в течение которых гляциологи и картографы Московского государственного университета следят за изменениями размеров и морфологии его ледников. За эти полвека площадь оледенения Эльбруса сократилась на $12,5 \text{ км}^2$ или в среднем на $0,25 \text{ км}^2$ в год. В общем же за весь период наблюдений с 1887 года по 2007 год, пло-

щадь ледников Эльбруса сократилось со $147,5 \text{ км}^2$ до 120 км^2 и составило $27,5 \text{ км}^2$, а интенсивность сокращения в среднем $0,23 \text{ км}^2$ в год. В настоящее время запасы льда и многолетних фирнов, тают с небывалой прежде скоростью, а на значительной площади в зоне 3700–4000 м. над ур. м. они почти исчерпаны [29]. Деградацию оледенения Кавказа отмечают за весь период наблюдений, практически все авторы [30, 31].

Показанная в вышеперечисленных работах дегляциация ледников Кавказа и их географическое расположение, делает этот регион особенно интересным для исследований их загрязнения различными аэрозолями и в том числе черным углеродом. Ведь с одной стороны, горные ледники Кавказа расположены вблизи промышленного и сельскохозяйственного производства юга России и ближнего зарубежья, а также на пути переноса воздушных масс из стран Западной и Восточной Европы и Ближнего Востока, а с другой стороны они достигают высоты более 5000 м, где влияние локальных источников загрязнения крайне незначительно, тогда как воздействие глобального и регионального переноса аэрозолей возрастает [32].

Первые сведения о содержании микрочастиц в высокогорных ледниках Кавказа были опубликованы в 1969 г. [33]. В 1970-1990-х годах на ледниках Центрального Кавказа и Эльбруса проводились исследования уровня концентрации антропогенных и естественных аэрозолей, химических соединений и микроэлементов. В снегу, фирне и льдах определялось содержание микрочастиц и тяжелых металлов [34, 35]. Большинство из этих работ проводилось на образцах, полученных из снежных шурфов и ледовых кернов. Авторами [32] были исследованы образцы из снежных шурфов и керна, пробуренных на г. Эльбрус в 2009, 2012 и 2013 гг., в которых было обнаружено, что в результате переноса минеральных частиц, на ледниках формируются загрязненные горизонты. С использованием космических снимков, были определены источники загрязнения. Выявлено, что пыль принесена на ледники с Ближнего Востока и из Северной Африки. Также в работе было выполнено определение количества твердого вещества, выпадающего из атмосферы на поверхность на больших высотах, оно составило 264 мкг/см^2 в год. Сделанный химический анализ образцов снега из загрязненных горизонтов, показал высокое содержание нитратов, аммония и сульфатов, что авторы связали с поступлением пыли из сельскохозяйственных районов в Месопотамии.

Согласно исследованиям, проведенным в 2013 году на западном плато г. Эльбрус, средние значения альбедо составили 66%. По результатам измерений примерно в тех же условиях на седловине в июле–августе 1959–1963 гг. эта величина равна 74%, то есть было отмечено уменьшение альбедо на 8% [36]. Возможно, это результат воздействия светопоглощающих веществ, которые, как уже было сказано выше, отрицательно на нее воздействует.

