© А.С. Батугин, 2006

УДК 551.2:550.834:622.8

А.С. Батугин

К ОЦЕНКЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РИСКА

В последние десятилетия работами по геодинамическому районированию было показано, что повсеместно существующие геодинамически активные зоны земной коры (границы блоков разных рангов) оказывают влияние на различные аспекты человеческой деятельности (разработка месторождений, строительство и эксплуатация инженерных сооружений, дорог, трубопроводов, ведение сельского и лесного хозяйства, авиация и др. [1, 2]. Такую точку зрения разделяют в настоящее время многие другие ученые [3, 4 и др.].

Границы блоков, называемые также геодинамически активными зонами (разломами) рассматриваются в настоящее время как зоны повышенного риска для инженерных сооружений и ведения хозяйственной деятельности. Иначе говоря, попадание инженерного или природного объекта в геодинамически активную зону рассматривается как самостоятельный фактор риска.

Количественные подходы к определению риска R, как меры опасности, в основном основаны на оценке последствий негативных событий через величину потенциального ущерба У:

$$R = P \times У,$$

где P – вероятность наступления негативного события.

Ущерб У при попадании инженерных объектов в геодинамически активную зону зависит от вида инженерной деятельности (разработка месторождений, эксплуатация трубопроводов и пр.), от ранга геодинамически активной зоны, от степени геодинамической опасности территории. На современном этапе такой ущерб может быть спрогнозирован на основе метода аналогий и в первом приближении может быть принят как известная величина. В этом случае риск R будет определяться величиной вероятности попадания объекта в геодинамически активную зону.

Таким образом, задача оценки геодинамического риска может быть сведена к задаче определения вероятности попадания объекта в геодинамически активную зону данного ранга.

Для решения задачи примем, что рассматриваемый инженерный объект имеет конечные размеры: длину l или оконтурен контуром произвольной формы длиной l.

Также примем, что среднее расстояние между границами блоков данного ранга и одной ориентировки известно (например, из результатов геодинамического районирования) и составляет L.

В простейшем случае решение задачи о попадании объекта длиной l на одну из границ блоков можно свести к решению задачи Бюффона [5]. Задача Бюффона формулируется следующим образом: Игла длиною l бросается на плоскость, разграфленную параллельными прямыми, разделенными расстояниями L $(L>l)$. Все положения центра иглы и все ее направления одинаково вероятны. Найти вероятность P того, что

Таблица 1

Вероятность пересечения (попадания) объекта на границу блока при L = 1000 м

Угол θ, град. **Длина объекта, м**	**15**	**30**	**45**	**60**	**75**	**90**
50	0,013	0,025	0,035	0,043	0,048	0,05
100	0,026	0,05	0,07	0,086	0,096	0,1
150	0,039	0,075	0,106	0,129	0,145	0,15
250	0,065	0,125	0,175	0,215	0,242	0,25
500	0,130	0,250	0,350	0,430	0,483	0,5

игла пересечет какую-нибудь из линий. Решение этой задачи

$$P = \frac{l\cos(90-\theta)}{L} = \frac{l\sin\theta}{L},$$

где θ^0. угол между линией L и отрезком l.

Во многих случаях границы блоков одной ориентировки можно представить в виде системы параллельных линий на каком-либо ограниченном участке. Тогда вероятность попадания объекта на границу блоков можно оценивать по формулам Бюффона.

Рассмотрим наиболее важные случаи.

1. Допустим, имеем систему линейных границ блоков или геологических нарушений данного ранга со средним расстоянием между ними L и некоторый линейный инженерный (или природный) объект длиною l или оконтуренный контуром длиной l. Ориентировка в пространстве (азимуты простирания) геодинамически активных границ блоков и объекта известны и угол между линией L и отрезком l составляет, L>l.

В этом случае вероятность того, что объект попадет (пересечет) линию L будет равна

$$P = \frac{l\cos(90-\theta)}{L} = \frac{l\sin\theta}{L},$$

(1)

т.е. P равна отношению проекции l на линию, перпендикулярную нарушению к расстоянию между нарушениями. При L = 1000 м, что характерно, например, для блоков IV ранга и длиной объектов 50-100 м P = 0,013-0,5 (табл. 1).

Даже при малой вероятности (менее 0,01) такие оценки важны, т.к. объектов (например, жилых зданий, горных выработок и др.) на данной площади может быть очень много. Математическое ожидание числа объектов с данными l_i и θ_i, попавших на нарушение, будет равным

$$N_{iн} = p_i N_i, \qquad (2)$$

где N_i – число объектов с l_i, θ_i.

Например, на шахте им газеты «Социалистический Донбасс» (северо-восточный фланг, опасный по внезапным выбросам угля и газа) штреки длиной 1000 м с расстоянием между ними 150 м ориентированы по азимуту 30 градусов. Границы блоков IV ранга ориентированы субмеридианально и расстояние между ними составляет 500 м. Отсюда по формуле (1) P = 0,15. Для двадцати штреков на двух угольных пластах в этом участке шахтного поля следует ожидать не менее 3-х пересечений выработок с геодинамически активными границами блоков меридианальной ориентировки.

