

Kliment N. Trubetskoy  
Sergey D. Viktorov  
Alexander A. Osokin

## Mining-Induced Generation of Submicron Particles and their Application in Rockburst Hazard Assessment

Researches aimed at gaining an insight into the processes of deformation and failure of materials on a submicron scale that have become of increasingly higher priority in recent years. Destruction of rocks is the integral part of mineral mining processes and directly connected with the generation of submicron size particles at any stage of production. Generation of submicron particles during deformation and failure of rocks exerts aggravating effect on the environment. At the same time, from the experience of laboratory testing, this effect can be used in

stress state control in rock masses both under quasi-static and dynamic loading. The accomplished investigation results are the basis for elaboration of a method to monitor and predict hazards associated with out-of-control failure in rock mass areas prone to dynamic response to strata pressure. The basic research into conditions for generation of submicron particles under different types of loading is of the current concern and scientific interest in the sphere of deformation and failure of geomaterials on the submicron scale.

## Feinststaub als Indiz für Spannungsänderungen im Gebirge: Chancen für die Gefährdungsbeurteilung

In der jüngsten Vergangenheit wurden vermehrt Untersuchungen durchgeführt, um das Verhalten von Materialien im Verformungs- und Versagensfall auf Nanoebene zu erforschen. Die Zerkleinerung von Gestein ist wesentlich mit der bergmännischen Gewinnung von Rohstoffen verbunden und ein gutes Beispiel für das Versagen von Material im Belastungsfall. In allen Produktionsstufen ist damit gleichzeitig die Entstehung von Staub verbunden, welcher bei unter 1 µm Größe als Feinststaub bezeichnet wird. Dieser Staubfraktion wird ein negativer Umwelteffekt nachgesagt; gleichzeitig kann Feinststaub aber auch herangezogen werden, um Rück-

schlüsse auf den Spannungszustand im Gestein unter sowohl quasistatischer als auch dynamischer Belastung zu ziehen. Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen hinsichtlich dieses Zusammenhangs können zur methodischen Entwicklung eines Überwachungssystems genutzt werden, um Bereiche des Gebirges mit kritischer Gebirgsspannung oder mit besonderer Sensibilität besser kontrollieren zu können. Die detaillierte Erkenntnis über die Entstehung von Feinststaub aus Gestein unter verschiedenen Belastungsarten ist dementsprechend von steigender Relevanz und zunehmend Gegenstand der Forschung.

### Submicron particles: Sources of and role in human life

Aerosols represent suspended solid or liquid particles contained in a gaseous medium, measuring 0.1 µm to 0.01 mm in size, which are present everywhere around us and condition our living environment both at home and globally. Even the purest air on the planet contains not less than 100 aerosol particles per 1 cm<sup>3</sup>. Aerosols can conditionally be divided into three large groups: dusts, smokes and mists. The first group seems to be of specific interest and deserves comprehensive analysis. Dusts are composed of solid particles dispersed in a gaseous medium (atmosphere) as a result of mechanical grinding of solids – e.g. dust generated in crushing and milling of rocks and minerals, or under drilling and blasting – or under action of aerodynamic forces (air jet) applied to powdered materials (1).

Aerosols enjoy wide application in various spheres of human activity: inhalation therapy in treatment of asthma and bronchitis, or irrigation of wounds and skin integument in medicine; powder metallurgy, micro electronics, or application of coatings

### Feinststaub: Entstehung und Bedeutung für den Menschen

In der Luft enthaltene Schwebeteilchen werden als Aerosole bezeichnet. Diese haben üblicherweise eine Größe zwischen 0,01 µm und 0,1 mm und können festen oder flüssigen Aggregats sein. Nach Aggregat und Ursprung werden Aerosole allgemein in Staub, Rauch und Dunst unterschieden. Selbst in der saubersten Luft sind Aerosole mit mindestens 100 Teilchen pro Kubikzentimeter enthalten und beeinflussen in vielfältiger Weise unser Leben. In der rohstoffgewinnenden Branche ist insbesondere die Gruppe der Stäube von Interesse. Unter Staub werden feste Partikel verstanden, die sich in Schwebelage in einem gasförmigen Medium – der Atmosphäre – befinden. Im Bergbau kann die Entstehung von Staub auf verschiedenste Prozesse zurückgeführt werden, wie etwa die mechanische Zerkleinerung von Gestein während des Mahlens oder des konventionellen Vortriebs sowie das Aufwirbeln von abgelagerten Feinstpartikeln durch bewegte Luft (1).

Ebenso vielfältig wie die Möglichkeiten ihrer Entstehung – wie am Beispiel Bergbau gezeigt – finden Aerosole in verschiedens-

in engineering; production of agricultural chemicals to increase productivity of arable crops and cattle breeding, as well as for protection of plants, agricultural inventories and livestock population from predators and diseases in agriculture, etc.

