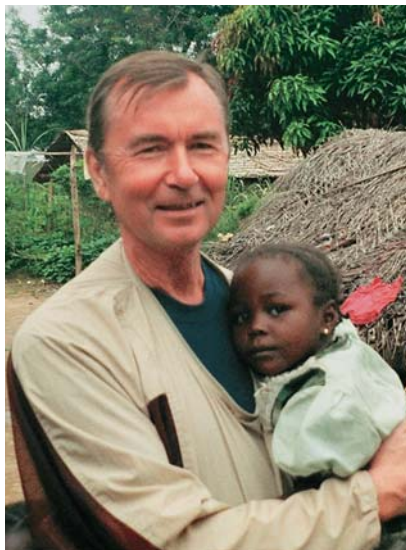


# «Эффект Бразильского ореха»

К поиску  
месторождений алмазов  
в песчаных пустынях

Кристаллы алмаза, одного из самых твердых материалов, известных человечеству, и самого дорогого из драгоценных камней, используются не только в ювелирном деле, но и в промышленности благодаря уникальным физико-химическим характеристикам, таким как высокая теплопроводность, устойчивость к агрессивным средам, особые оптические и электрические свойства. Главным конкурентом природных алмазов являются синтетические: такие кристаллы – основа современной инструментальной промышленности, при этом с развитием технологии синтеза стали производиться и крупные алмазы ювелирного качества. В последние десятилетия продажи «лабораторных» бриллиантов выросли более чем на порядок, что привело к падению оптовых цен на эти уникальные минералы. Однако и сейчас стоимость природных алмазов, возраст которых исчисляется миллионами и миллиардами лет, намного превышает цену синтетических, составляя более 5 тыс. долларов за 1 карат (0,2 г). Месторождения алмазов встречаются на всех континентах, за исключением (пока) Антарктиды. Обнаружить их непросто, а помощниками при их поиске служат минералы-индикаторы, «соседи» кристаллов алмаза по коренной породе: освобождаясь и рассеиваясь по территории, они могут указать путь к своему источнику. Но в разных геологических обстановках этот процесс идет по-разному. Новосибирские исследователи поставили эксперимент по моделированию поведения индикаторных кристаллов в динамичной песчаной среде, характерной для таких африканских пустынь, как Калахари, и обнаружили, что их вынос на поверхность песка можно объяснить давно известным, но малоизученным «эффектом бразильского ореха»



**АФАНАСЬЕВ Валентин Петрович** – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории литосферной мантии и алмазных месторождений Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск). Заслуженный геолог РФ, лауреат премии А. Е. Ферсмана (2022), премии академика В. А. Коптюга (2023). Автор и соавтор 280 научных работ, 4 монографий и 1 патента

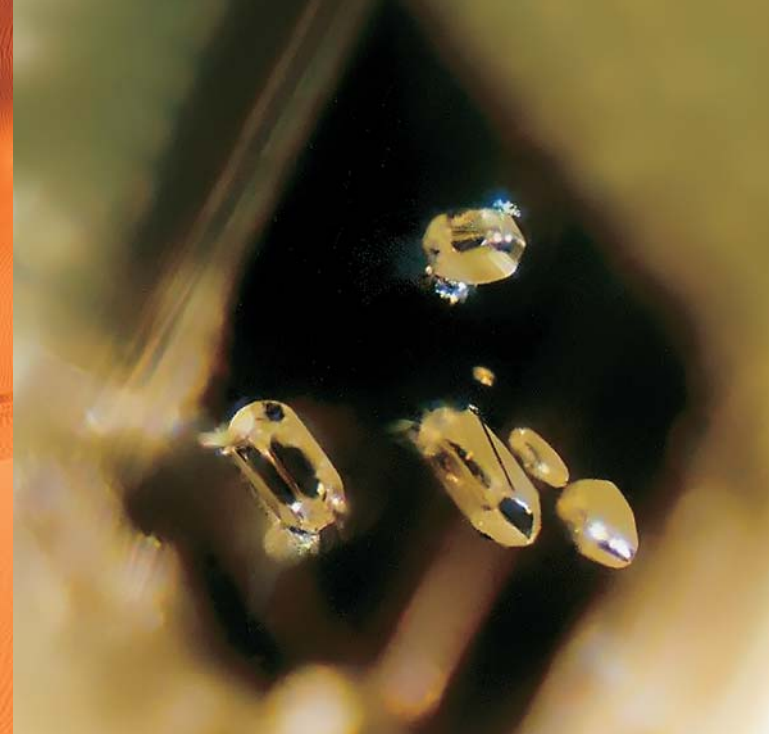


**УРАКАЕВ Фарит Хисамутдинович** – доктор химических наук, главный научный сотрудник лаборатории роста кристаллов Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 147 научных работ и 12 патентов



