

## Результаты исследований напряженно-деформированного состояния геосред в задачах геомеханики, геотектоники, горного машиностроения

Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
г. Новосибирск  
gmmlab@misd.ru

### Аннотация

В статье кратко изложены новые, включая неопубликованные, результаты, полученные группой прикладной геомеханики отдела горной и строительной геотехники ИГД СО РАН при выполнении цикла работ в областях геомеханики, геотектоники, горного машиностроения. Для связанных с ними задач объединяющими стали дискретный характер и большие деформации геоматериалов – участников исследованных процессов. С учетом этого при их изучении использованы представления механики сыпучих сред и модифицированный метод дискретных элементов. На его основе разработана компьютерная программа, эффективность которой подтверждена результатами решений для тестовых задач. Численно и на физических моделях обоснована, а также подтверждена независимыми инструментальными измерениями связь абсолютных значений и ориентации повышенных тектонических напряжений в области месторождений полезных ископаемых с тектоникой вмещающих их эндокольцевых структур. Показана актуальность данного раздела геотектоники с точки зрения освоения запасов полезных ископаемых ложа Мирового океана. Решены задачи: повышения несущей способности грунтовых анкеров с гибкой тягой; снижения пиковых нагрузок на пластинчатые питатели раздробленной руды обогатительных фабрик; повышения точности объемных дозаторов непрерывного действия для трудносипучих материалов; противозерозионной защиты изгиба пневмотранспортного трубопровода; влияния формы сечения и скорости вращения горизонтального трубопровода на эффективность транспортирования в нем твердых частиц. Усовершенствована и передана горнопроектной организации ранее разработанная компьютерная программа для численного моделирования течения отбитой руды при добыче с поэтажным обрушением и выпуском под обрушенными породами; на основе результатов международного сотрудничества предложен критерий оптимизации упаковки полидисперсных сред.

### Ключевые слова:

геомеханика, геотектоника, механика сыпучих сред, метод дискретных элементов, компьютерные программы, тестовые и прикладные задачи, численное и физическое моделирование

## Investigation results of the stress-strain state of geomedia for the purposes of geomechanics, geotectonics, mining engineering

E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky, G. N. Khan

N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk  
gmmlab@misd.ru

### Abstract

The article summarises new results, including unpublished data, obtained by the Applied Geomechanics Group of the Department of Mining and Construction Geotechnics at the Mining Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences while performing a series of works in the fields of geomechanics, geotectonics, and mining engineering. The discrete nature and serious deformations of geomaterials – participants of the studied processes – were unifying factors for the tasks these disciplines have to solve. With this in mind, the concepts of loose media mechanics and the modified method of discrete elements were used to study these issues. On the basis of this method, a computer program is developed, the efficiency of which is confirmed by the solving results of test activities. Numerically and on physical models, we have substantiated and confirmed by independent instrumental measurements the dependence between absolute values and orientation of elevated tectonic stresses in the area of mineral deposits and the tectonics of the surrounding endocircular structures. The work shows the relevance of this section of geotectonics from the point of the development of mineral reserves of the World Ocean bed. The following tasks are solved: increase of bearing capacity of ground anchors with flexible traction; decrease of peak loads on plate feeders of crushed ore of concentrating factories; increase of accuracy of volumetric dosers of continuous action for hard-to-flow materials; anti-erosion protection of pneumatic transport pipe bend; about the influence of cross-sectional shape and rotation speed of horizontal pipeline on the efficiency of pneumatic transport. The previously developed computer program for numerical simulation of the flow of broken ore during mining with sub-level caving and release under caved rocks has been improved and given to the mining organization. On the basis of the international cooperation results, the optimisation criterion of polydisperse media packing has been proposed.

### Keywords:

geomechanics, geotectonics, bulk mechanics, method of discrete elements, computer programs, test- and applied tasks, numerical and physical modeling

## Введение

Значительная часть актуальных для горного дела и строительства задач связана со взаимодействием конструкций, машин (либо их рабочего органа) с ненарушенными, а также фрагментированными горными породами, т. е. сыпучими материалами. В случае тех и других технических решения, которые бы в полной мере удовлетворяли требования практики, могут быть найдены только с использованием адекватных моделей геосред, взаимодействующих с конкретными объектами, методов расчета и с опорой на результаты экспериментальных лабораторных и/или натурных исследований. Как известно [1–5], между горными породами и дискретными средами существует глубокая внутренняя связь. В ее основе лежат общие для них фундаментальные свойства – дилатансия, трение, сцепление  $c$  [6]. Они являются определяющими прочностные характеристики, поведение этих геоматериалов при нагружении и в целом их напряженно-деформированное состояние (НДС). Породный массив отличается от образованного сыпучим материалом с его  $c=0$  лишь заполнителем межзерновых пустот, который имеет  $c>0$  и иной, чем у элементов скелета, модуль упругости.

Осознание общности рассматриваемых сред привело к заключению о перспективности использования при решении связанных с ними задач такого эффективного «инструмента», к каким относится метод дискретных элементов (МДЭ) [7]. Он является вариантом метода частиц [8] и, по сравнению с другими известными, с прикладной точки зрения обладает существенными достоинствами: 1) универсальностью (применимостью для описания в целом сред со структурой); 2) способностью автоматически учитывать дилатансию – ключевое для формирования их НДС свойство; 3) отслеживать изменение НДС этих сред на допредельной и запредельной стадиях деформирования.

Проделанные в течение ряда лет с привлечением МДЭ собственные исследования привели к заключению о целесообразности модификации модели сред, используемой в его классическом варианте. Сделанные в этом направлении шаги дали положительные результаты [9]. Они же убедили в перспективности дальнейшего основывающегося на представлениях [6] развития работ по совершенствованию модели сред со структурой. В этой связи прокомментируем основные результаты, полученные в исследованиях. Они включают МДЭ, который модифицирован за счет общей для дискретных сред модели, компьютерную программу, основанную на данном его варианте, а также найденные с ее помощью и физического моделирования принципиально новые решения для ряда задач геомеханики, геотектоники и машиностроения. Статья, являясь обзорной, демонстрирует суть результатов без обсуждения исходных данных, принятых в этих задачах, а также использованных в опытах стендов, оборудования,

методик и детального анализа. С ними можно ознакомиться в публикациях, приведенных в работе.

## Модель среды со структурой и компьютерная программа

На рис. 1 показаны модели контактных сил взаимодействия между частицами  $\Omega_i$  и  $\Omega_j$  среды со структурой при  $c=0$  (рис. 1 а) и  $c>0$  (рис. 1 б), где  $c$  – сцепление на контакте.

Вариант МДЭ, включающий модель среды, приведенную на рис. 1, положен в основу компьютерной программы PM2D [10]. Она предназначена для решения в двумерной постановке задач механики горных пород, сыпучих сред, грунтов, композитных материалов.

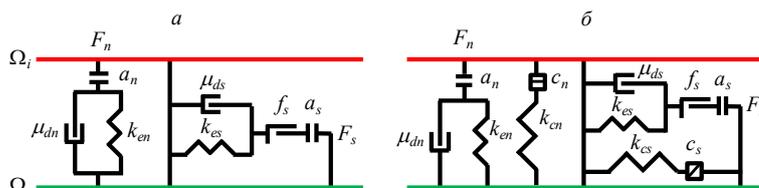


Рисунок 1. Компоненты линейной вязкоупругой модели несвязного (а) и связного (б) контактов:  $F_n, F_s$  – нормальная и касательная компоненты силы взаимодействия;  $a_n, a_s$  – установочные зазоры (installation gap) по нормали и касательной к контакту;  $\mu_{dn}, \mu_{ds}$  – коэффициенты вязкости по нормали и касательной к контакту;  $k_{en}, k_{es}$  – жесткость пружин по нормали и касательной к контакту;  $k_{cn}, k_{cs}$  – жесткость дополнительных пружин сцепления по нормали и касательной к контакту;  $f_s$  – коэффициент трения скольжения на контакте;  $c_n, c_s$  – компоненты сцепления по нормали и касательной к контакту.

Figure 1. Components of the linear viscoelastic model of non-cohesive (a) and cohesive (b) contacts:  $F_n, F_s$  – normal and tangential components of the interaction force;  $a_n, a_s$  – installation gaps along the normal and tangential to the contact;  $\mu_{dn}, \mu_{ds}$  – viscosity coefficients along the normal and tangential to the contact;  $k_{en}, k_{es}$  – stiffness of springs along the normal and tangential to the contact;  $k_{cn}, k_{cs}$  – stiffness of additional springs of adhesion along the normal and tangential to the contact;  $f_s$  – coefficient of sliding friction at the contact;  $c_n, c_s$  – components of adhesion along the normal and tangential to the contact.

## Тестовые задачи

Использование программы PM2D в анализе проблем горного производства предварено проверкой ее эффективности. Сделано это с привлечением двух групп тестовых задач – квазистатических и динамических (программа ФНИ, проект № АААА-А17-117121140065-7). При их выборе приняты во внимание известность в кругах специалистов и адекватность, надежно подтвержденная результатами физических экспериментов. В первую группу вошли задачи об НДС: 1) цилиндрического образца горных пород при испытаниях по бразильской схеме; 2) породного образца, ослабленного круговым отверстием, для случая двухосного сжатия; 3) надрезанной посередине балки на двух опорах, нагруженной сосредоточенной силой; 4) сыпучего материала при выпуске из плоского сходящегося канала (рис. 2-5).

Для задач по динамическому нагружению геосред, исследование которого – предмет ближайшей перспективы, тестовыми стали задачи об НДС массива горных пород при подрывании в нем зарядов взрывчатого вещества (ВВ) (рис. 6).

Сопоставим результаты вычислений для отдельных, наиболее ярких задач с известными для них же, полученными опытным путем [11–14]. Сделаем это с использованием в основном иллюстративного материала. Для всех тестов приведем расчетную картину разрушения, которую сравним с экспериментальной. В одном из примеров пока-

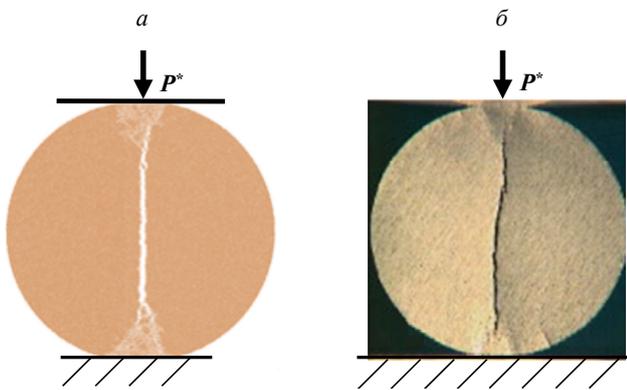


Рисунок 2. Расчетная (а) и экспериментальная (б) [11] картины разрушения образца горных пород при испытании по бразильской схеме.  
Figure 2. Calculated (a) and experimental (b) [11] failure patterns of a rock sample during the Brazilian scheme test.

