

# История развития и перспективы дальнейшего применения метода геодинамического районирования

А.С. Батугин<sup>1</sup>✉, Н.Е. Мороз<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ as-bat@mail.ru

**Резюме:** Рассмотрены предпосылки появления метода геодинамического районирования во ВНИМИ как головной организации по проблеме горных ударов в Советском Союзе. Метод предназначен для районирования месторождений по степени геодинамической опасности и направлен на оценку напряженного состояния горных массивов по принципу «от общего к частному». Метод предусматривает выявление иерархически упорядоченной блочной структуры горного массива; установление динамики взаимодействия блоков и оценку напряженного состояния блочного массива, в том числе после начала разработки месторождения; разработку рекомендаций по безопасному ведению горных работ с учетом полученных результатов и возможного изменения напряженного состояния массива под влиянием горных работ. Метод также нашел применение на нефтяных месторождениях для выявления перспективных мест расположения скважин, при выявлении геодинамически опасных зон вдоль трасс железных дорог и трубопроводов, селитебных и промышленных зон. Теоретические положения о взаимодействии глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов при ведении горных работ, представления о предельно напряженном состоянии слоя земной коры от поверхности до некоторой глубины нашли подтверждения на практике и в научных разработках в разных странах мира. Проведение работ по геодинамическому районированию угольных и рудных месторождений, склонных и опасных по горным ударам, предусмотрено действующими инструктивными документами по безопасности. ВНИМИ продолжает развивать теоретические вопросы геодинамического районирования и ведет практические работы по геомеханической безопасности на месторождениях, что показано на примере Камчатского региона.

**Ключевые слова:** геодинамика недр, блочная структура, сейсмичность, горный удар, газодинамическое явление

**Для цитирования:** Батугин А.С., Мороз Н.Е. История развития и перспективы дальнейшего применения метода геодинамического районирования. *Горная промышленность*. 2024;(3S):14–19. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-14-19>

## History of development and prospects for further application of the geodynamic zoning method

A.S. Batugin<sup>1</sup>✉, N.E. Moroz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>VNIMI JSC, St. Petersburg, Russian Federation

✉ as-bat@mail.ru

**Abstract:** The paper describes the background for the development of the geodynamic zoning method at VNIMI, which was the leading organization studying the problem of rock bursts, in the Soviet Union. This method is intended for zoning of deposits by the degree of geodynamic hazard and is aimed at assessing the stressed state of rock massifs using the general-to-specific principle. The method involves identification of hierarchically ordered block structure of the rock massifs; determination of the interaction dynamics between the blocks and assessment of the stressed state of the block massifs, including the states upon commencement of the field development; development of recommendations for safe mining operations with account of the results obtained and possible changes in the stressed state of the rock mass under the impact of the mining operations. The method has also found its application in oil fields to identify promising locations for wells, in identifying geodynamically dangerous zones along the railroads and pipelines, residential and industrial areas. Theoretical provisions on the interaction of global geodynamic and local geomechanical processes during mining operations, concepts of the critically stressed state of the Earth's crust from the day-time surface down to a certain depth have been confirmed in practice and in research findings in different countries of the world. Conducting work on geodynamic zoning of coal and ore deposits that are prone to and hazardous in terms of rock bursts is stipulated by the current safety instructions. VNIMI continues to develop theoretical aspects of geodynamic zoning and performs practical work on geomechanical safety in the fields, which is shown using a case study of the Kamchatka region.

