

УДК 622.831:622.502.551.14.550.343.4

**А.С. Батугин**

## **КЛАССИФИКАЦИЯ УЧАСТКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО СТЕПЕНИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ**

*Приведено обоснование и классификации участков земной коры по степени геодинамической опасности, ориентированной на учет последствий техногенного воздействия на массив. Для проверки классификации произведен анализ фактических данных по проявлению геодинамической опасности. С вероятностью 0,8 установлена статистическая связь, показывающая, что разнообразие форм, интенсивность проявления геодинамической опасности, геодинамический риск нарастают от участков 1 к участкам 4 степени геодинамической опасности.*

*Ключевые слова: геодинамическая опасность, напряженное состояние горного массива.*

---

**П**од геодинамической опасностью понимают такое состояние окружающей среды или техносферы, при котором возможно возникновение геодинамических явлений, способных причинять ущерб и оказывать влияние на окружающую среду [1]. Во второй половине 20-го века произошло качественное изменение форм проявлений геодинамической опасности, которая вышла за пределы только горнодобывающей отрасли и превратилась в крупную составляющую экологической опасности. При разработке месторождений Урала, Кузбасса и Горной Шории, Кольского полуострова в России, а также на зарубежных месторождениях происходят горно-тектонические удары, вызывающие разрушения на поверхности, образование провалов, появление трещин, исчезновение водотоков и др., отмечается техногенная сейсмичность при разработке нефтяных и газовых месторождений, строительстве сверхвысоких зданий в городах, происходят землетрясения в районах ликвидации шахт. В России возникло несколько горнопромышленных районов, в которых техноген-

ная сейсмичность стала социальным фактором, привела к повышению опасности эксплуатации других промышленных производств, стала оказывать непосредственное влияние на биологический оптимум для человека.

Выявилась приуроченность аварийных участков на трубопроводах, железных дорогах, других крупных инженерных сооружениях к геодинамически активным зонам. В 21-м веке прогнозируется еще более масштабное освоение недр и земной поверхности. Планируется осваивать огромные территории Севера, Сибири, Дальнего Востока, Европейской части России, возможна реализация крупнейших региональных проектов, связанных со строительством протяженных тоннелей, акведуков, трубопроводов, крупных шахт и карьеров.

Международный опыт показывает, что затраты на прогнозирование и обеспечение готовности к природно-техногенным явлениям катастрофического характера во много раз меньше, чем затраты на ликвидацию последствий. Поэтому при освоении новых территорий и усилении воздействия на уже осваиваемые территории не-

обходим прогноз и учет возможных изменений их геодинамического режима и его влияния на окружающую среду и инженерные сооружения.

Карты сейсмического районирования построены по данным проявления естественной сейсмичности и по геологическим данным, ориентированным на эти проявления. Они содержат важную информацию о геодинамическом состоянии массива, но преобразование недр осуществляется в историческом, а не геологическом масштабе времени. Поэтому нужна классификация территорий по степени геодинамической опасности, ориентированная на учет последствий техногенного воздействия на массив.

Одним из основных факторов, определяющих геодинамическую опасность, является напряженное состояние горного массива [2 и др.]. Интегральным отражением напряженного состояния земной коры является сейсмичность. Сейсмические события по глубинам гипоцентров относят к мелкофокусным (до 60 км); промежуточным (60-300 км) и глубокофокусным (более 300 км). Глубокофокусные и промежуточные землетрясения отмечены только на границах литосферных плит или микроплит, тогда как во внутренних частях литосферных плит происходят землетрясения мелкофокусные, очаг которых расположен в пределах земной коры. Как известно, очаги коровых землетрясений сосредоточены в земной коре в пределах определенного приповерхностного слоя, который называют также сейсмоактивным слоем земной коры. Мощность этого слоя в разных районах изменяется от нуля до 100% от мощности земной коры.

