

# Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.510.42

## Пути дальнего переноса пыли на ледники Кавказа и химический состав снега на Западном плато Эльбруса

© 2014 г. С.С. Кутузов<sup>1,2</sup>, В.Н. Михаленко<sup>1</sup>, М. Шахгеданова<sup>2</sup>, П. Жино<sup>3</sup>, А.В. Козачек<sup>4</sup>, И.И. Лаврентьев<sup>1</sup>, Т.М. Кудерина<sup>1</sup>, Г.В. Попов<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва; <sup>2</sup>Университет г. Рэдинг, Великобритания; <sup>3</sup>Лаборатория гляциологии и геофизики окружающей среды, Гренобль, Франция; <sup>4</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург; <sup>5</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
*s.kutuzov@gmail.com*

## Ways of far-distance dust transport onto Caucasian glaciers and chemical composition of snow on the Western plateau of Elbrus

S.S. Kutuzov<sup>1,2</sup>, V.N. Mikhailenko<sup>1</sup>, M.V. Shahgedanova<sup>2</sup>, P. Ginot<sup>3</sup>, A.V. Kozachek<sup>4</sup>, T.M. Kuderina<sup>1</sup>, I.I. Lavrentiev<sup>1</sup>, G.V. Popov<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Science, Moscow; <sup>2</sup>University of Reading, Great Britain; <sup>3</sup>Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, Grenoble, France; <sup>4</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, Sankt-Petersburg; <sup>5</sup>Moscow State University

*Статья принята к печати 19 мая 2014 г.*

*Атмосферный перенос, аэрозоли, высокогорье Кавказа, ледниковые керны.  
Aerosols, atmospheric transport, Caucasus high mountains, ice cores.*

Исследованы образцы из снежных шурфов и керны из неглубоких скважин, пробуренных на Западном плато Эльбруса на высоте 5150 м в 2009, 2012 и 2013 гг. Образцы снега и льда проанализированы на содержание основных соединений и микроэлементов, включая тяжёлые металлы. В результате переноса минеральных частиц на ледники Кавказа в снежно-фирновой толще формируются отчётливо различимые горизонты загрязнения. Анализ космических снимков SEVIRI, полей оптической толщины атмосферы, траекторий движения воздушных масс и метеорологических данных позволил определить первичные источники минеральных частиц для переноса пыли с высокой точностью (50–100 км). Составлена хронология событий переноса пыли. Установлено, что такие явления происходят на Кавказе 3–7 раз в год. Пыль принесена на ледники Эльбруса с Ближнего Востока и из Северной Африки. Выполнено первое для Кавказа прямое определение количества твёрдого вещества, выпадающего из атмосферы на поверхность на больших высотах – 264 мкг/см<sup>2</sup> в год. Химический анализ образцов снега из горизонтов загрязнения, образовавшихся в 2009 г., показал высокое содержание нитратов, аммония и сульфатов, что связано с поступлением пыли из сельскохозяйственных районов в Месопотамии. Обнаружено повышенное содержание Cu, Zn и Cd по сравнению с естественным фоном, что может указывать на повышенный региональный фон этих элементов в Северной Африке и на Ближнем Востоке, а также на вероятный вклад антропогенных аэрозолей.

Samples taken from snow pit and cores from shallow boreholes drilled in 2009, 2012, and 2013 on the Western plateau of Elbrus (5150 m a.s.l.) are examined. Content of basic compounds and microelements including heavy metals had been determined. Chronology of events with the dust transport had been constructed. Such phenomena were established to happen in Caucasus 3–7 times in a year. The dust is transported on the Elbrus glaciers from the Near east and North Africa.

### Введение

В настоящее время проблема загрязнения атмосферы выходит на первый план. Загрязняющие вещества присутствуют в атмосфере в виде аэрозолей – взвешенных в воздухе жидких или твёрдых частиц. Содержание аэрозолей влияет на формирование облаков, биогеохимический цикл, радиационный режим и климат Земли [14, 15]. Судить об уровнях загрязнения воздуха можно на основе прямых измерений содержания химических соединений в атмосфере, а также по косвенным данным. Ледниковый

кern – уникальный архив информации о температуре воздуха, скорости накопления снега, химическом и газовом составе атмосферы [29, 33]. Аэрозоли, перенесённые воздушными массами в полярные районы и в высокогорье, формируют на поверхности ледников слои с их повышенной концентрацией. В результате в толще ледников сохраняется информация об уровне содержания аэрозолей, которую можно использовать для выявления источников загрязнения, особенностей атмосферной циркуляции и оценки изменения эмиссии во времени.

Для мониторинга состояния окружающей среды особое значение имеют природные комплексы высокогорья, где антропогенное влияние ещё не достигло критических значений. Многие из них расположены довольно близко от источников природной пыли и антропогенных аэрозолей, а значительная аккумуляция снега в горах позволяет получать данные высокого временного разрешения. В ряде горных районов на основе информации из ледниковых кернов получены свидетельства о загрязнении атмосферы в индустриальный период. Например, показано, что увеличение кислотности, а также концентрации сульфатов и нитратов, которое наблюдалось в ледниковых кернах в Альпах в XX в., связано с эмиссией диоксида серы и оксида азота в результате сгорания ископаемого топлива. Развитие сельского хозяйства и сжигание биомассы вызвало рост концентрации аммония [30]. Исследования образцов снега и фирна из неглубоких скважин на ледниках Тянь-Шаня позволили установить, что химический состав осадков на ледниках Средней Азии определяется региональными пыльными бурями и антропогенным загрязнением. Содержание аммония и нитратов связано с воздушными массами, приходящими из индустриальных районов Сибири и Западного Казахстана [9]. Работы, выполненные в последние годы, показали, что на горных ледниках в Альпах, Боливии, Средней Азии и Гималаях, как и в Гренландии, и в Антарктиде, в последние десятилетия возросло загрязнение снега и льда микроэлементами, эмиссия которых в атмосферу связана с человеческой деятельностью [21].

В воздухе постоянно присутствуют естественные загрязнители минерального и биологического происхождения, основными источниками которых служат извержения вулканов, пыльные бури, лесные и степные пожары, пыльца растений. К главным источникам природных минеральных аэрозолей, расположенным в низких широтах Северного полушария Земли, относятся пустыни Северной Африки, Аравийский полуостров, Центральная Азия и Китай. К источникам минеральных частиц в атмосфере может быть отнесено около 30% общей площади суши. Условия возникновения пыльных бурь в пустыне Сахара исследованы в последнее время достаточно подробно [28, 36]: выполнение картирование районов возникновения пыльных бурь, определены сезонные и дневные циклы активности [26]. Практически вся территория Ближнего Востока подвержена влиянию пыльных бурь, которые чаще всего возникают в весенне-летнее время [19]. Наиболее детальные данные о содер-

жании минеральных частиц в ледниках получены при изучении ледниковых кернов Гренландии и Антарктиды [12, 25, 27]. Довольно хорошо изучены особенности переноса пыли из пустынь Северной Африки на ледники Европейских Альп [11, 32, 34]. Есть данные о содержании минеральных частиц в ледниках Средней Азии [35], Гималаев и Тибетского плато [16, 18, 39], а также Алтая [24].