**Keywords:** subsurface geodynamics, block structure, seismicity, rock burst, gas dynamic phenomenon

**For citation:** Batugin A.S., Moroz N.E. History of development and prospects for further application of the geodynamic zoning method. *Russian Mining Industry*. 2024;(3S):14–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-14-19>

## Введение

К началу 1970-х годов во ВНИМИ уже была сформирована теория горных ударов и велось широкое внедрение разработанных на ее основе мероприятий по их предотвращению и профилактике [1]. Ситуация с горными ударами стала улучшаться несмотря на то, что количество пластов, склонных к горным ударам и вовлекаемых в разработку, возрастало. Было установлено, что одним из главных принципов, способствующих безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных к горным ударам и внезапным выбросам, является достижение такого порядка их отработки, при котором в массиве горных пород в максимальной степени исключается чрезмерная концентрация напряжений на отдельных участках и снижается вредное влияние горного и газового давления в местах ведения работ. Наиболее полно требования по правильной раскройке месторождения на шахтные поля могут быть удовлетворены, если точно известно напряженно-деформированное состояние горного массива в районе месторождения. Прежде всего это касается рудных месторождений, для которых, как правило, характерна неоднородность поля напряжений. На фоне востребованности знаний о напряженном состоянии нетронутого массива горных пород и появился метод геодинамического районирования как метод, который открывал путь для заблаговременного выявления напряженных и разгруженных участков в массиве и по их наличию районировать шахтное поле по степени опасности, т.е. проводить геодинамическое районирование.

В основу метода геодинамического районирования, авторами которого были проф. И.М. Батугина и проф. И.М. Петухов, легли представления о взаимодействии глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов в районах ведения горных работ. Было принято, что естественное напряжение земной коры в районе месторождения формируется за счет взаимодействия иерархически упорядоченных активных блоков земной коры. Отражением активности блоков является выраженность их границ в современном рельефе земной поверхности, которая может быть установлена по топографическим картам и при полевых исследованиях. Таким образом, первым этапом работ по геодинамическому районированию стало выявление блочной структуры массива по геоморфологическим индикаторам рельефа земной поверхности. Всего предполагалось выявлять блоки четырех иерархических уровней с использованием топоматериалов масштаба от 1:25000 до 1:1 000 000. Блоки I ранга были наиболее крупными и состояли из блоков II ранга, те, в свою очередь, состояли из блоков III ранга и те из блоков IV ранга.

Далее изучение взаимодействия блоков земной коры открывало путь к использованию методов тектонофизики для оценки напряженного состояния горного массива. Поскольку исходными данными в методах тектонофизики были характеристики границ активных блоков земной коры, то речь шла о реконструкции современного поля напряжений. Унаследованность полей тектонических напряжений предлагалось устанавливать с применением геотехнических методов. После установления блочной структуры массива и его напряженного состояния можно было решать задачи по правильной раскройке месторождения на шахтные поля и порядку ведения горных работ, моделируя техногенное поле напряжений на разные периоды отработки месторождения.

Таким образом, изначально метод геодинамического районирования включал следующие части<sup>1</sup>:

- выявление иерархически упорядоченной блочной структуры горного массива;
- установление динамики взаимодействия блоков и оценку напряженного состояния массива;
- разработку рекомендаций по безопасному ведению горных работ с учетом полученных результатов и возможного изменения напряженного состояния массива под влиянием горных работ.

Фактически уже в первой редакции методических указаний по геодинамическому районированию были заложены идеи о взаимодействии глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов, обусловленных ведением горных работ, а также о фундаментальной роли блочно-иерархического строения горных массивов в геомеханических исследованиях. Первые работы по геодинамическому районированию были выполнены на месторождениях Таштагол и Североуральском бокситовом. На месторождении Таштагол фактически были реализованы только первые два этапа исследований. Сразу бросилось в глаза, что четыре ствола рудника, которые постоянно подвергались деформациям, находятся на границе двух блоков земной коры – в разломе Нагорный. На этот же разлом попадал и запроектированный ствол «Сибиряк». Были даны рекомендации по переносу места строительства ствола на 100 м за зону разлома. В дальнейшем на месторождении был организован геодинамический полигон для отслеживания динамики блоковых структур [2].

За первые 15 лет применения метода геодинамического районирования был выполнен большой объем работ по выявлению блочных структур земной коры в районе отработки месторождений полезных ископаемых. Прежде всего это относится к угольным месторождениям: Кузнецкий и Партизанский бассейны, Воркутинское месторождение, районы Донбасса, Ткибули-Шаорское месторождение в Грузии, Карагандинский бассейн в Казахстане. Из рудных месторождений необходимо отметить Североуральские и Южноуральские месторождения бокситов, месторождения апатитов Кольского полуострова, месторождение полиметаллов в Норильске. Результаты исследований нашли отражение в работах [3; 4].