При описании процессов в очагах коровых землетрясений в гипотезах «упругой отдачи» Н. Рида, «спускового механизма» А.П. Сытинского и др.,

в работах А.Г. Соболева и др. используются в том или ином виде элементы теории предельно напряженного состояния. Таким образом, сейсмоактивный слой земной коры можно рассматривать как область горного массива, в которой существуют участки с предельно напряженным состоянием.

Наиболее четко гипотеза о существовании в земной коре слоя с предельно напряженным состоянием пород изложена в работах И.М. Петухова. Слой предельно напряженных пород возникает во внутренних частях литосферных плит за счет процессов на их границах и его мощность изменяется в зависимости от мощности земной коры и характера взаимодействия блоков [2].

Имеются оценки размеров области геомеханического воздействия инженерных сооружений на массив. В работах по строительной механике показано, что она может достигать глубин, соответствующих четырехкратной высоте зданий (М.С. Хлыстунов). Из практики изучения техногенной сейсмичности известно, что ведение горных работ

оказывает воздействие на расстоянии до первых километров; расчеты показывают, что сооружение водохранилищ объемом воды порядка  $10^{10} \text{ м}^3$  вызывает изменение напряжений вплоть до поверхности Моховичича (Ф. Стейнхаузер, М. Капуро).

Если принять, что в земной коре существует слой предельно напряженных пород, то дополнительная механическая нагрузка на него, обусловленная инженерной деятельностью, вызовет немедленную ответную реакцию, связанную с перераспределением напряжений и развитием деформаций, т.е. повысит геодинамическую опасность данного района.

Действительно, запасы потенциальной энергии  $\Pi$  в области предельно напряженного состояния пород прямо пропорциональны ее размерам (Авершин С.Г. и др):

$$\Pi = \sigma_m^2 hl / E,$$

где  $E$  – модуль упругости,  $\sigma_m$  – прочность массива,  $h$  и  $l$  – размеры области предельного состояния горных пород.

Таким образом, мощность сейсмоактивного слоя характеризует уровень насыщения массива потенциальной энергией: чем мощнее этот слой, тем в более значительных объемах (участках) массива достигается предельно напряженное состояние, тем опаснее для инженерных сооружений наложение на эти участки собственных геомеханических нагрузок. Исходя из этого, в качестве основного классификационного признака в классификации участков земной коры по степени геодинамической опасности можно принять отношение  $n$  мощности сейсмоактивного слоя пород  $H_s$  к мощности земной коры  $H_{з.к.}$ ,  $n = H_s / H_{з.к.}$  [3].

Оценка мощности сейсмоактивного слоя земной коры  $H_s$  может быть осуществлена расчетным путем [4] или на основе данных о глубинах гипоцентров коровых землетрясений. Для оценки мощности сейсмоактивного слоя по фактическим данным были использованы опубликованные данные о максимальных глубинах очагов землетрясений.

На основе полученных данных о распределении величин относительной мощности сейсмоактивного слоя и блочного строения земной коры возможное количество градаций (классов) определим по формуле Стерджесса:

$$r = 1 + 3,322 \times \lg N,$$

где  $N$  – число единиц совокупности.

В данном случае  $N = 200$  и  $r = 9$ . Однако, найденное по этой формуле число групп явно является завышенным по причине высокой неопределенности классификационного признака. Если принять относительные ошибки мощности  $H_s$  и  $H_{з.к.}$  всего 0,1 (или 10%), то относительная ошибка  $n$  уже будет примерно 0,15. А так как значения  $n$  находятся в интервале  $[0-1,0]$ , то число градаций (число групп) должно быть не более 4-6. Также с увеличением глубины  $H_s$  возрастает ошибка ее определения, что ведет к тому, что групповые интервалы становятся неравномерными. Так, при  $n > 0,5$  ошибки в определении  $H_s$  настолько велики, что интервал 0,5-1,0 уже не представляется возможным разделить на группы. Кроме того, асейсмичные территории можно представить как территории с нулевым значением мощности сейсмоактивного слоя и выделить их в отдельную группу.