Кавказские горы, благодаря своему географическому положению, особенно интересны для подобных исследований. С одной стороны, горные массивы 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, с другой – ледниковые комплексы Кавказских гор достигают высоты более 5000 м, где влияние локальных источников загрязнения крайне незначительно, тогда как воздействие глобального и регионального переноса аэрозолей возрастает.

Для высокогорья Кавказа данные о содержании микрочастиц в снежно-фирновой толще впервые были опубликованы в 1969 г. [10]. В этой работе приводятся результаты анализа образцов фирна и льда, взятых из ледниковых трещин на высоте 4600 м на плато Майли, гора Казбек. Данные о среднем содержании, сезонном ходе и изменении уровня концентрации естественных аэрозолей и антропогенных химических соединений и микроэлементов в ледниках Центрального Кавказа и Эльбруса относятся к 1970–90-м годам. В процессе геохимических исследований [1, 7, 8] определялось содержание микрочастиц и тяжёлых металлов в снежно-фирновой толще. Большинство работ основано на анализах образцов из снежных шурфов и неглубоких кернов, отобранных на высотах 3800–4500 м над ур. моря [2, 3]. В летнее время здесь происходит активное таяние, что существенно изменяет геохимический сигнал в снежной толще [8]. Анализ содержания тяжёлых металлов в снеге на южном склоне Эльбруса в диапазоне высот 3700–5621 м [4] 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. Настоящая статья посвящена оценке концентрации, происхождения и путей переноса минеральных частиц, химических соединений и микроэлементов по данным изучения ледниковых кернов, отобранных на Западном плато Эльбруса.

### Методика исследований

Методика исследования включала в себя отбор образцов снега и фирна, изотопные и химические анализы, а также статистическую обработку результатов. Кроме того, использовались дистанционные методы и модели движения воздушных масс. Анализ космических снимков SEVIRI на борту спутника Meteosat, траекторий движения воздушных масс (модели FLEXTRA и HYSPLIT) и метеорологических данных позволил определить с высокой точностью даты и источники минеральных частиц для событий переноса пыли. Эта методика уже применялась нами для подобных исследований и описана в работах [20, 31]. Здесь мы остановимся лишь на кратком изложении основных методов и подходов.

Образцы снега и льда, которые использовались в настоящем исследовании, отобраны во время полевых работ 2009–2013 гг. на Западном плато Эльбруса. Плато площадью около 0,5 км<sup>2</sup> расположено в области аккумуляции ледников Большой Азау и Кюкюртлю в интервале высот 5100–5150 м над ур. моря. Толщина льда, по данным радиолокационного зондирования, достигает здесь 255±8 м [5]. Выполненные ранее работы по стратиграфии снежно-фирновой толщи и измерению температуры в снежных шурфах и 22-метровой скважине показали практически полное отсутствие поверхностного таяния [6]. В 2009 г. на плато (43°20'53,9" с.ш., 42°25'36,0" в.д., 5115 м) были отобраны керн льда длиной 182 м (от поверхности до ложа ледника) и образцы из снежного шурфа. В июне 2012 г. в той же точке отобран керн длиной 12 м, из которого были взяты образцы снега и фирна для изотопных анализов с интервалом 10 см. В керне обнаружено 13 визуально различимых горизонтов загрязнения. В 2013 г. отобран ещё один керн из скважины глубиной 20,58 м. Во время бурения выполнены также детальное стратиграфическое описание и измерение плотности. Образцы упаковывали в индивидуальные пластиковые пакеты и помещали в термоизоляционные ящики для последующей транспортировки. Керн льда в замороженном виде доставлялся в Лабораторию гляциологии и геофизики окружающей среды (LGGE) Гренобля, Франция.

Измерения изотопного состава образцов снега и льда выполнены в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) Арктического и Антарктического научно-исследовательского института на лазерном анализаторе изотопного состава Picarro L-1102 i. В данном приборе применяется технология абсорбционной спектроскопии по затуханию света (WS-CRDS). Принцип работы прибора и его техни-

ческие характеристики детально изложены на сайте [www.picarro.com](http://www.picarro.com). Точность измерений, значения калибровочных коэффициентов и коэффициентов памяти при анализах изотопов кислорода-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) определяются при регулярных калибровках прибора с использованием изотопных стандартов МАГАТЭ – SMOW, GISP и SLAP ([www.iaea.org](http://www.iaea.org)). Каждый образец измерялся один раз, но для проверки правильности работы прибора отдельные случайно выбранные образцы измеряли дважды. Точность измерений для  $\delta^{18}\text{O}$  составляла ±0,1 ‰.

Образцы снега из шурфа 2009 г. на содержание основных ионов анализировали на ионном хроматографе Dionex Dual ICS-3000 в чистой комнате в лаборатории LGGE. Определяли содержание катионов ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) и анионов ( $\text{F}^-$ ,  $\text{CHOO}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ). Концентрацию микроэлементов, включая тяжёлые металлы, определяли в химической лаборатории отдела минералогии, изотопной геохимии и геоэкологии Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ, Москва) методом плазменной масс-спектрометрии на приборе Elan-6100. Перед определением минеральные частицы полностью растворяли в смеси кислот ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HNO}_3$ ) в автоклаве при температуре 300 °С. Образцы снега из шурфа 2009 г. и керна из скважины 2013 г. анализировали также на содержание микрочастиц и распределение их по размерам. Анализ выполнен с помощью счётчика Коултера (Coulter Counter Multisizer 3) в лаборатории LGGE. Подготовку проб и анализы проводили в чистой комнате класса 100 для минимизации возможного загрязнения образцов. Счётную концентрацию определяли в диапазоне 1–30 мкм по 300 каналам. Исходя из распределения частиц по размерам, рассчитано распределение частиц по массе с допущением, что частицы имеют сферическую форму и плотность равную 2,5 г/см<sup>3</sup>. Всего из керна 2013 г. проанализировано 267 образцов.

Для выявления возможных событий переноса пыли использованы данные европейского геостационарного метеоспутника Meteosat Second Generation (MSG-2). На борту этого аппарата находится многоканальная камера инфракрасного и видимого диапазона спектра SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager). Спутник MSG-2 располагается над пересечением нулевого меридиана и экватора и получает изображения через каждые 15 мин с разрешением 3 км в надире. Изображения SEVIRI для анализа пыли в ат-

мосфере были составлены из трёх инфракрасных каналов: 10 (12,0 мкм), 9 (10,8 мкм) и 7 (8,7 мкм). Комбинированные RGB-изображения (красный, зелёный, синий) получены как разница между следующими каналами: 10–9 – красный, 9–7 – зелёный и 9 канал – синий [28]. На изображениях пыль соответствует оттенкам розового цвета, а облака имеют тёмно-коричневый цвет. Отметим, что влияние пыли на яркостную температуру зависит от особенностей подстилающей поверхности, времени суток, влажности и состава атмосферы, а также от высоты пылевого облака. Снимки получены с вебсайта Европейской организации спутниковой метеорологии EUMETSAT (<http://www.eumetsat.int>).