Важным этапом развития метода геодинамического районирования была реализация программы комплексных исследований на угольных шахтах им. Калинина и им. газеты «Социалистический Донбасс» в конце 1980-х годов. Часть материалов этого исследования нашла отражение в методических указаниях 1990 г. «Геодинамика недр», включая опыт использования методов тектонофизического анализа разломов с неустановленной ориентацией вектора смещения и расчета напряженного состояния и проницаемости массива с учетом его блочной структуры и развития горных работ<sup>2</sup>.

## От геодинамики месторождений к геодинамике недр

По мере того как становилось понятным, что границы активных блоков земной коры сами по себе являются зонами повышенного риска при ведении инженерной деятельности, метод геодинамического районирования

<sup>1</sup> Методические указания по профилактике горных ударов с учетом геодинамики месторождений. Л.: ВНИМИ; 1980. 46 с.

<sup>2</sup> Геодинамика недр: методические указания. Л.: ВНИМИ; 1990. 138 с.

стал широко применяться на других объектах. После железнодорожной аварии на станции Бологое в 1988 г. было высказано предположение о том, что авария произошла в зоне активного разлома (И.М. Петухов, И.М. Батугина, Т.И. Лазаревич). Дальнейшие исследования подтвердили эти предположения. Были проведены работы по выявлению геодинамически опасных зон вдоль трассы железной дороги Санкт-Петербург–Москва–Кемерово. Выполненный во ВНИМИ под руководством А.Н. Шабарова анализ произошедших крупных крушений и аварий на трассах железных дорог относительно границ выделенных блочных структур свидетельствует о том, что большинство из них также тяготеет к местам пересечения активных разломов или углам блоков.

В результате анализа материалов более 2000 случаев аварий, произошедших на линейной части магистралей газа и нефтепроводов за период с 1968 по 1994 г., было установлено, что места аварий на трассах трубопроводов распределены не равномерно, а сосредоточены на определенных участках, представляющих зоны влияния крупных разломов или серию разломов меньшего ранга. Наибольшее количество аварий (5) зафиксировано на трассе трубопровода Грязовец–Санкт-Петербург, все они приурочены к узлу пресечения разломов I ранга. Проведенное геодинамическое районирование трассы проектируемого продуктопровода Сургут–Самара протяженностью более трех с половиной тысяч километров позволило выявить более 10 геодинамически опасных зон, из которых 6 имеют зону влияния от 50 до 500 м [5].

Разработки по компьютерному моделированию изменения проницаемости в неоднородно напряженных блоках (В.В. Зубков, И.А. Зубкова, Э.Н. Работа, В.С. Сидоров, Е.В. Ходырев) были использованы на нефтяных месторождениях Удмуртии и затем Китая для поиска благоприятных мест для расположения скважин. Начиная с 1993 г. проводились исследования по оценке геодинамического состояния территории Московской области. Были построены карты II, III и частично IV рангов этого региона, с использованием которых даны рекомендации по отдельным инженерным решениям. Было также выполнено геодинамическое районирование г. Пекина. Выполненные работы по выбору площадки строительства Дальневосточной АЭС показали также перспективность использования метода при инженерно-геологических исследованиях [3].

