

УДК 624.131.21 + 539.37

ФОРМИРОВАНИЕ КЛАСТЕРОВ ПРИ ДВУХОСНОМ СЖАТИИ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ

В. П. Косых, О. А. Микенина

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: v-kosykh@yandex.ru, olgarev@yandex.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Экспериментально и теоретически показано, что в процессе плоского деформирования сыпучей среды образуются кластеры с размерами порядка 10–15 диаметров частиц. Исследован процесс двухосного сжатия. Установлено, что возможны четыре основных режима деформирования, которым соответствуют разные конфигурации кластеров. Режимы чередуются между собой весьма сложным образом. Процесс деформирования обладает памятью, показатель Херста равен 0.84. Предельные нагрузки, соответствующие различным режимам, могут различаться между собой в 2–3 раза. В задачах горного дела, связанных с деформированием сыпучих сред, расчеты механического состояния областей с размером менее 80–100 диаметров частиц должны делаться не по континуальным моделям среды, а методом дискретных элементов.

Двухосное сжатие, деформации, кластеры, дискретные элементы, предельные усилия

DOI: 10.15372/FTPRPI20220402

Реальная сыпучая среда представляет набор отдельных дискретных элементов. Исторически сложилось, что процессы деформирования сыпучих сред исследовались в рамках континуальной механики [1, 2]. Это связано с бурным развитием теорий упругости и пластичности [3]. Уравнения для сыпучих сред строились как обобщение уравнений пластичности. Для сыпучей среды модели указанного типа наиболее приемлемы в связи с достигнутыми результатами в теории пластичности. Поэтому теоретическое развитие механики сыпучей среды пошло в этом направлении.

Континуальные модели носят феноменологический характер. Вопрос о реальном механизме деформирования среды здесь не рассматривается, хотя необходимость в этом есть. В горном деле она связана прежде всего с проблемой негабаритов, исследованием поведения геосреды после взрыва и др. Кроме того, часто встречаются ситуации, когда через поперечное сечение выпускного отверстия из камер, рудоспусков проходит или останавливается материал с достаточно крупными частицами. В этом случае континуальные модели заведомо не работают.

Из современных исследований данный вопрос впервые поднят в [4]. Показано, что в среде при деформировании образуются кластеры. Под несколько другим названием (домены) вопрос о кластерах поднимался в [5]. К исследованию физического механизма деформирования относится также цикл работ [6–8], посвященных исследованию “силовых цепочек” в сыпучей среде.

Существенное продвижение в этом вопросе произошло в связи с развитием метода дискретных элементов (МДЭ). В МДЭ ситуация обратная: здесь реальная неупругая среда независимо от реального механизма ее деформирования заменяется набором дискретных элементов, т. е. фактически заменяется сыпучей средой. Когда размеры частиц можно принять бесконечно малыми, полученные МДЭ решения будут соответствовать той или иной континуальной модели деформирования. В противном случае применение континуальных моделей не правомерно и необходимо явно учитывать дискретность среды. Во всех случаях представляет интерес экспериментальное исследование кластеров и их сопоставление с результатами МДЭ. В механике, основанной на построении феноменологических моделей, наибольшее значение имеют экспериментальные методы исследования простейших способов нагружения: одноосное и многоосное сжатие, сдвиг, различные типы сложных нагружений и т. д. [9]. Остановимся на двухосном сжатии в случае плоской деформации. Последнее обстоятельство позволяет наблюдать кластеры визуально, не прибегая к более сложной технике.

Для проведения экспериментов изготовлен специальный стенд (рис. 1). Его основой служит жесткая металлическая рама 1, выполненная в виде перевернутой буквы “П”. К раме с обеих сторон винтами 2 крепятся боковые стенки 3 толщиной 7 мм из прозрачного органического стекла. Расстояние между стеклами 8.3 мм. Между стеклами в правой стороне находится пластина 4 толщиной 8 мм и шириной 30 мм, соединенная резьбой со стержнем 5. Стержень 5 проходит через направляющую втулку, вмонтированную в правую стенку рамы. Выступающий конец стержня с помощью подвижного соединения связан с ходовым винтом 6, который приводится в движение с помощью шагового двигателя 7. Перед левой стенкой рамы между стеклами помещена металлическая пластина 8 шириной 10 мм и толщиной 8 мм. К пластине, в ее верхней и нижней частях, с помощью резьбы присоединены два полированных стальных стержня 9 диаметром 4 мм. Стержни проходят через отверстия в стенке рамы и упираются в два тензометрических датчика силы 10. Диаметр отверстий в стенке подобран так, что стержни легко и без заедания могут перемещаться, полностью передавая усилие, действующее на пластину 8 со стороны деформируемой среды на датчики 10, выполненные из алюминиевого сплава в виде прямоугольных балок размерами $82 \times 13 \times 13$ мм.