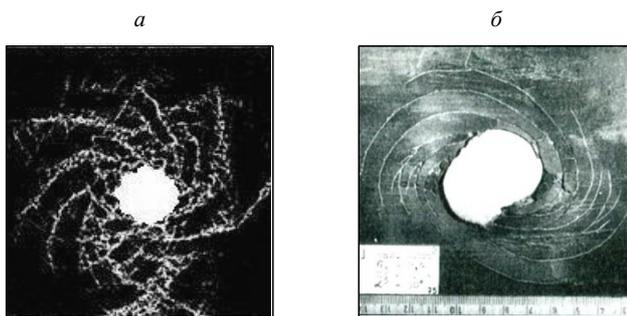


Рисунок 3. Деформированное состояние породного образца, ослабленного отверстием, при двухосном сжатии: а, б – результаты соответственно численного и физического [12] экспериментов.

Figure 3. Deformed condition of a rock sample, weakened by a hole, after biaxial compression: a, b – results of numerical and physical [12] experiments, respectively.

жем также вычисленное НДС образца на промежуточной стадии его деформирования. Такого рода «селекция» вызвана ограничениями на допустимое число рисунков в публикациях. Подрисуночные подписи – те комментарии, которых после изложенного выше для данных примеров достаточно, чтобы понять суть иллюстраций.

В свое время в работе [14] в механике сыпучих сред экспериментально обнаружен новый, на первый взгляд, неожиданный эффект. Оказалось, что с началом выпуска песка из плоского сходящегося канала, несмотря на симметрию конструкции и условий на ее внутренних границах, гравитационное течение сыпучего в емкости существенно неоднородно и асимметрично (рис. 5). Геоматериал по мере продвижения к ее выпускному отверстию системой характерных полос скольжения, развивающихся от его кромок по восстанию, разделяется на отдельные все более раздробляемые блоки. Решению задачи о течении сыпучих материалов в обсуждаемом канале посвящен ряд публикаций [16–18 и др.]. В данном случае результаты, полученные для нее численно (рис. 5 а–в), вместе с многократно воспроизведенными в опытах с песком (рис. 5 а'–в') использованы в качестве теста на адекватность модели среды и программы PM2D применительно к задачам механики дискретных сред. Из сравнения деформационных картин на рис. 5 следует, что обе успешно прошли это испытание.

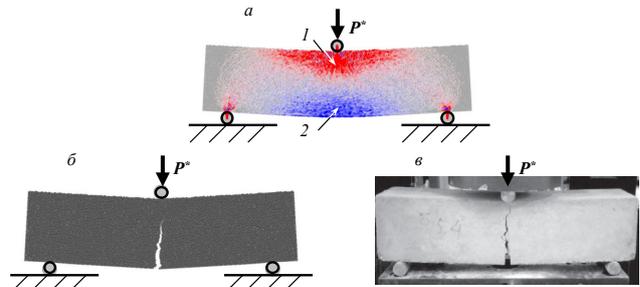


Рисунок 4. К НДС бетонной балки на двух опорах нагруженной центральной сосредоточенной силой  $P^*$ : а – напряженное состояние на стадии предразрушения, 1, 2 – сжимающие и растягивающие напряжения соответственно; б, в – расчетная и экспериментальная [13] картины разрушения.

Figure 4. To the stress-strain condition of a concrete beam on two supports loaded by a central concentrated force  $P^*$ : а – stress condition at the pre-fracture stage; 1, 2 – compressive and tensile stresses, correspondingly; б, в – design and experimental [13] patterns of fracture.

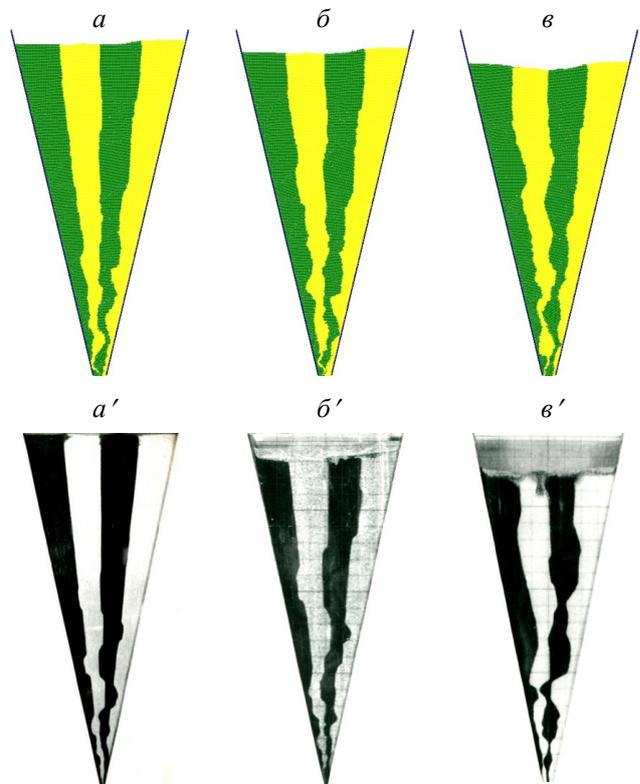


Рисунок 5. Характерные стадии деформирования сыпучего материала при асимметричном режиме гравитационного течения в плоском сходящемся канале: а–в – численный; а'–в' – физический [14] эксперименты.  
Figure 5. Characteristic deformation stages of bulk material under asymmetric regime of gravitational flow in a flat converging channel: а–в – numerical; а'–в' – physical [14] experiments.

Материалы тестирования, приведенные выше, убеждают в том, что использование компьютерной программы PM2D при анализе двумерных задач геомеханики, включая связанные с машиностроением, является гарантом адекватности найденных с ее помощью для них решений. Ниже кратко охарактеризуем ряд таких научных и инженерных геомеханических задач и прокомментируем найденные для них решения. Сделаем это, как и выше, с использованием иллюстраций, число которых, по уже отмеченной причине, ограничено. Приоритет отдадим

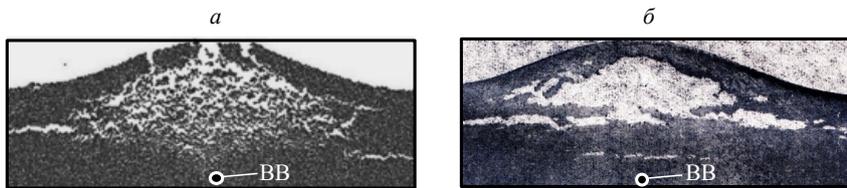


Рисунок 6. Результаты численного (а) и физического [15] (б) экспериментов по подрыванию в образцах материалов заглубленного заряда ВВ.

Figure 6. Results of numerical (a) and physical [15] (b) experiments on detonation of a buried explosive charge in material samples.

рисунок, поясняющим фундаментальные составляющие исследований.

#### Фундаментальные задачи геомеханики, геотектоники

Первыми покажем результаты исследований, связанные с проблемой горного давления. В труде [19] подчеркивается, что «источником, первопричиной всех проявлений горного давления при <...> разработке месторождений (полезных ископаемых) являются <...> тектонические напряжения от современных движений земной коры». Там же отмечается, что эти субгоризонтальные напряжения  $\sigma_T$  сжатия много больше диктуемых гравитацией. О механизме формирования  $\sigma_T$  в верхах коры «в геологической литературе высказан целый ряд гипотез, что только подчеркивает неясность природы рассматриваемого феномена» [20]. Таким образом, для антропогенной толщи Земли характерны аномально высокие значения  $\sigma_T$ , за которые ответственна геотектоника. Механизм их реализации неизвестен. Это, с учетом коррелируемости горного давления с тектоническими напряжениями, означает, что до конца понять его природу станет возможным лишь в том случае, если будет достигнут прогресс в понимании происхождения напряжений  $\sigma_T$ . Отсюда следует, что разрешение проблемы горного давления, генетически связанной с тектоникой Земли, напрямую зависит от успешного решения соответствующих геотектонических задач. Ниже рассмотрены три из них (программа ФНИ, проект № ААА-А-17-117121140065-7). Две первые позволяют проследить возможные изменения в НДС массива горных пород за период с начала формирования в нем месторождения полезных ископаемых до начала его разработки.

Карты различных регионов планеты [21, 22 и др.], литературные источники [23, 24 и др.], съемки из космоса свидетельствуют, что практически вся ее суша покрыта самого разного размера кольцевыми структурами (К-структурами) или образованиями. Это указывает на их высокую тектоническую значимость. О том же говорят приуроченность к данным морфообразованиям более 75 % месторождений разнообразных полезных ископаемых [23], включая углеводороды [25] и алмазы [24], а также сейсмичности [26]. Та же принадлежность свидетельствует об эндогенной природе К-структур. Затухающая в них со временем сейсмическая активность – проявление их продолжающегося сотни миллионов лет постдегазационного залечивания, которое характеризуется гравитационной консолидацией вмещающих пород, нарушенных актами дегазации и всплывания структур [27]. Осущест-

вляется залечивание при поддержке твердопрививной «вибрацией» и иной природы волновыми движениями литосферы. Этот процесс является нестационарным и чрезвычайно медленным даже по геологическим меркам; сопровождается изменением НДС породного массива в области кольцевых морфообразований в режимах stick-slip и крипа. В работе [28]

с учетом изложенного предложена принципиально новая версия, которая объясняет развитие напряжений  $\sigma_T$  в верхах земной коры тектоническими процессами, протекающими многие миллионы лет в ее залечивающихся эндогенных кольцевых структурах, в том числе осложненных месторождениями полезных ископаемых.

- В работе [29] в рамках новой гипотезы с использованием программы PM2D численно исследована эволюция НДС осложненного К-структурой породного массива с момента зарождения до начала отработки сформировавшегося в нем флюидогенного рудного месторождения. Результаты вычислений сопоставлены с материалами [30, 31], полученными для гипабиссального Капаевского месторождения магнетита при бурении и изучении его геофизическими методами, а также в [32] – экспериментально (рис. 7). Данное месторождение может рассматриваться как тектонотип множества других таких же. О механизме образования вмещающих их рудоконтролирующих структур «существуют самые противоречивые представления» [31].