2. При таких же исходных данных, как с случае 1, добавляется условие, что

Таблица 2

Вероятность пересечения (попадания) объекта длиной l на границу блока размерами L.

L, м ***l, м***	**500**	**1000**	**2000**	**3000**	**5000**	**10000**
10	0,013	0,006	0,003	0,002	0,001	0,0006
50	0,064	0,032	0,016	0,01	0,006	0,003
100	0,127	0,064	0,032	0,021	0,012	0,006
200	0,255	0,127	0,063	0,042	0,025	0,013
500	0,637	0,318	0,159	0,106	0,064	0,032

все направления объекта равновероятны.

Ответ: $P = \dfrac{2l}{\pi L}$. (3)

В табл. 2 приведены вероятности попадания объектов разной длины на границы блоков различного размера. Размер блоков, в свою очередь, определяется их рангом и степенью геодинамической опасности территории [6].

Например, для территории г. Реутова Московской области для границ блоков V ранга северо-западной ориентировки L = 500-600 м. Старая часть города застроена панельными домами длиной около 100 м. Вероятность попадания дома в геодинамически активную зону составит P = 0,13. Для микрорайона с количеством 10-20 домов математическое ожидание числа попаданий домов в геодинамически активную зону составит 2-3. Следовательно, зная ущерб от попадания здания в геодинамически активную зону, можно планировать дополнительные затраты на эксплуатацию зданий и оценивать риски.

3. В условиях предыдущей задачи внесено изменение, состоящее в том, что ограничение $l<L$ снимается. Найдем математическое ожидание числа пересечений объекта с параллельными разломами, расстояние между которыми L.

Ответ: $M\left[y\right] = \dfrac{2l}{\pi L}$ (4)

Так, для прямолинейного отрезка коммуникаций длиной 1000 м в условиях предыдущего примера M = 1-1,3.

4. На плоскость, разграфленную параллельными разломами, фигурирующую в предшествующих задачах, случайным образом размещается любой контур (выпуклый или невыпуклый, замкнутый или незамкнутый) длины *l*. Определить математическое ожидание числа пересечений этого контура с разломами.

Ответ: $M\left[y\right] = \dfrac{2l}{\pi L}$, (5)

т.е. такой же как в предыдущем случае.

Эта задача важна, например, для оценки числа пересечений автодороги, маршрута, траектории, оконтуренного горными выработками участка массива и др. с геодинамически активными зонами.

Например, периметр шахтного поля шахты Анжерская-Южная составляет около 11 километров. Шахтное поле расположено в северной части Кузбасса, где расстояния между границами блоков IV ранга северо-восточного простирания составляют 1,5-2 километра. Таким образом, для шахтного поля следует ожидать 3-5 пересечений границами блоков IV ранга. Действительно, по результатам геодинамического районирования, проведенного в 1988-89 годах, шахтное поле разделено разломами северо-восточного простирания IV ранга на 4

блока и граница горного отвода имеет не менее 5 пересечений с ними.

5. На плоскость, разграфленную параллельными разломами на расстоянии *L*, бросается случайным образом выпуклый замкнутый контур длины *l,* наибольший размер которого *a* не превосходит *L.*

Найти вероятность того, что он пересечется с каким-либо из разломов.

Ответ: $P = \dfrac{l}{\pi L}$ (6)

В условиях предыдущей задачи вероятность пересечения горного отвода с границами блоков II ранга, расстояние между которыми 60-70 километров составит P = 0,1.

6. Геодинамически активные блоки представляют собой прямоугольники со сторонами *L* и *M.* На местность случайным образом размещается объект длиной *l (l<L, l<M).* Найти вероятность того, что объект попадет хотя бы на одну из границ блоков.

Ответ:

$$p(A+B) = \frac{2l}{\pi L} + \frac{2l}{\pi M} - \frac{4l^2}{\pi^2 LM}. \qquad (7)$$

Эта задача важна для случая, когда две системы линейных нарушений взаимно перпендикулярны.

Задачи 1-6 основаны на известных решениях задач Бюффона. Рассмотрим также новые задачи (7-10), решения которых важны при оценке геодинамического риска.

7. Задана система линейных нарушений со средним расстоянием между ними *L* (рис. 1).

Задана некоторая сеть природных объектов или искусственных сооружений (горных выработок, дорог, улиц, газо-, нефте-, водопроводов, метро и т.п.) – рис. 2.

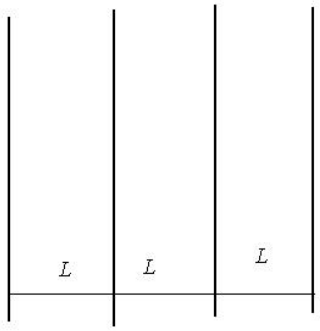

Рис. 1

Найти математическое ожидание числа пересечений сети сооружений сетью геологических нарушений.

Решение аналогичное решениям задач 3 и 4.