At the same time, aerosols not only benefit but also blight by polluting the environment. Sometimes aerosols are hazardous for human health and cause specific diseases. Primary sources of man-made aerosol pollution of air are fuel-and-power stations consuming high-ash coal, preparators, as well as metallurgical, cement, magnesite and lamp black plants. Furthermore, mineral mining technologies involve mechanical and explosive rupture of rocks (2, 3, 4). Such production processes create favorable conditions for super fine crushing of rocks and formation of micro- and nano-size particles.

Major sources of production-induced dusting are mine shafts, adits and various air courses, open pit mines, processing and agglomeration plants, classifying and loading terminals, waste dumps and ore stockpiles, tailings ponds, coal and ore storage yards. Considerable amount of dust enters the biosphere during broken muck transportation to storage and processing sites.

By estimates, overall weight of finely dispersed aerosols in the mining industry reaches 107 t/a, out of which not less than 10 to 12 % are ultrafine particles. There are two kinds of potential sources of ultrafine particles in mining: geotechnical sources and geomechanical sources. The former is related to the production and other purpose processes in the lithosphere zone under complete destruction. The latter is reflective of the dynamics of state of a substance in the zone with changed geophysical properties.

The processes partaken by mineral particles, including finely dispersed particles with a representative size of less than a micron, play a significant role for many phenomena governing the motion and transformation of a substance in the environment. Air, rocks, water and bio-systems contain a diverse variety of nano-particles and nano-structure substances. Thus and so, mineral mining is directly connected with the generation of submicron particles at different stages of mineral extraction and processing; and generation of such particles is assumed as an ecologically unfriendly aspect of mining practices (4, 5, 6, 7).

### **Theoretical background of generation of submicron particles under rock deformation and failure**

Detachment of pieces of rocks from an expose surface is the effect of high inner energy of the geomaterial. On the macro-failure scale, this phenomenon is well-known as spalling, exfoliation and slabbing; on the micro-scale as fracto-emission, or shear and detachment of micro- and nano-particles (8, 9, 10).

As one of the most important types of research, mechanical tests of rocks allow determining resistance of rocks to deformation and failure under external loading. Generation of submicron particles in the tension tests of a steel rod was experimentally discovered and registered (11, 12). The Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON) of the Russian Academy of Sciences in Moscow studied generation of particles in the size interval from 0.3 to 10  $\mu\text{m}$  during uniaxial compression tests of dolomite specimen in a sealed cell (13). The particles split off the specimen as a result of its deformation were detected using an aerosol particle counter. Later on, another experimentation

ten Gebieten praktische Anwendung, wie etwa in der Metallurgie oder der Elektroindustrie zur Oberflächenbehandlung. Auch in der Agrarbranche werden Schwebstoffe eingesetzt, u.a. bei der Schädlingsbekämpfung im Ackerbau und der Viehwirtschaft. Beim Menschen werden Aerosole beispielsweise zur Bekämpfung von Asthma oder Bronchitis eingesetzt und können durch Inhalation dem Körper zugeführt werden. Auch finden Aerosole in der Wundbehandlung Anwendung.

Allerdings können Aerosole auch umweltbelastende Eigenschaften aufweisen und beim Menschen bestimmte gesundheitliche Probleme hervorrufen. Als Hauptverursacher anthropogener Umweltverschmutzung mit Aerosolen gelten alle Anlagen, die Kohle mit hohem Ascheanteil verfeuern oder Metalle, Zement oder Magnesit herstellen oder weiterverarbeiten. Durch die Zerkleinerungsprozesse in der bergmännischen Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen wird die Entstehung von Feinststäuben besonders begünstigt (2, 3, 4). Über die zahlreichen Wetterwege von Untertagebergwerken wird Staub aufgenommen, ebenso wie durch die natürliche Windströmung in Tagebauen. Durch jede Art der Weiterverarbeitung – insbesondere auch die Klassierung – und durch den Transport – vor allem auch durch die Übergabe von Material – wird Staub generiert und aufgewirbelt. Zuletzt spielen auch die Zwischen- und Endlagerung als Orte hoher Konzentration von Stäuben eine nennenswerte Rolle in Bezug auf die Staubemission in die Biosphäre durch industrielle Prozesse.

Schätzungen zufolge entstehen in der Bergbaubranche jährlich rd. 107 t Aerosole, von denen etwa 10 bis 12 % auf die ultrafeine Fraktion (Feinstfraktion) entfallen. Zwei Arten von Ursachen werden für die Entstehung von Feinststaub unterschieden, nämlich geotechnische und geomechanische Ursachen. Die erstgenannte meint die Entstehung von Staub durch produktionsbedingte Prozesse in der Lithosphäre (Zerstörung des Gesteins durch Abbau). Die zweite bezieht sich auf die Entstehung von Staub durch die neuen Randbedingungen hinsichtlich des Spannungszustands, denen das angrenzende Gebirge nach einem Abbau oder der Aufnahme einer Strecke unterliegt.