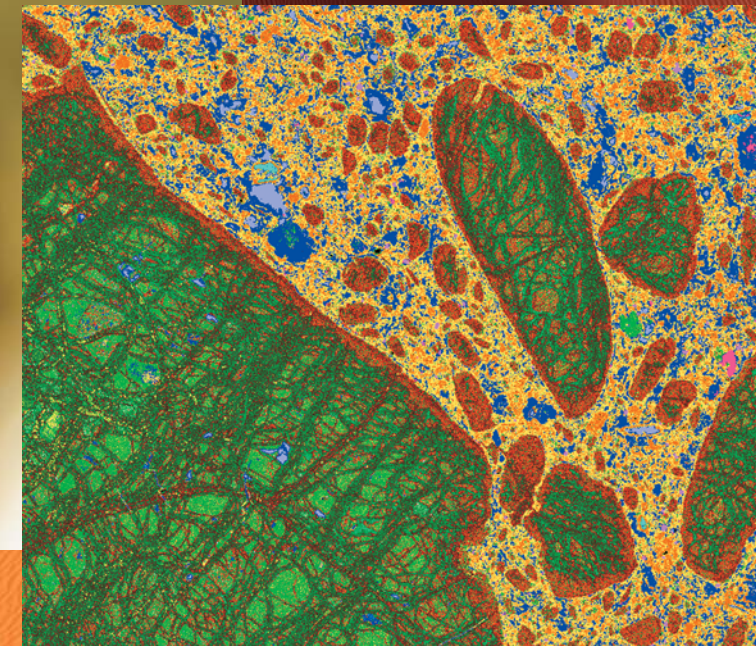
**ИВАНОВА Оксана Александровна** – младший научный сотрудник лаборатории литосферной мантии и алмазных месторождений Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 18 научных работ

© В. П. Афанасьев, Ф. Х. Уракаев, О. А. Иванова, 2024



Кимберлитовая матрица состоит из глинистых минералов и карбонатов, представленных синим, фиолетовым и охристым цветом; зеленым окрашены макрокристаллы оливина, преобразованные в серпентин (справа). Поперечное сечение. © CC BY-SA 3.0/ David Haberland

Вверху – кристаллы алмаза с включениями оливина. По: (Похиленко, 2007)



**Кимберлиты образуются на огромных глубинах в результате сложного процесса частичного плавления пород, слагающих различные уровни мантии Земли. Значительная часть кимберлитовых расплавов формируется на уровнях ниже границы перехода «графит – алмаз». Для начала кристаллизации алмаза в природных условиях требуются давления порядка 40 тыс. атм., что отвечает глубинам около 140 км. С учетом достаточно низких величин тепловых потоков для литосферы древних платформ температура на таких глубинах достигает 900 °С**

Кимберлитовая брекчия состоит из сцементированных обломков разных пород. Шахта «Премьер», ЮАР. © CC BY 2.0/ James St. John

Основным источником природных алмазов на сегодняшний день является **кимберлит** – магматическая порода, зарождающаяся на глубине более 100 км. Именно он и выносит в своем составе алмазы вместе с сопутствующими глубинными минералами (**гранатом (пиропом), пикроильменитом, хромитом, оливином** и др.). Тела кимберлитов в основном представлены так называемыми **трубками взрыва** – жерлами древних вулканов, через которые кимберлитовая магма вырывалась на поверхность; реже встречаются **дайки** (пластинообразные протяженные тела), **жилы** и другие формы. В результате эрозии и размыва алмазоносных кимберлитов образуются россыпи алмазов, которые также содержат сопутствующие минералы, служащие индикаторами кимберлитов.

Поиски месторождений алмазов, как коренных, так и россыпных, ведутся в самых разных ландшафтах и условиях: в постледниковых отложениях на территориях вечной мерзлоты (Канада, Якутия); в латеритной коре выветривания, образующейся во влажных тропиках в результате смены сухих и дождливых сезонов (Экваториальная Африка, Индия, Бразилия); в условиях влажного и холодного сибирского климата (юг Якутии, Иркутская область, Красноярский край) и т.д. (Афанасьев и др., 2010).

И в каждом таком случае геологи сталкиваются со специфическими условиями перемещения алмазов и индикаторных минералов кимберлитов, которые и определяют возможности минералогических поисков месторождений алмазов, коренных и россыпных, а также организацию и методику ведения поисковых работ.

**Ключевые слова:** алмазы, кимберлит, пустыня, сыпучая среда, индикаторные минералы, эффект бразильского ореха, гранулярная дифференциация.