Метеорологические условия во время переноса минеральных частиц проанализированы с помощью данных реанализа NCEP/NCAR, полученных с вебсайта Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>). Обратные траектории движения воздушных масс рассчитаны с использованием модели HYSPLIT, рассматривающей уравнения движения единичной частицы [13] для каждого события переноса пыли. Также применяли модель FLEXTRA, разработанную А. Штолем при содействии Института Метеорологии и Геофизики в Вене (<http://www.nilu.no/projects/ccc/trajectories/>).

### Результаты

**Датирование снежно-фирновой толщи.** Для датирования снежно-фирновой толщи использованы данные по стратиграфии и результаты измерения  $\delta^{18}\text{O}$  образцов снега и фирна из шурфа 2009 г. и керна скважины 2012 г. (рис. 1). Профиль  $\delta^{18}\text{O}$  в керне 2012 г. характеризуется чётким сезонным ходом с амплитудой 21,5 ‰, минимумом  $-27$  ‰ и максимумом  $-5,5$  ‰. Установлено, что керн 2012 г. вскрывает толщу, сформированную в период июня 2012 г. – осени 2009 г., в то время как шурф содержит зимние, весенние и осенние слои 2009 г. Слои загрязнения, главным образом, относятся к весенне-летнему периоду, однако два слоя сформированы осенью.

**Хронология событий переноса пыли.** Зная распределение горизонтов пыли по сезонам, мы проанализировали изображения SEVIRI на наличие и перемещение облаков пыли в сторону Кавказского региона, полученные с двухчасовым разрешением для периодов март–июль и сентябрь–ноябрь с 2009 по 2012 г. В результате были определены даты возможного переноса пыли. Для этих дней сним-

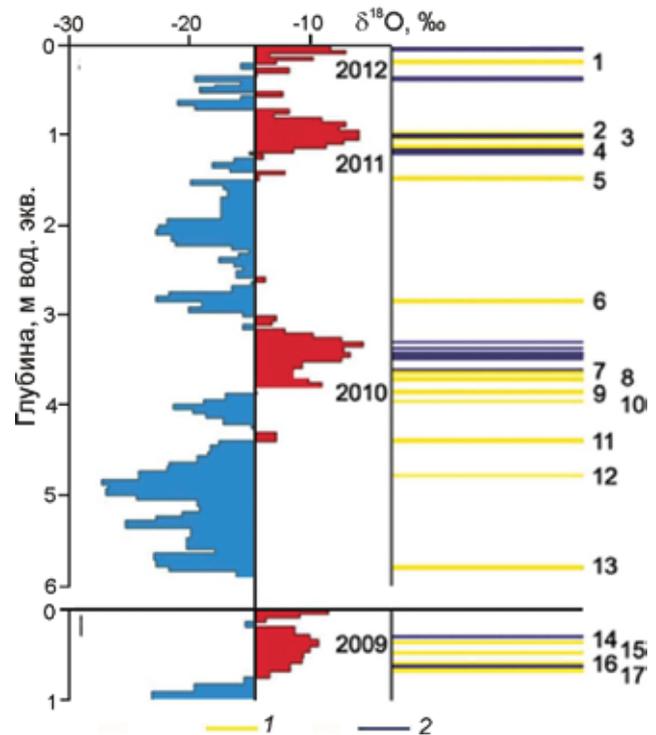
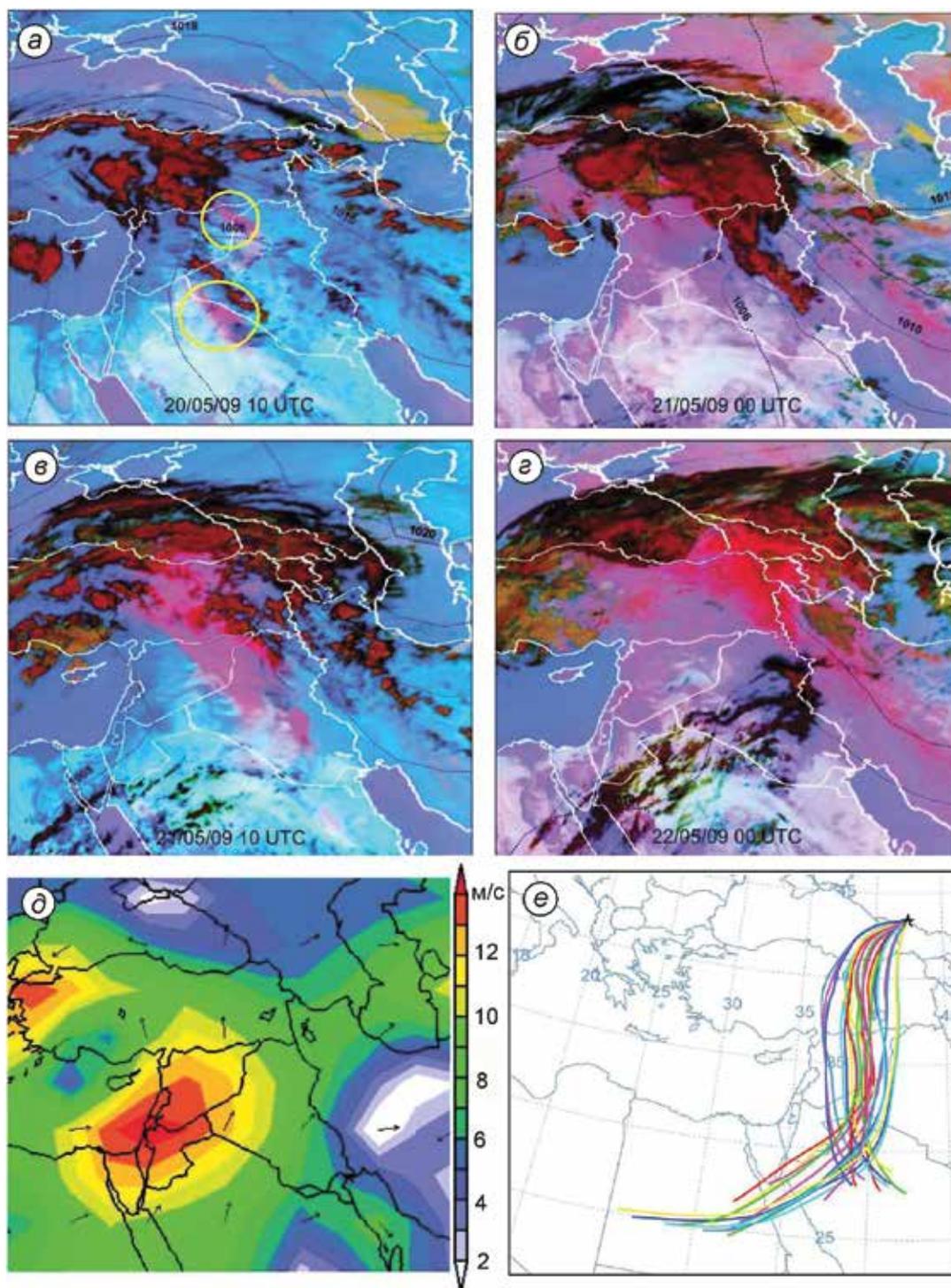