Die Anwesenheit von Staub kann die Prozesse eines Ökosystems erheblich beeinflussen, da insbesondere die Feinstfraktion die Mobilität und Reaktivität von anderen Substanzen maßgeblich beeinflussen kann. Mineralische Feinststäube, wie sie bei den verschiedenen Prozessen in Bergwerken entstehen, sind daher in Bezug auf ökologische Fragen mit besonderer Aufmerksamkeit und kritisch zu betrachten (4, 5, 6, 7).

### **Theorie der Entstehung von Feinststaub bei Verformung oder Zerkleinerung von Gestein**

Um Gesteinsstücke zu zerkleinern oder aus dem Gebirgsverband zu lösen, muss eine entsprechende Spannung im Gestein aufgebaut werden. Diese führt bei der Hereingewinnung von Gestein schließlich zum Abplatzen, Abschälen oder Abschlagen des Materials. Bei genauerer Betrachtung wird aber deutlich, dass durch die mechanische Beanspruchung neben den größeren Gesteinsstücken auch eine messbare Menge an Feinstpartikeln freigesetzt wird (8, 9, 10).

Bei der Untersuchung von Gesteinen auf ihre Festigkeitseigenschaften werden mechanische Belastungstests über Deformationen bis hin zum Versagen der Probe durchgeführt. Bei derartigen

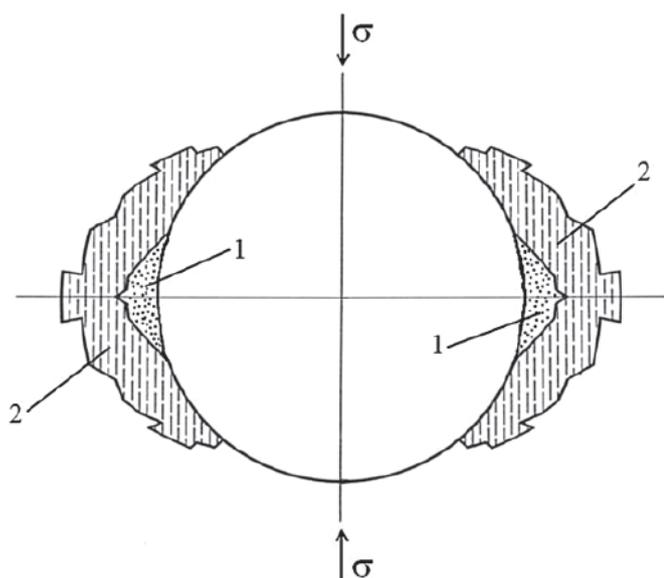


Fig. 1. Model of post-limiting deformation and failure of cylindrical hole surface in rocks under uniaxial compression.

Bild 1. Modellhafte Darstellung des Stöorzustands einer Probe im Bereich der Aussparung unter einaxialer Druckbelastung.

procedure was proposed to study this phenomenon. In that case, a cylindrical hole made in the middle of a specimen served as a measurement cell, and the experimental research involved different types of rocks.

### Experimental features of cylindrical hole

It is worthy of emphasizing that the through cylindrical hole made in a specimen is an important feature of this research. This hole is an artificial macro-scale discontinuity, possessing variable size and acting as a stress raiser when a specimen is subjected to uniaxial compression, which makes it possible to trace the onset of micro-failure of the hole surface at the early stage of loading. Moreover, such design ensures air-tightness of the measurement hole volume relative to the ambient particles.

Figure 1 shows the model of post-limiting deformation and failure of the cylindrical hole surface under uniaxial compression (14), where 1 is the zone of disintegration (source of free particles); 2 is the zone of partial disintegration.

In accordance with this model, in the zones of the maximum compression stresses, the geomaterial can be in the post-limiting deformation state followed by disintegration of the hole surface and, as a consequence, by generation of free particles.

The research findings on the nonuniform triaxial compression of a cubic granite specimen with the cylindrical hole (15) show that a system of joints initiates in the zones with the maximum compression stresses, and detachment of fine long flakes is observed. Disintegration of granite induces "dog's ear" shape of the hole cross-section in these zones. The micro-image of the maximum compression stress zone at the perimeter of the cylindrical hole in the granite specimen is given in Figure 2.

A pronounced system of joints is clearly seen in the figure. These research findings confirm disintegration of granite specimen in the maximum compression stress zone that is a potential source of free particles.

Tests with a steel rod were the first to discover and describe (11, 12). The Institute for complete recovery of mineral raw materials (IPKON) of the Russian Academy of Sciences in Moscow has finally conducted investigations on dolomite in uniaxial compression tests and observed the formation of particles in the size range 0.3 to 10 μm (13). The particles resulting from the deformation of the rock were registered in the experiment with a suitable particle counter. Later, experiments were also conducted with other rock samples, where the measuring probe was placed in a through cylindrical hole in the center of the specimen.

