УДК 622.235

В.В.АДУШКИН, С.И.ПОПЕЛЬ, С.И.ШИШАЕВА
Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

АНАЛИЗ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ФРАКЦИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД ВЗРЫВОМ И ОБРАЗОВАНИИ СКАЛЬНЫХ ОПОЛЗНЕЙ

Проведено исследование мелкодисперсной фракции нано- и микромасштабного размера, образующихся в результате разрушения горных пород взрывами химических ВВ и обрушения скальных склонов. Показана возможность образования наномасштабных частиц от 20 нм до 240 мкм в случае разрушения породы взрывом и от 77 нм до 2 мкм при скальных оползнях. Рассмотрены частицы, распространяющиеся в атмосфере, образовавшиеся в воронке от взрыва и в основании скальных оползней. Выполнен статистический анализ мелкодисперсной фракции по размерам и проведено сравнение с классическими распределениями Колмогорова и Розина – Раммлера. Проанализированы особенности характера дробления мелкодисперсных частиц в зависимости от размера и типа горных пород.

Research fine fractions nano- and the microscale size, rocks formed as a result of destruction by explosions chemical BB and destruction rocky slopes is lead (carried out). The opportunity of formation(education) nanoscale of particles in a range of the sizes from 20 nanometers up to 240 microns is shown in case of destruction of breed by explosion and from 77 nanometers up to 2 microns in case of rocky landslips. The particles extending in an atmosphere, formed in voronce from explosion and in the basis of rocky landslips are considered. The statistical analysis fine fractions in the sizes is executed and comparison with Kolmogorov classical distributions and Rozin – Rammler is lead (carried out). Features of character of crushing fine fractions particles are analysed, depending on their size and such as rocks.

В работе приведены результаты исследований гранулометрического состава мелкодисперсной фракции, образующейся при разрушении горных пород взрывами химических ВВ и развитии скальных оползней. Мелкодисперсная фракция – это частицы наномасштабного размера от 1 нм (1 нм = $= 10^{-9}$ м) до 10^3 нм (10^3 нм = 1 мкм) и микромасштабного размера от 1 мкм (1 мкм = $= 10^{-6}$ м) до 10^3 мкм (10^3 мкм = 1 мм). Насколько известно авторам, такая работа является первым исследованием наночастиц, образующихся при указанных крупномасштабных процессах. Особая роль наночастиц в окружающей среде связана с их исключительно малыми размерами и высокой степенью дисперсности, благодаря которым они обладают высокой подвижностью, значительным давлением насыщенного пара и большим временем жизни в атмосфере (порядка 100 суток). Так, в атмосфере современного города насчитывается несколько десятков тысяч наночастиц в кубических сантиметрах. По современным оценкам 10 % от общей массы аэрозолей в атмосфере Земли техногенного происхождения, причем заметными источниками их образования служат открытые горные работы с применением массовых взрывов химических ВВ [1].

Остановимся вначале на результатах исследования мелкодисперсной фракции, образующейся при разрушении горных пород взрывами химических ВВ. Для изучения грансостава мелкодисперсной фракции и определения возможности образования наночастиц были проведены натурные эксперименты в гранитном массиве Балтийского щита вблизи г.Выборга. Массив сложен из крупных блоков гранита серии рапакиви, расположенных непосредственно на дневной поверхности. На поверхности этого массива на участке сплошного гранита было проведено три взрыва шашек литого тротила весом по 200 г в каждом взрыве. Первый

