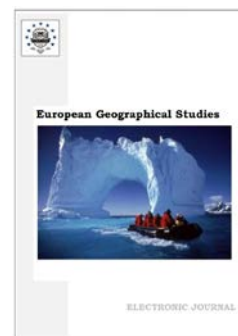


Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
European Geographical Studies
Issued since 2013.
E-ISSN: 2413-7197
2025. 12(1): 62-67

DOI: 10.13187/egs.2025.1.62
<https://egs.cherkasgu.press>



Letters to the Editorial Office

Time-Resolved Scanning Electron Microscopy for Sand Saltation Measurements

Brief Conference Communication

Oleg V. Gradov ^{a, *}, Irina A. Maklakova ^a, Andrei I. Sergeev ^a

^a Semenov Institute of Chemical Physics, RAS (ICP RAS), Moscow, Russian Federation

Abstract

The role of electrostatics in providing sand saltations is well known (including during the formation of dunes, as well as variations of sand flows in dust storms and sand clouds in aeology). We propose to use time-resolved scanning electron microscopy for this purpose, since in the column of an electron microscope it is possible to program the potential difference/field strength by varying the accelerating voltage. Examples of time-resolved microimages for calibrated "sand models" are shown in this short paper.

Keywords: sand saltations, sand electrostatics, dust storms, time-resolved SEM, sand clouds, aeology.

1. Введение

Общеизвестна роль электростатики в обеспечении "сальтации" песка, в том числе при формировании дюн (модифицированный механизм Багнольда), а также вариациях песчаных потоков в пылевых бурях и песчаных облаках в эолологии (Schmidt et al., 1988; Yue et al., 2003, 2007; Zheng et al., 2006; Yue, Zheng, 2007). Несмотря на пересмотр некоторых механизмов сальтационных эффектов в последние годы, в особенности – недавно обнаруженную немонотонную зависимость порога текучести от диаметра частиц, приложенного электрического поля и поверхностной плотности заряда (приводящую к сепарации в течениях проводящих частиц от диэлектрических – за счёт снижения порога текучести за счёт электростатики для проводящих частиц до 31 % и повышения порога текучести до 76 % за счёт электростатики у отрицательно заряженных диэлектрических частиц) (Zhang, 2024), в целом, различные электростатические феномены воспроизводятся на песчинках в лабораторных условиях в элементарных установках типа описанной в (Xie et al., 2021). Две параллельные электродные пластины используются для создания однородного электрического поля, имитирующего атмосферное или золотое электрическое поле. Под действием электрического поля частицы песка приобретают индуктивный заряд и поднимаются в воздух. Их траектории снимают скоростной камерой, на основе чего вычисляют суммарные заряды отдельных частиц песка, и их заряд на единицу массы.

* Corresponding author

E-mail addresses: geochemicalphysics@gmail.com (O.V. Gradov)

Измеряется также пороговая напряженность электрического поля, приводящая к подъему частиц песка (она увеличивается с диаметром песчинки).

В данном методе невозможно воздействовать на одиночную песчинку и наблюдать динамические феномены, сопутствующие сальтациям, в которых она участвует (электростатическая мультитабильность и обратимая агрегация, вращение частиц в вихревых полях и т. д.).

2. Предлагаемый подход

Нами предлагается использовать для этого времяразрешенную (и стробоскопическую) сканирующую электронную микроскопию, так как в колонне сканирующего электронного микроскопа возможно программировать разность потенциалов/напряженность поля через варьирование ускоряющего напряжения на катоде. Находящиеся на специализированной платформе с ограничивающими стенками либо в "субкамере" (если речь идёт об ASEM – атмосферной электронной микроскопии) песчинки будут испытывать воздействие электронного пучка и проявлять динамику строго в находящихся под электронным пучком/облучаемых/сканируемых участках (ROI/region of interest). При этом можно отслеживать их динамику под пучком с временным разрешением, соответствующим техническим свойствам детекторов и системы развёртки.

3. Материалы и методы

Времяразрешенное исследование динамики песчинок с разным зарядом (в том числе модифицированных химически) и размерами/морфометрическими характеристиками было произведено впервые на собственноручно модифицированном сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM T330-A в TV-режиме при подключении АЦП с модулем оцифровки видео к BNC-разъёму, выводящему на монитор (обычно при использовании TV-режима). При записи видеосигналов сальтационной динамики частиц песка с параметрами регистрации, отображаемыми на адресно-временном коде/тайм-коде, достигали разрешение от десятков миллисекунд до миллисекунд. Напряжение на катоде варьировали от единиц киловольт до 25 киловольт.