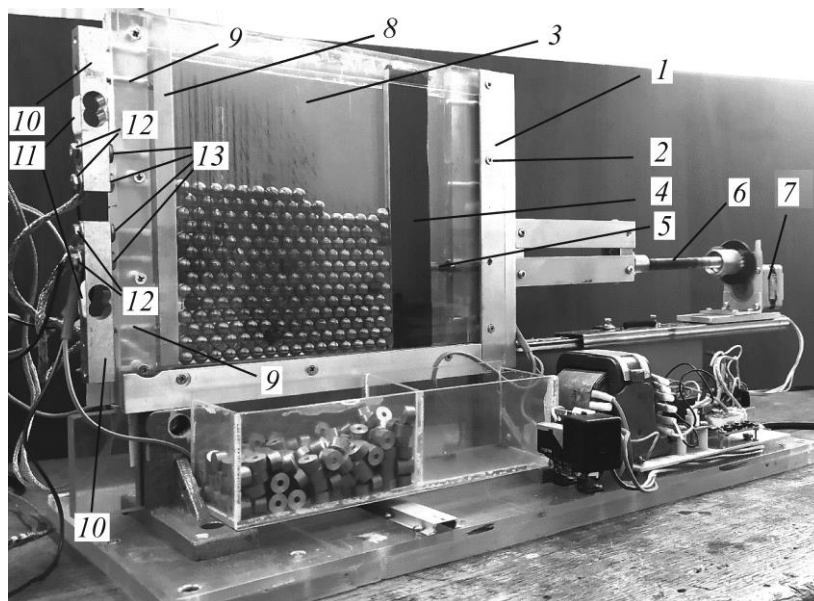


Рис. 1. Стенд двухосного циклического сжатия слоя шаров

Для увеличения изгибных деформаций (увеличения чувствительности) датчиков центральная часть их поперечного сечения ослаблялась сквозными отверстиями в форме цифры “8”. Над отверстиями с каждой стороны наклеивались по два фольговых тензорезистора 11, соединенных в общую мостовую схему. Сопротивление тензорезисторов 750 Ом. Готовые датчики с помощью винтов 12 жестко крепились на боковой стенке, вблизи ее центральной части. Зазор между поверхностями датчиков и стенки, необходимый для корректных измерений, обеспечивался металлическими прокладками 13.

Для проведения опыта задавалось начальное положение правой стенки и стенд заполнялся стальными калиброванными шариками диаметром 8 мм. Всего загружено 13 горизонтальных рядов по 16 шаров (рис. 2а). Длина образца в начальном состоянии 132 мм.