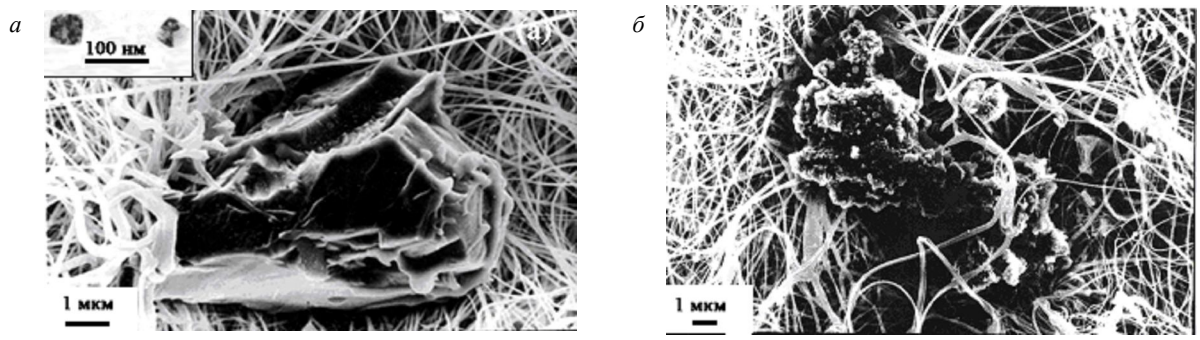


Рис.1. Электронные изображения частиц на волокнах фильтров

взрыв проводился на поверхности ненарушенного гранита. Во втором взрыве заряд взрывчатого вещества располагался в воронке от первого взрыва, а в третьем – в воронке от второго взрыва. Пылесборники, представляющие собой фильтры Петрянова АФА-РСП-10, имеющие волокнистую структуру и закрепленные между двумя шайбами каждый, размещались на границе расширения газообразных продуктов взрыва на высоте 1 м от поверхности земли. Пылесборники располагались таким образом, чтобы их плоскость была перпендикулярна направлению на заряд.

Исследовались нано- и микрочастицы, собранные как на волокнах фильтров, так и в пробах из воронки, образованной после трех взрывов, и взятых из места самых сильных разрушений под зарядом. Также проводилось исследование фильтров, не подверженных действию взрыва, но помещенных до взрывов в той же местности. При этом использовались оптический микроскоп МБС-10, электронный растровый микроскоп JEOLS, а также электронный микроскоп просвечивающего типа ЭМ-125.

Общий интервал размеров частиц, обнаруженных на волокнах фильтров, составляет от 20 нм до 240 мкм. Классификация частиц по их форме позволяет выделить две основные разновидности частиц: осколочного более 50 нм, (рис.1, *а*) и капельного (от 20 нм до 5 мкм) типов, и конгломераты (рис.1, *б*). Обнаруженные на волокнах фильтров частицы образованы непосредственно вследствие взрывов, поскольку при анализе фильтров, не подверженных действию взрыва, частицы не были обнаружены.

На рис.1, *а* представлены примеры отдельных частиц осколочного типа и скопления разновеликих (от 30 нм до 5 мкм) частиц в одном относительно плотном конгломерате (рис.1, *б*). На поверхности более крупных частиц видны (рис.1, *б*) нанометровые частицы капельного типа. Изображения на основных частях рис.1 получены с помощью электронного растрового микроскопа JEOLS, а в левом верхнем углу рис.1, *а* – с помощью электронного микроскопа просвечивающего типа ЭМ-125.

Для построения распределений частиц по размерам использовались частицы, извлеченные из воронки, образованной после взрывов. Данные были получены посредством снимков, сделанных при оптическом и электронном увеличении. Были определены размеры 1000 частиц, что достаточно для проведения статистического анализа.

На рис.2, *а* приведено сравнение распределения по размерам частиц, полученных в натурных экспериментах, с распределением Розина – Раммлера [3, 4], характеризующего распределение частиц по размерам для однократного дробления (одного взрыва):

$$V(x) = V_0 \exp[-(x/x_0)^n], \qquad (1)$$

где x – размер частицы; V_0 – объем исследованного вещества; $V(x)$ – общий объем частиц, размер которых больше x; x_0, n – параметры распределения; $\langle x \rangle = x_0 \Gamma(1+1/n)$ – среднемассовый размер частицы. Интересно отметить, что экспериментальное распределение хорошо согласуется с распределением Розина – Раммлера для частиц с размерами, превышающими 200 нм ($\ln(x) > 5{,}3$, рис.2, *а*).