**Key words:** diamonds, kimberlites, desert, granular medium, indicator minerals, African nut effect, granular differentiation

На с. 37: Пустыня Сахара. Марокко. © CC BY-2.0/cattan2011

Природный кристалл алмаза в материнской породе. Венесуэла. Public Domain/Gery PARENT



### КИМБЕРЛИТОВЫЙ ТРАНСПОРТЕР

Слой пород, обогащенных алмазами, находится на глубине более 150 км. В то же время образование магматических расплавов под континентами в большинстве случаев происходит на меньших глубинах (100 км и менее). Исключение составляют магмы, связанные с мантийными плюмами и суперплюмами, которые поднимаются с огромных глубин, зарождаваясь на границе ядра и мантии. Именно с этими явлениями связаны наиболее масштабные вспышки магматизма в истории Земли.

Большинство (95 %) алмазных месторождений связано с кимберлитовыми расплавами, которые поднимаются по трещинам и «по пути» дробят алмазоносные породы, вынося алмазы и обломки пород древней литосферной мантии. Эта магма стремительно поднимается под большим давлением. Вязкость кимберлитового расплава сравнима с вязкостью масла, которое заливается в двигатель автомобиля. И скорость ее подъема вверх под давлением также соизмерима со скоростью движения автомобиля (примерно 60–70 км/ч). За два-три часа она проходит всю дистанцию от места образования расплава до земной поверхности, и в этом случае алмаз не успевает графитизироваться.

При вскипании кимберлитовой (и не только) магмы происходит взрыв, и образуются трубки взрыва, которые моментально заполняются магмой; температура при этом очень быстро падает. На Севере в брекчиях жерловых частей кимберлитовых трубок можно обнаружить обломки мезозойской древесины, которая не сгорела, потому что температура понизилась очень быстро; этой мезозойской древесиной можно топить костер.

Абсолютное большинство алмазов образовалось на ранних стадиях геологической истории нашей планеты, около 3 млрд лет назад. Однако кимберлитовые трубки, из которых добывают эти кристаллы, обычно гораздо моложе. В Южной Африке их возраст определен в пределах от 2,4 млрд лет до 30 млн лет; в Бразилии – от 1,7 млрд лет до 180 млн лет; в Канаде – 560–52 млн лет, в Якутии – 450–140 млн лет. Обычно в одной алмазоносной провинции присутствуют кимберлитовые трубки разного возраста.

По: (Похиленко, 2007)

### Когда «музыка ветра» молчит

Обычно при поисках месторождений исследователи исходят из предположения, что образующийся при эрозии кимберлитов обломочный материал (*галечники*) перемещается под действием гравитации в *латеральных* направлениях (параллельно поверхности земли). В разных средах этот процесс идет по-разному: с водой – по рекам и берегам морей, с почвой – при сползании по склонам долин, с движущимися ледниками и т.д. Так появляются механические потоки и ореолы рассеяния индикаторных минералов, по которым можно локализовать местоположение коренного источника. При этом мелкие минералы под действием гравитации могут мигрировать вниз сквозь толщу более грубого материала до *плотика* – непроницаемого ложа обломочных отложений.

Однако так происходит не всегда. К примеру, там, где ранее прошел ледник, формируются потоки рассеяния (*ледниковые трейны*) за счет переноса минералов в толще движущегося льда (Похиленко и др., 2010). А в каменистых пустынях, где латеральный *эоловый перенос* (с помощью ветра) достаточно ограничен, выдувание мелких легких минералов приводит к концентрации индикаторных минералов и алмазов с образованием локальных россыпей (Соболев и др., 1992; Акулов, Агафонов, 2007; Пактовский, 2021, 2022).

Многие кимберлитовые тела, в том числе алмазоносные, погребены под песками пустынь Калахари и Сахара. Мощность песчаных отложений очень различается – от нескольких сантиметров до сотен метров. Так, кимберлитовую трубку Орапа в Калахари скрывают пески мощностью до 50 м; в Сахаре песчаная толща может достигать 300 м и более. Тем не менее индикаторные минералы кимберлитов

В этой кимберлитовой трубке в январе 1905 г. был найден Куллинан – самый дорогой и крупный в мире алмаз весом свыше 3100 карат (621 г). Шахта «Премьер», ЮАР. © CC BY 2.0/ Africa Deluxe Tours

встречаются там прямо на поверхности песка, что сразу наводит на мысль об эоловом переносе.

Однако для песчаных пустынь вопрос ветровой транспортировки индикаторных минералов кимберлитов до сих пор не решен. Вероятно, такое возможно в случае маломощных песчаных отложений на каменистом ложе, когда весь песок вместе с содержимым способен перемещаться под действием ветра. Но как транспортируются индикаторные минералы в отложениях большой (десятки и сотни метров) мощности? Если это латеральное перемещение, то почему эти частицы, достаточно тяжелые и крупные по сравнению с тонкозернистым песком, не тонут в его толще? Как далеко они могут переноситься и можно ли прогнозировать местоположение источников по таким индикаторам?