Особенности деформированного состояния (ДС) массива горных пород, представленные на рис. 7 а, б, вместе с рассмотренными в [30–32] позволили заключить следующее. Генезис Капаевского месторождения, подобно его аналогам, является результатом взрывной, преимущественно водородной дегазации локального насыщенного флюидами глубинного очага. Одно из свидетельств этого – видимые на рис. 7 а радиальные разломы. Акт дегазации осуществлен с помощью всплывшей из этой очаговой области эндоэксплозивной кольцевой структуры. Сформировалось ее столбообразное сложенное брекчированным геоматериалом тело (см. рис. 7 б) в соответствии с закономерностями, подробно рассмотренными в [33]. Их реализация сопровождалась последовательной начиная от очага локализацией сдвигов вдоль системы конических поверхностей скольжения 1 и участков 2, развивавшейся по восстанию цилиндрической поверхности (см. рис. 7 в). Следствием этого стали дробление и разделение породного массива на отдельные блоки. На рис. 7 показано, что деформационные картины, полученные в опыте с песком на плоской модели (см. рис. 7 в), а также из решения задачи в двумерной постановке (см. рис. 7 г) в принципе мало чем отличаются от картины ДС, установленной для осесимметричной ситуации на натуре (см. рис. 7 б), т. е. согласуются с ней качественно. Иллюстрацией на рис. 7 д обращено внимание на тот факт, что полосы локализованных деформаций и дилатансионного разуплотнения геоматериалов, на самом деле имеют мощность  $m > t$  (см. рис. 7 г),

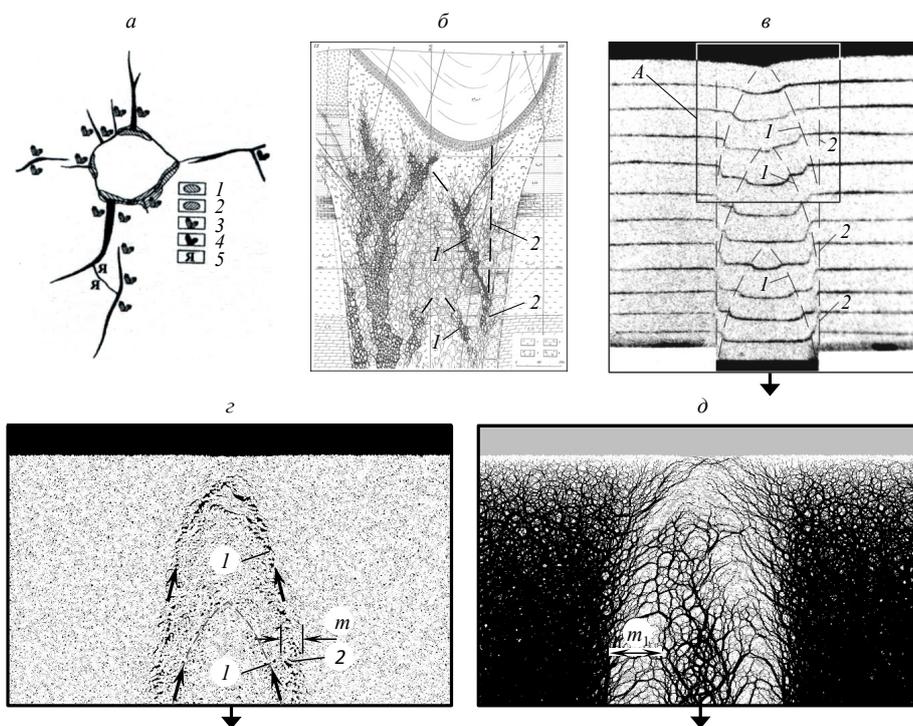


Рисунок 7. К генезису полигенных месторождений твердых полезных ископаемых: а – план Капаевского месторождения магнетита [31], черным выделено рудное тело, 1-5 – проявления соответственно ртути, меди, аметиста, горного хрусталя, яшмы; б – его центральное вертикальное сечение П-160 [30], темное – магнетит, 1 – конические полосы скольжения, 2 – участки цилиндрической полосы; в – результат опыта с песком [32], область А – аналог П-160; г, д – соответственно расчетные деформированное состояние и силовое поле в области образующейся К-структуры [29].

Figure 7. To the genesis of polygenic deposits of solid minerals: а – plan of Kapaevsky magnetite deposit [31], the ore body is highlighted in black, 1-5 – manifestations of mercury, copper, amethyst, rock crystal, jasper, respectively; б – its central vertical section П-160 [30], magnetite is dark-coloured, 1 – conical slip bands, 2 – sections of cylindrical band; в – result of the experiment with sand [32], area А – analogue of П-160; г, д – calculated deformed state and force field in the area of formed К-structure, respectively [29].

которая в опыте оказалась контрастно выраженной из-за концентрации разрывных деформаций в основном в центральной части сместителей.

Данные разупрочненные полосы, приоткрывающиеся в процессе рождения и эволюционирования К-структуры, представляют собой те единственные и уникальные каналы, которые обеспечивают миграцию к поверхности раскаленных газонасыщенных находящихся под сверхгидростатическим давлением глубинных флюидов, включая рудную магму [33]. Они перколируют с мантийных горизонтов сквозь литосферу по восстанию (см. рис. 7 в) под действием собственной подъемной силы, градиента давлений, твердых лунных приливов, как показано наклонными стрелками на рис. 7 г. Этот процесс носит, о чем уже говорилось, нестационарный характер: периодическому в ходе всплывания кольцевой структуры раскрытию поверхностей скольжения 1, 2 в массиве сопутствуют такие же акты «впрыскивания» в них снизу новых «порций» высокобарного рудосодержащего субстрата. В результате формирующееся в кольцевом морфообразовании месторождение превращается в полигенное. Его приуроченные к полосам сдвига локальные насыщенные рудным расплавом порово-трещинные раздувы превращаются в наиболее богатые полезным ископаемым залежи. Таким образом, происхождение приуроченных к эндогенным К-структурам месторождений полезных ископаемых и их

напряженно-деформированное состояние определяются геотектоническими и геомеханическими процессами, которые реализуются в ходе генезиса этих эксплозивных изометричных в плане трубо- или столбовых полигенных морфообразований.

• Прокомментируем результаты изучения изменений НДС породного массива в области эндогенной К-структуры с показанным происхождением в ходе ее поствзрывного залечивания (программа ФНИ, проект № АААА-А17-117121140065-7). Эти результаты, учитывая вероятность существования в ней месторождения, приобретают особую значимость. Именно они должны приниматься в качестве исходных данных при оценке возможных трансформаций его НДС за счет техногенного вмешательства.

Залечивание эксплозивных кольцевых морфообразований характеризуется погружением дна, носит циклический характер, протекает многие миллионы лет [27]. Спецификой

каждого единичного цикла является осуществление в два характерных продиктованных дилатансией шага [33]. С привлечением РМ2D исследовано изменение НДС геосреды в ходе реализации в теле эволюционирующей кольцевой структуры (детально в ее антропогенной толще) одного такого цикла. Численное моделирование показало, что напряженно-деформированное состояние слагающих ее горных пород в процессе консолидации оказывается существенно непостоянным и неоднородным (рис. 8). На рис. 8 в наклонная стрелка указывает на локальное поднятие поверхности в области К-структуры. Его появление – результат роста тектонических напряжений  $\sigma_T$  и потери в какой-то момент времени под их действием приповерхностным породным слоем дна морфообразования устойчивости. Подобный эффект наблюдали, в частности, в каменоломнях США и Канады [19].

Результаты, полученные при решении задач в двумерной постановке, позволили сделать следующие обобщения для трехмерных ситуаций: 1) происхождение сублатеральных тектонических напряжений  $\sigma_T$  сжатия в границах кольцевых морфообразований, включая осложненные месторождениями, связано с протекающим сотни миллионов лет, подчиняясь определенным закономерностям, процессом их залечивания; 2)  $\sigma_T$  зависят от прочностных и деформационных свойств пород, слагающих К-структуру и 3) больше, чем на порядок могут

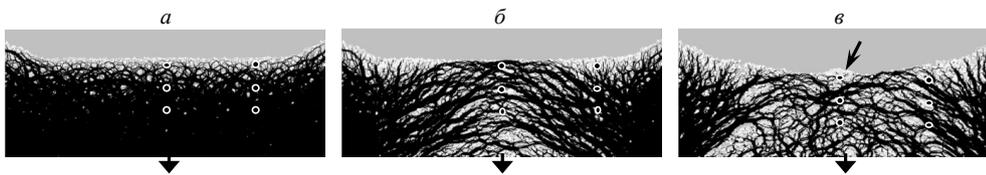


Рисунок 8. Характерные стадии НДС в пределах приповерхностной (антропогенной) толщи залечивающегося кольцевого морфообразования (силовые линии на фоне деформационных картин) [28].  
Figure 8. Characteristic stages of the stress-strain state within the near-surface (anthropogenic) layer of the healing ring morpho-formation (force lines against the background of deformation patterns) [28].

превышать вертикальные напряжения от веса пород; 4) в различных областях любого из горизонтов структуры напряжения  $\sigma_T$  в одно и то же время существенно разные; 5) их азимутальный вектор и значения в ее границах переменные; 6) изменяются они в ходе консолидации породного массива квазистатически и/или скачком.

На рис. 9 приведена совмещенная модель рельефа и геологического строения, осложненного месторождениями удароопасного Хибинского массива [34]. Он представляет собой одноименную эндогенную кольцевую структуру с рассматриваемым генезисом. Новейший анализ ее локальных палео стресс-состояний показывает «большое разнообразие положения осей главных нормальных напряжений и лишь их частичное соответствие таковым современного поля <...> (а также) как минимум два этапа активизации с относительно автономным развитием тектоники и соответствующих полей напряжений. <...> В целом для Хибинского ... массив(а) отмечена нестабильность ориентировок осей девиаторного сжатия и растяжения...» [35].

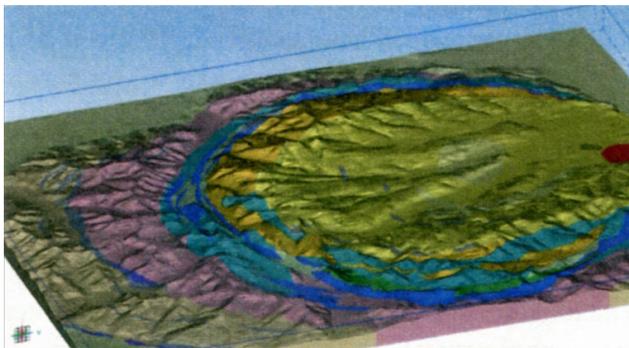


Рисунок 9. Совмещенная модель рельефа и геологического строения Хибинского массива [34].

Figure 9. Combined model of relief and geological structure of the Khibiny massif [34].

Таким образом, процитированными материалами, базирующимися на данных полевых инструментальных наблюдений над реальным геологическим объектом кольцевой формы, прямо подтверждается адекватность качественной составляющей результатов, полученных при численном в двумерной постановке моделировании изменения НДС породного массива в границах залечивающейся К-структуры. Отмеченные выше два этапа активизации эволюционирующего Хибинского массива отвечают двум основным этапам его консолидации. Один из них связан с погружением залечивающейся структуры, другой, не рассматриваемый в работе, – с ее активизацией и инверсионным воздыманием.