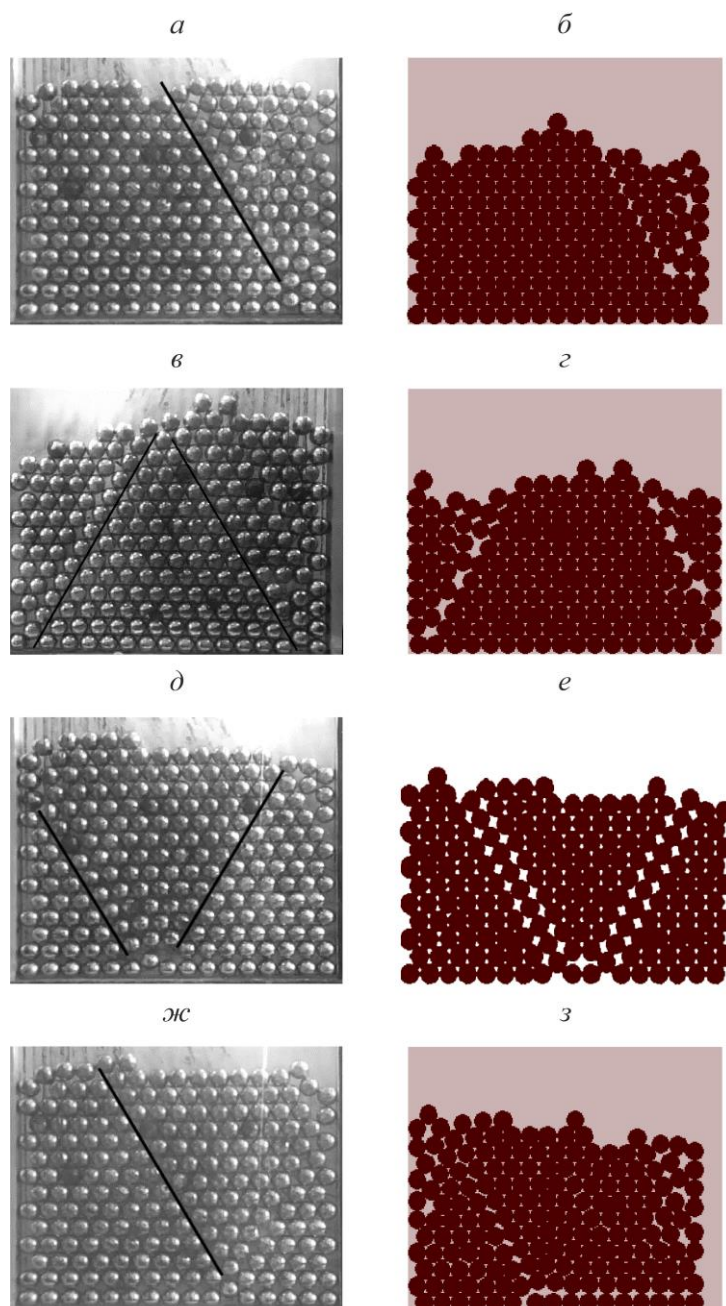


Рис. 2. Экспериментальные (а, в, д, жс) и расчетные (б, г, е, з) картины кластеров, образующихся при сжатии слоя шаров

Деформирование образца проводилось циклическим перемещением u подвижной стенки по закону $u = a \sin wt$, $a = 4$ мм, $w = 0.63$ 1/с, средняя скорость 1.6 мм/с, максимальное ускорение 1.58 мм/с² — много меньше характерной величины 9.8 м/с². При этом записывалось усилие на неподвижной стенке в зависимости от времени. Запись велась с помощью крейтовой системы L-Card. По вертикальной оси величина сжатия определялась весом материала. Велась непрерывная съемка. Данные экспериментов записывались в компьютер. Выполнено 18 000 циклов.

Опыты показали, что при деформировании в упаковке шаров появляются преимущественные направления, вдоль которых происходит скольжение и которыми образец разделяется на области — кластеры, которые почти не деформируются и перемещаются как отдельные блоки. При данных условиях нагружения реализуются четыре основных режима деформирования.

Как отмечалось, инерционные члены незначительны, поэтому роль правой и левой стенок практически одинакова. Однако в силу ряда случайных факторов картина деформирования будет, как правило, несимметричной. При режиме 1 только около одной из стенок образуется линия скольжения. При уменьшении расстояния между боковыми стенками призма, примыкающая к стенке, вытесняется вверх, при обратном движении стенки — смещается вниз. Это соответствует классическим решениям об активном и пассивном давлении грунта на подпорную стенку [10]. В режиме 2 реализуются две такие же призмы (рис. 2в, г). В этом случае величина проскальзывания на линиях скольжения будет в 2 раза меньше, чем при режиме 1.

Следующий режим (3) отличается от классического принципиально. Здесь около стенок также образуется по одной линии скольжения. Однако их ориентация такова, что при уменьшении расстояния между стенками примыкающие призмы движутся горизонтально, а вверх смещается только средний кластер (рис. 2д, е). При режиме 4 образуется только одна линия скольжения, второй кластер становится больше и смещается вверх с разрыхлением (рис. 2ж, з).

На рис. 2б, г, е, з приведены картины деформирования плоской упаковки упругих шаров, находящихся в поле силы тяжести, полученные расчетом методом дискретных элементов в программе Altair EDEMTM. Их сопоставление с экспериментами показало вполне удовлетворительное совпадение. Одни и те же краевые условия приводят к четырем основным режимам деформирования. Возможны и смешанные случаи. Главное, что различным режимам отвечают различные предельные нагрузки. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

В экспериментах непрерывно записывалось значения сигналов с датчиков силы. Частота оцифровки составляла 63.5 Гц. Запись велась как функция времени. На рис. 3а показана зависимость силы, действующей на левую стенку стенда, в зависимости от времени для первых трех циклов деформирования.