Рис. 1. Изотопный состав, горизонты загрязнения (1) и ледяные прослойки (2) снежно-фирновой толщи по данным исследования керна 2012 г. (см. таблицу)

Fig. 1. Isotopic composition, dust layers (1) and melt features (2) in 2012 firn core (see table)

ки SEVIRI получены с 15-минутным разрешением. Анализ изображений позволил подробно реконструировать историю возникновения и перемещения пылевых облаков (рис. 2). В большинстве случаев пыльные бури зарождаются в небольших по масштабу источниках (1–10 км и менее), однако после первичной мобилизации несколько пылевых шлейфов сливаются и формируют крупные пылевые облака регионального синоптического масштаба. Благодаря высокому временному разрешению изображений SEVIRI, для каждого события переноса пыли в сторону Кавказа можно проследить развитие облаков пыли вплоть до их первичного зарождения в источнике. Подробно эта методика описана в работе [28]. Привлечение метеорологических данных реанализа NCEP/NCAR и построение обратных траекторий движения воздушных масс для каждого события позволило уточнить хронологию событий переноса (см. рис. 2). Значительное событие переноса пыли наблюдалось на Эльбрусе 5 мая 2009 г. В результате выпадения минеральных частиц в снежной толще сформировался горизонт рыжего цвета. Детальное изучение этого события позволило выяснить ис-



**Рис. 2.** Анализ события переноса микрочастиц на Кавказ 19–22 мая 2009 г. *a–г* – RGB-изображения спутника SEVIRI (комбинация инфракрасных каналов 8,7; 10,8 и 12,0 мкм), облака пыли имеют розовый или малиновый оттенок, кучевая облачность представлена коричневыми цветами; *д* – скорость и направление ветра на уровне 700 мб 20.05.2009 по данным реанализа NCEP/NCAR, м/с; *е* – 48-часовые обратные траектории движения. HYSPLIT – ансамбль из 27 траекторий, начальная точка – Западное плато Эльбруса

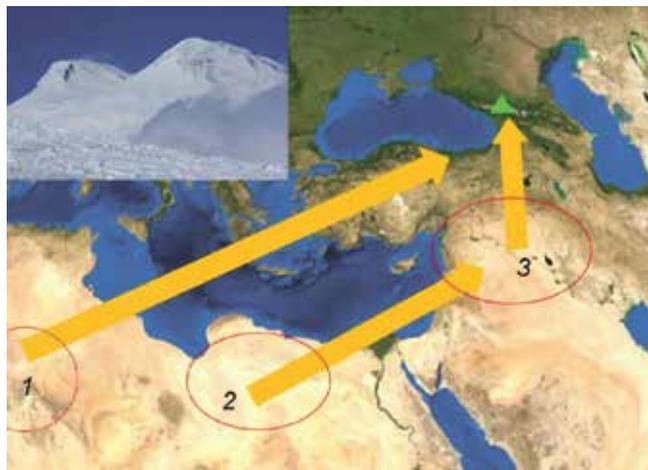
**Fig. 2.** Analysis of the 19–21 May 2009 dust deposition event in Caucasus.

*a–г* – SEVIRI RGB composition images (combination of infrared channels 8.7, 10.8, and 12  $\mu\text{m}$ ), dust appears in pink or magenta colours, clouds – brown; *д* – 20.05.2009 average wind speed ( $\text{ms}^{-1}$ ) and direction at 700 hPa, NCEP/NCAR data; *е* – 48 hours ensemble of 27 members back trajectories from HYSPLIT model starting at western Elbrus plateau

точники минеральных частиц, а также историю их переноса в атмосфере [31].

Всего по данным керн 2012 г., образцов из снежного шурфа 2009 г, снимков SEVIRI и модели переноса частиц определено 17 событий переноса пыли на ледники Эльбруса за период с марта 2009 г. по июнь 2012 г. (рис. 3, таблица). В 12 случаях мине-

ральные частицы были перенесены на ледники Эльбруса из источников с Ближнего Востока – с севера Месопотамии, востока Сирии, запада Сирийской пустыни, на границе Саудовской Аравии и Ирака, а также с плато в Восточном Иордане. Пыль в этих районах в большинстве случаев образуется из локальных естественных и антропогенных источни-



**Рис. 3.** Основные источники и пути переноса пыли на ледники Эльбруса (зелёный треугольник).

1 – восток Алжира, запад Ливии, плато Тассилин-Адджер; 2 – северо-восток Ливии (к югу от гор Ахдар); 3 – источники на Ближнем Востоке (Сирийская пустыня, Иордания, северо-запад Саудовской Аравии, Месопотамия)

**Fig. 3.** Main dust sources and pathways of dust towards Elbrus glaciers (green triangle).

1 – eastern Algeria, western Libya, Tassili n'Ajjer plateau; 2 – north-east Libya to the south from Akhdar mountains; 3 – Middle East sources (Syrian desert, Jordan, north-west Saudi Arabia, Mesopotamia)

ков: сухих русел рек, сухих озёр, сельскохозяйственных земель. Четыре раза пылевые облака возникали в пустынях Северной Африки. Однако и в этих случаях вовлекался дополнительный материал из источников с Ближнего Востока. Большинство событий происходило с мая по июнь, дважды перенос пыли зарегистрирован в октябре. Четыре случая переноса пыли из Сахары происходили весной (март–май). Трижды пыль была поднята в предгорьях Ахдара на востоке Ливии, включая событие 5 мая 2009 г. В марте 2009 и 2010 гг. пыльные бури возникли на плато Тассилин-Адджер в Алжире. В процессе продвижения воздушной массы был вовлечён дополнительный материал из пустынь Ливии. Карта источников пыли приведена в работе [20].

Детальное описание переноса пыли из аридных районов Ближнего Востока и Северной Африки на Кавказ позволяет лучше понять особенности атмосферной циркуляции в регионе. Наши результаты подчёркивают особую значимость исследований ледниковых кернов на Кавказе. Известно, что аридные экосистемы Ближнего Востока крайне нестабильны в период климатических изменений. Недавние исследования [17] показали, что температурные аномалии в последнем тысячелетии (в 900–1300 гг. н.э., а также во время малого ледникового периода) приводили к существенному изме-