Кристаллы якутских алмазов. Фото А. Павлушина (ИГАиБМ СО РАН, Якутия)



### ПО СЛЕДУ КИМБЕРЛИТА

Коренное алмазное месторождение значительно перспективнее для эксплуатации, нежели россыпное. Поэтому, обнаружив россыпь, геологи сразу пытаются определить тип и местоположение коренного источника. И в этом смысле старателю, не обремененному научным багажом, проще: его метод – это метод «тыка», или «дикой кошки», т.е. тотальный поиск на местности в расчете натолкнуться на коренное месторождение или богатый участок россыпи.

Уважающий же себя геолог попытается дать научно обоснованный прогноз, опираясь на накопленные знания и прецеденты. К сожалению, знаний и опыта иногда не хватает, и тогда тот же геолог, воровато озираясь, запускает «дикую кошку» под видом научного прогноза и ведет бурение, проверяя все геофизические аномалии или зондируя определенный участок в надежде попасть в месторождение. Не стоит осуждать его за это, ведь найти кимберлитовую трубку диаметром 100 м на абсолютно дикой территории в десятки тысяч квадратных километров якутской тайги, либо песков Калахари, либо джунглей Гвинеи – задача очень непростая.

Тем не менее, несмотря на все трудности, геологам удалось сформировать достаточно мощный комплекс методов прогноза и поиска месторождений алмазов, главным образом кимберлитового типа, который успешно используется в самых сложных условиях. Загвоздка состоит в том, что зачастую идентифицировать найденные в россыпи кристаллы с алмазами из известных коренных источников (например, того же кимберлита) не удается, и тогда прогноз и поиск вожделенного месторождения становится задачей нетривиальной.

По: (Афанасьев, 2009)

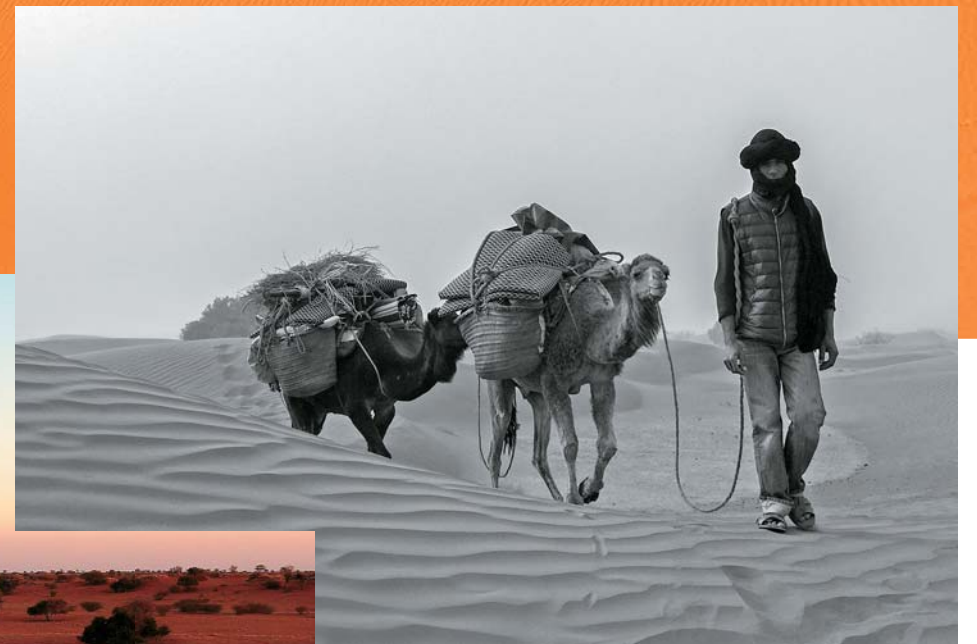
И это еще не все: известно, что на поверхности песков Сахары встречаются не только частицы песчаной размерности (0,05–2 мм), но и крупные камни из подстилающих песок пород. Эоловый перенос подобных камней нереален – необходимо искать другие механизмы, отвечающие за появление крупных частиц на песчаной поверхности.