Все это позволяет разбить всю совокупность значений  $n$  на четыре неравных интервала: 0; 0-0,25; 0,25-0,5 и 0,5-1,0.

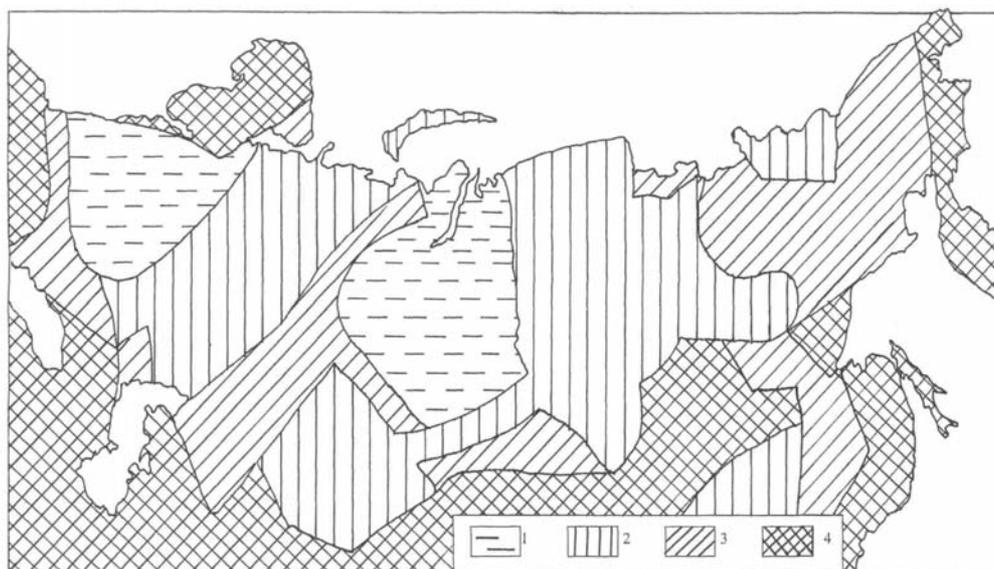
С учетом вышесказанного примем, что если в один блок  $I$  ранга попадают землетрясения из разных по градациям групп, то для всего блока принимается максимальное значение  $n$ . Блоки с одинаковыми значениями относительной мощности сейсмоактивного слоя (0%; 0-25%; 25-50%; >50%) соответственно объединим в участки 1-4-й степеней геодинамической опасности, рис. 1, табл. 1 [3].

В соответствии с представлениями об иерархичности в проявлении свойств и строении блочного массива выделяемые участки могут включать в себя менее опасные подучастки (блоки меньшего ранга). То есть, наиболее опасные участки 4-й степени опасности могут включать в себя подучастки 3-й,

Таблица 1

**Классификация участков земной коры по степени геодинамической опасности**

Степень геодинамической опасности	Мощность слоя предельно напряженных пород земной коры, Нс/Нк, %	Примеры
1	0	Европейская равнина, Западно-Сибирская низменность
2	до 25	Кузбасс, Донбасс, Воркута
3	до 50	Урал, Юг Западной Сибири, Апатиты, Дальний Восток
4	>50	Юг Сибири, Кавказ, районы Западной Европы, Средней Азии и Китая, Памир