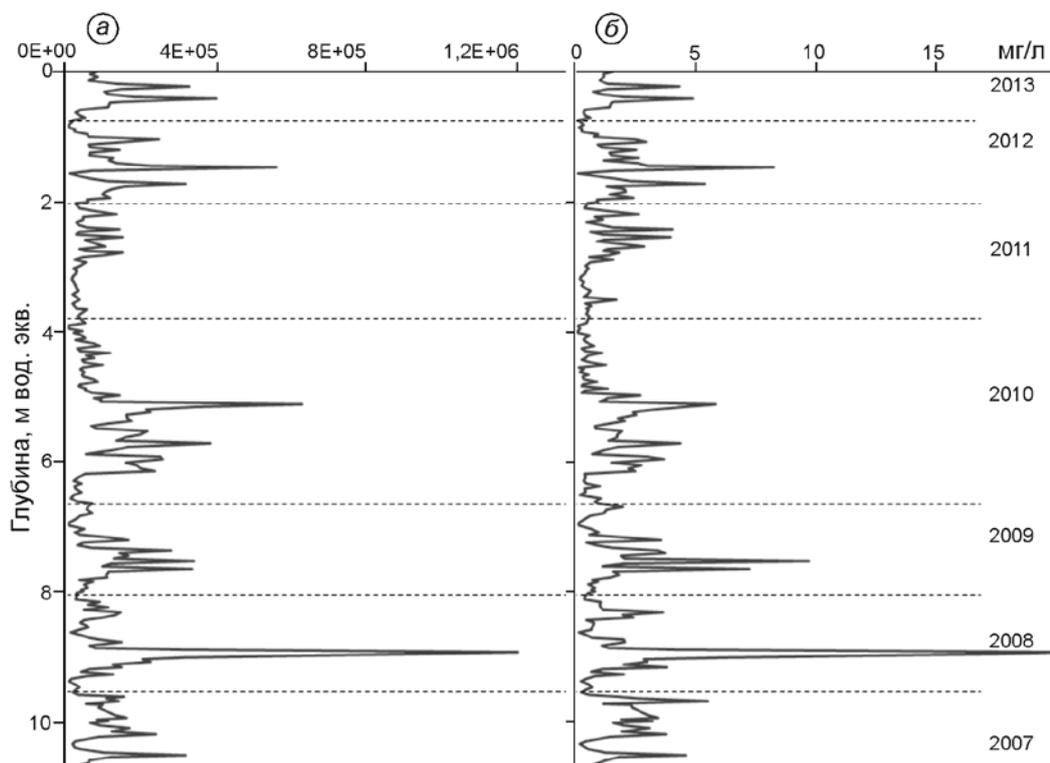
#### Хронология событий переноса пыли на Западное плато Эльбруса

Номер и дата	Расположение основных источников пыли
1. 03.05.2012	Сирийская пустыня, Иордания, северо-запад Саудовской Аравии
2. 02.06.2011	Север Месопотамии, северо-запад Ирака
3. 30.05.2011	Север Месопотамии, Сирийская пустыня, северо-запад Саудовской Аравии
4. 19.05.2011	
5. 20.04.2011	Север Месопотамии, северо-запад Ирака
6. 08.10.2010	
7. 24.06.2010	Сирия, Иордания
8. 06.06.2010	Сирийская пустыня
9. 12.05.2010	Северо-восток Сирии, северо-запад Ирака
10. 12.04.2010	Сирийская пустыня, Ирак
11. 09.03.2010	Восток Алжира, запад Ливии (плато Тассилин-Адджер)
12. 12.02.2010	Алжир
13. 13.10.2009	Сирийская пустыня, северо-запад Саудовской Аравии
14. 27.06.2009	Север Месопотамии, Сирийская пустыня, восток Сирии
15. 21.05.2009	Север Месопотамии, Сирийская пустыня, северо-запад Саудовской Аравии
16. 05.05.2009	Северо-восток Ливии (к югу от гор Ахдар), Сирийская пустыня, север Месопотамии
17. 08.03.2009	Восток Алжира, запад Ливии (плато Тассилин-Адджер), Тунис

нению увлажнения, что, в свою очередь, вызывало массовую миграцию населения.

Подобные события происходят и сейчас. В 2007–2010 гг. на Ближнем Востоке наблюдалась одна из самых сильных засух за последние 40 лет. Исследования керн льда на Кавказе позволяют получить независимые данные для оценки времени и интенсивности пыльных бурь на Ближнем Востоке и в Северной Африке не только на современном этапе, но и в прошлом. Такая возможность появилась впервые – до этого в публикациях не сообщалось об обнаружении пыли из пустынь Ближнего Востока в ледниковых кернах.

**Содержание минеральных частиц.** При анализе образцов керн 2013 г., отобранных с шагом 10 см, на счётчике частиц Коултера получены данные о количестве (кол-во/мл) и массе частиц (мг/л), а также о распределении минеральных частиц по размеру (рис 4). Для расчёта общей массы частиц распределение их числа по размеру было пересчитано в распределение частиц по массе (объёму). Для перевода суммарное количество частиц в каж-



**Рис. 4.** Концентрация микрочастиц – количество (а) и масса (б) в керне 2013 г.

**Fig. 4.** Particle number (a) and mass (b) concentration in 2013 firn core

дой группе одного размера пересчитывалось в суммарный объём и соответственно в массу, принимая, что объём индивидуальной частицы

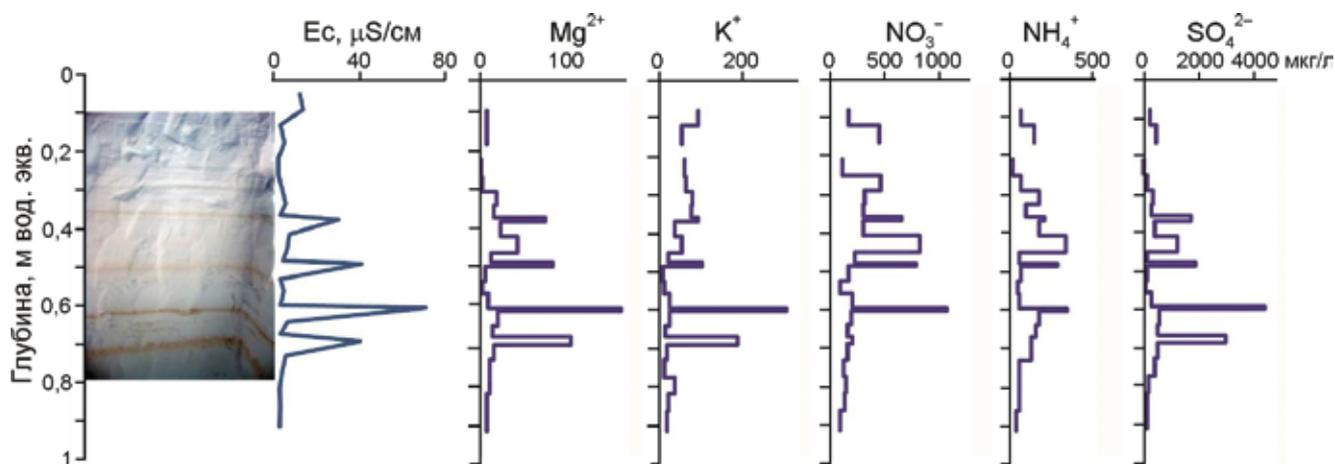
$$v_i = \frac{4\pi}{3} \left( \frac{\bar{d}_i}{2} \right)^3,$$

где  $\bar{d}_i$  – характерный диаметр частицы в каждом классе, рассчитанный как корень из результата умножения значений граничных диаметров; плотность индивидуальной частицы принята равной  $2,5 \text{ г/см}^3$ . Для каждого образца подбиралась соответствующая функция логнормального распределения [12, 27, 38].