### Большой – всегда сверху

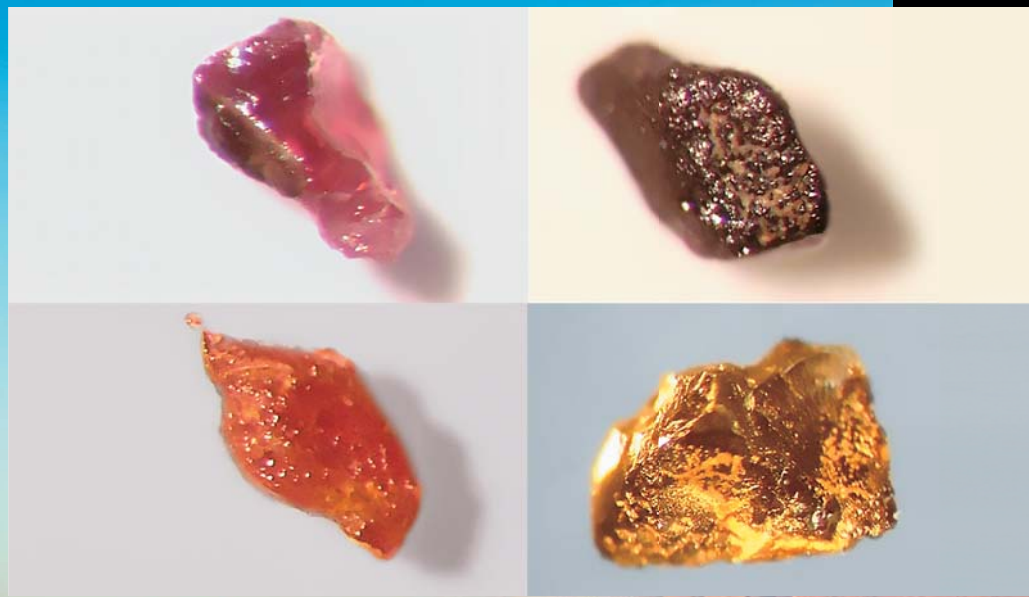
Заняться кимберлитовой загадкой пустынь нас подтолкнула одна из публикаций в материалах конференции в Кейптауне в 1998 г., где описывалось распределение индикаторных минералов над кимберлитовой трубкой в песчаных отложениях пустыни Калахари (Baumhartner, Neuhoff, 1998). Из графика распределения по скважине было видно, что они встречались не только на поверхности, но и по всему разрезу 50-метровой песчаной толщи над трубкой. При этом нужно отметить, что в Калахари пески состоят из очень мелкого кварцевого песка с размером частиц 100–150 мкм.

Авторы тезисов предлагали, без детального объяснения, два возможных механизма этого феномена. Первый – это *биотурбация*, деятельность живых

В южноафриканской пустыне Калахари площадью около 600 тыс. км<sup>2</sup> находятся обширные области, покрытые безводными красными песками (внизу). © CC BY 2.0/oirdenoir67



В пустыне Сахара, расположенной на севере Африки, толща песчаных отложений может достигать 300 м. Благодаря высокой подвижности песков и сильным ветрам здесь часто зарождаются песчаные бури. © CC BY-NC-ND 2.0/ James WestFollow; © CC BY 2.0/ Tobias Begemann



Кимберлит содержит множество включений глубинных минералов, захваченных магматическим расплавом на месте зарождения и при продвижении вверх сквозь толщу литосферы: красный, оранжевый или фиолетовый пироп (слева), черный пикроильменит (справа), похожий на слюду флогопит, ярко-зеленый пироксен (хромдиопсид) и др. Присутствие этих минералов – геохимических индикаторов – является прямым свидетельством наличия в регионе кимберлитов. По: (Похиленко, 2007)

организмов, предположительно термитов, которые выносят на поверхность землю при строительстве гнезд. Второе – ландшафтный фактор: в этом случае первичное накопление минералов связывалось с развитием корок *калькрета* (твердого водонепроницаемого карбоната кальция) и *силъкрета* (кремнистой породы) и последующей концентрацией минералов вследствие ветровой эрозии.

Однако ни тот ни другой механизм не объясняет вертикального распределения индикаторных минералов в толще песка. Мы предположили, что в данном случае речь может идти о давно известном *эффекте бразильского ореха*. Суть его в том, что при встряхивании коробки, наполненной орехами разного размера, бразильские орехи, наиболее крупные, оказываются наверху, тогда как более мелкие арахис, фундук и другие – под ними. Этому есть естественное объяснение: орехи маленького размера попадают в промежутки между крупными и постепенно уходят вниз, т.е. происходит *гранулометрическая дифференциация*.

Но орехи имеют близкую плотность, а как будут вести себя такие крупные и тяжелые частицы, как индикаторные минералы кимберлитов, в песчаной среде, состоящей из мелких частиц? Чтобы ответить на этот вопрос и прояснить ситуацию с кимберлитовой

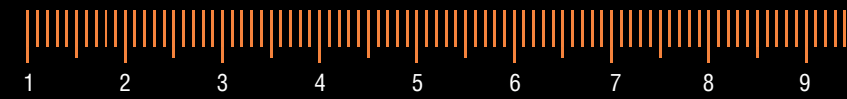
трубкой, засыпанной песком, требовался модельный эксперимент.