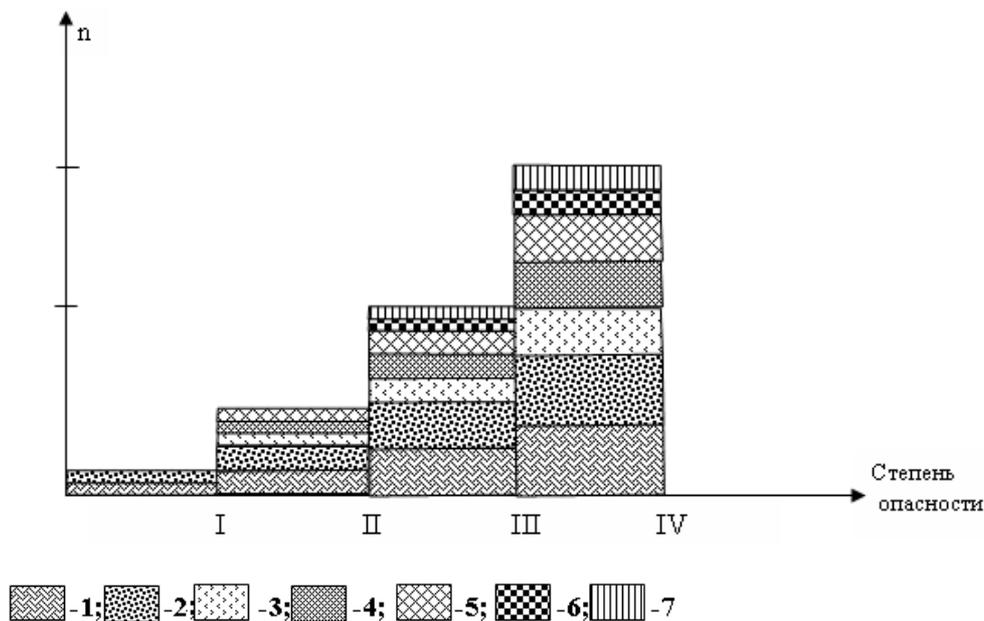
**Рис. 1. Карта-схема участков земной коры различной степени геодинамической опасности: 1, 2, 3, 4 – соответственно участки 1-4-й степеней геодинамической опасности**

2-й и 1-й степеней опасности; участки 3-й степени опасности могут включать в себя подучастки 2-й и 1-й степеней опасности; участки 2-й степени опасности могут включать в себя подучастки 1-й степени опасности.

Поскольку данная классификация построена на теоретических представлениях и прямо не вытекает из анализа проявления геодинамической опасности, то рассмотрим особенности ее пространственного изменения по фактическим данным.

Из опубликованных данных автором проанализированы материалы об удароопасных рудных и угольных месторождениях, минимальных глубинах проявления горных ударов, техногенных землетрясениях, аварийности на инженерных объектах, рис. 2, табл. 2.

Представленные на рис. 2 и табл. 2 результаты анализа показывают увеличение количества форм проявлений геодинамической опасности от участка 1 к участку 4 степени опасности и усиление ее интенсивности, т.е.



**Рис. 2. Нарастание количества форм проявления и интенсивности геодинамической опасности:** 1 - аварийные зоны на линейных объектах; 2 - удароопасные угольные месторождения; 3 - удароопасные рудные месторождения; 4 - горно-тектонические удары на угольных месторождениях; 5 - горно-тектонические удары на рудных месторождениях; 6 - техногенные землетрясения; 7 - оживление тектонических нарушений при ведении горных работ

переход от участка к участку сопровождается появлением все новых форм геодинамической опасности и усилением интенсивности проявления встречавшихся ранее:

- на участках 1 степени геодинамическая опасность отмечается в двух формах: повышенная аварийность на инженерных сооружениях в геодинамически опасных зонах и предположительно техногенные землетрясения до 2 баллов;

- на участках 2 степени интенсивность проявления геодинамической опасности в имевшихся на участке 1 степени формах увеличивается (техногенные землетрясения до 4 баллов, аварийность на инженерных объектах на прежнем уровне) и проявляется еще в трех других

формах (горные удары на угольных шахтах с глубин 200-700 метров, сейсмичность при затоплении шахт, удароопасные рудные месторождения);

- на участках 3 степени интенсивность проявления геодинамической опасности в имевшихся на участке 2 степени формах увеличивается (техногенные землетрясения до 7 баллов, начальная глубина проявления горных ударов снижается до 150 метров, увеличивается количество удароопасных месторождений) и проявляется дополнительно в других формах: горнопромышленные районы с техногенной сейсмичностью, удары горно-тектонического типа, «оживление» нарушений при ведении горных работ;