Что касается изучения черного углерода на ледниках Центрального Кавказа, то в исследовании [37], была представлена первая работа, посвященная этому вопросу на этой территории. В работе представлены данные, полученные из ледяных кернов, пробуренных на высокогорной (5115 метров над уровнем моря) площадке г. Эльбрус. Было выявлено изменение массовых концентраций и размеров черного углерода, охватывающий период с 1825 по 2013 год. В работе показано, что в первой половине 20-го века, антропогенные выбросы из Европы привели к увеличению концентраций черного углерода на г. Эльбрус, в 1,5 раза по отношению к его уровню в доиндустриальную эпоху (до 1850 года). Наблюдалась большая временная изменчивость в их массовых концентрациях как по сезонам, так и ежегодно. Исследования выявили, что летние концентрации увеличились в 5 раз, а зимние в 3,3 раза в период с 1960 по 1980 годы. Затем был небольшой спад до 2000 года, а затем опять увеличение после 2000 года. Интересные данные были получены из слоя керна за 2003 год, они показали присутствие максимальной концентрации и более крупных частиц черного углерода в этом году. В свою очередь, другие исследователи [38], также работавшие с этим керном отмечали, что именно в 2003 году происходило наиболее интенсивное таяние снежного и ледяного покрова. Исходя из этого, можно предположить, с чем согласны и другие авторы [39,40], что информация о концентрациях и размерах частиц может предоставить важную информацию, необходимую для определения таяния льдов и снега на ледниках как полярных, так и горных территорий, под воздействием светопоглощающих частиц и в частности черного углерода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marrakech communiqué / CCAC 8th High Level Assembly – November 2016, Marrakech. P. 3.
2. **Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., De Angelo 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, 5380-5552. DOI:10.1002/jgrd.50171.
3. AMAP, 2015. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. vii + 116 pp.
4. **Hildén M., Kupiainen K., Forsius M., Salonen R.** Curbing black carbon emissions slows warming in the Arctic. SYKE Policy Brief. 2017.
5. **Виноградов А.А.** Эмиссии антропогенного черного углерода в атмосферу: распределение по территории России // *Оптика атмосферы и океана.* 2014. № 12. С. 1059-1065.
6. **Jacobson M.Z.** Investigating cloud absorption effects: Global absorption properties of black carbon, tar balls, and soil dust in clouds and aerosols // *Journal of Geophysical Research Atmospheres.* 2012. Vol. 117, Issue D6. DOI: 10.1029/2011JD017218.
7. 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).
8. **Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н.** Аномальные пожары 2010 и 2012 гг. на территории России и поступление черного углерода в Арктику // *Оптика атмосферы и океана.* 2016. Т. 29, № 6. С. 482-487.
9. **Котляков В.М.** О современном увеличении массы ледникового покрова Антарктиды // *Материалы гляциологических исследований.* Хроника, обсуждение. 1962. Вып. 5. С. 39-44.
10. **Zwally J.H., Li J., Robbins J.W., Saba J.L., Yi D., Brenner A.C.** Mass gains of the Antarctic ice sheets exceeded losses // *Journ. of Glaciology.* 2015. Vol. 61, № 230. P. 1019-1036. DOI: 10.3189/2015JG15J071.
11. МГЭИК, 2013 г.: Резюме для политиков. Сохранится в публикации *Изменение климата, 2013 г.: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата.* [Стоккер Т.Ф., Цинь Д., Платтнер Дж.-К., Тигнор М., Аллен С.К., Бошунг Дж., Науэлс А., Ся Ю., Бекс В., Мидглей П.М. (редакторы)]. Кембридж, Соединенное Королевство, и Нью-Йорк, США: Кембридж Юниверсити Пресс, 2013.
12. **Shepherd A., Ivins E.R., Geruo F., Barletta V.R., Bentley M.J., Bettadpur S., Briggs K.H., Bromwich D.H., Forsberg R., Galin N., Horwath M., Jacobs S., Joughin I., King M.A., Lenaerts J.T.M., Li J., Ligtenberg S.R.M., Luckman A., Luthcke S.B., McMillan M., Meister R., Raskin M.G., Mouginot J., Muir A., Nicolas J.P., Paden J., Payne A.J., Pritchard H., Rignot E., Rott H., Sorensen L.S., Scambos T.A., Scheuchl B., Schrama E.J.O., Smith B., Sundal A.V., van Angelen J.H., vandeBerg W.J., vanden Broeke M.R., Vaughan D.G., Velicogna I.,**