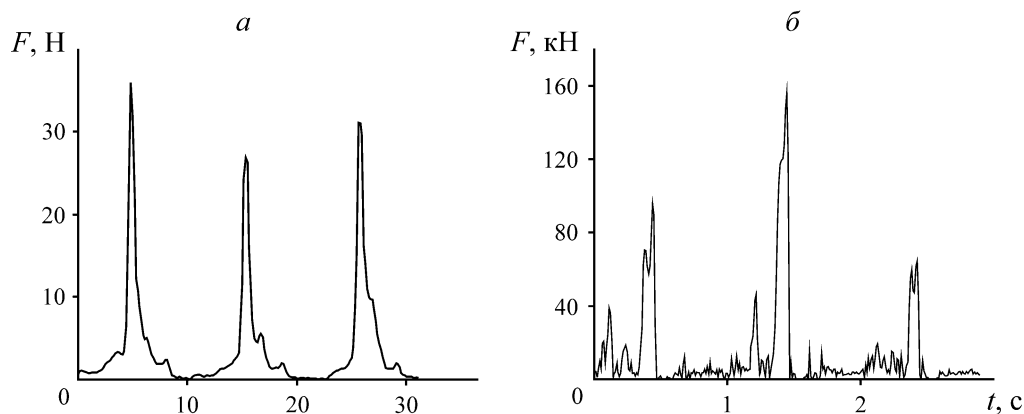


Рис. 3. Зависимость силы, действующей на вертикальную стенку, при циклическом сжатии слоя шаров в зависимости от времени: а — эксперимент; б — расчет методом дискретных элементов

Видно, что сила в течение цикла меняется немонотонно как при нагрузке (это примерно 5 с на экспериментальной диаграмме и 0.5 с на расчетной), так и на ветви разгрузки. На диаграммах силы наблюдаются несколько пиков. Они непосредственно связаны с образованием и эволюцией кластеров. Например, с перемещением или схлопыванием линии скольжения шаров и последующим образованием другой линии проскальзывания.

Рассмотрим поведение силы на протяжении большого числа циклов. На рис. 4а представлена экспериментальная диаграмма зависимости силы от времени, записанная в течение 400 с, на рис. 4б — соответствующая расчетная диаграмма для 50 с. Видно, что максимальное значение силы в цикле не постоянная величина, а изменяется от цикла к циклу. Причина этого — постоянное переключение режимов деформирования.

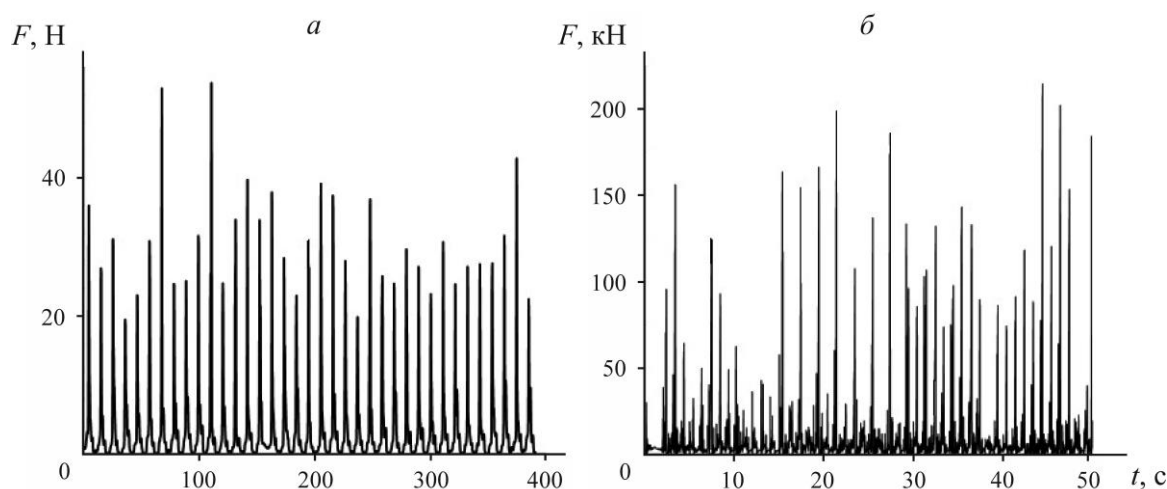


Рис. 4. Зависимость силы, действующей на вертикальную стенку, при циклическом сжатии слоя шаров в зависимости от времени: а — эксперимент; б — расчет методом дискретных элементов

На рис. 5 приведены максимальные значения силы в каждом цикле в зависимости от номера цикла. На экспериментальном графике величина силы в течение 150 циклов изменяется более чем в 3 раза, на расчетном — это изменение еще больше.