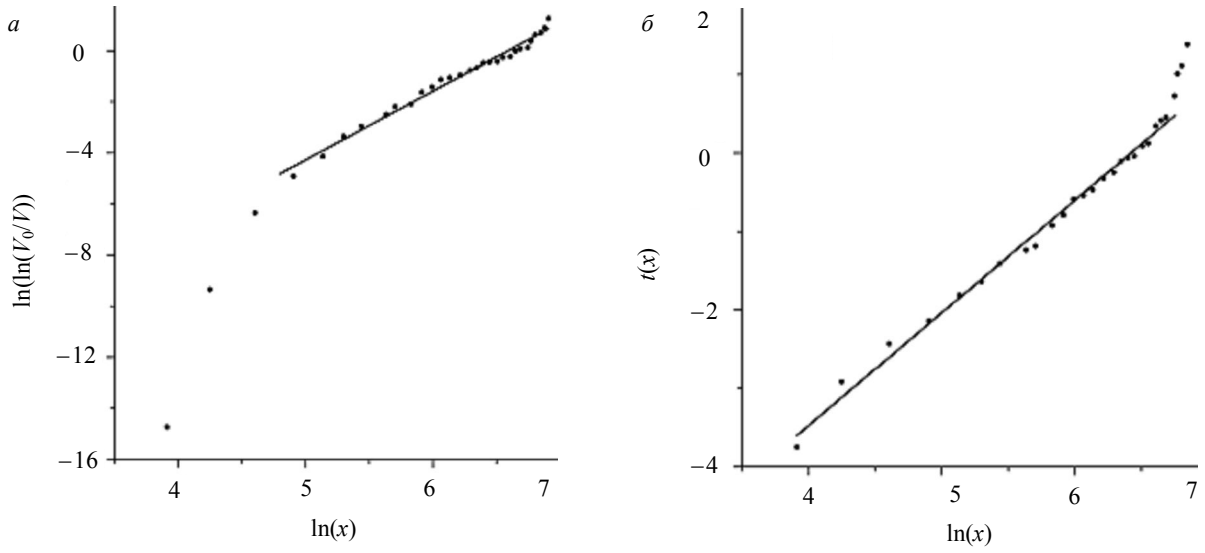


Рис.2. Сравнение экспериментального распределения частиц (точки на графиках) с теоретическими распределениями Розина – Раммлера (*а*) и Колмогорова (*б*) (сплошные кривые); размер частиц *x* в нанометрах

Поскольку распределение Розина – Раммлера относится к случаю однократного взрыва, указанный факт свидетельствует о том, что более крупные частицы (в рассматриваемом случае > 200 нм) образовывались в каждом взрыве.

На рис.2, *б* показано экспериментальное распределение частиц по размерам и распределение Колмогорова [5], характеризующее распределение частиц по размерам для многократного дробления:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} \exp(-y^2/2)dy;$$

$$t = \left(\ln(x) - \ln(x_0)\right)/\sigma, \qquad (2)$$

где x – размер частицы; $\Phi(t)$ – вероятность обнаружить частицу, размеры которой меньше x; x_0, σ – параметры распределения; $\langle x \rangle = x_0$ – среднемассовый размер частицы. Экспериментальное распределение достаточно хорошо согласуется с распределением Колмогорова для частиц менее 900 нм ($\ln(x) < 6{,}8$, рис.2, *б*). Учитывая, что распределение Колмогорова характеризует случай многократного дробления, можно предположить, что значительная часть более мелких частиц образовалась вследствие дробления более крупных частиц во время второго и третьего взрывов.

Отметим также, что резкое уменьшение значений функций, стоящих по оси ординат (рис.2, *а*, *б*), при $\ln(x) < 4{,}5$ (что соответствует значениям $x < 100$ нм) может быть обусловлено изменением физических свойств наночастиц с размерами, меньшими 100 нм. Указанное изменение физических свойств наночастиц может означать изменение их прочностных свойств и, посредством этого, влиять на распределения частиц по размерам. Отметим, что в рассматриваемой ситуации среднемассовый размер частицы 620 и 600 нм при распределении Розина – Раммлера и Колмогорова соответственно. В обоих случаях величины хорошо согласуются с данными экспериментов, согласно которым среднемассовый размер частицы равен 623 нм, что указывает на оправданность описания частей полученного экспериментального распределения с помощью теоретических распределений Розина – Раммлера и Колмогорова.