Среди теоретических разработок особое место занимает гипотеза профессора И.М. Петухова (конец 1980-х годов) о существовании в земной коре слоя ее предельно напряженного состояния мощностью от земной поверхности до некоторой глубины, который возникает под влиянием глобальных сил горизонтального сжатия [6]. В этом слое земной коры внутри блоков сохраняются условия упругого деформирования. В настоящее время эта гипотеза согласуется с представлениями о существовании в земной коре высоко напряженных зон, находящихся в состояниях: «близком к пределу длительной прочности» [7]; «достижения (превышения) напряжениями порога трещинообразования» [8; 9] «близком к пределу разрушения» [10], «за пределом прочности разрушения» [11], «в предельно напряженном состоянии» [12], которые используются при анализе сейсмичности и других происходящих в земной коре геодинамических процессов. В условиях предельно напряженного состояния земной коры ее приповерхностная часть может деформироваться путем смещения бло-

ков по поверхностям раздела и можно предполагать, что глубина разломов земной коры (границ блоков) не превышает мощности слоя предельно напряженного состояния для каждого конкретного участка земной коры [13].

Неравномерность распределения напряжений в земной коре приводит к формированию тектонически напряженных и разгруженных зон. В тектонически напряженных зонах происходит упрочнение пород (массива), что создает в земной коре множество прочных включений разного иерархического уровня. Эти включения создают своеобразную объемную решетку, силовой каркас земной коры [5]. При тектонических процессах эти включения могут переходить в предельно напряженное состояние, пригружать соседние узлы, создавая условия и для их перехода в предельно напряженное состояние. Такой взгляд предполагает своеобразную геомеханическую жизнь земной коры, когда постоянно возникают и исчезают участки предельно напряженного состояния, постоянно изменяющиеся в размерах. При выполнении условий стабильности они проявляют себя как зоны пластических деформаций земной коры, в которых происходит скольжение по разломам, постепенное формирование ее блочной структуры. При выполнении условий неустойчивости, т.е. когда скорость притока энергии в зону предельно напряженного состояния превышает скорость ее релаксации, происходит сброс этой потенциальной энергии в динамической форме, возникают естественные и техногенные землетрясения.

Авторы метода геодинамического районирования не раз отмечали, что на рубеже тысячелетий возникла новая наука о Земле – Геодинамика недр, которая рассматривает вопросы безопасного и эффективного освоения недр и земной поверхности с учетом характера и интенсивности техногенного воздействия на массив горных пород и современного состояния динамического состояния литосферы. Геодинамика недр как новая наука о Земле отражает единство и взаимодействие природной и техногенной систем, имея в виду, что природная система представляет собой объективное единство и взаимодействие элементов блочной структуры земной коры ее напряженно-деформированного и газогидродинамического состояния, находящихся в определенных связях, а техногенная система – единство и взаимодействие элементов, явлений и процессов техногенной деятельности в земной коре, находящихся в определенных связях, устанавливаемых по воле человека [3].

### **Развитие метода геодинамического районирования в Китае**

В 1990 г. был заключен контракт между ВНИМИ и китайской угольной компанией на выполнение работ по разработке мероприятий по повышению геодинамической безопасности разработки угольного месторождения Бейпяо в провинции Ляонин. На шахте Тай-Ди этого месторождения происходили сильные динамические явления, сильнейшее из которых имело магнитуду 4,3. По результатам геодинамического районирования было установлено, что поле шахты Тай-ди пересекает крупный разлом I ранга, имеющий кулисообразно смещенные фрагменты и представляющий собой левый сдвиг. На участке между фрагментами разлома сформировалась геодинамически опасная зона, в пределах которой происходили горно-тектонические удары со смещением крыльев шахтных дизъюнктивов с амплитудой до 17 см. Исследования на этом

месторождении подтвердили сделанный ранее на Североуральском бокситовом месторождении вывод о том, что смещения крыльев крупных нарушений при сильных горно-тектонических ударах управляет внешнее региональное поле напряжений. Также был сделан вывод о том, что опасной для возникновения сильных горно-тектонических ударов является ситуация, когда ведение горных работ формирует зону разгрузки, снижающую нормальное сжатие к плоскости нарушений и облегчающую смещение по ним в динамической форме.