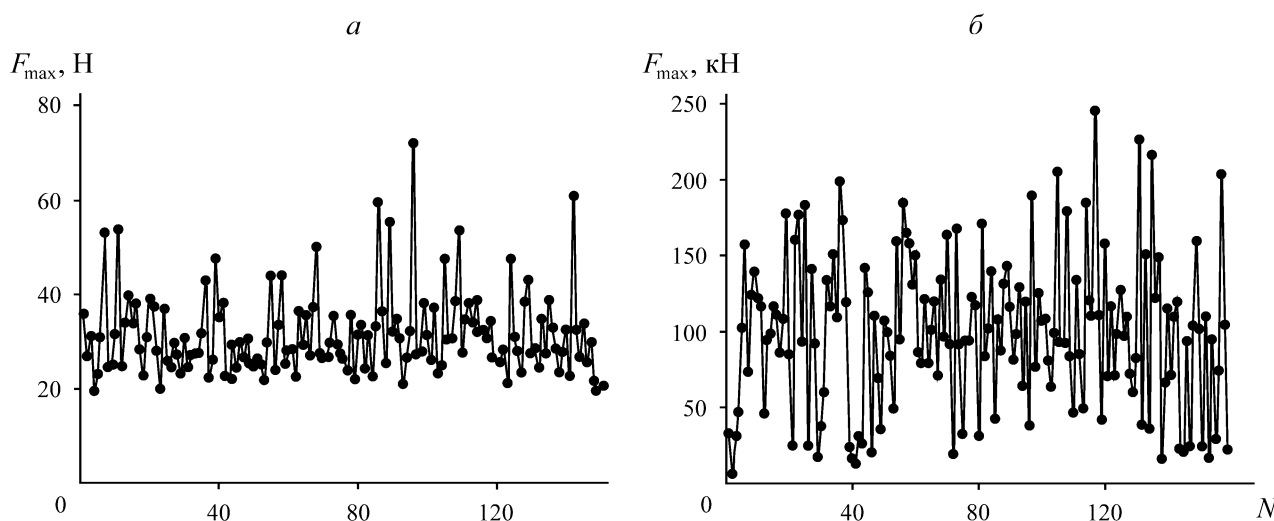


Рис. 5. Изменение максимальной силы в цикле при увеличении числа циклов: а — эксперимент; б — расчет методом дискретных элементов

Эксперименты и теоретический расчет показывают весьма сложную зависимость предельной нагрузки от номера цикла, т. е. от времени. Вопрос о поведении временных рядов возникает во многих областях, и его исследованию посвящено большое число работ (например, [11, 12]). Какой подход необходимо использовать в рассматриваемой ситуации? Прежде всего, исследуемый процесс не стохастический. Из механических соображений ясно, что упаковка частиц в любой момент времени “помнит” хотя бы в определенной степени свое исходное состояние, а также часть истории предыдущего процесса деформирования. Поэтому естественно для анализа использовать показатель Херста [13].

Показатель Херста определяется тангенсом угла наклона прямой, показанной на рис. 6. Здесь δN — ширина исследуемого интервала, R — размах на этом интервале, σ — стандартное отклонение на интервале δN . Величина показателя равна 0.84 для $N = 18\,000$ экспериментальных точек и 0.61 для 1600 теоретических значений, что больше 0.5. Следовательно, процесс обладает памятью о своих прежних состояниях и вся проблема сводится к данным о начальном состоянии упаковки и данным об истории ее деформирования.