Химический анализ частиц, проведенный микрозондовым методом с помощью сканирующего электронного микроскопа YSM-35C и рентгеновского спектрометра Zink 860 с Si(Li)-детектором, показал, что в состав частиц входят кварц (SiO_2), калиевый полевой шпат ($KAlSi_3O_8$) и плагиоклаз в двух модификациях ($\{Na,Ca\}AlSi_3O_8$). Обнаруженные осколки состоят как из од-

Перечень исследованных образцов вещества

№ п/п	Образец	Район	Объект (оползень, разлом)	Порода	Фракция, мм	Примерная масса образца
1	1/2003	Северный Тянь-Шань	Арашанский	Гранит	<0,14	10 г
2	2/2003	– " –	– " –	– " –	<0,14	10 г
3	3/2003	– " –	Джашилькульский	Известняк	<0,14	10 г
4	2/2004	Северная Осетия	Верхне-Мизурский	Мраморизованный известняк	<0,14	3-5 г
5	4/2004	– " –	Каривхохский	Известняк	<0,14	3-5 г
6	8/1991a	Центральный Тянь-Шань	Кокоменский	Гранит	<0,01	Миллиграммы
7	8/1991b	– " –	– " –	– " –	<0,01	– " –
8	1991	Новая Зеландия	Оползень с г.Кука	Кварцевый песчаник	–	–
9	1992	– " –	Оползень с г.Флетчера	– " –	–	–

ного, так и из двух или трех различных минералов.

Таким образом, проведенные исследования доказали возможность образования наноразмерных частиц при массовых химических взрывах. Минимальный размер обнаруженных частиц составляет 20 нм. Возможна классификация частиц по их форме, что позволяет выделить две основные разновидности частиц: частицы осколочного типа с размерами, превосходящими 50 нм, и частицы капельного типа с размерами от 20 нм до 5 мкм. Частицы осколочного типа образованы в результате дробления гранитного массива при натурных экспериментах. На это указывает сравнение распределений частиц по размерам с известными распределениями Розина – Раммлера и Колмогорова. Оказывается, что более крупные частицы (больше нескольких сотен нанометров) образуются в каждом из взрывов, тогда как значительная часть более мелких частиц формируется вследствие дробления более крупных частиц во время последующих взрывов. Частицы капельного типа образованы, по-видимому, в результате испарения вещества породы и взрывчатого вещества и их последующей конденсации, на что указывают их малые (до 5 мкм) размеры.

Исследование мелкодисперсной фракции, образующейся при взрывах, представляет научный интерес с точки зрения выявления механизмов образования микро- и наночастиц и возможности управления процессом их формирования в зависимости от параметров динамического воздействия. Такое исследование может иметь также определенное практическое значение для сверхтонкого измельчения минеральных образований различного состава (например для извлечения особо ценных компонент) или послужить одним из методов коммерческого производства порошков наночастиц, которые могут найти важные применения (например в качестве средства защиты от некоторых видов биологического оружия). Так, опыты показали [5], что термостойкие споры *Bacillus Globigii* (имитатор возбудителя сибирской язвы) уничтожаются в воздухе при комнатной температуре распыленными наночастицами из оксида магния и других реакционноспособных компонентов. Аналогичные результаты были получены для спор *Bacillus Cereus* и бактерий кишечной палочки *E. coli*. Другое практическое применение данных исследований связано с решением некоторых экологических проблем загрязнения окружающей среды, в том числе на значительных расстояниях из-за продолжительной жизни частиц мелкодисперсной фракции в атмосфере [2].