- Wahr J., Whitehouse L., Wingham D.J., Yi D., Young D., Zwally H.J.** A Reconciled Estimate of Ice-Sheet Mass Balance // *Science*. 2012. Vol. 338, № 6111. P. 1183-1189. DOI: 10.1126/science.1228102.
13. **Rignot E., Velicogna I., van den Broeke M.R., Monaghan A., Lenaerts J.** Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38, Issue 5. DOI: 10.1029/2011GL046583.
14. **Dickens W.A., Kuhn, G., Leng, M.J. et al. Graham A.G.C., Dowdeswell J.A., Meredith M.P., Hillenbrand C.-D., Hodgson D.A., Roberts S.J., Sloane H., Smith J.A.** Enhanced glacial discharge from the eastern Antarctic Peninsula since the 1700s associated with a positive Southern Annular Mode // *Scientific Reports*. 2019. 9, 14606. DOI: 10.1038/s41598-019-50897-4.
15. **Feldmann J., Levermann A., Mengel M.** Stabilizing the West Antarctic Ice Sheet by surface mass deposition. *Science Advances* 2019. Vol. 5, no. 7, eaaw4132. DOI: 10.1126/sciadv.aaw4132.
16. **Gogoi M.M., Babu S., Pandey S.K., Nair V.S., Vaishya A., Girach I.A., Koushik N.** Scavenging ratio of black carbon in the Arctic and the Antarctic // *Polar Science*. 2018. Vol. 16. P. 10-22. DOI: 10.1016/j.polar.2018.03.002.
17. **Khan A.L., McMeeking G.R., Schwarz J.P., Xian P., Welch K.A., Berry Lyons W., McKnight D.M.** Near surface refractory black carbon observations in the atmosphere and snow in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica, and potential impacts of foehn winds // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2018. Vol. 123, Issue 5. P. 2877-2887. DOI: org/10.1002/2017JD027696.
18. **Khan A.L., Klein A.G., Katich J.M., Xian P.** Local Emissions and Regional Wildfires Influence Refractory Black Carbon Observations Near Palmer Station, Antarctica // *Frontiers in Earth Science*. 2019. Vol. 7, id.49. DOI: 10.3389/feart.2019.00049.
19. **Warren S.G., Wiscombe W.J.** A model for the spectral albedo of snow. II: snow containing atmospheric aerosols // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1980. Vol. 37. P. 2734-2745.
20. **Casey K.A., Kaspari S.D., Skiles S.M., Kreutz K., Handley M.J.** The spectral and chemical measurement of pollutants on snow near South Pole, Antarctica // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. Vol. 122, Issue 12. P. 6592-6610. DOI: 10.1002/2016JD026418.
21. **Hansen A.D.A., Lowenthal D.H., Chow J.C., Watson J.G.** Black Carbon Aerosol at McMurdo Station, Antarctica // *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2001. Vol. 51, Issue 4. P. 593-600. DOI: 10.1080/10473289.2001.10464283.
22. **Chaubey J.P., Moorthy K.K., Babu S.S., Nair V.S., Tiwari A.** Black carbon aerosols over coast al Antarctica and its scavenging by snow during the Southern Hemispheric summer // *Journal of Geophysical Research*. 2010. Vol. 115. D10210. DOI: 10.1029/2009JD013381.
23. **McConnell J.R.** New Directions: Historical black carbon and other ice core aerosol records in the Arctic for GCM evaluation // *Atmospheric Environment*. 2010. Vol. 44. P. 2665-2666.
24. **UNEP and WMO.** Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone, Nairobi, Kenya. 2011.
25. **Пастухов А.В.** Сообщение о восхождении на Эльбрус 31 июля 1890 года // *Зап. Кавказского отдела Русского геогр. общества*. Кн. 15. Тифлис, 1893. С. 22-37.
26. **Калесник С.В.** Горные ледниковые районы СССР. Л.;М.: Гидрометеоздат, 1937. 182 с.
27. **Кравцова В.И., Лосева В.Г.** Изменение оледенения Эльбруса за 100 лет (результаты картометрических работ). Успехи советской гляциологии. Материалы 3-го Всес. гляциол. симпозиума, Фрунзе, 1968. С. 262-270.
28. **Золотарёв Е.А., Харьковец Е.Г.** Оледенение Эльбруса в конце XX в. (цифровая ортофотокарта Эльбруса на 1997 г.) // *Материалы гляциологических исследований*. 2000. Вып. 89. С. 175-181.
29. **Ротогаева 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.
30. **Ротогаева 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 // *Материалы гляциологических исследований*. 2003. Вып. 95. С. 111-121.
31. **Золотарёв Е.А., Харьковец Е.Г.** Эволюция оледенения Эльбруса после малого ледникового периода // *Лёд и Снег*. 2012. Т. 52, № 2. С. 15-22.
32. **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. Т. 54, № 3. С. 5-15. DOI: org/10.15356/2076-6734-2014-3-5-15.
33. **Davitaya F.F.** Dust content as a factor affecting glaciation and climatic change // *Ann. Assoc. Amer. Geogr.* 1969. Vol. 59, № 3. P. 552-560.
34. **Залиханов М.Ч., Керимов А.М., Степанов Г.В., Черняк М.М.** Загрязнение ледников Центрального Кавказа // *Материалы гляциологических исследований*. 1992. Вып. 75. С. 15-22.
35. **Ротогаева О.В., Керимов А.М., Хмелевской И.Ф.** Содержание макроэлементов в ледниках южного склона Эльбруса // *Материалы гляциологических исследований*. 1999. Вып. 87. С. 98-105.
36. **Торопов П.А., Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Морозова П.А., Шестакова А.А.** Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56, № 1. С. 5-19. DOI: org/10.15356/2076-6734-2016-1-5-19.
37. **Lim S., Faïn X., Ginot P., Mikhalenko V., Kutuzov S., Paris J.-D., Kozachek A., 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. Vol. 17. P. 3489-3505. DOI: 10.5194/acp-17-3489-2017.

38. **Kozachek A., Mikhalenko V., Masson-Delmotte V., Ekaykin A., Ginot P., Kutuzov S., Legrand M., Lipenkov V., 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.

39. **Flanner M.G., Zender C.S., Randerson J.T., Rasch P.J.** Present-day climate forcing and response from black carbon in snow // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. D11202. DOI: 10.1029/2006jd008003.

40. **Schwarz J.P., Gao R.S., Perring A.E., Spackman J.R., Fahe, D.W.** Black carbon aerosol size in snow // *Scientific Reports.* 2013. Vol. 3. P. 1356. DOI: 10.1038/srep01356.