### Пустыня «в пробирке»

Эксперимент по гранулометрической дифференциации в песке был проведен на вибростенде с вертикальными колебаниями, частоту которых можно менять. На стенд установили стеклянный контейнер, на его дно уложили крупные частицы разного размера и плотности, включая зерна минералов-индикаторов кимберлита (пикроильменита и пироба). Все это засыпали кварцевым песком.

Включение вибростенда на частоте вибрации 50 Гц привело песок в конвективное движение: песчаный поток поднимался вдоль одной стенки сосуда и опускался вдоль другой, противоположной, – так осуществлялось круговое движение. В результате сформировался склон, более высокий на стороне восходящего песчаного потока.

В течение первых 40 с работы вибростенда наблюдалось только движение песка, но затем на поверхности появился стальной шарик и вслед за ним кварцевая галька. Через 3–4 с они погрузились в нисходящей струе песка у стенки контейнера. Далее на поверхность одна



Для эксперимента на вибростенде были подготовлены крупные частицы разного размера и плотности: стальной шарик (10 мм в диаметре, плотностью 7,8 г/см<sup>3</sup>); медная пластинка (размером 7 × 7 × 3 мм, 8,96 г/см<sup>3</sup>); зерна пикроильменита из кимберлита обломочной формы и обкатанные (7–7,5 и 5–6 мм, 4,7 г/см<sup>3</sup>); овальные зерна пироба из кимберлита (7–8 мм, 3,5 г/см<sup>3</sup>); зерно вольфрамита (6 мм, 7,2 г/см<sup>3</sup>); хорошо обкатанная кварцевая галька (10 мм, 2,6 г/см<sup>3</sup>). Частицы были уложены на дно стеклянного контейнера (внутренний диаметр 50 мм) и засыпаны кварцевым песком (размер частиц 200 мкм). Ход эксперимента фиксировался на видео



за другой выносились остальные частицы, включая пиробы и пикроильмениты. Они скатывались по песчаному склону и тонули. Весь процесс занял полминуты.

Затем, после 40-секундного перерыва, вынос на поверхность частиц, включая индикаторные минералы, стал повторяться в произвольном порядке. Было заметно, что частицы на пару секунд задерживаются на нисходящей струе песка у стенки контейнера. Через минуту вновь появились кварцевая галька и стальной шарик – они оказались более устойчивыми и тонули только от взаимных соударений или толчков других частиц, но снова всплывали. При этом отчетливо было видно, что частицы будто плывут по песчаному подвижному склону на струях песка, опускающихся вниз. Когда частоту колебаний уменьшили до 25 Гц, движение песка и частиц продолжилось, хотя и замедлилось.

Увеличение частоты колебаний до 100 Гц ускорило движение песка и вместе с ним перемещение испытуемых частиц. Как и в предыдущих случаях, они поднимались на поверхность, скатывались по склону и крутились у стенки, не погружаясь вслед за песком, и лишь через некоторое время (секунды, десятки секунд) уносились вниз. При этом зерна пироба и пикроильменита вели себя аналогично другим частицам и выносились на поверхность без всяких закономерностей. Как и ранее, наиболее устойчивыми на подвижном песке оказались самые крупные частицы – кварцевая галька и в первую очередь стальной шарик.

Итак, при любой частоте колебаний испытуемые частицы появлялись наверху и неохотно тонули. Эксперимент наглядно показал, что в динамичной песчаной среде



51–53 с, частота колебаний 50 Гц:  
на поверхности песка зерно граната  
и угловатое зерно пикроильменита



В динамичной песчаной среде наиболее устойчивыми на поверхности песка оказались самые крупные частицы – стальной шарик и кварцевая галька (внизу; 2 мин 24 с с начала эксперимента, частота колебаний 100 Гц). Лидером стал шарик: кварцевая галька ударялась об него и уходила вниз с нисходящими струями песка, тогда как сам он оставался на поверхности. *Кадры видеосъемки*

1 мин 54 с, частота колебаний 100 Гц:  
на поверхности движущегося песка  
медная пластинка и зерно вольфрамита



Пустыня Сахара. Марокко. ©CC BY-NC 2.0/ Michael Wong

крупные тяжелые частицы, включая индикаторные минералы кимберлита, могут выноситься на поверхность и оставаться на ней. При этом они оказываются даже более устойчивыми по сравнению с мелкими.

### Явление есть, механизма нет

Эксперимент на вибростенде показал возможность выноса индикаторных минералов кимберлитов на поверхность динамичной песчаной среды наряду с другими крупными и тяжелыми частицами. Но полученные результаты выходят за рамки геологии, позволяя лучше понять поведение различных крупных объектов в динамичной сыпучей среде.

Как известно, пустыни Калахари и Сахара образовались за счет переотложения морских песчаников ранне-мелового возраста, что сопровождалось перемещением песка. Движение Луны вызывает приливы и отливы не только в океане, но и в сыпучем песке в масштабах, незаметных для глаза. Поэтому песок в пустынях подвижен, а малая амплитуда, вектор и частота движений компенсируются фактором времени.