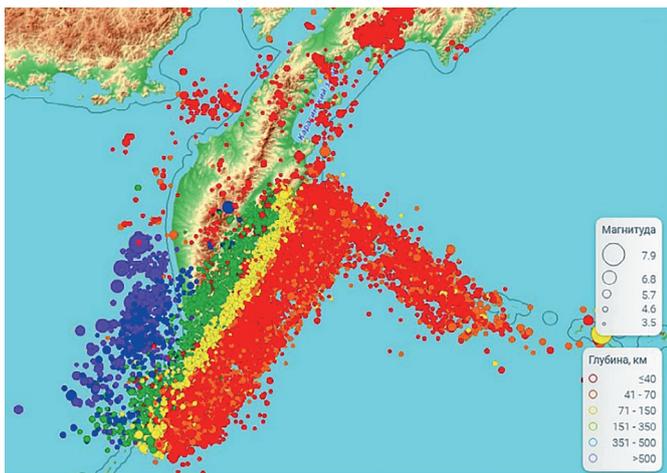
В настоящее время направление исследований по геодинамическому районированию развивается в Ляонинском инженерно-технологическом университете [14].

### Современное состояние исследований по геодинамическому районированию во ВНИМИ

Современными инструктивными документами предусмотрено использование метода геодинамического районирования на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам («Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений», «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»).

Например, активное развитие подземной добычи золота на восточном побережье Камчатского полуострова обусловило необходимость проведения комплексных исследований геодинамической обстановки месторождений с установлением режимов природных полей напряжений, оценкой рисков проявлений горных ударов и потери несущей способности конструктивных элементов систем разработки под действием природной сейсмичности.

По данным сейсмологических наблюдений Камчатской региональной сети (<https://www.emsd.ru/seismicity/sesmicnost-kamchatki>) за 30-летний период с 1993 по 2023 г. произошло 38 131 землетрясение, приуроченное к территории полуострова (рис. 1).



**Рис. 1**  
Карта распределения эпицентров землетрясений Камчатского региона

**Fig. 1**  
A distribution map of the earthquake epicenters in the Kamchatka Region

Согласно представленной карте территориального распределения эпицентров происходивших в эти годы сейсмических событий можно отметить, что для восточного побережья полуострова характерными являются события, гипоцентры которых располагаются на глубине

от 70 до 350 км, что во многом обуславливает фактически незначительную пригрузку на горные выработки.

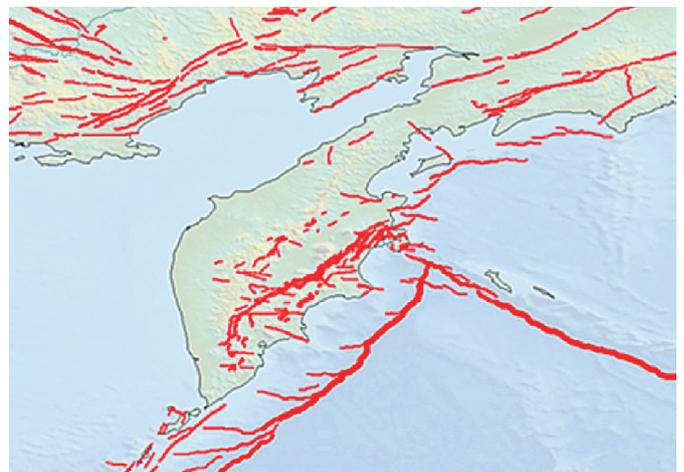
В наиболее неблагоприятном отношении при землетрясениях находятся борты и уступы карьеров, где возможны оползни, и устья штолен. С глубины, превышающей 15 м, значительно снижается действие поверхностных сейсмических волн (волны Релея, Лява и др.), а на глубине более 50 м интенсивность землетрясения падает на 1–2 балла.

С достаточной для практических целей точностью сейсмические нагрузки можно учитывать как дополнительное горное давление (коэффициент сейсмичности  $K_{сн}$ ), значения которого представлены в табл. 1 и базируются на многолетних результатах исследований специалистов сектора сейсмологии ВНИМИ по изучению воздействия сейсмических волн на горные выработки<sup>3</sup>.