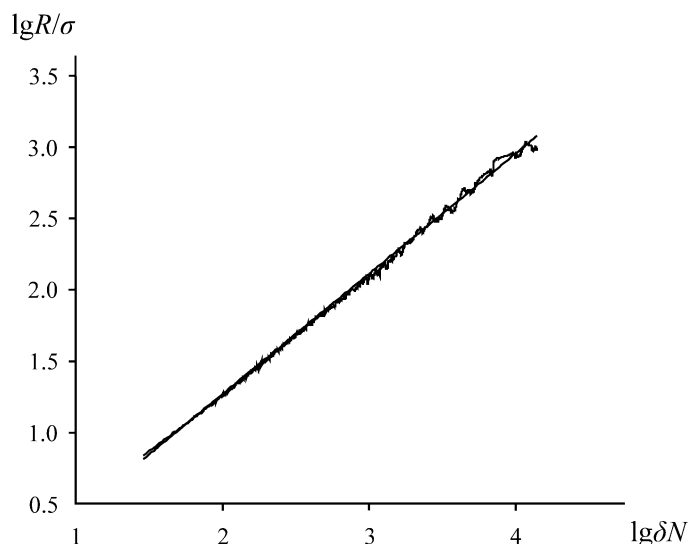


Рис. 6. Зависимость нормированного размаха максимальной силы в цикле от ширины анализируемого интервала

В лабораторном эксперименте можно наблюдать всю историю деформирования. В фундаментальных работах, располагая всей историей, можно поставить вопрос о том, какой именно режим деформирования будет реализован. Из проведенного эксперимента и расчетов следует, что режим 1 реализуется примерно за 100 циклов, затем он переходит в режим 2, который затем переходит в режим 3 и 4. Располагая этими данными и всей историей деформирования, можно ставить вопрос о конкретном ожидаемом режиме.

Если говорить о практических расчетах, то трудно получить данные о начальном состоянии и точной истории деформирования. Поэтому расчеты дают только диапазон предельных нагрузок, причем нижний предел может отличаться от верхнего в 2–3 раза. По-видимому, это будет наблюдаться и в других случаях нагружения упаковки шаров.

ВЫВОДЫ

Циклическое деформирование сыпучей среды сопровождается образованием кластеров, конфигурация которых изменяется с увеличением числа циклов. Максимальная нагрузка, реализуемая в одном цикле, зависит от конфигурации кластеров и в различных циклах может меняться в 2–3 раза.

Расчеты процессов деформирования областей сыпучей среды с размерами порядка нескольких десятков диаметров частиц должны учитывать образование и эволюцию кластеров. Оптимальным для этого является метод дискретных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Определяющие** законы механики грунтов. — М.: Мир, 1975. — 229 с.
2. **Соколовский В. В.** Статика сыпучей среды. — М.: Наука, 1990. — 272 с.
3. **Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д.** Математическая теория пластичности. — М.: Физматлит, 2001. — 704 с.
4. **Drescher A. and de Josselin de Jong G.** Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material, *J. Mech. Phys. Solids.*, 1972, Vol. 20, No. 5. — P. 337–351.
5. **Гольдштик М. А.** Процессы переноса в зернистом слое. — Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1984. — 163 с.
6. **Кочарян Г. Г., Марков В. К., Остапчук А. А., Павлов Д. В.** Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // *Физ. мезомеханика*. — 2013. — Т. 16. — № 5. — С. 5–15.
7. **Маков Ю. Н.** Эксперименты с вибрационным перемещением объемно-локализованных кластеров сыпучей среды: новые эффекты // *Акуст. журн.* — 2021. — Т. 67. — № 2. — С. 145–153.
8. **Бобряков А. П., Косых В. П., Ревуженко А. Ф.** Распространение в упаковке стеклянных шаров слабых продольных волн от периодических нагрузок // *ФТПРПИ*. — 2016. — № 5. — С. 40–47.
9. **Ревуженко А. Ф.** Механика сыпучей среды. — Новосибирск: Офсет, 2003. — 371 с.
10. **Надаи А.** Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2. — М.: Мир, 1969. — 863 с.
11. **Бокс Дж., Дженкинс Г.** Анализ временных рядов, прогноз и управление. Кн. 1. — М.: Мир, 1974. — 406 с.
12. **Бриллинджер Д.** Временные ряды. Обработка данных и теория. — М.: Мир, 1980. — 536 с.
13. **Лукк А. А., Дещеревский А. В., Сидорин А. Я., Сидорин И. А.** Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. — М.: ОИФЗ РАН, 1996. — 200 с.

Поступила в редакцию 19/VI 2022

После доработки 25/VI 2022

Принята к публикации 30/VI 2022