В целом результаты, полученные при исследовании особенностей формирования горного давления, служат ответом на вопрос о «происхождении наблюдаемых вариаций локальных деформаций при стабильности региональных силовых воздействий» [36].

• В рамках проекта № АААА-А17-117121140065-7 программы ФНИ исследована также актуальная проблема, которая стоит в одном ряду с рассмотренными выше и касается НДС ложа Мирового океана. В последние десятилетия «центр тяжести» мировой добычи многих полезных ископаемых заметно смещается в сторону его морей. Данная тенденция понятна. Осадочный чехол их дна содержит  $\sim 2 \cdot 10^7$  м<sup>3</sup> газогидратов [37], шельфы богаты далеко не до конца разведанными запасами нефти и газа [38], а срединно-океанические хребты (СОХ) осложнены черными курильщиками с их впечатляющими скоплениями массивных полисульфидов [39]. По последним данным, японскими геофизиками в акватории Пацифики обнаружено беспрецедентно гигантское месторождение крайне дефицитных редкоземельных металлов [40].

Промышленное освоение недр ложа Мирового океана наряду со специфическими трудностями морских (особенно высокоширотных) условий сталкивается со всеми теми, что преследуют извлечение ископаемых на суше. Главными, как и в ее случае, оказываются геотектонические. Для их разрешения привлекаются представления господствующей сегодня плит-тектонической парадигмы [41]. Однако ее положения разделяются далеко не всеми исследователями [42]. Есть основания считать, что данная позиция имеет право на существование. Весомый аргумент в пользу этого – отсутствие до сих пор ясного понимания физических механизмов формирования и эволюции структурно-тектонических ловушек полезных ископаемых как на континентах, так и на шельфах, в осадочном чехле абиссалий океанов, а также вдоль их срединных хребтов. Последние являются одним из трех ключевых элементов тектоники плит. Остановимся на результатах исследований СОХ, магматические расплавы в коре которых, судя по геофизическим данным, перемещаются к поверхности по «трубообразным каналам» [43], т. е. каналам, которые подобны приведенному на рис. 7.

В работе [44] выдвинута и экспериментально обоснована версия о связи срединно-океанических поднятий и осложняющей их гребень глобальной рифтовой системы, с вертикальной тектоникой. Исследования проделаны на специальном лабораторном стенде с использованием модельных материалов. Изучены особенности деформированного состояния выполненных из этих материалов сплошных, а также ослабленных системой нарушений слоев, моделирующих литосферу планеты, при образовании и развитии в них изометричных впадин. В опытах получены основные морфоструктурные элементы срединных хребтов; с единых позиций объяснена реализа-

ция у них ряда характерных черт. Показано, что пересекающие СОХ трансформные разломы океанского дна имеют возраст больший, чем у первых, являются «пассивными» участниками их сегментации, а также формирования вдоль их простирания латеральной «ступенчатости». Эффективность выдвинутой геотектонической гипотезы подтверждается сопоставлением результатов физических экспериментов с существующими фактическими данными (рис. 10). В соответствии с ней запускается механизм образования СОХ и их рифтогенеза прогибаниями литосферы, которые развиваются на фоне ее сжатия, связанного с сокращением размеров остывающей Земли [45], и сопровождаются нагнетанием мантийного геосубстрата под растущие срединно-океанические хребты. Новые модельные представления позволяют по-новому взглянуть на механическую сторону генезиса полезных ископаемых в условиях СОХ, а также на особенности развития тектонических напряжений  $\sigma_t$  и горного давления в области скопления этих продуктов подводной гидротермальной деятельности.

Рассмотренные результаты являются новыми фундаментальными в геомеханике, геотектонике, геологии.

#### Прикладные задачи

- В развитие исследований по ФЦП (соглашение с Минобрнауки РФ № 8183 от 27.07.12, проект «Разработка инновационной технологии и комплекса технических средств для крепления инженерных объектов грунтовыми анкерами с гибким тяговым элементом») в рамках проекта VIII.74.3.3. предложено новое конструктивное решение для анкеров с гибкой тягой (Э-анкеров), предусматривающее промежуточную опору естественного или искусственного происхождения. Они благодаря развитию «эйлеровского эффекта» при ее взаимодействии с этим опорным элементом приобретают повышенную несущую способность и улучшенные эксплуатационные характеристики [47]. Предназначены Э-анкеры для временного крепления откосов и бортов котлованов, включая сооружаемые под различного назначения инженерными объектами в слабых грунтах. Взаимодействие обсуждаемой анкерной конструкции с грунтовым основанием численно промоделировано с использованием программы PM2D. В условиях полигона «Зеленая горка» ИГД СО РАН проверены работоспособность Э-анкеров и оборудования для их установки в основание, а также приемы монтажа в него этих конструкций. С учетом полученных в исследованиях результатов рассмотрен вариант технологической схемы анкерования бортов котлована строящихся открытым способом станций метрополитена.

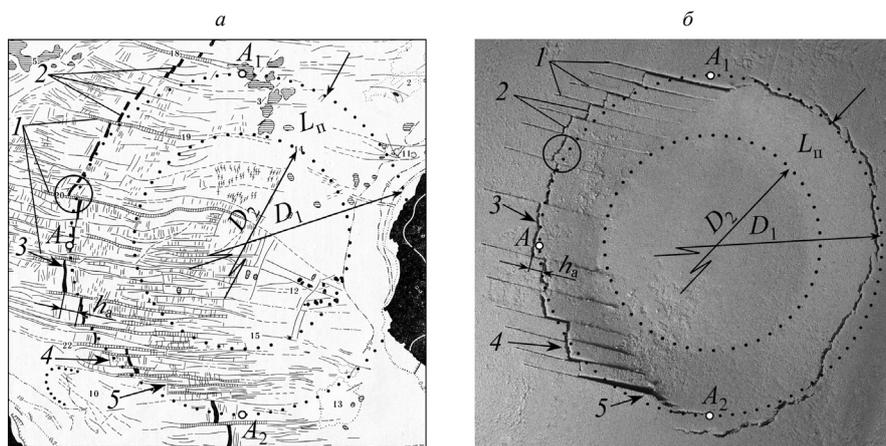


Рисунок 10. Деформационная картина дна Атлантики в области Канарской котловины (а); по [46] с изменениями); ДС модельного слоя после прогибания (б): 1 – трансформные разломы, 2 – проявления сегментации СОХ, 3–5 – общие детали деформированного состояния дна океана и модельного слоя; в кружке – область разлома Кейн.

Figure 10. Deformation pattern of the Atlantic floor in the Canary Basin region (a): according to [46] with changes; design system of the model layer after deflection (b): 1 – transform fractures, 2 – manifestations of segmentation of the mid-ocean ridge, 3–5 – general details of the deformed state of the ocean floor and the model layer; in circle – Kane fracture zone.

- На полотно подбункерных питателей обогащенных фабрик и питателей напольных складов со стороны их заполнителя – фрагментированных горных пород – действуют пиковые пусковые нагрузки  $P_{max}$ . В данной связи известны случаи разрушения этих транспортирующих устройств при первом же их пуске. Как парадокс воспринимается тот факт, что реализуется  $P_{max}$  даже при весьма незначительной толщине слоя перерабатываемого геоматериала в его емкостях-накопителях, т. е. при сравнительно малом вертикальном давлении на полотно питателей в статике.

В [48] численно с использованием программы PM2D, а также экспериментально на физических моделях исследовано изменение НДС раздробленной рудной массы в бункере при взаимодействии с подбункерным пластинчатым питателем на начальной и развитой стадиях его движения. Объяснен парадокс пиковой нагрузки. Обосновано, что связан он с развитием в геоматериале подбункерного узла с началом работы питателя, даже при маломощном слое геоматериала над ним, эффекта дилатансии. Показано, что абсолютное значение  $P_{max}$  зависит от физико-механических характеристик дробленой руды, конструктивных особенностей накопителя и его разгрузочного узла, а также стесненности в нем условий ее деформирования. Продемонстрирована возможность усовершенствования, с целью исключения действия  $P_{max}$  на полотно питателей, одной из традиционных схем подбункерного узла.

- В работе [49] численно и в опытах на моделях исследовано НДС раздробленных пород, заполняющих секцию напольного склада, при взаимодействии с расположенным под ней в галерее пластинчатым питателем. Показано, что известные для складских узлов разгрузки конструктивные решения не способны нейтрализовать дилатирование материала при перемещениях и, таким образом, предотвратить действие  $P_{max}$  на питатель с началом его работы. На основе результатов исследований

предложены новые технологический прием заполнения раздробленными породами напольных складов, а для узла разгрузки их секций – конструктивная схема. Экспериментально и численно подтверждено, что использование этих технических решений способно блокировать влияние дилатансии на напряженное состояние перерабатываемого сыпучего продукта и, как результат, снять актуальную для питателей напольных складов проблему пиковой нагрузки.

- В пищевой промышленности (в частности, Новосибирска и Минска) более 30 лет успешно эксплуатируются непрерывного действия объемные «Дозаторы ИГД» порошковых со слабым сцеплением материалов [50]. Разработаны устройства по инициативе СО РАН в рамках программы оказания Сибирским отделением помощи городу. Создана их конструкция на основе результатов экспериментальных исследований; до рабочего состояния доведена методом «проб и ошибок» в производственных условиях в ходе внедрения.

В связи с открывшимися перспективами расширения области применения этой проверенной временем разработки в рамках программы ФНИ (проект № ААА-А-17-117122090003-2) с привлечением компьютерной программы PM2D с опорой на опытные данные численно обоснованы рациональная конструктивная схема бункера дозатора, а также принципиально новая оптимальная конструкция его узла дозирования [51, 52]. Таким образом, для рассматриваемого устройства найдено решение более совершенное, чем известные. Его использование позволяет проектировать объемные дозаторы непрерывного действия, которые способны обеспечить выполнение возлагаемой на них операции с порошками ( $C > 0$ ), а также мелкофракционными сыпучими материалами ( $C = 0$ ) с точностью, принятой для весовых систем.

- В системах трубопроводного транспорта в горнодобывающей промышленности, металлургии, нефтегазовой отрасли и т. д. воздействие твердых частиц, переносимых потоком транспортирующей фазы, приводит к интенсивному эрозионному износу изгибов труб [53–55]. Эрозионные повреждения в некоторых случаях могут быть причиной катастрофических и опасных происшествий для персонала, оборудования и окружающей среды [56]. С привлечением численного и физического моделирования методом дискретных элементов на лабораторном макете [57] обоснован вариант противозерозионной защиты изгиба пневмотранспортного трубопровода путем установки наклонных пластин на внутренней поверхности изгиба (рис. 11). Транспортируемые частицы, попадая в ловушки между пластинами и поверхностью трубы, образуют защитный футерующий слой, препятствующий развитию эрозии. Установлены рациональные количество, геометрические параметры и координаты размещения пластин, обеспечивающие эффективную защиту изгиба от эрозионного износа.