Для глубин более 50 м в наихудшем случае при неустойчивом состоянии горных пород и сечении горной выработки более 12 м<sup>2</sup>  $K_{сн}$  равен 1,1, что обуславливает необходимость учёта 10% запаса при расчете нагрузок на конструктивные элементы системы разработки и крепления горных выработок<sup>4</sup>.

Помимо прямого влияния сейсмичности территории на состояние подземных конструкций, стоит также учитывать подчиненность формирования блочной структуры сейсмическому режиму региона.

При подвиге под земную кору происходит деформирование Тихоокеанской плиты, сопровождающееся образованием активных разломов. Согласно данным исследований лаборатории неотектоники и современной геодинамики Ги РАН восточное побережье полуострова, на котором сконцентрирована современная подземная разработка месторождений золота, наиболее подвержено неотектоническим процессам (рис. 2).



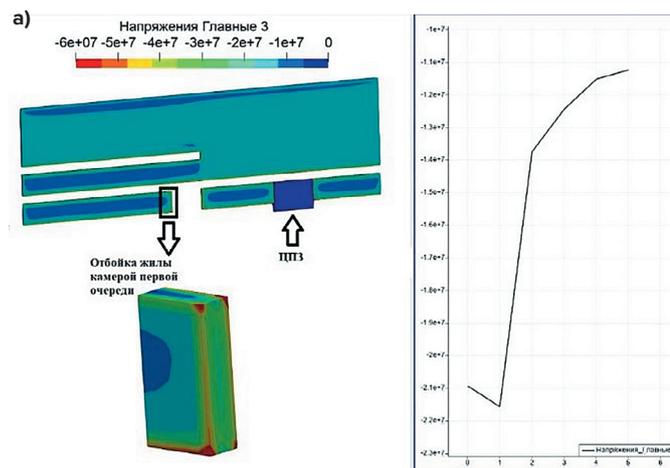
**Рис. 2**  
Карта активных тектонических разломов Камчатского региона

**Fig. 2**  
A map of active tectonic faults in the Kamchatka Region

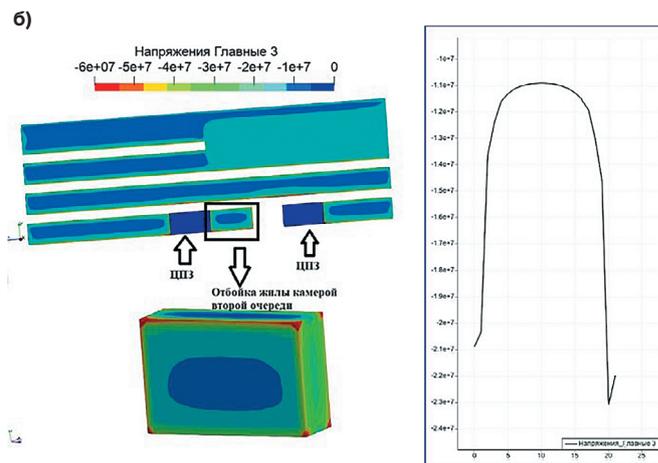
Наличие неотектонических процессов в исследуемых геологических средах является маркером, свидетельствующим о наличии тектонических полей напряжений.

<sup>3</sup> Временной инструкции по креплению горных выработок угольных шахт в сейсмоопасных районах о. Сахалин. Прокопьевск; 1973. 124 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293750/4293750064.pdf> (дата обращения: 26.06.2024).

<sup>4</sup> Временной инструкции по креплению горных выработок угольных шахт в сейсмоопасных районах о. Сахалин. Прокопьевск; 1973. 124 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293750/4293750064.pdf> (дата обращения: 26.06.2024).