В работе проведено также исследование размеров частиц, образующихся в результате крупномасштабных обрушений скальных склонов и образования длиннопробежных каменных лавин. Объем породы, подвергающейся разрушению при оползне, может достигать нескольких кубических километров. При этом суммарный объем частиц менее микрометра составляет до 5 % от общего объема разрушенной породы, а именно, от нескольких сотен тысяч до десятка мил-

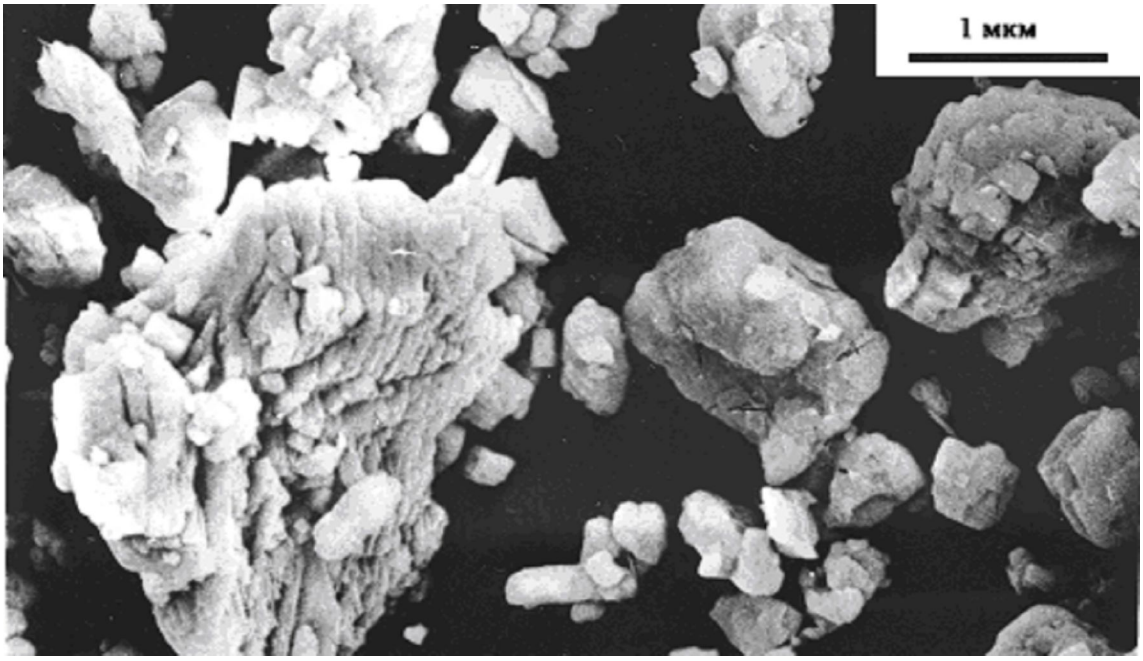


Рис.3. Изображение частиц из Джашилькульского оползня (образец 3/2003), полученное с помощью электронного растрового микроскопа JEOLS

лионов кубометров. Известно, что крупные оползни сопровождаются массовым выбросом пыли, формируя существенное пылевое облако. В частности, такое явление отмечалось при обрушении скального склона в д.Малпа в долине р.Кали в Гималаях, одним из последствий которого была, по свидетельству очевидцев, настоящая пылевая буря [6]. Это привело к тому, что окрестности оказались буквально покрыты слоем пыли, особенно по направлению ветра.

В рамках данной работы исследуется прежде всего возможность образования частиц наномасштабных размеров при обрушении скальных склонов и затем распределение частиц мелкодисперсной фракции по размерам. Проводится сравнение этого распределения с известными распределениями Колмогорова (для многократного дробления) и Розина – Раммлера (для однократного дробления).

Для исследования использовались образцы вещества, образовавшегося при сходе оползней с различным минералогическим составом (см. таблицу).