- В технологиях проходки в горных породах и грунтах горизонтальных скважин с пневматическим выносом продуктов разрушения по центральному вращающемуся каналу возникает проблема неэффективного транспорта

буровой мелочи. Это может приводить к блокировке шламотранспортной магистрали и остановке процесса проходки. Такие осложнения могут возникать, в частности, при бурении в угольных пластах дегазационных скважин с обратной циркуляцией воздуха и вакуумным отбором проб, при расширении грунтовых скважин с напорным или вакуумным шламотранспортом [58–60] и т. п.

С привлечением физического и численного методом дискретных элементов моделирования (рис. 12) впервые показано, что для транспорта частиц по вращающемуся вокруг продольной оси трубопроводу наиболее выгодны не круглая, а эллиптическая или прямоугольная форма его поперечного сечения с соотношением размеров по осям 1 : 2. Для этих форм при оптимальной скорости вращения во взвешенном состоянии находится наибольшее количество частиц [61]. За счет этого концентрация транспортируемого материала в воздушном потоке увеличивается, а необходимый расход воздуха уменьшается. В итоге процесс удаления буровой мелочи улучшается и повышается эффективность проходки горизонтальных скважин.

#### Результаты сотрудничества с организациями страны и международного

- Разработчиками с целью апробации и получения экспертной оценки консалтинговой компании «СПб-Гипрошахт» передана компьютерная программа SideDraw. Предназначена она для численного моделирования гравитационного течения отбитой руды в системе добычи с поэтажным обрушением и выпуском под обрушенными породами. Создана программа в ИГД СО РАН на основе результатов [62, 63], полученных в ходе совместных исследований с Техническим университетом Лулео (Швеция) в рамках национальной программы «Горное дело 2000» (Mining 2000) этой страны. Результаты [там же] использованы также шведской стороной при обосновании Программ 2013 и 2016 гг. [64–66] стратегических исследований и инноваций шведской горно-металлургической промышленности (Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry), ориентированных на период до 2030 г.

- Согласно отзыву компании «СПб-Гипрошахт», программа SideDraw была привлечена для «...моделирования технологий действующих рудников <...>, например, на подземном руднике ОАО "Олкон" ПАО "Северсталь" <...>, а также для проверочного моделирования проектной технологии», которая совместно с зарубежными партнерами разработана «СПб-Гипрошахт». Специалисты компании пришли к заключению об «универсальности <...> и достаточности программы SideDraw <...> для принятия обоснованных решений по конструированию системы добычи».

- В 2018 г. в рамках совместного инициированного и профинансированного Корейским институтом строительных технологий международного проекта «МДЭ-подходы к оптимизации упаковки полидисперсного зернистого материала и содержания импрегнированного полипропиленом мультифиламентного стекловолокна в горячей асфальтной смеси» предложены и численно с привлечением программы PM2D обоснованы новый в до-

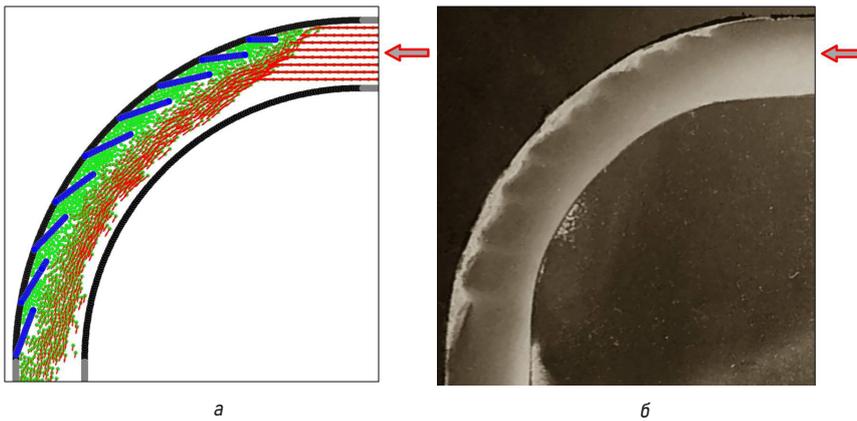


Рисунок 11. Самофутеровка изгиба трубопровода транспортируемыми частицами: а) численная модель; б) физический эксперимент. Стрелкой показано направление потока воздуха.  
Figure 11. Self-fouling of a pipeline bend by transported particles: а) – numerical model; б) – physical experiment. The arrow shows the direction of air flow.

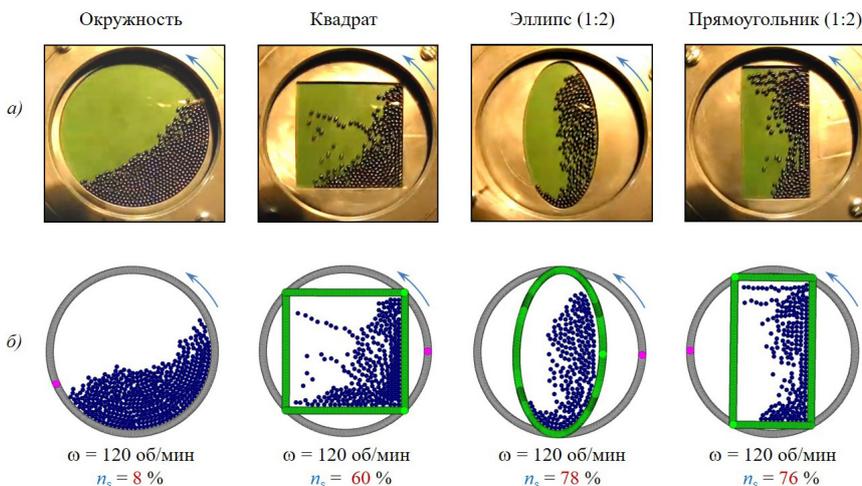


Рисунок 12. Картины распределения частиц в поперечном сечении трубопровода при его вращении с оптимальной для данной формы угловой скоростью  $\omega$ : а) физический эксперимент, б) расчет;  $n_s$  – доля взвешенных частиц в просвете трубопровода.  
Figure 12. Distribution patterns of particles in the pipeline cross-section at its rotation with optimal for this shape angular velocity  $\omega$ : а) physical experiment, б) calculation;  $n_s$  – percent of suspended particles in the pipeline clean space.

рожном строительстве эффективный критерий оптимизации упаковки полидисперсных сред – ее максимальная учитывающая их кусковатость структурная прочность [6], а также пути достижения такой прочности. Полученным в ИГД решениям корейской стороной дана высокая оценка. Развитие работ в этом направлении актуально для разработки составов дорожных покрытий, бетонов и других строительных, а также композитных материалов, в горном деле – для создания различных с наперед заданными характеристиками видов закладки и искусственных целиков. Это свидетельствует о фундаментальном характере и уже полученных результатов, и планируемых новых.

## Заключение

Таким образом, применительно к методу дискретных элементов усовершенствована модель среды со структурой, и на его основе разработана компьютерная программа. Она предназначена для решения двумерных квазистатических и динамических задач о напряженно-деформи-

рованном состоянии горных пород, грунтов, сыпучих и композитных материалов. С использованием программы и физического моделирования изучены актуальные для горного дела и геотектоники проблемы и задачи. При их решении получены принципиально новые геомеханические, геотектонические научные, а также прикладного характера результаты. Адекватность решений подтверждена материалами тестирования, данными лабораторных опытов и/или натуральных наблюдений и измерений.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Brace, W. F. Dilatancy in the fracture of crystalline rock / W. F. Brace, B. W. Paulding, C. Scholz // *Journal of Geophysical Research*. – 1966. – Vol. 71. – № 16. – P. 3939–3952.
2. Шемякин, Е. И. Некоторые модели деформирования горных пород и грунтов / Е. И. Шемякин, А. Ф. Ревуженко, С. Б. Стажевский // *Разрушение и деформирование твердой среды взрывом*. – М.: Недра, 1976. – С. 204–208.
3. Николаевский, В. Н. Обзор: земная кора, дилатансия и землетрясения / В. Н. Николаевский // *Механика*. Вып. 28. Новое в зарубежной науке. – М.: Мир, 1982. – С. 133–215.
4. Садовский, М. А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва / М. А. Садовский. – М.: Наука, 2004. – 440 с.
5. Гольдин, С. В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения / С. В. Гольдин // *Физика Земли*. – 2004. – № 10. – С. 37–54.
6. Ревуженко, А. Ф. О структурно-дилатансионной прочности горных пород / А. Ф. Ревуженко, С. Б. Стажевский, Е. И. Шемякин // *ДАН СССР*. – 1989. – Т. 305, № 5. – С. 1077–1080.
7. Cundall, P. A. A discrete numerical model for granular assemblies / P. A. Cundall, O. D. L. Strack // *Geotechnique*. – 1979. – Vol. 29. – P. 47–65.
8. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
9. Хан, Г. Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // *Физическая мезомеханика* / Г. Н. Хан. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 109–114.
10. Хан, Г. Н. PM2D. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615760 / Г. Н. Хан, А. Л. Ланис. – 2015.