**Рис. 3**  
Численное моделирование разработки жилы очистной камерами первой (а) и второй (б) очереди. Графики иллюстрируют изменение максимальных сжимающих напряжений вдоль центральной части жилы в направлении от камеры



**Fig. 3**  
Numerical modeling of the vein development by the first (a) and second (b) stage stopes. The graphs illustrate changes in the maximum compressive stresses along the central part of the vein away from the stope

Для их моделирования в институте ВНИМИ применяется специализированное программное обеспечение «PRESS 3D URAL» [15–18], при помощи которого установлено, что для исследуемых месторождений на восточном побережье Камчатки характерно следующее напряженное состояние горных пород:

- $\sigma_1 = \gamma H$  – вертикальные (гравитационные) сжимающие напряжения;
- $\sigma_2 = 0,6\gamma H$  – максимальные горизонтальные (тектонические) сжимающие напряжения;
- $\sigma_3 = 0,25\gamma H$  – минимальные горизонтальные (тектонические) сжимающие напряжения.

Полученные параметры напряженного состояния горных пород далее используются в качестве граничных условий для многовариантных геомеханических расчётов, в том числе для оценки НДС конструктивных элементов проектируемых систем подземной разработки (рис. 3).

Результаты, полученные при моделировании напряженно-деформированного состояния горных пород на исследуемых объектах, свидетельствуют о том, что максимальные сжимающие напряжения не превышают 80% прочности на сжатие скальных пород, способных накопить упругую энергию и хрупко разрушиться в динамическом режиме, а значит месторождения являются не склонными к горным ударам. Данный результат, полученный до начала ведения горных работ, на сегодняшний день подтверждается фактическим неудороопасным состоянием массива горных пород на золоторудных месторождениях восточного побережья Камчатки.

Дальнейшее развитие геодинамического районирования полуострова целесообразно развивать для прогноза дислокации сильнотрещиноватых участков неустойчи-

вых горных пород, проблема с которыми на сегодняшний день является крайне актуальной.

### Закключение

Одной из предпосылок появления метода геодинамического районирования, т.е. метода районирования месторождения по степени геодинамической опасности, во ВНИМИ была востребованность в оценке напряженного состояния участков рудных и угольных месторождений, склонных и опасных по горным ударам. Предложенный авторами метода проф. И.М. Батугиной и И.М. Петуховым подход «от общего к частному» при изучении тектонически активной структуры горного массива и его напряженного состояния опробован на практике и рекомендован к использованию инструктивными документами по безопасности для угольных и рудных месторождений, склонных и опасных по горным ударам.

Идеи, заложенные в метод геодинамического районирования, такие, например, как взаимодействие глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов при ведении горных работ, о фундаментальной роли блочно-иерархического строения горных массивов в геомеханических исследованиях, представления о предельно напряженном состоянии земной коры, о тектонически напряженных и разгруженных зонах, о влиянии геодинамических зон на инженерные сооружения, нашли подтверждение на практике и продолжают развиваться во ВНИМИ и в научных коллективах разных стран.

В настоящее время ВНИМИ располагает современными инструментами решения проблем геодинамической безопасности, что показано на примере Камчатского региона.

### Список литературы / References

1. Петухов И.М. *Горные удары на угольных шахтах*. М.: Недра; 1972. 221 с.
2. Батугина И.М., Петухов И.М. *Геодинамическое районирование при строительстве и эксплуатации рудников*. М.: Недра; 1988. 162 с.
3. Петухов И.М., Батугина И.М. *Геодинамика недр*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра коммуникейшэнз; 1999. 287 с.
4. Шабаров А.Н. *Научные основы геологического обеспечения безопасной отработки пластовых месторождений в геодинамически опасных зонах: дис. ... д-ра техн. наук*. М.; 2004. 503 с.