Образцы № 1-7 отобраны из нижних частей крупных оползневых тел объемом от нескольких миллионов до миллиардов кубических метров, сошедших со склонов, сложенных коренными породами. Образец № 8 отобран из верхней части оползневого тела, образец № 9 – из пыли, осевшей после схода оползня. Предполагается, что породы испытали интенсивное дробление в процессе перемещения оползней под действием деформационных процессов, приводящих к объемному разрушению, а не только к разрушению вдоль поверхности смещения. Следует отметить, что при сходе оползня не происходило перемешивания различных частей горной породы, вовлеченных в обрушение.

Для фракций от 1 мкм до 1 см гранссоставы определялись ситовым и ареометрическим методами. Для исследования фракций менее 100 мкм применялся электронный растровый микроскоп JEOLS. Исследования проводились при двух или трех последовательных увеличениях снимков россыпи осколков. Таким образом, для диапазона менее 100 мкм, как правило, анализ проводился для трех отдельных фракций: < 2 и 1,5 мкм – 20 мкм и 15 мкм – 100 мкм. Согласно снимкам, частицы имеют осколочную форму, что указывает на возникновение их вследствие дробления (рис.3).

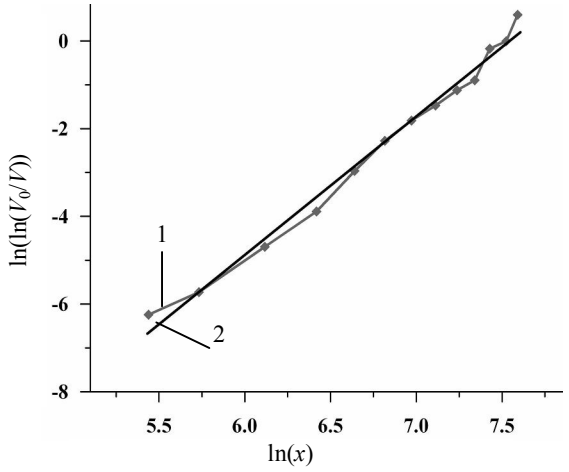


Рис.4. Сравнение распределения частиц от 200 нм до 2 мкм из Арашанского оползня (образец 2/2003) (1) с распределением Розина – Раммлера (2)

В ходе исследований было выявлено, что при сходе оползней образуются наномасштабные частицы. Статистическое исследование было проведено для частиц более 150 нм. Для частиц менее 150 нм сделана приблизительная оценка. Исследование показало, что количество частиц менее 150 нм в зависимости от образца могло составлять как ничтожную часть от исследуемого диапазона (0,4 % для образца 2/2003 из Арашанского оползня), так и существенную долю (10 % для образца 8/1991b из Кокоменского оползня). Наименьший размер наночастиц, обнаруженных в данном исследовании, составил 77 нм. Следовательно, в ходе исследований было показано, что при обрушении скальных пород в процессе их движения образуются наномасштабные частицы. Для установления предполагаемого предела дробления, который лежит за пределами 100 нм, необходимы исследования более мелких фракций.

Сравнение полученных распределений частиц (для частиц с размерами менее 2 мкм, что соответствует $\ln(x) < 7{,}6$ на рис.4-6, где x измеряется в нанометрах) с известными теоретическими распределениями Розина – Раммлера и Колмогорова показало, что для гранита распределение частиц хорошо согласуется с распределением Розина – Раммлера (рис.4), для известняка имеются отклонения как от распределения Розина – Раммлера (рис.5, *а*), так и от распределения Колмогорова (рис.5, *б*), а для песчанников достаточно хорошее соответствие с распределением Колмогорова, тогда как распределение Розина – Раммлера оказывается неприменимым (рис.6). Таким образом, для гранитов однократное дробление играет наиболее существенную роль и на малых размерах, для фракций песчаников менее 2 мкм имеет место только многократное дробление, для известняков – ситуация промежуточная. Из полученных данных