### Bedeutung und Auslegung der zylindrischen Aussparung

Die oben genannte Bohrung durch die Probe, in der die Entstehung von Partikeln während der Deformation gemessen wird, ist für die Untersuchungen von besonderer Bedeutung und kann in unterschiedlichen Dimensionen ausgeführt werden. Die Aussparung stellt eine künstliche Kerbe dar und bewirkt eine lokale Verstärkung des Spannungszustands in der Probe während des einaxialen Druckversuchs. Dadurch wird es ermöglicht, den Ansatz des Versagens der Probe bereits bei geringer Belastung zu erkennen und zu beobachten. Die Aussparung dient zugleich als abgeschlossener Raum, wodurch eine Verfälschung der Messung durch Partikel von außen verhindert werden kann.

Bild 1 zeigt modellhaft den Versagensfall im Bereich der Aussparung im einaxialen Belastungstest (14). Der punktierte Bereich 1 zeigt den Teil der Probe mit vollständiger Störung des Materials. Hier sind die Spannungen am größten und es werden entsprechend der Deformation Feinstpartikel freigesetzt. In Bereich 2 ist das Material nur teilweise gestört.

In triaxialen Druckversuchen an Granitblöcken, die ebenfalls mit zylindrischen Aussparungen versehen wurden (15), konnte an eben jenen Stellen der Spannungsspitzen erste Rissbildung und das Abplatzen von Gesteinsstücken beobachtet werden. Dieser Bereich ist in Bild 2 dargestellt. Durch das Abplatzen ändert sich lokal die Form der Aussparung.

Ein ausgeprägtes System aus feinen Rissen ist in der Abbildung deutlich zu erkennen – eben dort, wo die Spannungen am

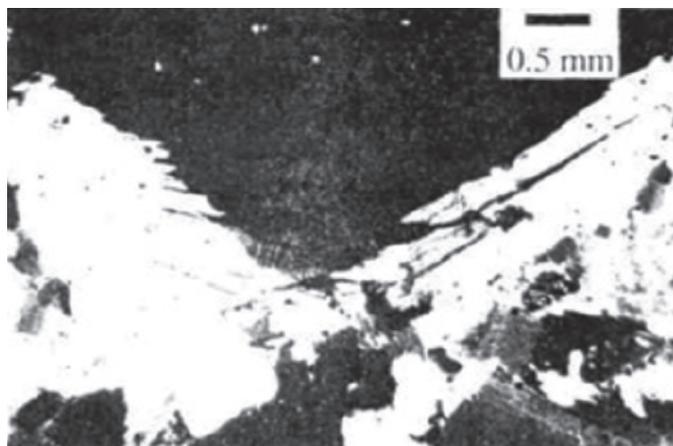


Fig. 2. Micro-image of the perimeter of a cylindrical hole in granite specimen. // Bild 2. Detailsicht der Bereiche der Spannungsspitzen um die Aussparung in einer Granitprobe.

## Prospects for application of submicron particle emission to predicting dynamic events in underground mineral mining

The increase in the mineral production output, in particular, in deeper level mining, entails escalation of stresses in rocks, complication of stoping technology, intensification of rock-bursting and other factors. Deeper level mining induces risk of disasters in mines. The issue of prediction of a dynamic hazard, especially in the seismically active mining regions, is very important and calls for improvement of the current methods of strata pressure control, engineering of new equipment and development of landmark approaches.

The dynamic events due to rock pressure – spalling and exfoliation of wall-rocks, micro-shocks and bumps, rock bursts – are sufficiently investigated both by Russian and foreign researchers. Regarding rockburst-hazardous iron ore bodies in Western Siberia, there are a lot of methods and means developed to assess stresses and strains in rocks. Out of the known precautions toward reduction in rockburst hazard, the methods of borehole slotter and destressing blasting have found wide application. It is determined that round 60 to 70% of dynamic events in mines are conditioned by blasting (16). Although huge knowledge has been accumulated on initiation of dynamic events and a variety of destressing techniques have been developed, many researchers yet concern themselves with the dynamic hazard prediction and ground control.

Investigation of deformation and failure of rocks in laboratory and field conditions appeals from the view point of basic science and application. The available scientific knowledge and equipment has enabled a landmark approach to stress state assessment in rocks. The laboratory test data obtained in the IPKON Institute on generation of submicron particles under uniaxial compression of rock specimens confirm applicability of this phenomenon in estimation of variation in stress state of rocks (17). The current techniques of rock stress state assessment – geological, geomechanical, geophysical methods – have some constraints and are not always efficient. In this context, it is thought possible to enhance awareness on rock mass condition by using new approaches and criteria for hazardous situations related to dynamic events due to rock pressure.