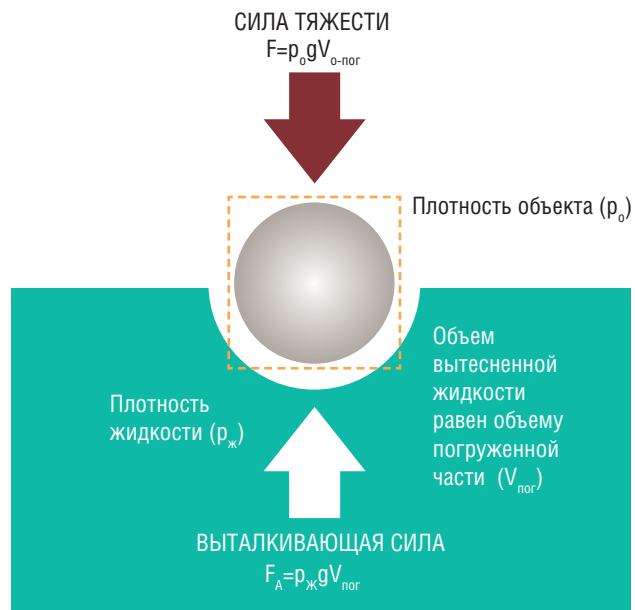
Естественно, возникает вопрос о физической картине и математической модели этого явления. Нужно сказать, что эффекту бразильского ореха (более широко – динамике сыпучей среды) посвящено огромное число исследований, как экспериментальных, так и теоретических (точнее, попыток разработки теории этого явления) (Ревуженко, 2003; Блехман, 2003; Долгунин и др., 2020 и др.). Это связано с тем, что гранулированные среды чрезвычайно широко представлены в нашей жизни, а их поведение, часто парадоксальное,

заставляет сомневаться в справедливости привычных законов механики.

Примером могут служить слова специалиста в области нелинейных колебаний и прикладной механики, профессора И.И. Блехмана: «Можно ли оставаться равнодушным, видя, как в результате едва заметной вибрации верхнее положение маятника делается устойчивым, тяжелый металлический шар “всплывает” в слое песка, свая легко погружается в грунт под действием собственного веса, массивное тело или слой сыпучего материала движется вверх по наклонной плоскости, вращение ротора устойчиво поддерживается при включенном электродвигателе и т.п.?» (2003, с. 42).

Ему вторит профессор Тамбовского государственного университета В.Н. Долгунин: «На протяжении уже многих десятилетий особенно пристальное внимание уделяется изучению эффектов разделения и перемешивания неоднородных частиц при вибрационном воздействии на гранулированные среды и сдвиговом их течении. Однако в настоящее время общая теория сепарации отсутствует и, более того, не прекращаются дискуссии в отношении физической сущности отдельных эффектов разделения частиц. Например, продолжают споры в отношении механизма всплытия крупной частицы вне зависимости от ее плотности в слое мелких частиц под действием вертикальных виброколебаний» (2020, с. 601–602).

Актуальность этой темы в том, что эффект бразильского ореха проявляется во всех отраслях, где используются сухие смеси, например: в пищевой промышленности, при изготовлении асфальтобетонных смесей, в горно-обогательном деле, при перевозке



Тело будет плавать, если сила гравитации ( $F$ ), действующая на тело, будет равна (или меньше) выталкивающей силе (силе Архимеда,  $F_A$ ). © CC BY-SA 3.0/ Yuri666 (анг.), Lit-uri (рус.)

сыпучих грузов и т.д. В частности, мы полагаем, что именно в связи с этим эффектом происходит также «всплытие» крупных частиц в тонкозернистом песке в условиях песчаных пустынь.

В свое время эксперименты, подобные нашему, но с частицами близкой плотности, провели ученые из Чикагского университета, получив аналогичную гранулометрическую сепарацию. Но когда они использовали сосуд конической формы, результат оказался обратным (Knight, Jaeger, Nagel, 1993). Позднее исследователи из Ратгерского университета в опытах с крупными частицами также получили результаты, схожие с нашими, и показали, что сепарация зависит не только от размера, но и от плотности частиц (Shinbrot and Muzzio, 1998). Известны эксперименты и с другими направлениями вектора вибрации, при которых поведение частиц кардинально менялось (Shinbrot, 2004). Но в конечном итоге теория эффекта бразильского ореха так и не была разработана.

## Песок – это жидкость?

Эксперимент поставлен, результат есть. Не претендуя на оригинальность и полноту интерпретации, попробуем объяснить его физическую сущность и описать картину сегрегации крупных частиц в сыпучей среде.