Установлено, что в среднем по керну 2013 г. концентрация частиц составила  $10 \cdot 10^5$  частиц на 1 мл при максимуме  $1,2 \cdot 10^6$ /мл, средняя массовая доля частиц по керну равна  $1,2 \text{ мг/л}$ , а максимальная –  $20 \text{ мг/л}$  (см. рис. 4). Керн был разделён на годовые слои на основе стратиграфии, изотопного состава и концентрации частиц. В результате получено среднегодовое значение массовой доли частиц, составившее  $1,7 \text{ мг/л}$ . Данные по ежегодной аккумуляции снега и концентрации частиц позволили установить, что в среднем за год на Западном плато Эльбруса в 2007–2013 гг. выпадало  $264 \text{ мкг/см}^2$  твёрдых нерастворимых частиц. Это – первое для Кавказского региона прямое определе-

ние количества твёрдого вещества, выпавшего из атмосферы на поверхность.

Анализ распределения массы частиц по размеру позволил выделить 30 пиков концентрации, для которых характерно одномодальное логнормальное распределение. Косвенно такой характер распределения подтверждает длительный перенос микрочастиц в атмосфере. Отметим, что данные по керну 2013 г. согласуются с результатами 2012 г., когда при визуальном описании керна было выделено 17 горизонтов загрязнения с 2009 по 2012 г. В керне 2013 г. этому периоду соответствует такое же число пиков. Обнаружены также четыре пика концентрации, соответствующие четырём событиям переноса пыли на Эльбрус в 2009 г. Эти эпизоды подробно описаны ранее [20, 31]. Максимальный пик концентрации приходится на 2008 г. и соответствует масштабному событию переноса пыли над Средиземноморьем 22–23 марта в результате пыльной бури, начавшейся в Восточном Алжире. Это событие привело к существенному превышению норм концентрации микрочастиц в атмосфере в Восточном Средиземноморье [23]. Медиана распределения массы частиц в зависимости от диаметра варьирует от 2 до 8 мкм. Полученные результаты для горизонтов загрязнения на Эльбрусе соответствуют данным для слоёв пыли в других высокогорных районах [35, 38, 40], что под-



**Рис. 5.** Содержание ионов в образцах снега из шурфа 2009 г. на Западном плато Эльбруса, мкг/л. Показаны также фотография стенки шурфа с хорошо различимыми горизонтами загрязнения и профиль электропроводности  
**Fig. 5.** Ions concentration in snow samples from 2009 snowpit,  $\mu\text{g/l}$ . Photograph of the snowpit and conductivity profile is also shown

тверждает гипотезу о длительном переносе минеральных частиц из далёких источников.

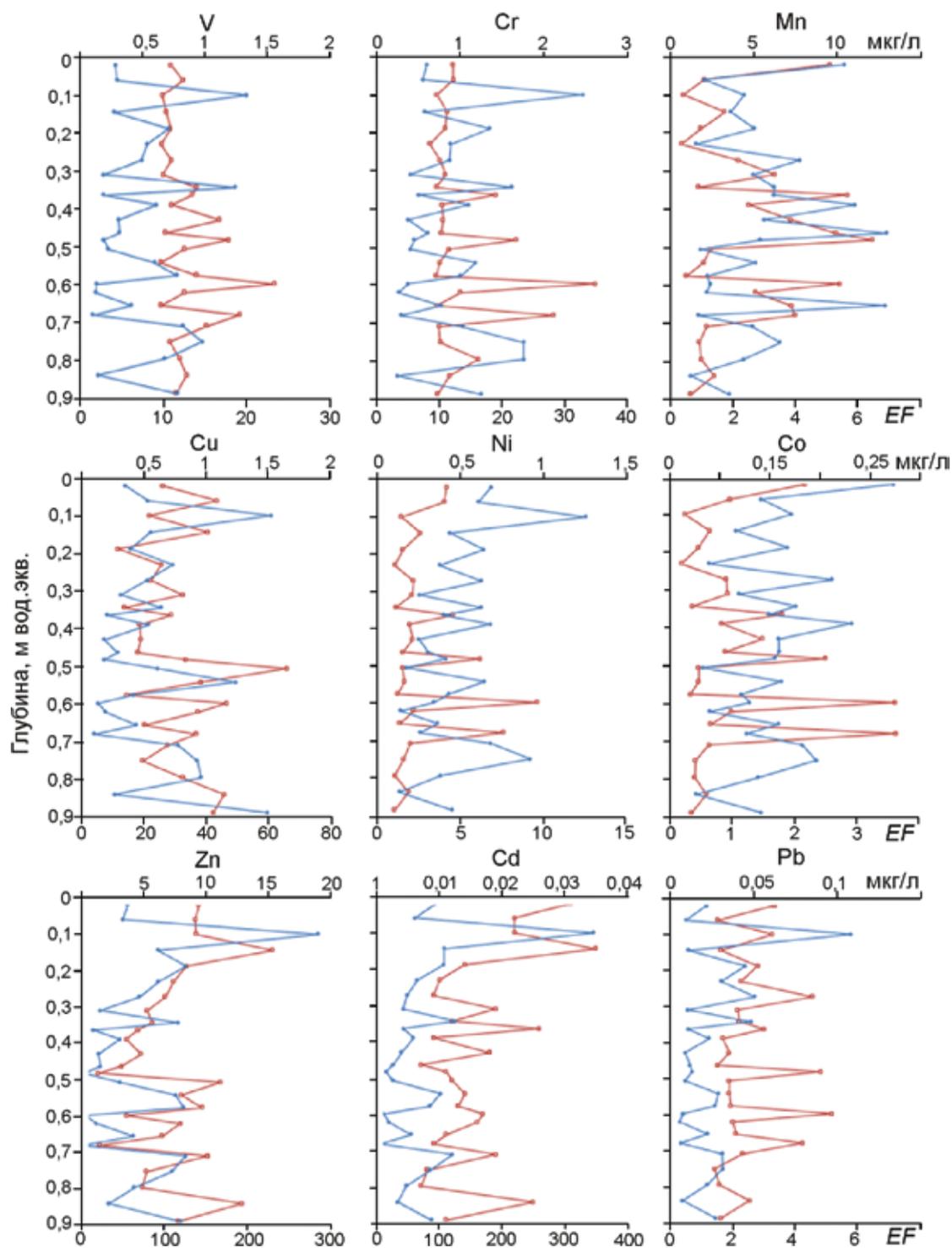
**Химический состав снежной толщи.** Профили содержания основных ионов в снежной толще 2009 г. на Западном плато Эльбруса показывают четыре пика, соответствующие четырём событиям переноса пыли из пустынь Сахары (8 марта и 5 мая 2009 г.) и с Ближнего Востока (5 мая, 21 мая и 27 июня 2009 г.). Во время переноса пыли из северной Сахары 5 мая 2009 г. происходило вовлечение дополнительного материала из района Месопотамии [31] (рис. 5). Отложение пыли существенно увеличило концентрацию большинства ионов в снежной толще, особенно  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{NO}_3^-$ . Три верхних горизонта загрязнения, для которых источником микрочастиц были территории Ближнего Востока (частично 5 мая, 21 мая и 27 июня 2009 г.), отличаются высоким содержанием нитратов, аммония и сульфатов. Это может быть связано с тем, что основной источник пыли в данных горизонтах – сельскохозяйственные земли Месопотамии [20]. Перенос пыли из естественных источников в Восточном Алжире не привёл к повышению концентрации  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$ . Полученные данные показывают, что перенос минеральных частиц существенно влияет на химический состав снежно-фирновой толщи в привершинной области Эльбруса в весенне-летнее время.