The present authors have tested specimens made of such geomaterials as marble, dolomite, limestone, granite, urtite, sandstone, blue elvan, ferruginous quartzite and others, and traced the phenomenon of emission of submicron particles in all specimens subjected to uniaxial compression. Figure 3 presents the testing results for the geomaterials within three size intervals (0.3 to 0.5  $\mu\text{m}$ , 0.5 to 5.0  $\mu\text{m}$  and more than 5  $\mu\text{m}$ ) at the constant loading rate  $P=0.8P^*$ , where  $P^*$  is the failure load. It is seen in the bar charts that the particle distribution differs in different geomaterials. The maximum particle quantity within the size interval of 0.5 to 5.0  $\mu\text{m}$  is less than 70 for marble (Fig. 3a) and is round 20.000 for urtite (Fig. 3e) and sandstone (Fig. 3f). The scatter is explained by petrographic features of these types of rocks. For polymineral geomaterials, such as granite and urtite, structural inhomogeneity is added by nonuniformity of mineral composition. In this case, emission of particles experiences great influence of strength characteristics of rock-forming minerals and binders, and the nature of bonding of grains. In addition, due to nonuniformity of

stärksten ausgeprägt sind und potentiell Feinstpartikel freigesetzt werden.

## Feinststaub als Vorzeichen felsmechanischer Ereignisse im Bergbau

Mit der Einrichtung immer größerer und tieferer Bergwerke geht im felsmechanischen Sinn auch eine immer größere Gefahr hinsichtlich der gebirgsmechanischen Zustände einher. Spannungen im Gebirge steigen und können bei ungeeigneter Auslegung des Grubengebäudes zum Einsturz des Gebirges führen. Um die aus den Spannungszuständen hervorgehende Gefahr besser beurteilen zu können – insbesondere in Regionen, die aufgrund ihrer seismischen Aktivität ohnehin ein erhöhtes Gefahrenpotential in Bezug auf Gebirgsschläge aufweisen – ist es unbedingt notwendig, die bisherigen Methoden zur Kontrolle des felsmechanischen Zustands des Gebirges zu verbessern und mit neuen Ansätzen und Technologien die Vorhersage geomechanischer Ereignisse voranzubringen.

Der Zusammenhang zwischen den Spannungszuständen im Gebirge und den Auswirkungen im Sinn von Abplatzungen, Konvergenzen oder dem Einsturz des Gebirges wurde auf internationaler Ebene und auch in Russland bereits hinreichend erforscht. In Bezug auf die felsmechanisch anspruchsvollen Erzbergwerke im Westen Sibiriens wurden zahlreiche Methoden und Standards zur Kontrolle und Beurteilung der Spannungszustände des Gebirges erarbeitet. Gemäß dem Stand der Technik finden dort übliche Verfahren wie Bohrlochtests und Entlastungssprengungen Anwendung. Vor dem Hintergrund, dass etwa 60 bis 70% aller gebirgsmechanischen Ereignisse auf die Sprengarbeit selbst zurückzuführen sind (16), sind trotz des bereits erlangten Wissens über Ursachen und der heute verfügbaren Methoden zur Behebung ungünstiger Spannungszustände weiterhin zahlreiche Wissenschaftler mit der Erforschung dieser Thematik befasst.

Dabei ist es wichtig, dass Erkenntnisse genauso im Labor wie auch im Feld gewonnen werden, um Theorie und Praxis bei der Entwicklung von Methoden zu vereinen und belastbare Ansätze entwickeln zu können. Mit den heute verfügbaren Möglichkeiten aus den Fachgebieten Geologie, Geomechanik und Geophysik konnten neue Meilensteine in der Untersuchung gebirgsmechanischer Spannungszustände erreicht werden. Trotzdem unterliegen diese Verfahren technischen Grenzen und sind zumeist wenig effektiv in Bezug auf konkrete Vorhersagen. Die Untersuchungen von IPKON zur Entstehung von Feinstpartikeln bei der mechanischen Belastung von Proben zeigen schließlich, dass sich eine weitere Erforschung der Zusammenhänge lohnt (17).

Die Autoren dieses Artikels haben schließlich Versuche mit verschiedenen Gesteinen durchgeführt, um die Entstehung von Feinststaub bei (einaxialer) mechanischer Beanspruchung des Materials näher zu untersuchen. U.a. wurden Proben aus Marmor, Dolomit, Kalkstein, Granit, Urtit, Sandstein, Blauer Elvan (porphyrische Quarz-Variation in England) und eisenmineralhaltigem Quarzit verwendet. Diese wurden in einem Versuch mit 80% der jeweiligen Bruchlast konstant beansprucht. Die dabei freiwerdenden Feinstpartikel wurden registriert und nach Größe in Gruppen (0,3 bis 0,5  $\mu\text{m}$ , 0,5 bis 5,0  $\mu\text{m}$ , und  $>5,0 \mu\text{m}$ ) zusam-