Таблица 2

**Характеристика нарастания геодинамической опасности для территорий северной Евразии**

Характеристика геодинамической опасности	Степень геодинамической опасности участка земной коры			
	1	2	3	4
Минимальная глубина проявления горных ударов	нет	200-700	150-200	150
Проявление горно-тектонических ударов, баллы	нет	нет	до 6-7	до 8
Амплитуда смещений крыльев крупных нарушений при горно-тектонических ударах, см	0	0	до 10	до 17
Техногенная сейсмичность на водохранилищах, % от общего количества	0	10	10	80
Техногенная сейсмичность при разработке месторождений нефти и газа, % от общего количества	0	10	25	65
Наличие удароопасных рудных месторождений, % от указанных в Инструкции..., 1989	0	10	40	50
Наличие удароопасных угольных месторождений, % от указанных в Инструкции...1988	0	4	22	76
«Оживление» нарушений при ведении горных работ	-	-	да	да
Горно-промышленные районы с техногенной сейсмичностью	0	0	да	да
Интенсивность максимального расчетного землетрясения, баллы	5	6	6-7	>10
Количество аварий на 1000 км магистральных трубопроводах (неполные данные)	0,21-0,22			0,43
Вероятность попадания объекта длиной 500 м в геодинамически активную зону IV ранга	0,03	0,04	0,053	0,158
Математическое ожидание числа пересечений линейного объекта длиной 500 км двух систем геодинамически активных зон I-II рангов.	1,0	2,13	4,24	15,8
Интегральная гистограмма распределения объектов с зарегистрированными проявлениями техногенной сейсмичности по участкам различной степени геодинамической опасности				

• На участках 4 степени интенсивность проявления геодинамической опасности во всех имевшихся на участке 3 степени формах увеличивается (техногенные землетрясения до 8 баллов, аварийность на магистральных трубопроводах увеличивается в 2 раза, количество плотин с техногенной сейсмичностью, удароопасных месторождений, месторождений нефти и газа с техногенной сейсмичностью увеличивается в несколько раз.

Кроме того, от участка 1 к участку 4 степени опасности увеличивается геодинамический риск за счет повышения вероятности попадания инженерного объекта в геодинамически опасную зону [6].

Поскольку характеристики геодинамической опасности, представленные в табл. 2 измерены в разных шкалах, то для статистической оценки их взаимосвязи со степенью геодинамической опасности воспользуемся критерием ранговой корреляции Спирмена.

Таблица 3

**Вычисление коэффициента ранговой корреляции Спирмена**

Значения первой переменной			Значения второй переменной			Разность рангов, d
Исходные	Упорядоченные	Ранги	Исходные	Упорядоченные	Ранги	
2-я	2	1	200-700	200-700	3	-2
3-я	3	2	150-200	150-200	2	0
4-я	4	3	150	150	1	2

Преобразуем данные первой строки табл. 2 в следующие две строки переменных:

- Степень геодинамической опасности: 2; 3; 4;
- Минимальная глубина проявления горных ударов: 200-700; 150-200; 150.

Определим коэффициент ранговой корреляции Спирмена, который обозначим  $R_s$ . Для этого необходимо упорядочить данные в приведенных строках по возрастанию и заменить их значения рангами. Рангом значения называют его номер в упорядоченном ряду. Представим исходные, упорядоченные и ранжированные значения рассматриваемых двух переменных в виде таблицы (табл. 3).

По данным табл. 3 вычислим искомым коэффициент ранговой корреляции Спирмена по формуле :

$$R_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n^3 - n} = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)} \text{ или}$$

$$R_s = 1 - \frac{6(4 + 0 + 4)}{3^3 - 3} = 1 - \frac{48}{24} = -1$$

Значение коэффициента ранговой корреляции  $R_s = -1$  указывает на то, что существует взаимосвязь между степенью геодинамической опасности участка земной коры и минимальной глубиной проявления горных ударов: чем выше степень геодинамической опасности, тем меньше начальная глу-

бина их возникновения (т.е. тем выше опасность горных ударов).