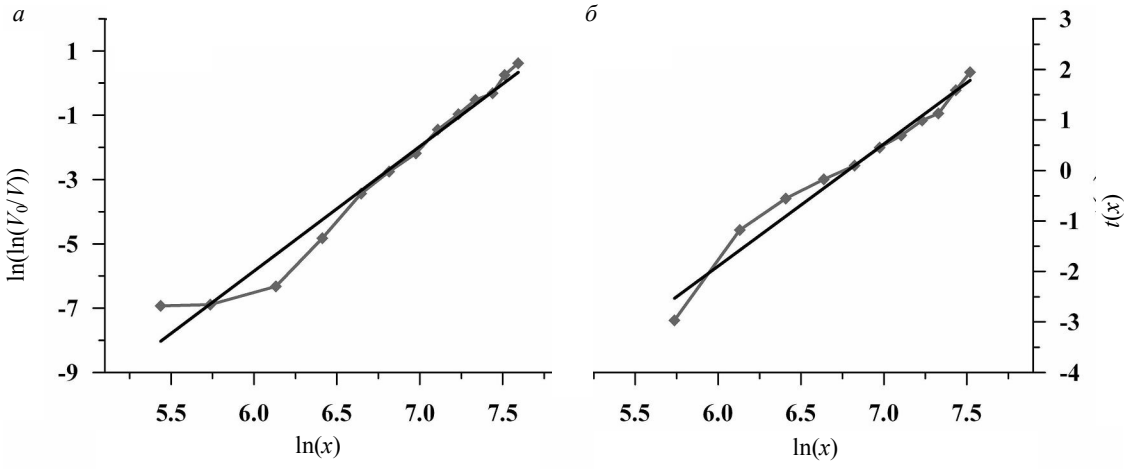


Рис.5. Сравнение распределения частиц от 200 нм до 2 мкм из Каривхохского оползня (образец 4/2004) с распределениями Розина – Раммлера (*а*) и Колмогорова (*б*). Теоретические распределения изображены прямыми линиями

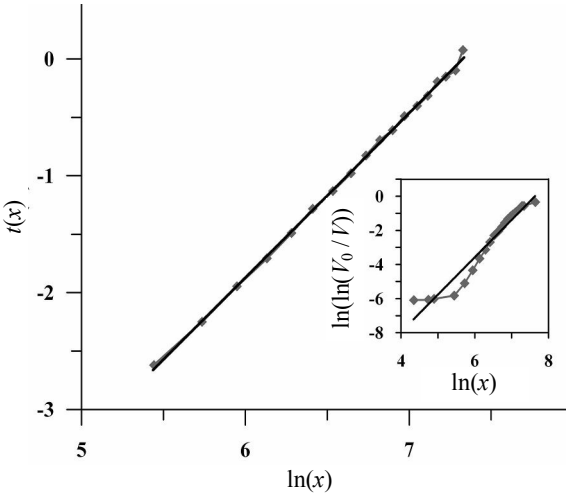


Рис.6. Сравнение экспериментального распределения частиц с размерами до 2 мкм из оползня, сошедшего с г.Флетчера, с распределением Колмогорова (прямая линия)

также следует, что чем мягче порода, тем значительнее на микро- и наноразмерах многократное дробление замещает однократное.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН «Наночастицы в природных и техногенных системах». С.И.Попель выражает признательность за финансовую поддержку Фонду содействия отечественной науке (грант в номинации «Доктор наук РАН»).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Адушкин В.В.* Литосферные источники аэрозольного загрязнения атмосферы / В.В.Адушкин, С.П.Соловьев, В.А.Будников // Геология и геофизика. 1995. Т.36. № 8.

2. *Адушкин В.В.* Основные факторы воздействия открытых горных работ на окружающую среду // Горный журнал. 1996. № 4.

3. *Кузнецов В.М.* Математические модели взрывного дела. М.: Наука, 1977.

4. *Родионов В.Н.* Основы геомеханики / В.Н.Родионов, И.А.Сизов, В.М.Цветков. М.: Недра, 1986.

5. *Роко М.К.* Нанотехнология в ближайшем десятилетии / М.К.Роко, Р.С.Уильямс, П.Аливисатос. М.: Мир, 2002.

6. Bhandari R.K., Kumar K., Malpa Rock Avalanche of 18 August 1998 // Landslide News. 2000. № 13.