4. Результаты

Примеры времяразрешенных микроизображений для динамики калиброванных моделей песчинок с измеренными характеристиками заряда, пористости и морфометрии (SILASORB) приведены на [Рисунке 1а](#). Можно видеть вращение одной частицы на поверхности другой – удерживающей первую электростатическими силами. Подтвердить факт вращения можно с применением двумерного преобразования Фурье в реальном времени (мы осуществляли это с использованием ПО QAVIS разработки ТОИ ДВО РАН): динамику изменений 2D FFT данной серии рапид-микрофотографий можно видеть на [Рисунке 1б](#). В ряде случаев можно наблюдать прецессию частиц, а также явления, подобные гироскопическому движению песчинки в конфайнменте на поверхности. После отрыва от поверхности частицы уносятся вовне, иногда за пределы зоны сканирования. Ещё одним экстраординарным феноменом является дискретная динамика переключений при вращении частиц (частица "стопорится" в определенных угловых позициях), а также дискретные переходы в ориентациях песчинки между двумя состояниями ("бистабильность") и более ("мультитабильность"). Также наблюдаются "перемещения частиц на дальние расстояния", предположительно, коррелирующие с размерами и зарядом поверхности песчинок. Они детектируются с использованием осциллографического метода на заданных строках.

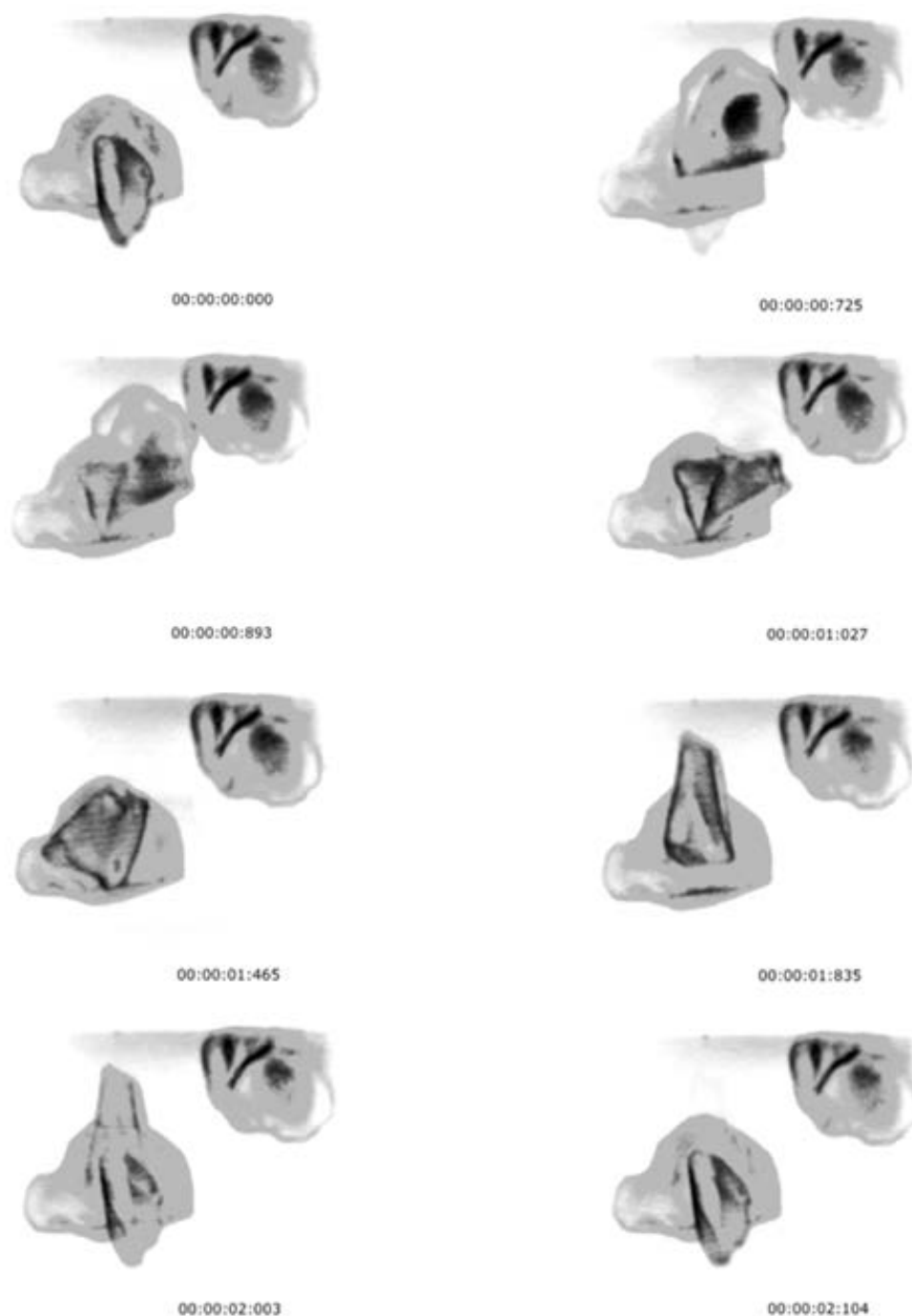
Примеры этих эффектов показаны на [Рисунках 2а, 2б](#).