11. Литвинский, Г. Г. Исследование влияния формы образца при испытаниях на раскол / Г. Г. Литвинский, Ю. Н. Биляшева / Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск, 2013. – Вып. 39. – С. 44–51.
12. Zischinsky, U. Effects of rock bolts in tunnelling. Anchor in theory and practice / U. Zischinsky // Proceedings of the International Symposium on Anchors in Theory and Practice. Salzburg, Austria. 9–10 October 1995. – Widmann (ed.). Rotterdam, Balkema, 1995. – P. 147–154.
13. Богданова, Е. Р. Экспериментальное исследование бетона, дисперсно армированного синтетической полипропиленовой фиброй / Е. Р. Богданова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 2. – С. 91–98.
14. Ревуженко, А. Ф. О несимметрии пластического течения в сходящемся симметричном канале / А. Ф. Ревуженко, С. Б. Стажевский, Е. И. Шемякин // ФТПРПИ. – 1977. – № 3. – С. 3–9.
15. Никифоровский, В. С. Динамическое разрушение твердых тел / В. С. Никифоровский, Е. И. Шемякин. – Новосибирск: Наука, 1979. – 272 с.
16. Бабаков, В. Кинематически возможное несимметричное поле скоростей в задаче о плоском сходящемся канале / В. Бабаков, А. Шиманская // ФТПРПИ. – 2011. – № 6. – С. 30–34.
17. Клишин, С. В. Численное моделирование выпуска раздробленного материала методами дискретных элементов и клеточных автоматов / С. В. Клишин, С. В. Лавриков, А. Ф. Ревуженко / Труды XX Всероссийской научной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (7–11 октября 2013 г.). – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2013. – С. 208–215.
18. Бушманова, О. П. Численное моделирование процесса деформирования материала в сходящемся канале в условиях возникновения линий локализации сдвигов / О. П. Бушманова, С. Б. Бушманов // ФТПРПИ. – 2009. – № 4. – С. 33–38.
19. Айтматов, И. Т. Методы и результаты изучения напряженного состояния скальных массивов и создание на их основе эффективных способов управления горным давлением при подземной разработке руд / И. Т. Айтматов, В. И. Ахматов, В. И. Борщ-Компоницец // ФТПРПИ. – 1987. – № 4. – С. 3–22.
20. Курленя, М. В. Напряженное состояние породных массивов в верхних слоях земной коры / М. В. Курленя, Г. И. Кулаков // ФТПРПИ. – 1998. – № 3. – С. 3–9.
21. Космогеологическая карта линейных и кольцевых структур территории СССР / гл. ред. А. Д. Щеглов. – М.: Мингео СССР, 1979.
22. Космогеологическая карта дочетвертичных образований Северо-Восточной части Балтийского щита / под ред. О. Я. Даркшевича. – М.: Мингео СССР, 1987.
23. Космическая информация в геологии / под ред. академиков: А. В. Пейве, А. В. Сидоренко, А. Л. Яншина [и др.]. – М.: Наука, 1983. – 534 с.
24. Серокуров, Ю. Н. Космические методы при прогнозе и поисках месторождений алмазов / Ю. Н. Серокуров, В. Д. Колмыков, В. М. Зуев. – М.: Недра, 2001. – 198 с.
25. Смирнова, М. Н. Нефтегазоносные кольцевые структуры и научно-методические аспекты их изучения / М. Н. Смирнова // Геология нефти и газа. – 1997. – № 9. – С. 51–55.
26. Стажевский, С. Б. Кольцевые структуры как источник сейсмичности / С. Б. Стажевский // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 23–32.
27. Стажевский, С. Б. Механика становления и развития некоторых морфоструктур Земли: Ч. I. К происхождению и эволюции Патомского кратера / С. Б. Стажевский // ФТПРПИ. – 2011. – № 4. – С. 23–39.
28. Стажевский, С. Б. О связи повышенных тектонических напряжений с эндогенными кольцевыми структурами / С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан // ФТПРПИ. – 2017. – № 6. – С. 50–60.
29. Стажевский, С. Б. Об изменениях напряженно-деформированного состояния месторождений полезных ископаемых / С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т. 2, № 2. – С. 157–162.
30. Фон-дер-Флаасс, Г. С. Структура Нерюндинского и Капаевского месторождений магнетита (Ангарская железнорудная провинция) / Г. С. Фон-дер-Флаасс // Геология и геофизика. – 1977. – № 6. – С. 63–69.
31. Амиржанов, А. А. Признаки глубинной дегазации в рудоносных диатремах Ангарской провинции: материалы Всероссийской конференции «Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы» (22–25 апреля 2008 г.) / А. А. Амиржанов. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 29–32.
32. Стажевский, С. Б. Кольцевые структуры – вклад в генезис и напряженно-деформированное состояние месторождения полезных ископаемых / С. Б. Стажевский // ФТПРПИ. – 2004. – № 3. – С. 45–51.
33. Стажевский, С. Б. Кольцевые структуры в эволюции небесных тел Солнечной системы / С. Б. Стажевский. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – 106 с.
34. Лукичев, С. В. Информационная поддержка освоения и эксплуатации месторождений Хибинского горнорудного района / С. В. Лукичев, О. В. Наговицын // ФТПРПИ. – 2012. – № 6. – С. 98–105.
35. Сим, Л. А. Напряженно-деформированное состояние Хибинского и Ковдорского массивов. Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов IV Всероссийской конференции с международным участием (6–9 июня 2017 г.) / Л. А. Сим, А. В. Маринин, Д. В. Жиров. – М.: ГЕОС, 2017. – С. 91.
36. Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов / Ю. О. Кузьмин // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 78–103.
37. Геологический словарь. Т. 1 / под ред. О. В. Петрова. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. – 432 с.

38. Мировой океан. Т. 1. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане / под ред. Л. И. Лобковского. – М.: Научный мир, 2013. – 644 с.
39. Дубинин, Е. П. Океанический рифтогенез / Е. П. Дубинин, С. А. Ушаков. – М.: ГЕОС, 2001. – 293 с.
40. Takaya, Y. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements / Y. Takaya, K. Yasukawa, T. Kawasaki [et al.] // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – № 1. – Article number: 5763.
41. Ле Пишон, К. С. Спрединг океанского дна и дрейф континентов. Новая глобальная тектоника / К. С. Ле Пишон – М.: Мир, 1974. – С. 93–132.
42. Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы / под ред. В. Н. Шолпо. – М.: ОИФЗ РАН, 2002. – 236 с.
43. Magde, L. Crustal magma plumbing within a segment of the Mid-Atlantic Ridge, 35°N / L. Magde, A. Barclay, D. Toomey [et al.] // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2000. – Vol. 175. – № 1–2. – P. 55–67.
44. Стажевский, С. Б. О триггерах и механизме океанского рифтогенеза. Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов IV Всероссийской конференции с международным участием (6–9 июня 2017 г.) / С. Б. Стажевский. – М.: ГЕОС, 2017. – С. 95–96.
45. Хаин, В. Е. Геотектоника с основами геодинамики / В. Е. Хаин, М. Г. Ломизе. – М.: КДУ, 2005. – 560 с.
46. Мазарович, А. О. Разломы северной части Центральной Атлантики / А. О. Мазарович // *Геотектоника*. – 1986. – № 5. – С. 25–34.
47. Крамаджян, А. А. О повышении несущей способности грунтовых анкеров с гибкой тягой / А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, С. Б. Стажевский [и др.] // *ФТПРПИ*. – 2014. – № 6. – С. 96–106.
48. Крамаджян, А. А. О механизме формирования пиковой нагрузки на подбункерные питатели обогатительных фабрик / А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, С. Б. Стажевский [и др.] // *ФТПРПИ*. – 2015. – № 6. – С. 19–27.
49. Крамаджян, А. А. О пике нагрузок на питатели напольных складов полезных ископаемых / А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, С. Б. Стажевский [и др.] // *ФТПРПИ*. – 2016. – № 5. – С. 30–39.
50. А.с. СССР № 1557033. Дозатор сыпучих материалов / С. Б. Стажевский, Е. И. Шемякин, А. А. Крамаджян [и др.] // *Опубл. в БИ*. – 1990. – № 14.
51. Русин, Е. П. К обоснованию конструкции бункера-накопителя для высокоточного объемного дозатора / Е. П. Русин, Г. Н. Хан // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. – 2020. – Т. 2. – С. 173–179.
52. Русин, Е. П. Высокоточный объемный дозатор порошковых материалов / Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан // *Прикладная механика и техническая физика*, 2022. – Т. 63, № 3. – С. 173–182.
53. Смолдырев, А. Е. Гидравлический и пневматический транспорт в металлургии и горном деле / А. Е. Смолдырев. – М.: Металлургия, 1967. – 357 с.
54. Venkatesh, E. S. Erosion damage in oil and gas wells. Paper No. SPE-15183-MS – SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Billings, Montana, USA, May 19–21, 1986. – SPE, 1986. – P. 489–500.
55. Изюмченко, Д. В. Эксплуатация газовых скважин в условиях активного водо- и пескопроявления / Д. В. Изюмченко, Е. В. Мандрик, С. А. Мельников [и др.] // *Научно-технический сборник Вести газовой науки*. – 2018. – Т. 33, № 1. – С. 235–242.
56. Barton, N. A. Erosion in elbows in hydrocarbon production systems. Review document. Research Report 115 / N. A. Barton. – Health & Safety Executive. – East Kilbride, Glasgow, UK: TÜV NEL Limited, 2003. – 35 p.
57. Русин, Е. П. К разработке стенда для моделирования элементов систем переработки зернистых материалов / Е. П. Русин // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. – 2021. – Т. 2, № 4. – С. 99–107.
58. Han, X. Pressure drop characteristics of reverse circulation pneumatic cuttings removal during coal seam drilling / X. Han, S. Song, J. Li // *Science Progress*. – 2020. – Vol. 103, № 2. – P. 1–20.
59. Данилов, Б. Б. Определение условий транспортирования пластичного грунта сжатым воздухом по горизонтальному трубопроводу при бурении скважин / Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий, Е. Н. Шер // *ФТПРПИ*. – 2014. – № 3. – С. 66–74.
60. Данилов, Б. Б. Определение длины горизонтальной пневмотранспортной магистрали бурового станка для удаления шлама разрежением / Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий // *ФТПРПИ*. – 2016. – № 4. – С. 80–86.
61. Хан, Г. Н. О влиянии формы сечения и скорости вращения горизонтального трубопровода на эффективность транспортирования твердых частиц / Г. Н. Хан, Е. П. Русин // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. – 2023. – Т. 2, № 1. – С. 12–17.
62. Stazhevsky, S. B., Lindqvist, P. A. (Eds.). Gravity flow of disrupted rock. Final report. – Luleå, Sweden: Luleå University of Technology, Novosibirsk, Russian Federation: Institute of Mining. – 1995.
63. Стажевский, С. Б. Об особенностях течения раздробленных горных пород при добыче руд с поэтажным обрушением / С. Б. Стажевский // *ФТПРПИ*. – 1996. – № 5. – С. 72–89.
64. Lindqvist, P.-A. Sustainable mining and innovation for the future – research, development and innovation program. August 2012 / P.-A. Lindqvist. – Luleå, Sweden: Rock Tech Centre, Luleå University of Technology, 2012. – 51 p.
65. Björkman, B., Bäckblom, G., Greberg, J., Weihed, P. (Eds.). Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry (STRIM). April 2013. – Luleå, Sweden: Rock Tech Centre. – 2013. – 104 p.
66. Greberg, J., Andersson, C., Weihed, P. (Eds.). Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry (STRIM). 2016. – Luleå, Sweden: Rock Tech Centre. – 2016. – 120 p.

## References

1. Brace, W. F. Dilatancy in the fracture of crystalline rock / W. F. Brace, B. W. Paulding, C. Scholz // *Journal of Geophysical Research*. – 1966. – Vol. 71. – № 16. – P. 3939–3952.