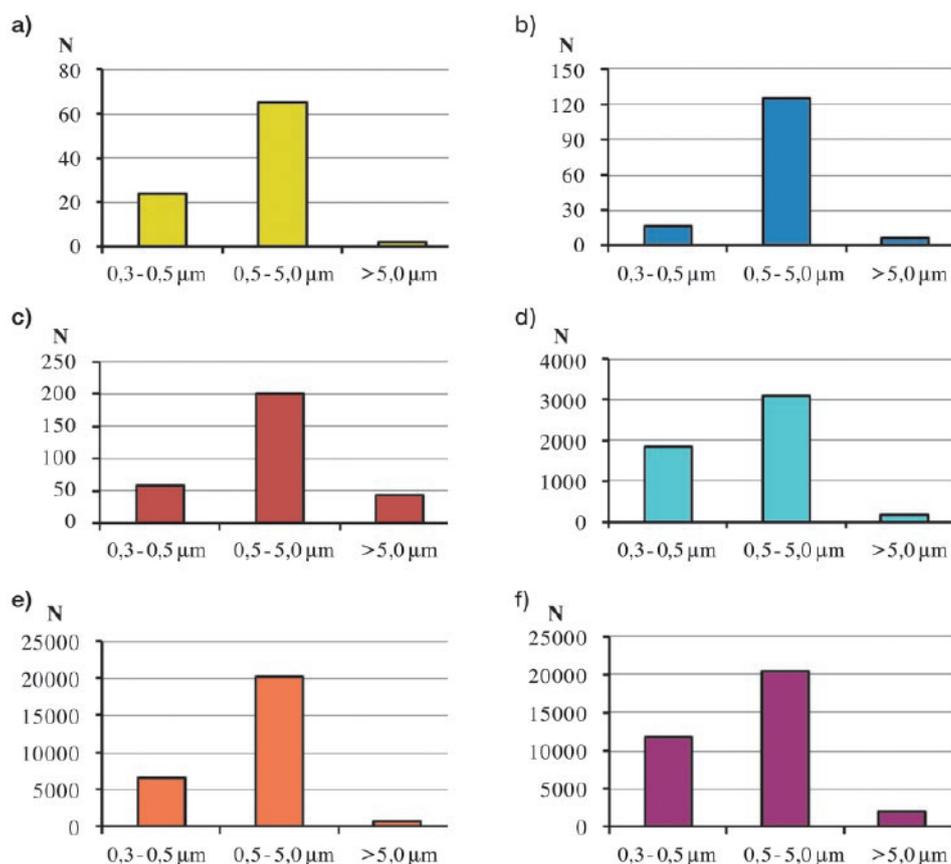


Fig. 3. Distribution of particles under sustained loading  $P = 0.8P^*$ : (a) marble; (b) dolomite; (c) limestone; (d) red granite; (e) urtite; (f) sandstone.

Bild 3. Verteilung emittierter Partikel unter konstanter Belastung (80 % der Bruchlast) für (a) Marmor, (b) Dolomit, (c) Kalkstein, (d) Rotgranit, (e) Urtit und (f) Sandstein.

specimens, stresses are generated nonuniformly, too, which also affects emission of particles. As follows from the bar charts, the maximum quantity of particles falls inside the size interval of 0.5 to 5.0 µm, which is explained by the larger width of this interval. Regarding the size more than 5.0 µm, there are very few particles in this interval and this is connected with the size of the particles. For marble, urtite and dolomite specimens, the particle quantity is insignificant as compared with the other size intervals.

Under compression of granite specimen (Fig. 3a), the noticeable increase in the particle quantity is observed at the loading rate of  $P = 0.4P^*$  while their quantity becomes three times as much at the loading rate of 0.6. It is also noteworthy that the increase in the particle quantity takes place from the very beginning of loading of this specimen, which is reflective of opening of joints as a consequence of uniaxial compression. In the tests of urtite specimen (Fig. 3b), a jump in emission of particle is recorded at the loading rate of 0.8. It is worth mentioning that there were almost no particles before that moment. In the tests of dolomite specimen (Fig. 3c), the essential growth of particle emission takes place at the loading level of 0.8 while there are very few particles at the loading level of 0.7 as in the tests of urtite. Prior to failure, a jump in emission of particles is recorded in the specimen at the loading rate of 0.9. Apparently, the number of particles triples under such loading rate. These results confirm, again, that the increase in the load applied to the test rock specimens entails generation of particles in the size interval of 0.3 to 5.0 µm emitted from the surface of the cylindrical hole made in the middle of the specimens.

In the course of testing limestone specimen, the surface of the cylindrical hole has been photographed after the specimen load-

mengefasst. Die materialspezifisch teilweise deutlich verschiedenen ausfallenden Ergebnisse sind in Bild 3 grafisch dargestellt. Für die Fraktion 0,5 bis 5,0 µm ist die Anzahl gemessener Partikel stets am größten, was auf die Wahl der Intervallgrenzen und das Spektrum der auftretenden Partikel zurückzuführen ist. Dabei schwankt die Anzahl gemessener Partikel zwischen knappen 70 bei Marmor (Bild 3a) und rd. 20.000 bei Urtit (Bild 3e) und Sandstein (Bild 3f). Als Erklärung können die unterschiedlichen petrografischen Eigenschaften der Gesteine herangezogen werden. Insbesondere bei polymineralischen Gesteinen spielt die durch den Mineralverbund bedingte Inhomogenität eine Rolle, was Einfluss auf die Ausbildung des Spannungszustands hat. Das Freiwerden von Feinstpartikeln ist damit zumindest teilweise ebenso abhängig von der lokalen Beschaffenheit des Gesteins (Mineralkomposition, Textur, Matrix).