Подвижный песок можно сопоставить с жидкостью, вязкость которой определяется частотой и амплитудой

колебаний. Наблюдаемая в нашем эксперименте картина циркуляции потоков песка при разной частоте колебаний подтверждает допустимость такой аналогии. В этом случае к интерпретации поведения крупных тяжелых частиц можно попытаться приложить закон Архимеда, согласно которому на тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу объема жидкости или газа, вытесненного телом.

То есть если наша частица устойчива на поверхности подвижного песка, то на нее должна действовать выталкивающая сила. Но тогда необходимо ввести понятие *динамическая плотность*, которая выше у подвижного песка, чем у покоящегося, и соответствует его кинетической энергии. Если к этому параметру добавить еще один – *динамическую вязкость*, связанную с частотой колебаний, то их сочетание может обеспечить выталкивающую силу, способную вынести на поверхность крупные тяжелые частицы.

Устойчивость крупных частиц на поверхности нижней части склона движущегося песка можно объяснить, используя аналогию с деревянным шариком в воде, вытекающей в отверстие в ванне. Как и наши частицы, такой шарик не увлекается вниз стекающими струями воды, а лишь вращается на них.

Снижение динамики песчаной среды сопровождается ослаблением ее «жидкостных» характеристик, при этом сильнее проявляются свойства сыпучего материала, состоящего из твердых частиц с определенной плотностью, размером и силой трения между ними. Тяжелая крупная частица, положенная на такой материал, создаст под собой своеобразный подиум с повышенной плотностью за счет сближения частиц песка и силы трения

между ними. Он и обеспечивает выталкивающую силу, не позволяющую крупному объекту утонуть в песке, что мы и наблюдаем в реальности. Недаром верблюд с широкой стопой не вязнет в песке, несмотря на свой вес, в отличие от маленькой козочки с острыми копытцами.

В случае частиц одного размера, но разной плотности самый большой подиум сформируется под самой тяжелой частицей; соответственно будет различаться и выталкивающая сила. Сила тяжести частицы будет компенсироваться выталкивающей силой подиума, и то же самое произойдет при повышении динамики среды.

Результаты эксперимента, имитирующего поведение минералов-индикаторов кимберлитов в динамичной песчаной среде, показали, что его можно свести к давно известному эффекту бразильского ореха – явлению, физическая картина которого до сих пор не ясна. Наше предложение использовать жидкость в качестве аналогии подвижного песка, с учетом дуализма «сыпучая среда – жидкая среда», позволяет применить к описанию опыта, а возможно и самого эффекта бразильского ореха, закон Архимеда.

Мы не занимались численными расчетами «жидкостных» характеристик песка и разработкой теории, поскольку для этого необходимо полностью понимать суть явления, и представленная нами физическая картина может быть оспорена, изменена и уточнена. Однако результаты проведенного эксперимента уже сейчас имеют большое практическое значение для поиска кимберлитовых тел в песках Калахари и Сахары. Очевидно, что при этом не нужно исходить из эолового переноса индикаторов кимберлита: погребенные

кимберлитовые тела должны находиться под толщей песка вблизи тех мест, где в пробах с поверхности были обнаружены эти минералы.

### Литература

- Акулов Н.И., Агафонов Б.П. *Поведение минералов тяжелой фракции в условиях эолового переноса* // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 3. С. 344–349.
- Афанасьев В.П. *Родословная кристаллического углерода* // НАУКА из первых рук. 2009. № 3 (27). С. 70–83.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. *Поисковая минералогия алмаза*. Новосибирск: Гео, 2010. 650 с.
- Блехман И.И. *Вибрация «изменяет законы механики»* // Природа. 2003. № 11. С. 42–53.
- Долгунин В.Н., Куди А.Н., Тувев М.А. *Механизмы и кинетика гравитационной сепарации гранулированных материалов* // УФН. 2020. Т. 190, № 6. С. 585–604.
- Похиленко Н.П. *Алмазный путь длиной в 3 миллиарда лет* // НАУКА из первых рук. 2007. № 4 (16). С. 28–39.
- Ревуженко А.Ф. *Механика сыпучей среды*. Новосибирск: Офсет, 2003. 373 с.
- Baumhartner M. C., Neuhoﬀ L. *The vertical distribution of indicator minerals within Kalahari cover overlying a kimberlite pipe* // Short Abstr. VII Internat. Kimberlite Conf. University Cape Town. South Africa. 1998. P. 55–57.
- Knight J. B. et al. *Vibration-induced size separation in granular media: The convection connection* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. P. 3728–3731.
- Shinbrot T. *Granular materials: The brazil nut effect – in reverse* // Nature. 2004. V. 429, is. 6990. P. 352–353.
- Shinbrot T., Muzzio F. J. *Reverse Buoyancy in Shaken Granular Beds* // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 4365–4368.