2. Shemyakin, E. I. Nekotorye modeli deformirovaniya gornyh porod i gruntov [Some models of deformation of rocks and grounds] / E. I. Shemyakin, A. F. Revuzhenko, S. B. Stazhevsky // Razrushenie i deformirovanie tverdoj sredy vzryvom [Destruction and Deformation of Solid Medium by Explosion]. – M.: Nedra, 1976. – P. 204–208.
3. Nikolaevsky, V. N. Obzor: zemnaya kora, dilatatsiya i zemletryaseniya [Review: Earth crust, dilatancy and earthquakes] / V. N. Nikolaevsky // Mekhanika. Vyp. 28. Novoe v zarubezhnoj nauke [Mechanics. Iss. 28. New in Foreign Science]. – M.: Mir, 1982. – P. 133–215.
4. Sadovsky, M. A. Izbrannye trudy. Geofizika i fizika vzryva [Selected works. Geophysics and physics of explosion] / M. A. Sadovsky. – M.: Nauka, 2004. – 440 p.
5. Goldin, S. V. Dilatatsiya, pereupakovka i zemletryaseniya [Dilatancy, repacking and earthquakes] / S. V. Goldin // Fizika Zemli [Physics of the Earth]. – 2004. – № 10. – P. 37–54.
6. Revuzhenko, A. F. O strukturno-dilatatsionnoj prochnosti gornyh porod [About structural-dilatancy strength of rocks] / A. F. Revuzhenko, S. B. Stazhevsky, E. I. Shemyakin // DAN USSR. – 1989. – Vol. 305, № 5. – P. 1077–1080.
7. Cundall, P. A. A discrete numerical model for granular assemblies / P. A. Cundall, O. D. L. Strack // Geotechnique. – 1979. – Vol. 29. – P. 47–65.
8. Hockney, R. Chislennoe modelirovanie metodom chastic [Numerical modelling by particle method] / R. Hockney, J. Eastwood. – M.: Mir, 1987. – 640 p.
9. Khan, G. N. O nesimmetrichnom rezhime razrusheniya massiva gornyh porod v okrestnosti polosti [About the asymmetric fracture mode of the rock massif in the vicinity of a cavity] // Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics] / G. N. Khan. – 2008. – Vol. 11, № 1. – P. 109–114.
10. Khan, G. N. PM2D. – Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2015615760 [PM2D. – Certificate of state registration of the computer program № 2015615760] / G. N. Khan, A. L. Lanis. – 2015.
11. Litvinsky, G. G. Investigation on the influence of the sample's shape during splitting tests / G. G. Litvinsky, Y. N. Bikyasheva // Collection of Scientific Papers of the Donbass State Technical University. – 2013. – Vol. 39. – P. 44–51.
12. Zischinsky, U. Effects of rock bolts in tunnelling. Anchor in theory and practice / U. Zischinsky // Proceedings of the International Symposium on Anchors in Theory and Practice. Salzburg, Austria. 9–10 October 1995. – Widmann (ed.). Rotterdam, Balkema, 1995. – P. 147–154.
13. Bogdanova, E. R. Eksperimentalnoe issledovanie betona, dispersno armirovannogo sinteticheskoy polipropilenoj fibroj [Experimental study of concrete, reinforced with synthetic polypropylene fibre] / E. R. Bogdanova // Proceedings of the Petersburg University of Railway Engineering. – 2015. – № 2. – P. 91–98.
14. Revuzhenko, A. F. O nesimmetrii plasticheskogo techeniya v skhodyashchemsya simmetrichnom kanale [About the asymmetry of plastic flow in a converging symmetrical channel] / A. F. Revuzhenko, S. B. Stazhevskiy, E. I. Shemyakin // FTPRPI. – 1977. – № 3. – P. 3–9.
15. Nikiforovsky, V. S. Dinamicheskoe razrushenie tverdyh tel [Dynamic destruction of solid bodies] / V. S. Nikiforovsky, E. I. Shemyakin. – Novosibirsk: Nauka, 1979. – 272 p.
16. Babakov, V. Kinematicheski vozmozhnoe nesimmetrichnoe pole skorostej v zadache o ploskom skhodyashchemsya kanale [Kinematically possible asymmetric velocity field in the problem about a flat converging channel] / V. Babakov, A. Shimanskaya // FTPRPI. – 2011. – № 6. – P. 30–34.
17. Klishin, S. V. Chislennoe modelirovanie vypuska razdroblennogo materiala metodami diskretnyh elementov i kletochnyh avtomatov [Numerical simulation of the release of split material by methods of discrete elements and cellular automata] / S. V. Klishin, S. V. Lavrikov, A. F. Revuzhenko / Proceedings of the XX All-Russian Scientific Conference 'Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior' (October 7–11, 2013). – Novosibirsk: SB RAS, 2013. – P. 208–215.
18. Bushmanova, O. P. Chislennoe modelirovanie processa deformirovaniya materiala v skhodyashchemsya kanale v usloviyah voznikoveniya linij lokalizacii sdvigoj [Numerical modeling of the process of material's deformation in a converging channel in the conditions of shear-fault localisation lines] / O. P. Bushmanova, S. B. Bushmanov // FTPRPI. – 2009. – № 4. – P. 33–38.
19. Aitmatov, I. T. Metody i rezultaty izucheniya napryazhennogo sostoyaniya skalnyh massivov i sozdanie na ih osnove effektivnyh sposobov upravleniya gornym davleniem pri podzemnoj razrabotke rud [Methods and results of studying the stressed state of rock massifs and creating effective methods on their basis for controlling the mountain pressure during underground ore development] / I. T. Aitmatov, V. I. Akhmatov, V. I. Borsch-Komponyets [et al.] // FTPRPI. – 1987. – № 4. – P. 3–22.
20. Kurlenya, M. V. Napryazhennoe sostoyanie porodnyh massivov v verhnih sloyah zemnoj kory [Stress state of rock massifs in the upper layers of the Earth's crust] / M. V. Kurlenya, G. I. Kulakov // FTPRPI. – 1998. – № 3. – P. 3–9.
21. Kosmogeologicheskaya karta linejnyh i kolcevyyh struktur territorii SSSR [Cosmogeological map of linear and ring structures of the USSR territory]. – M.: Ministry of Geology of the USSR, 1979.
22. Kosmogeologicheskaya karta dochetvertichnyh obrazovaniy Severo-Vostochnoj chasti Baltijskogo shchita [Cosmogeological map of pre-Quaternary formations in the North-Eastern part of the Baltic Shield]. – M.: Ministry of Geology of the USSR, 1987.
23. Kosmicheskaya informaciya v geologii [Space information in geology] / ed. by academicians: A. V. Peive, A. V. Sidorenko, A. L. Yanshin [et al.]. – Moscow: Nauka, 1983. – 534 p.
24. Serokurov, Yu. N. Kosmicheskie metody pri prognoze i poiskah mestorozhdenij almazov [Space methods in forecasting and prospecting diamond deposits] / Yu. N. Serokurov, V. D. Kolmykov, V. M. Zuev. – M.: Nedra, 2001. – 198 p.
25. Smirnova, M. N. Neftegazonosnye kolcevye struktury i nauchno-metodicheskie aspekty ih izucheniya [Oil and

- gas bearing ring structures and scientific-methodological aspects of their study] / M. N. Smirnova // *Geologiya nefti i gaza* [Oil and Gas Geology]. – 1997. – № 9. – P. 51–55.
26. Stazhevsky, S. B. Kolcevye struktury kak istochnik sejsmichnosti [Ring structures as a source of seismicity] / S. B. Stazhevsky // *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. – 2006. – Vol. 9, № 1. – P. 23–32.
  27. Stazhevsky, S. B. Mekhanika stanovleniya i razvitiya nekotorykh morfostruktur Zemli: Ch. I. K proiskhozhdeniyu i evolyucii Patomskogo kratera [Mechanics of formation and development of some morphostructures of the Earth: Part I. To the origin and evolution of the Patom crater] / S. B. Stazhevsky // *FTPRPI*. – 2011. – № 4. – P. 23–39.
  28. Stazhevsky, S. B. O svyazi povyshennykh tektonicheskikh napryazhenij s endogennymi kolcevymi strukturami [On the dependence of the increased tectonic stresses with endogenous ring structures] / S. B. Stazhevsky, G. N. Khan // *FTPRPI*. – 2017. – № 6. – P. 50–60.
  29. Stazhevsky, S. B. Ob izmeneniyah napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh [About changes in the stress-strain state of mineral deposits] / S. B. Stazhevsky, G. N. Khan // *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk* [Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences]. – 2017. – Vol. 2, № 2. – P. 157–162.
  30. Von-der-Flaass, G. S. Struktura Neryundinskogo i Kapaevskogo mestorozhdenij magnetita (Angarskaya zheleznorudnaya provinciya) [Structure of the Neryunda and Kapaevo magnetite deposits (Angara iron-ore province)] / G. S. Von-der-Flaass // *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics]. – 1977. – № 6. – P. 63–69.
  31. Amirzhanov, A. A. Priznaki glubinnoj degazacii v rudonosnykh diatremah Angarskoj provincii [Signs of deep degassing in ore-bearing diatremes of the Angarsk province]: Materials of the All-Russian Conference 'Degassing of the Earth: Geodynamics, Geofluids, Oil, Gas and their Parageneses' (April 22–25, 2008) / A. A. Amirzhanov. – M.: GEOS, 2008. – P. 29–32.
  32. Stazhevsky, S. B. Kolcevye struktury – vklad v genezis i napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie mestorozhdeniya poleznykh iskopaemykh [Ring structures – contribution to the genesis and stress-strain state of mineral deposit] / S. B. Stazhevsky // *FTPRPI*. – 2004. – № 3. – P. 45–51.
  33. Stazhevsky, S. B. Kolcevye struktury v evolyucii nebesnykh tel Solnechnoj sistemy [Ring structures in the evolution of celestial bodies of the Solar System] / S. B. Stazhevsky. – Novosibirsk: SB RAS, 1998. – 106 p.
  34. Lukichev, S. V. Informacionnaya podderzhka osvoeniya i ekspluatatsii mestorozhdenij Hibinskogo gornorudnogo rajona [Information support of development and exploitation of deposits of the Khibiny mining district] / S. V. Lukichev, O. V. Nagovitsyn // *FTPRPI*. – 2012. – № 6. – P. 98–105.
  35. Sim, L. A. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie Hibinskogo i Kovdorskogo massivov. Triggernye efekty v geosistemah [Stress-strain state of the Khibiny and Kovdor massifs. Trigger effects in geosystems]: Abstracts of IV All-Russian Conference with International Participation (June 6–9, 2017) / L. A. Sim, A. V. Marinin, D. V. Zhironov. – M.: GEOS, 2017. – P. 91.
  36. Kuzmin, Yu. O. Sovremennaya geodinamika: ot dvizhenij zemnoj kory do monitoringa otvetstvennykh obyektov [Modern geodynamics: from the movements of the Earth's crust to the monitoring of critical objects] / Yu. O. Kuzmin // *Fizika Zemli* [Earth's Physics]. – 2019. – № 1. – P. 78–103.
  37. *Geologicheskij slovar* [Geological dictionary]. Vol. 1. – SPb.: VSEGEI, 2010. – 432 p.
  38. Mirovoj okean. T. 1. Geologiya i tektonika okeana. Katastroficheskie yavleniya v okeane [World ocean. Vol. 1. Geology and ocean tectonics. Catastrophic phenomena in the ocean] / ed. by L. I. Lobkovsky. – M.: Nauchny Mir, 2013. – 644 p.
  39. Dubinin, E. P. Okeanicheskiy riftogenez [Oceanic riftogenesis] / E. P. Dubinin, S. A. Ushakov. – M.: GEOS, 2001. – 293 p.
  40. Takaya, Y. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements / Y. Takaya, K. Yasukawa, T. Kawasaki [et al.] // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – № 1. – Article number: 5763.
  41. Le Pichon, K. S. Sprejding okeanskogo dna i drejff kontinentov. Novaya globalnaya tektonika [Spreading of the ocean floor and drift of continents. New global tectonics] / K. S. Le Pichon. – M.: Mir, 1974. – P. 93–132.
  42. Spornye aspekty tektoniki plit i vozmozhnye alternativy [Disputable aspects of plate tectonics and possible alternatives]. – M.: OIFZ RAN, 2002. – 236 p.
  43. Magde, L. Crustal magma plumbing within a segment of the Mid-Atlantic Ridge, 35°N / L. Magde, A. Barclay, D. Toomey [et al.] // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2000. – Vol. 175. – № 1–2. – P. 55–67.
  44. Stazhevsky, S. B. O triggerah i mekhanizme okeanskogo riftogeneza. Triggernye efekty v geosistemah [About triggers and mechanism of oceanic riftogenesis. Trigger effects in geosystems]: Abstracts of the IV All-Russian Conference with International Participation (June 6–9, 2017) / S. B. Stazhevsky. – M.: GEOS, 2017. – P. 95–96.
  45. Khain, V. E. Geotektonika s osnovami geodinamiki [Geotectonics with the basics of geodynamics] / V. E. Khain, M. G. Lomise. – M.: KDU, 2005. – 560 p.
  46. Mazarovich, A. O. Razlomy severnoj chasti Centralnoj Atlantiki [Faults of the northern part of the Central Atlantic] / A. O. Mazarovich // *Geotektonika* [Geotectonics]. – 1986. – № 5. – P. 25–34.
  47. Kramadzhyan, A. A. O povyshenii nesushchej sposobnosti gruntovykh ankerov s gibkoj tyagoj [Increasing the load-bearing capacity of ground anchors with flexible tie rod] / A. A. Kramadzhyan, E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky [et al.] // *FTPRPI*. – 2014. – № 6. – P. 96–106.
  48. Kramadzhyan, A. A. O mekhanizme formirovaniya pikovoj nagruzki na podbunkernye pitateli obogatitelnykh fabrik [About the mechanism of peak load formation on the sub-bunker feeders of the enrichment factories] / A. A. Kramadzhyan, E. P. Rusin, S. B. Stazhevskiy [et al.] // *FTPRPI*. – 2015. – № 6. – P. 19–27.