Результаты модельных экспериментов опубликованы ([Elfimov et al., 2025](#)). Микрофото приведены из данной работы, а также исходной конференционной публикации.

5. Обсуждение

Эксперименты могут быть воспроизведены на любом песке при соблюдении электрофизических условий проведения эксперимента, а также могут лечь в основу классификации песков по их динамике. Созданные подходы могут иметь значение для

геологии также в целях: исследования механизмов извлечения отдельных минералов из песков электростатическим методом; анализа и моделирования электростатических эффектов в пылевых бурях и поведения частиц почв в ходе выветривания; поведения песка при формировании не только земных дюн, но и дюн Багнольда на Марсе и экзопланетах.



а

Рис. 1. Вращение модельной песчинки: а – серия микрофотографий; б – двумерные Фурье-спектры (2D FFT), снятые с ПО QAVIS

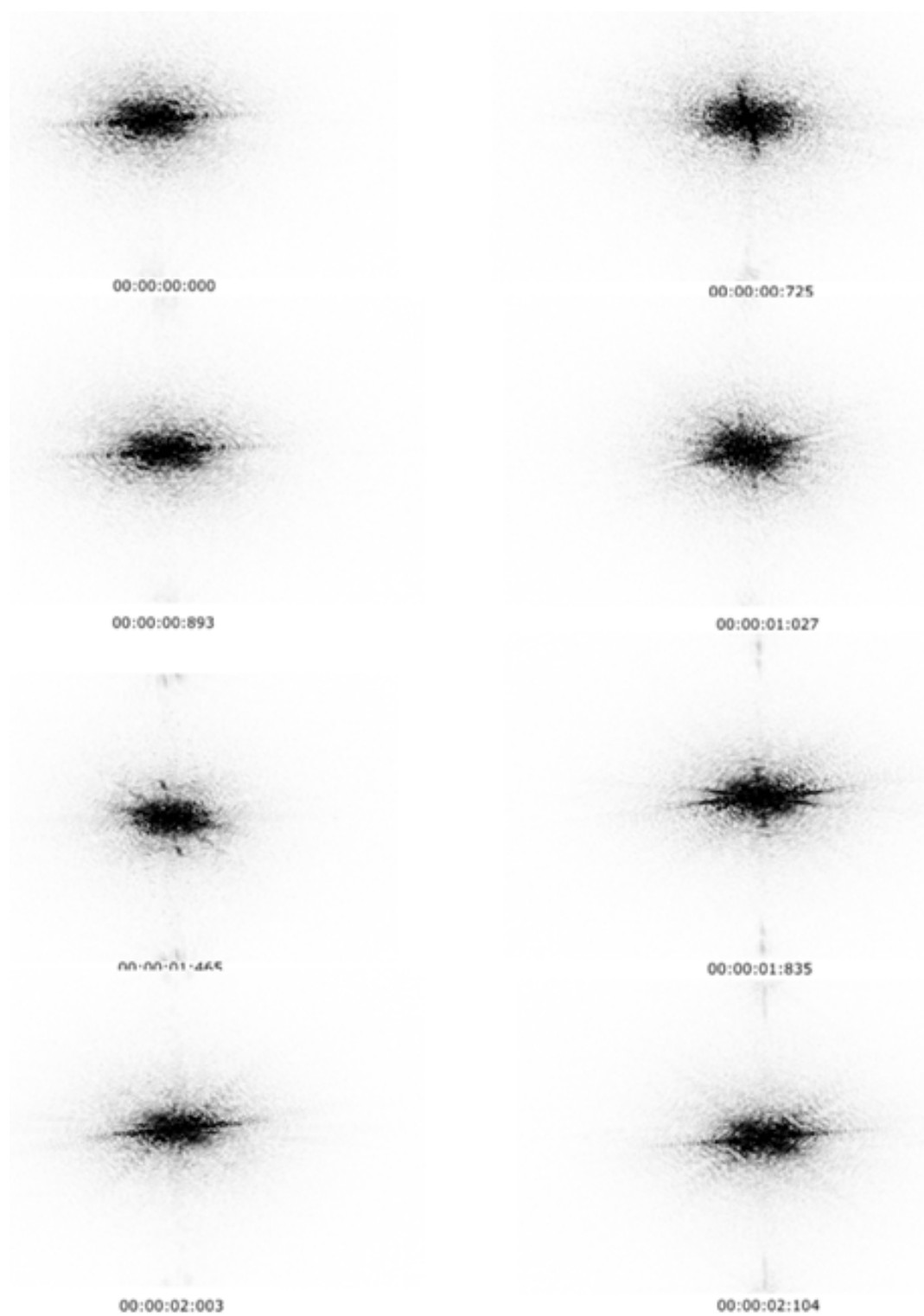


Рис. 1. Вращение модельной песчинки: а – серия микрофотографий;
 б – двумерные Фурье-спектры (2D FFT), снятые с ПО QAVIS

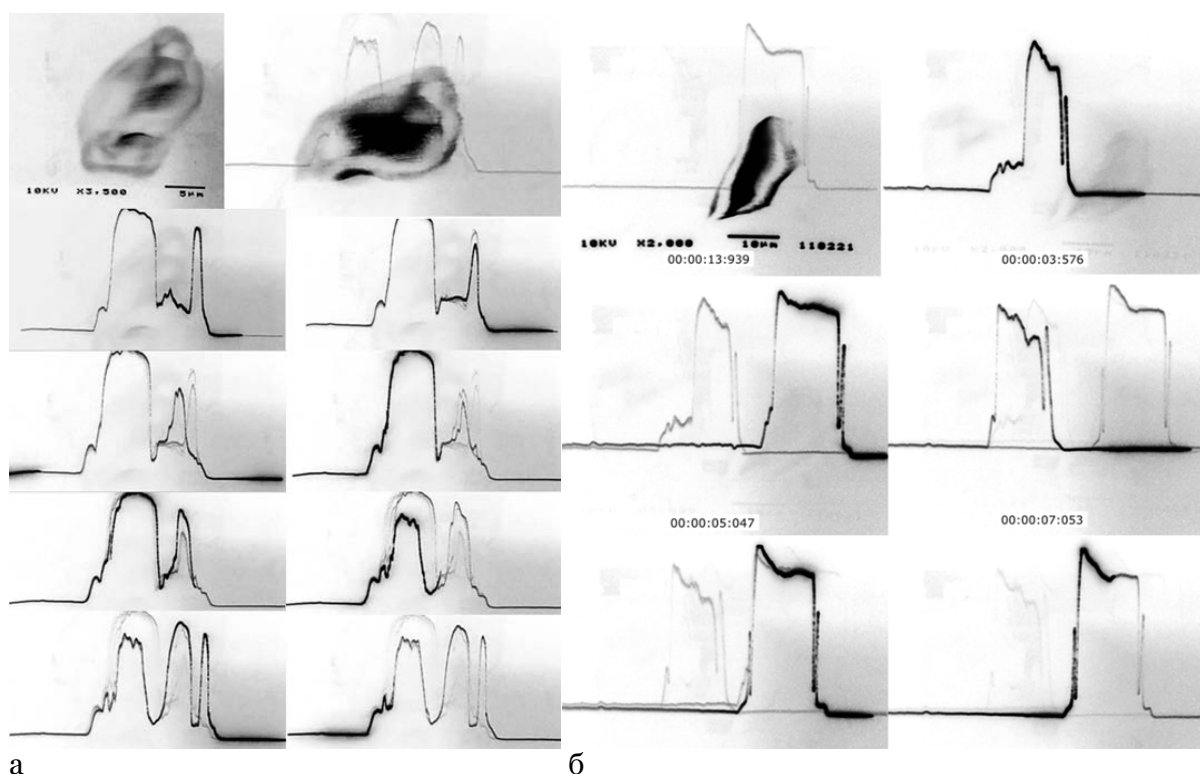


Рис. 2. Осциллограммы динамики модельной песчинки: а – ротация с промежуточными фазами; б – резкое перемещение в пространстве.

6. Благодарности

Результаты, приведенные в данном кратком сообщении, впервые доложены в Борке, на международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» осенью 2025 г., организаторам которой, слушателям и коллегам из Борка мы предельно благодарны за проявленный интерес к тематике, стимулирующий нас далее продолжать работы в этом направлении.