Проверим гипотезу об отсутствии связи, т.е. гипотезу  $R > 0$ .

В нашем случае критическая область коэффициента ранговой корреляции Спирмена определяется для разных уровней значимости и объемов выборки. При этом своеобразие задачи состоит в том, что первая переменная имеет всего четыре (а в табл. 3) градации и невозможно сформировать более 3-х пар значений рассматриваемых переменных (хотя число проанализированных месторождений более 10).

При  $n=3$  по табл. 8.6, с. 264-265, из работы [7] делаем заключение, что наличие связи между переменными в рассматриваемой задаче можно признать только при уровне значимости  $q \approx 0,2$ . Это позволяет утверждать, что с вероятностью 0,8 приведенные данные свидетельствуют о том, что связь действительно имеет место. Аналогичный вывод можно получить и для других строк табл. 2, т.е. имеющиеся фактические данные, представленные в табл. 2, удовлетворительно описываются с помощью предлагаемой классификации.

Таким образом, предлагаемая классификация может быть использована для оценки геодинамической опасности при освоении недр и земной поверхности.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России» на 2009-2013 годы

1. *Временные указания* по выявлению и контролю зон риска возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций при освоении недр и земной поверхности на основе результатов геодинамического районирования. С-Пб., ВНИМИ, 1997, 12 с.
2. *Петухов И.М., Батугина И.М.* Геодинамика недр. М.: Недра. 1996. – 218 с.
3. *Батугин А.С.* Классификация участков земной коры по степени геодинамической опасности /3-я международная конференция "Экология и развитие северо-запада" – СПб. 1996. – С. 263–267.
4. *Батугин А.С., Петухов И.М.* К оценке напряженного состояния участков земной коры // ГИАБ, 1988. №1. С.146-151.
5. *Новый каталог* сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М, Недра, 1977.
6. *Батугин А.С., Воинов К.А.* Сравнительная оценка тектонофизического и сейсмического методов определения ориентировки главных нормальных напряжений. Сб. науч. тр. Совершенствование технологии сооружения горных выработок. Кемерово.: КузПИ.1986. С.102-106.
7. *Батугин А.С.* К оценке геодинамического риска //ГИАБ, 2006. № 9. С. 35-42
8. *Стентон Г.* Медико-биологическая статистика. Пер. с англ. М.: Практика, 1998.-459 с. **ГИАБ**

### Коротко об авторе

*Батугин А.С.* – кандидат технических наук, доцент;  
Московский государственный горный университет,  
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru



### ГОРНОМУ ИНЖЕНЕРУ-ЭРУДИТУ НА ЗАМЕТКУ

#### Старейшие германские журналы по горному делу

1. «Gas-Erdgas (GWF)» (Газ и природный газ). Издается с 1858 г.
2. «Gьsкаuf» (Журнал по горному делу). Издается с 1865 г.
3. «Braunkohle» (Бурый уголь). Издается с 1902 г.
4. «Nobel Hefte» (Нобелевские записки «Взрывные работы»). Издается с 1926 г.
5. «Neue Bergbautechnik» (Горное дело). Издается с 1926 г.
6. «Gьsкаuf Forschungshefte» (Журнал по горному делу). Издается с 1940 г.
7. «Erzmetall» (Горнометаллургическая промышленность). Издается с 1948 г.
8. «Erdoel-Erdgas Zeitschrift» (Журнал по нефти и природному газу). Издается с 1948 г.
9. «Bergbau» (Горное дело). Издается с 1950 г.
10. «Kali- und Steinsalz» (Калийная и каменная соль). Издается с 1952 г.
11. «Aufbereitungs-Technik» (Обогащение полезных ископаемых). Издается с 1960 г.
12. «Naturstein-Industrie» (Промышленность стройматериалов). Издается с 1965 г.