49. Kramadzhyan, A. A. O pike nagruzok na pitately napolnykh skladov poleznykh iskopaemykh [About peak loads on the feeders of the ground-level storages of minerals] / A. A. Kramadzhyan, E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky [et al.] // FT-PRPI. – 2016. – № 5. – P. 30–39.
50. A.s. USSR № 1557033. Dozator sypuchih materialov [Divider of bulk materials] / S. B. Stazhevsky, E. I. Shemyakin, A. A. Kramadzhyan [et al.] // Publ. in Bl. – 1990. – № 14.
51. Rusin, E. P. Substantiation of the design of the hopper-on-copier for the high-precision volumetric divider / E. P. Rusin, G. N. Khan // Interexpo GEO-Siberia. – 2020. – Vol. 2. – P. 173–179.
52. Rusin, E. P. Vysokotochnyy obyemnyy dozator poroshkovykh materialov [High-precision volumetric doser of powder materials] / E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky, G. N. Khan // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Applied Mechanics and Technical Physics]. – 2022. – Vol. 63. – № 3. – P. 173–182.
53. Smoldyrev, A. E. Gidravlicheskiy i pnevmaticheskij transport v metallurgii i gornom dele [Hydraulic and pneumatic transport in metallurgy and mining] / A. E. Smoldyrev. – M.: Metallurgiya [Metallurgy], 1967. – 357 p.
54. Venkatesh, E. S. Erosion damage in oil and gas wells. Paper No. SPE-15183-MS – SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Billings, Montana, USA, May 19–21, 1986. – SPE, 1986. – P. 489–500.
55. Iziumchenko, D. V. Ekspluatatsiya gazovykh skvazhin v usloviyakh aktivnogo vodo- i peskoproyavleniya [Operation of gas wells in conditions of active water and sand eruption] / D. V. Iziumchenko, E. V. Mandrik, S. A. Melnikov [et al.] // Scientific and Technical Collection 'Vesti gazovoy nauki [Gas Science News]'. – 2018. – Vol. 33, № 1. – P. 235–242.
56. Barton, N. A. Erosion in elbows in hydrocarbon production systems. Review document. Research Report 115 / N. A. Barton. – Health & Safety Executive. – East Kilbride, Glasgow, UK: TÜV NEL Limited, 2003. – 35 p.
57. Rusin, E. P. K razrabotke stenda dlya modelirovaniya elementov sistem pererabotki zernistykh materialov [To the development of the stand for modelling the elements of the processing systems of granular materials] / E. P. Rusin // Interexpo GEO-Siberia. – 2021. – Vol. 2, № 4. – P. 99–107.
58. Han, X. Pressure drop characteristics of reverse circulation pneumatic cuttings removal during coal seam drilling / X. Han, S. Song, J. Li // Science Progress. – 2020. – Vol. 103, № 2. – P. 1–20.
59. Danilov, B. B. Opredelenie usloviy transportirovaniya plastichnogo grunta szhatym vozduhom po gorizontalmu truboprovodu pri burenii skvazhin [Determination of transportation conditions of plastic soil by compressed air through a horizontal pipeline during well drilling] / B. B. Danilov, B. N. Smolyanitsky, E. N. Sher // FT-PRPI. – 2014. – № 3. – P. 66–74.
60. Danilov, B. B. Opredelenie dliny gorizontальной pnevmo-transportnoy magistrali burovogo stanka dlya udaleniya shlama razrezheniem [Determination of the length of the horizontal pneumatic conveying line of the drilling machine for sludge displacement by rarefaction] / B. B. Danilov, B. N. Smolyanitsky // FT-PRPI. – 2016. – № 4. – P. 80–86.
61. Khan, G. N. O vliyaniy formy secheniya i skorosti vrashcheniya gorizontalnogo truboprovoda na effektivnost transportirovaniya tverdykh chastic [On the influence of the cross-sectional shape and rotation speed of the horizontal pipeline on the efficiency of transporting solid particles] / G. N. Khan, E. P. Rusin // Interexpo Geo-Siberia. – 2023. – Vol. 2. – № 1. – P. 12–17.
62. Stazhevsky, S. B., Lindqvist, P. A. (Eds.). Gravity flow of disrupted rock. Final report. – Luleå, Sweden: Luleå University of Technology, Novosibirsk, Russian Federation: Institute of Mining. – 1995.
63. Stazhevsky, S. B. Ob osobennostyakh techeniya razdroblyennykh gornyykh porod pri dobyche rud s podetazhnym obrusheniem [About the flow of disrupted rocks during ore mining with sub-level caving] / S. B. Stazhevsky // FT-PRPI. – 1996. – № 5. – P. 72–89.
64. Lindqvist, P.-A. Sustainable mining and innovation for the future – research, development and innovation program. August 2012 / P.-A. Lindqvist. – Luleå, Sweden: Rock Tech Centre, Luleå University of Technology, 2012. – 51 p.
65. Björkman, B., Bäckblom, G., Greberg, J., Weihed, P. (Eds.). Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry (STRIM). April 2013. – Luleå, Sweden: Rock Tech Centre. – 2013. – 104 p.
66. Greberg, J., Andersson, C., Weihed, P. (Eds.). Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry (STRIM). 2016. – Luleå, Sweden: Rock Tech Centre. – 2016. – 120 p.

#### Благодарность (госзадание):

Исследования выполнены в рамках ПФНИ, проекты VIII.74.3.3, AAAA-A17-117121140065-7, AAA-A17-117122090003-2.

#### Acknowledgments (state task)

The research was done within the frames of the Fundamental Research Program, projects VIII.74.3.3, AAAA-A17-117121140065-7, AAA-A17-117122090003-2.

#### Информация об авторах:

**Евгений Павлович Русин** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН; Scopus Author ID: 20434728100, <https://orcid.org/0000-0001-7220-8589> (630091, Российская Федерация, г. Новосибирск, Красный пр-кт, д. 54; e-mail: gmmlab@misd.ru).

**Стажевский Станислав Борисович** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН; Scopus Author ID: 6601922039, <http://orcid.org/0000-0002-8185-6884> (630091, Российская Федерация, г. Новосибирск, Красный пр-кт, д. 54; e-mail: stazh@misd.ru).

**Хан Гил Нам** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН; Scopus Author ID: 7102006001, <https://orcid.org/0000-0003-4114-7730> (630091, Российская Федерация, г. Новосибирск, Красный пр-кт, д. 54; e-mail: khan.igd@gmail.com).

#### About the authors:

**Evgeny P. Rusin** – Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher at the Mining and Building Geomachinery Department, N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 20434728100, <https://orcid.org/0000-0001-7220-8589> (54 Krasny ave., Novosibirsk, 630091 Russian Federation; e-mail: gmmlab@misd.ru).

**Stanislav B. Stazhevsky** – Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher at the Mining and Building Geomachinery Department, N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 6601922039, <http://orcid.org/0000-0002-8185-6884> (54 Krasny ave., Novosibirsk, 630091 Russian Federation; e-mail: stazh@misd.ru).

**Khan Gil Nam** – Candidate of Sciences (Mathematics), Senior Researcher at the Mining and Building Geomachinery Department, N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 7102006001, <https://orcid.org/0000-0003-4114-7730> (54 Krasny ave., Novosibirsk, 630091 Russian Federation; e-mail: khan.igd@gmail.com).

#### Для цитирования:

Русин, Е. П. Результаты исследований напряженно-деформированного состояния геосред в задачах геомеханики, геотектоники, горного машиностроения / Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 87–101.

#### For citation:

Rusin, E. P. Rezultaty issledovaniy napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya geosred v zadachakh geomekhaniki, geotektoniki, gornogo mashinostroeniya [Investigation results of the stress-strain state of geomechanics for the purposes of geomechanics, geotectonics, mining engineering] / E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky, G. N. Khan // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2025. – № 3 (79). – P. 87–101.

Дата поступления статьи: 14.11.2024

Прошла рецензирование: 25.01.2025

Принято решение о публикации: 01.04.2025

Received: 14.11.2024

Reviewed: 25.01.2025

Accepted: 01.04.2025