Neben Versuchen mit konstanter Belastung wurden auch Versuche unter steigender Last durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass auch bei kleinen Lasten bereits Partikel frei werden und bei einer bestimmten Belastung eine abrupte Zunahme an Partikelemissionen verzeichnet werden kann. Dies hängt entsprechend von dem Aufbrechen der Strukturen des Gesteins ab und ist materialspezifisch. Bei einer Granitprobe beispielsweise wurde ab 40% der Bruchlast eine deutliche Zunahme an Partikeln verzeichnet bis hin zu einer weiteren Verdreifachung bei 60%. Bei Urtit hingegen zeigte sich eine markante Zunahme an freien Partikeln erst bei 80% Belastung, wobei zuvor nur eine vergleichsweise geringe Anzahl an Partikeln gemessen werden konnte. Ein sehr ähnliches Bild zeigte sich bei der Untersuchung von Dolomit. Hier zeichnete sich ein erneuter Sprung auf etwa das Dreifache kurz vor Versagen der Probe (90% Belastung) ab.



*Fig. 4. Exfoliation of the hole surface under uniaxial compression of limestone specimen.*

*Bild 4. Abplatzungen im Bereich der Oberfläche der Aussparung einer Kalksteinprobe bei einaxialer Druckbelastung.*

ing up to  $P = 0.4\sigma^*$ , where  $\sigma^*$  is the ultimate compressive strength of the geomaterial. Figure 4 shows a picture where exfoliation of the surface is visible.

Exfoliation takes place in the zones of the maximum compression stresses. Figure 4 reinforces the hypothesis on disintegration of the cylindrical hole in the zones of the maximum compression stress concentration, in accordance with the elastic theory of stress redistribution. In the case discussed, the hole simulates an underground opening and exfoliation is a result of nonuniform stress distribution, e. g. roof breaks in a real mine working. This is typical of rock mass occurrence under high tectonic stresses.

## Conclusions

It is of the current concern to investigate the described phenomenon, both in the field of physics of failure of rocks and building materials, and in applied areas of science, especially in earthquake prediction in seismology. Regarding mining, this phenomenon is important from the viewpoint of mine safety, in assessment and monitoring of rockburst hazard and in prediction of dynamic events due to rock pressure in mines.

The research findings on generation conditions of submicron particles in rocks under deformation and failure under mechanical loading may be the background of a new method to forecast induced accidents in underground mines and surrounding rock mass prone to respond dynamically to high strata pressure. This approach enables recording the change in the stress state at the early stage of loading, which also depends on structural features, composition, petrography, etc. of the tested types of rocks. At the same time, a number of open questions relating moisture, jointing and anisotropy of properties of rock masses impede application of this approach, on the one hand, while being of scientific interest in the sphere of submicron deformation and failure of geomaterials, on the other.

## Acknowledgement

This study has been supported by the Russian Science Foundation, Project No. 16-17-00066).

In Bezug auf die Fraktion 0,3 bis 5,0  $\mu\text{m}$  ist damit der Nachweis, dass die Partikelemission bei Beanspruchung von Gestein in Abhängigkeit von der Last steht, hinreichend erbracht.

Bild 4 zeigt eine Fotografie des Zustands der Probenoberfläche in der Aussparung einer untersuchten Kalksteinprobe. Diese war zuvor bis 40% ihrer Druckfestigkeit belastet worden.

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass es im Bereich der Aussparung bereits zu Abplatzungen gekommen ist. Diese treten in Bereichen maximaler Spannungen auf, die sich aufgrund der Inhomogenität des Materials lokal und aufgrund der Kerbwirkung der Aussparung bilden. In Bezug auf eine reale Situation in einem Bergwerk stellt die künstliche Belastung der Probe den natürlichen Gebirgsdruck oder tektonische Beanspruchungen dar. Die Aussparung in der Probe ist vergleichbar mit einer Strecke im Gebirge und die Abplatzungen stellen Gebirgsschläge dar.

## Schlussworte

Der Zusammenhang zwischen Belastung eines Gesteins und den daraus resultierenden Effekten ist derzeit Gegenstand der Forschung und von großer Bedeutung für die grundlegenden Wissenschaften sowie in Bezug auf praktische Anwendungsgebiete, wie etwa die Vorhersage von Erdbeben. Auch für den Bergbau sind diese Erkenntnisse von großer Bedeutung, um die Spannungszustände im Gebirge einschließlich des Gefahrenpotentials durch Gebirgsschläge besser einschätzen zu können.