Для образцов снега из шурфа 2009 г. также получены содержания микроэлементов (рис. 6). Используя методику, описанную в работе [22], для некоторых элементов, включая тяжёлые металлы, рассчитано превышение их содержания относительно

среднего в земной коре [37]. При этом оценивался показатель обогащения  $EF$  (enrichment factor) по сравнению с нормированными величинами относительно одного из элементов. В данном случае таким элементом был барий [22]. Например, показатель обогащения для кадмия рассчитан как  $EF = (\text{Cd}/\text{Ba})_{\text{обр.}} / (\text{Cd}/\text{Ba})_{\text{з.кора}}$ . Средние значения показателя обогащения показаны на рис. 7. Для V, Cr, Mn, Co и Ni величины  $EF$  ниже десяти, что указывает на преимущественно естественное происхождение этих элементов из минералов земной коры, переносимых с микрочастицами на Западное плато Эльбруса. Значения  $EF$  для Pb оказались невысокими: его содержание было ниже предела обнаружения ( $< 0,1$  мкг/л), что на порядок меньше полученных ранее значений для южного склона Эльбруса [3]. Для Cu, Zn и Cd определены повышенные значения  $EF$ , что, вероятно, указывает на повышенный региональный фон этих элементов в Северной Африке и на Ближнем Востоке, а также на вклад антропогенных аэрозолей. Для проверки этой гипотезы необходимо определить обогащение не относительно среднего содержания в земной коре, а относительно природного регионального фона источника аэрозолей. Возможные источники эмиссии этих элементов – выбросы промышленных предприятий на юге России, в странах Западной и Восточной Европы и Ближнего Востока.

### Заключение

В результате исследования снежно-фирновой толщи на Западном плато Эльбруса составлена хронология событий переноса пыли. Всего, по данным исследования керн 2012 г., образцов из



**Рис. 6.** Содержание некоторых микроэлементов в снеге 2009 г., мкг/л (красный), и показатель обогащения  $EF$  (синий) (см. пояснения в тексте)  
**Fig. 6.** Concentration of selected trace elements (red) and enrichment factor  $EF$  (blue) (see text for explanation)

снежного шурфа 2009 г, снимков SEVIRI и моделей переноса частиц, определено 17 событий переноса пыли на ледники Эльбруса за период с марта 2009 г. по июнь 2012 г. Определены источники минеральных частиц для каждого события переноса. В большинстве случаев пыль на ледники Эльбруса поступает из источников с Ближнего Востока. Че-

тыре раза пылевые облака возникали в пустынях Северной Африки. Большинство событий происходило с мая по июнь, при этом дважды перенос пыли зарегистрирован в октябре.

В процессе исследований установлено характерное распределение минеральных частиц по размерам. Среднегодовое значение массовой кон-

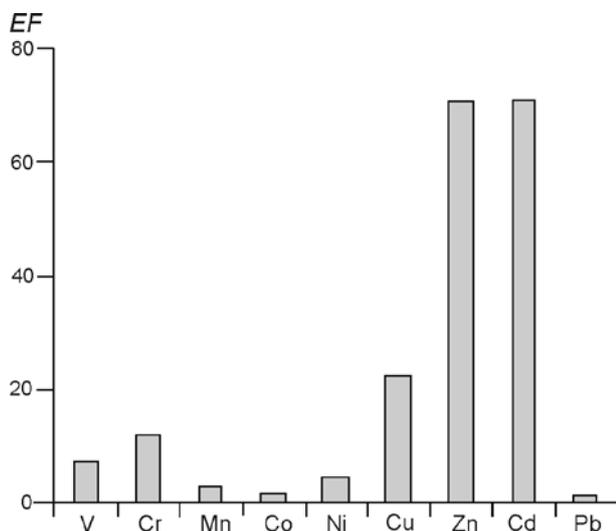


Рис. 7. Средние значения  $EF$  для девяти микроэлементов по данным 23 образцов из шурфа 2009 г.

Fig. 7. Average  $EF$  values for nine trace elements in 23 samples from 2009 snowpit

центрации составляет 1,7 мг/л. Экспериментально определена величина потока твёрдых частиц, выпадающих из атмосферы на больших высотах на Кавказе. В среднем за год на Западном плато Эльбруса за период 2007–2013 гг. выпало 264 мкг/см<sup>2</sup> микрочастиц пыли. Горизонты загрязнения, для которых источниками микрочастиц был Ближний Восток, характеризует высокое содержание нитратов, аммония и сульфатов, что связано с поступлением пыли из сельскохозяйственных районов Месопотамии. Перенос пыли из естественных источников на севере Сахары не приводит к повышению концентрации  $NO_3^-$  и  $NH_4^+$ . Анализ содержания микроэлементов показал, что для Cu, Zn и Cd значения показателя обогащения  $EF$  по сравнению со средним содержанием в земной коре увеличены, что может указывать на повышенный региональный фон этих элементов в Северной Африке и на Ближнем Востоке, а также на возможный вклад антропогенных аэрозолей.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-05-00137, № 14-05-31102 и гранта седьмой рамочной программы Европейского союза FP7-PEOPLE-2010-IIF соглашение № P1IF-GA-2010-275071.

### Литература

1. Залиханов М.Ч., Керимов А.М., Степанов Г.В., Черняк М.М. Загрязнение ледников Центрального Кавказа // МГИ. 1992. Вып. 75. С. 15–22.
2. Керимов А.М., Рототаева О.В., Хмелевской И.Ф. Особенности формирования химического состава ледников Кабардино-Балкарии // МГИ. 1998. Вып. 84. С. 66–71.