5. Шабаров А.Н., Дупак Ю.Н., Батугин А.С. Тектонически напряженные и разгруженные зоны в горном массиве. Уголь. 1994;(7):28–30.  
Shabarov A.N., Dupak Yu.N., Batugin A.S. Tectonically stressed and unloaded zones in the rock mass. *Ugol'*. 1994;(7):28–30. (In Russ.)
6. Петухов И.М. О природе горизонтальных сил в земной коре. В кн.: Норватов Ю.А. (ред.) *Изучение и прогноз сдвижений и деформаций массивов горных пород, гидрогеомеханических процессов при разработке месторождений подземным и открытым способом: сб. науч. тр.* СПб.: ВНИМИ; 1991.
7. Соболев Г.А., Пономарев А.В. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука; 2003. 270 с.
8. Scholz C.H. *The mechanics of earthquakes and faulting*. New York: Cambridge University Press; 1990. 439 p.
9. Métivier L., de Viron O., Conrad C.P., Renault S., Diament M., Patau G. Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides. *Earth and Planetary Science Letters*. 2009;278(3-4):370–375. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.024>
10. Ellsworth W.L. Injection-induced earthquakes. *Science*. 2013;341(6142):1225942. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>
11. Тарасов Б.Г. Запредельные свойства горных пород и их связь с динамикой спонтанного разрушения. *Горный журнал*. 2021;(1):13–19. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.03>  
Tarasov B.G. Post-limit properties and correlation with spontaneous fracture dynamics in rocks. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):13–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.03>
12. Townend J., Zoback M.D. How faulting keeps the crust strong. *Geology*. 2000;28(5):399–402. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<399:HFKTCS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<399:HFKTCS>2.0.CO;2)
13. Батугин А.С. Геодинамические эффекты предельно напряженного состояния земной коры. *Горная промышленность*. 2023;(S1):14–21. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-14-21>  
Batugin A.S. Geodynamic effects of the critically stressed state of the earth's crust. *Russian Mining Industry*. 2023; (1 Suppl.):14–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-14-21>
14. Lan T., Zhang H., Li S., Batugina I., Batugin A. Application and development of the method of geodynamic zoning according to geodynamic hazard forecasting at coal mines in China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;221:012088. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/221/1/012088>
15. Сидоров Д.В., Потапчук М.И., Сидляр А.В., Курсакин Г.А. Оценка удароопасности при освоении глубоких горизонтов Николаевского месторождения. *Записки Горного института*. 2019;238:392–398. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.392>  
Sidorov D.V., Potapchuk M.I., Sidlyar A.V., Kursakin G.A. Assessment of rock-burst hazard in deep layer mining at Nikolayevskoye Field. *Journal of Mining Institute*. 2019;238:392–398. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.392>
16. Мороз Н.Е., Гендлер С.Г., Вьюников А.А. Газодинамические явления при проходке выработок во вмещающих породах кимберлитовой трубки «Интернациональная». *Горная промышленность*. 2023;(S1):96–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-96-102>  
Moroz N.E., Gendler S.G., Vyunikov A.A. Gas-dynamic phenomena in tunnel driving through the host rocks of the “International” kimberlite pipe. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):96–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-96-102>
17. Мороз Н.Е., Сидоров Д.В., Соннов М.А. Применение цифровых двойников для прогнозной оценки удароопасности надштрековых целиков. *Горная промышленность*. 2022;(3):93–98. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-93-98>  
Moroz N.E., Sidorov D.V., Sonnov M.A. Application of digital twins to predict rock-bump hazard of drift pillars. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):93–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-93-98>
18. Мороз Н.Е., Сидоров Д.В., Соннов М.А. Комплексное геомеханическое моделирование разработки жильных месторождений блочного строения. *Горная промышленность*. 2023;(6):71–74. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-71-74>  
Moroz N.E., Sidorov D.V., Sonnov M.A. Complex geomechanical modeling of mining vein deposits of block structure. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):71–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-71-74>

#### Информация об авторах

**Батугин Андриан Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, кафедра безопасности и экологии горного производства, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: as-bat@mail.ru

**Мороз Никита Евгеньевич** – научный сотрудник, лаборатория горных ударов, АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: info@vnimi.ru

#### Information about the authors

**Andrian S. Batugin** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Safety and Ecology of Mining Production, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: as-bat@mail.ru

**Nikita E. Moroz** – Research Scientist, Laboratory of Rock Bumps, JSC “VNIMI”, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: info@vnimi.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.05.2024

Поступила после рецензирования: 18.06.2024

Принята к публикации: 27.06.2024

#### Article info

Received: 03.05.2024

Revised: 18.06.2024

Accepted: 27.06.2024