Mit den Erkenntnissen über das Entstehen von freigesetzten Feinstpartikeln bei mechanischer Beanspruchung von Gesteinsproben können möglicherweise neue Methoden für den Bergbau entwickelt werden, um die Reaktion des Gebirges bei großer Belastung einschätzen und bevorstehende Negativereignisse rechtzeitig vorhersehen zu können. Durch die Analyse der emittierten Feinstpartikel ist es möglich, auch bei noch geringer Belastung Rückschlüsse auf die Änderungen des Spannungszustands im Gestein zu ziehen. Da der sich ausprägende Spannungszustand im Wesentlichen auch von Gesteinsparametern wie Mineralzusammensetzung und petrographischen Eigenschaften abhängt, der Einfluss von Feuchtigkeit, Isotropie und Gesteinsdichte noch nicht geklärt und die Reaktion des Probenmaterials im Detail auch von grundlegendem Interesse ist, besteht weiterhin Forschungsbedarf.

## Danksagung

Die Erforschung dieser Thematik wurde wesentlich von der Russischen Wissenschaftsgemeinschaft unterstützt (Projekt-Nr. 16-17-00066).

## References / Quellenverzeichnis

- (1) Green, H. L.; Lane, W. R.: Particulate Clouds: Dusts, Smokes and Mists. Van Nostrand, Princeton, N. J., Ed. 2, 1964.
- (2) Adushkin, V.V.; Popel, S.I.; Shishaeva, S. I.: Analysis of blasting-generated particulates in rocks and initiation of rockslides. *Zap. Gorn. Inst.*, 2007, vol. 171, pp. 32–38.
- (3) Kochanov, A. N.: Analysis of super fine particle generation under rock blasting. In: *Int. Conf. Proc. Physical Problems of Rock Failure*, Moscow, 2005, pp. 220–222.
- (4) Chanturia, V. A.; Trubetskoy, K. N.; Viktorov, S. D.; Bunin, I. Z.: Nanoparticles in the Processes of Destruction and Dissociation of Geomaterials. Moscow: IPKON RAN, 2006 (in Russian).
- (5) Bogatikov, O. A.: Inorganic nanoparticles in nature. *Vestn. RAN*, 2003, no. 5, pp. 426–428.
- (6) Trubetskoy, K. N.; Viktorov, S. D.; Galchenko, Y. P.; Odintsev, V. N.: Production-generated particulates as the problem of subsoil development. *Vestn. RAN*, 2006, vol. 76, no. 4, pp. 318–324.
- (7) Trubetskoy, K. N.; Galchenko, Y. P.; Burtsev, L. I.: Environmental Challenges of Mineral Mining under Sustainable Development of Nature and Society. Moscow: Nauchtekhizdat, 2003 (in Russian).
- (8) Massalimov, I. A.; Urakaev, F. K.: Potentiality of generation of nano-size particles at a crack tip. In: *Physicochemistry of Ultra Dispersed (Nano) Systems: Collected Book*. Moscow: MIFI, 2002, pp. 46–47 (in Russian).
- (9) Odintsev, V. N.: Extensile Rupture of Hard Rocks. Moscow: IPKON RAN, 1996 (in Russian).
- (10) Urakaev, F. K.; Massalimov, I. A.: Energy fluctuations and particle emission in a crack mouth. *J. Physics of the Solid State*, 2005, vol. 47, no. 9, pp. 1675–1680.
- (11) Aleksandrov, P. A.; Kalechits, V. I.; Khozyasheva, E. S.; Chechueva, P. V.: Analysis of generation of particles under rupture of metals. *MIFI Sess.*, 2003, vol. 8, pp. 296–297.
- (12) Aleksandrov, P. A.; Kalechits, V. I.; Shakhov, M. N.: Studies of particulate generation in metal specimens under low-cycle mechanical loading. *MIFI Sess.*, 2004, vol. 9, pp. 224–225.
- (13) Viktorov, S. D.; Kochanov, A. N.; Odintsev, V. N.; Osokin, A. A.: Emission of micro-particles from the surface of rocks under deformation. *Proc. Int. Conf. Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior*, Novosibirsk: IGD SO RAN, 2011, pp. 179–184.
- (14) Kuznetsov, S. V.; Odintsev, V. N.; Slonim, M. E.; Trofimov, V. A.: Methodology of Strata Pressure Calculation. Moscow: Nauka, 1981 (in Russian).
- (15) Lee, M.; Haimson, B.: Laboratory study of borehole breakouts in Lac du Bonnet granite: A case of extensile failure mechanism. *Int. J. Rock Mech. Mm. So. & Geomech*, 1993, vol. 30, no. 7, pp. 1039–1045.
- (16) Kurlenya, M. V.; Eremenko, A. A.; Shrepp, B. V.: Geomechanical Problems of Iron Ore Mining in Siberia. Novosibirsk: Nauka, 2011 (in Russian).
- (17) Viktorov, S. D.; Kochanov, A. N.; Odintsev, V. N.; Osokin, A. A.: Emission of submicron particles under deformation of rocks. *Izvest. Ross. Akad. Nauk. Ser. Fiz.*, 2012, vol. 76, pp. 388–390.

## Authors / Autoren

Prof. Dr.-Ing. Kliment N. Trubetskoy, Dr.-Ing. Sergey D. Viktorov, Dr.-Ing. Alexander A. Osokin, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON), Russian Academy of Sciences, Moscow