Литература

- [Elfimov et al., 2025](#) – *Elfimov A., Gradov O.V., Gradova M.A., Maklakova I.A., Sergeev A.I.* Field-driven and electron beam-driven discrete multi-stable microrotators based on modified HPLC sorbents // *Advanced Structured Materials*. 2025. 221: 157-189.
- [Schmidt et al., 1988](#) – *Schmidt D.S., Schmidt R.A., Dent J.D.* Electrostatic force on saltating sand // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1988. 103(D8): 8997-9001.
- [Xie et al., 2021](#) – *Xie L., Liu Y., Zhou C., Wang M., Lacks D.J., Zhou J.* A laboratory study of the electrostatic charge of individual sand particles lofted in an electric field // *Aeolian Research*. 2021. 50: 100675.
- [Yue, Zheng, 2007](#) – *Yue G.W., Zheng X.J.* Effect of thermal diffusion and electrostatic force on evolution of wind-blown sand flow // *Applied Mathematics and Mechanics*. 2007. 28(2): 183-192.
- [Yue et al., 2003](#) – *Yue G.W., Huang N., Zheng X.J.* Effect of irregular sand grains and electrostatic force on threshold wind speed // *Journal of Desert Research*. 2003. 23(6): 621.
- [Zhang, 2024](#) – *Zhang H.* Revisiting the effects of electrostatic forces on the lifting of sand particles in dust storms // *Journal of Electrostatics*. 2024. 127: 103880.
- [Zheng et al., 2006](#) – *Zheng X.J., Huang N., Zhou Y.* The effect of electrostatic force on the evolution of sand saltation cloud // *The European Physical Journal E*. 2006. 19(2): 129-138.

References

- [Elfimov et al., 2025](#) – *Elfimov, A., Gradov, O.V., Gradova, M.A., Maklakova, I.A., Sergeev, A.I.* (2025). Field-driven and electron beam-driven discrete multi-stable microrotators based on modified HPLC sorbents. *Advanced Structured Materials*. 221: 157-189.

[Schmidt et al., 1988](#) – Schmidt, D.S., Schmidt, R.A., Dent, J.D. (1998). Electrostatic force on saltating sand. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 103(D8): 8997-9001.

[Xie et al., 2021](#) – Xie, L., Liu, Y., Zhou, C., Wang, M., Lacks, D.J., Zhou, J. (2021). A laboratory study of the electrostatic charge of individual sand particles lofted in an electric field. *Aeolian Research*. 50: 100675.

[Yue, Zheng, 2007](#) – Yue, G.W., Zheng, X.J. (2007). Effect of thermal diffusion and electrostatic force on evolution of wind-blown sand flow. *Applied Mathematics and Mechanics*. 28(2): 183-192.

[Yue et al., 2003](#) – Yue, G.W., Huang, N., Zheng, X.J. (2003). Effect of irregular sand grains and electrostatic force on threshold wind speed. *Journal of Desert Research*. 23(6): 621.

[Zhang, 2024](#) – Zhang, H. (2024). Revisiting the effects of electrostatic forces on the lifting of sand particles in dust storms. *Journal of Electrostatics*. 127: 103880.

[Zheng et al., 2006](#) – Zheng, X.J., Huang, N., Zhou, Y. (2006). The effect of electrostatic force on the evolution of sand saltation cloud. *The European Physical Journal E*. 19(2): 129-138.

Времяразрешенная сканирующая электронная микроскопия для измерения и моделирования сальтационных процессов в песчаных бурях

Краткое конференционное сообщение

Олег Валерьевич Градов ^{a, *}, Ирина Александровна Маклакова ^a, Андрей Иванович Сергеев ^a

^a Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Роль электростатики в обеспечении сальтационных процессов в песке хорошо известна (в том числе при формировании дюн, а также при изменении песчаных потоков в пылевых бурях). Мы предлагаем использовать для этой моделирования и измерения параметров этих процессов на уроне одиночных песчинок времяразрешающую сканирующую электронную микроскопию, поскольку в колонне электронного микроскопа возможно программировать разность потенциалов/напряженность поля путем изменения ускоряющего напряжения. В данном кратком сообщении представлены примеры времяразрешенных микроизображений для калиброванных по размеру и моментам инерции силикагелевых гранул – «модельных песчинок».

Ключевые слова: сальтационные процессы в песке, электростатика песка, пылевые бури, времяразрешенная сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), песчаные облака, эолология.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: geochemicalphysics@gmail.com (О.В. Градов)