3. Керимов А.М., Черняк М.М. Микропримеси тяжелых металлов в снежно-фирновой толще южного склона Эльбруса // МГИ. 2003. Вып. 95. С. 178–182.
4. 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.
5. Лаврентьев И.И., Михаленко В.Н., Кутузов С.С. Толщина льда и подлёдный рельеф Западного ледникового плато Эльбруса // Лёд и Снег. 2010. № 2 (110). С. 12–18.
6. Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Кунахович М.Г., Томпсон Л.Г. Исследования западного ледникового плато Эльбруса: результаты и перспективы // МГИ. 2006. Вып. 99. С. 185–190.
7. Рототаева О.В., Хмелевской И.Ф., Бажев А.Б., Хейнтценберг И., Стенберг М., Пингло Ж. Строение и химический состав деятельного слоя ледника Большой Азау (Эльбрус) в области питания // МГИ. 1998. Вып. 84. С. 25–33.
8. Рототаева О.В., Керимов А.М., Хмелевской И.Ф. Содержание макроэлементов в ледниках южного склона Эльбруса // МГИ. 1999. Вып. 87. С. 98–105.
9. Aizen V.B., Aizen E.M., Melack J.M., Kreuz 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.
10. Davitaya F.F. Dust content as a factor affecting glaciation and climatic change // Ann. Assoc. Amer. Geogr. 1969. V. 59. № 3. P. 552–560.
11. De Angelis M., Gaudichet A. Saharan dust deposition over Mont Blanc (French Alps) during the last 30 years // Tellus. B. 1991. V. 43. № 1. P. 61–75.
12. Delmonte B., Petit J.R., Maggi V. Glacial to Holocene implications of the new 27000-year dust record from the EPICA Dome C (East Antarctica) ice core // Climate Dynamics. 2002. V. 18. P. 647–660.
13. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), Model access via (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) // NOAA Air Resources Laboratory. Silver Spring, MD. 2014.
14. 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. № RG3005. P. 1–36.
15. 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.
16. 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.
17. Kaniewski D., Van Campo E., Weiss H. Drought is a recurring challenge in the Middle East // Proc. National Academy of Sciences. U.S.A. 2012. V. 109. I. 10. P. 3862–3867.
18. 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.
19. Kutiel H., Furman H. Dust storms in the Middle East: Sources of origin and their temporal characteristics // Indoor and Built Environment. 2003. V. 12. № 6. P. 419–426.
20. 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.

21. 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.
22. Liu Y., Hou S., Hong S., Do Hur S., Lee K., Wang Y. High-resolution trace element records of an ice core from the eastern Tien Shan, central Asia, since 1953 AD // *Journ. of Geophys. Research*. 2011. V. 116. № D12307. P. 1–14.
23. Nastos P.T., Kampanis N.A., Giaouzaki K.N., Matzarakis A. Environmental impacts on human health during a Saharan episode at Crete island – Greece // *Meteorologische Zeitschrift*. 2011. V. 20. № 15. P. 517–529.
24. Olivier S., Blaser C., Brütsch 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. Research*. 2006. V. 111. № D05309. P. 1–13.
25. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core. Antarctica // *Nature*. 1999. V. 399. P. 429–436.
26. Prospero J., Ginoux M.P., Torres O., Nicholson S.E., Gill T.E. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product // *Rev. Geophysics*. 2002. V. 40. № 1. 1002. P. 1–31.
27. Ruth U., Wagenbach D., Steffensen J.P., Bigler M. Continuous record of microparticle concentration and size distribution in the central Greenland NGRIP ice core during the last glacial period // *Journ. of Geophys. Research*. 2003. V. 108 (D3). № 4098. P. 1–12.
28. Schepanski K., Tegen I., Laurent B., Heinold B., Macke A. A new Saharan dust source activation frequency map derived from MSG-SEVIRI IR channels // *Geophys. Research Letters*. 2007. V. 34. № L18803. P. 1–5.
29. Schwikowski M. Reconstruction of European air pollution from alpine ice cores // *Earth Paleoenvironments: Records Preserved in Mid- and Low-Latitude Glaciers*. The Netherlands: Kluwer Academic, 2004. P. 95–119.
30. Schwikowski M., Brütsch 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.
31. Shahgedanova M., Kutuzov S., White K.H., Nosenko G. Using the significant dust deposition event on the glaciers of Mt. Elbrus, Caucasus Mountains, Russia on 5 May 2009 to develop a method for dating and «provenancing» of desert dust events recorded in snow pack // *Atmos. Chem. Phys*. 2013. V. 13. P. 1797–1808.
32. 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.
33. Thompson L.G. Understanding global climate change: Paleoclimate perspective from the World's highest mountains // *Proc. Amer. Philos. Society*. 2010. V. 54. № 2. P. 133–157.
34. Wagenbach D., Geis K. The mineral dust record in a high altitude Alpine glacier (Colle Gnifetti, Swiss Alps) // *Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*. Kluwer Academic Publishers, 1989. P. 543–564.
35. 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.
36. Washington R., Todd M., Middleton N.J., Goudie A.S. Dust-Storm source areas determined by the Total Ozone Monitoring Spectrometer and surface observations // *Annals Amer. Geogr.* 2003. V. 93. P. 297–313.
37. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochemical et Cosmochemical Acta*. 1995. V. 59. P. 1217–1232.
38. Wu G., Yao T., Xu B., Tian L., Zhang C., Zhang X. Volume-size distribution of microparticles in ice cores from the Tibetan Plateau // *Journ. of Glaciology*. 2009. V. 55. № 193. P. 859–868.
39. Xu J., Hou S., Qin D., Kaspari S., Mayewski P.A., Petit J.R., Delmonte B., Kang S., Ren J., Chappellaz J. A 108.83-m ice-core record of atmospheric dust deposition at Mt. Qomolangma (Everest), Central Himalaya // *Quaternary Research*. 2010. V. 73. № 1. P. 33–38.
40. Zdanowicz C.M., Hall G., Vaive J., Amelin Y., Percival J., Girard I., Biscaye P., Bory A. Asian dustfall in the St. Elias Mountains, Yukon, Canada // *Geochemical et Cosmochemical Acta*. 2006. V. 70. P. 3493–3507.

### Summary

We present and discuss the chronology of dust deposition events documented by the shallow firn and ice cores extracted on the Western Plateau, Mt. Elbrus (5150 m a.s.l.) in 2009, 2012 and 2013. Snow and ice samples were analysed for major ions and minor element concentrations including heavy metals. Dust layers are formed on the surface of the glaciers as a result of atmospheric transport of mineral dust and aerosol particles to the Caucasus region. Satellite imagery (SEVIRI), trajectory models, and meteorological data were used for accurate dating of each the dust layers revealed in the ice cores. Then we tried to determine origins of the dust clouds and to investigate their transport pathways with high resolution (50–100 km). It was found that the desert dust is deposited on Caucasus glaciers 3–7 times in a year and it comes mainly from deserts of the Middle East and more rarely from the Northern Sahara desert. For the first time average annual dust flux (264  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  per a year) and average mass concentration (1.7 mg/kg) over the period 2007–2013 were calculated for this region. The deposition of dust resulted in elevated concentrations consists of mostly ions, especially  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , and sulphates. Dust originated from various sources in the Middle East, including Mesopotamia, or similar dust clouds passing over the Middle East are characterised by high concentrations of nitrates and ammonia that may be related to atmospheric transport of ammonium from agricultural lands that may explain high concentrations of ammonium in the dust originating from this region. Mean values of crustal enrichment factors ( $EF$ ) for the measured minor elements including heavy metals were calculated. We believe that high content of Cu, Zn and Cd can be a result of possible contribution from anthropogenic sources. Studies of the Caucasus ice cores may allow obtaining new independent data on the atmosphere circulation and high-altitude environment of this region.