Получим: $M\left[y\right] = \dfrac{2l}{L\pi}$, где *l* – длина сети сооружений.

Но если на площади, например, две системы нарушений (рис. 3) то $M\left[y\right]$ будет суммой числа пересечений I-ой системой и II-ой.

Например, территория г. Реутов, упомянутая в задаче 2, имеет блочное строение с размерами блоков от 500 до 700 м в поперечнике, границы блоков по простиранию можно объединить в 4 системы. Длина подземных теплосетей в

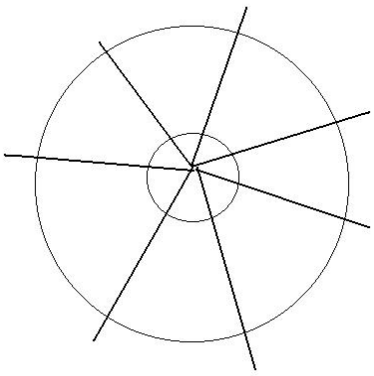

Рис. 2

Таблица 3

Математическое ожидание числа пересечений границ блоков с сетью коммуникаций для центральной части города Реутов

Простирание границ блоков, град.	Расстояние L между границами блоков, м	Математическое ожидание числа пересечений границ блоков с сетью коммуникаций
345-360	500	12,7
315	600	10,6
270-280	450-600	10,6-14,1
30-60	1500	4,24
Итого		38,1-40,6

центральной части города составляет около 10 километров. Число пересечений тепловых сетей с границами блоков 1-й – 4-й систем составит приблизительно M(1-4) = 40 (табл. 3).

Как показал предварительный анализ мест аварий на тепловых сетях, выполненный по заданию администрации города, более 50 % аварий приходится на участки пересечения тепловых трасс с границами геодинамически активных блоков. Таким образом, зная размеры ущерба от одной аварии, можно рассчитывать необходимые риски.

Во всех выше рассмотренных задачах границы геодинамически активных блоков представлены в виде линий, ширина которых не учитывается в получаемых решениях. Вместе с тем зона влияния границ блоков (разломов) может достигать значительных размеров, от нескольких десятков метров до нескольких километров и более. Поэтому важно рассмотреть задачи и получить решения, в которых учитывается ширина разломных зон.

Ниже рассмотрены такие задачи.

8. Игла длиною l бросается на плоскость, разграфленную параллельными полосами шириною h, разделенным L $(L>l)$ (рис. 4). Все положения центра иглы и все ее направления одинаково вероятны.

Найти вероятность P того, что игла частью или целиком окажется в полосе.

Решение. Какая-то часть иглы или игла целиком может оказаться в полосе в двух случаях:

1. если центр иглы попадет в полосу – событие А. В этом случае, в зависимости от ориентировки, игла может оказаться и целиком в полосе или ча-

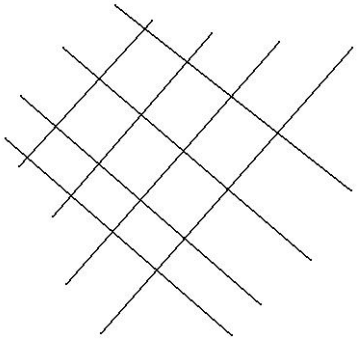

Рис. 3

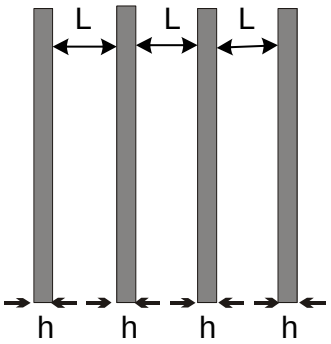

Рис. 4

стью;

2. если центр иглы окажется между полосами, игла пересечет границу какой-нибудь полосы – событие В.

Искомая вероятность *P* будет суммой вероятностей *P(A) и P(B)*, т.е.
$P = P(A) + P(B)$.

Геометрическая вероятность наступления события *A* равна:

$$P(A) = \frac{h}{\mathrm{L} + \mathrm{h}}.$$

Для наступления события *B* необходимо наступление одновременно двух событий: центр иглы окажется между полосами (событие *C*) и игла пересечет границу какой-нибудь полосы (событие *D*). По теореме умножения вероятностей $P(B) = P(C) \cdot P(D)$.

Вероятность наступления события *C* *P(C)* из геометрических соображений равна:

$$P(C) = \frac{L}{L + h}. \qquad (8)$$

Вероятность наступления события *D* (пересечения иглой *границы* левой или правой полосы при попадании центра иглы между полосами) будет, как можно заметить из известного решения задачи Бюффона (3), равна:

$$P(D) = \frac{2l}{\pi L}.$$

(3)

Следовательно

$$P(B) = P(C) \cdot P(D) = \frac{2l}{\pi(L + h)}. \qquad (9)$$

И искомая вероятность
$P = P(A) + P(B)$ будет:

$$P = \frac{h}{L + \mathrm{h}} + \frac{2l}{\pi(L + 2h)}. \qquad (10)$$

Например, при L = 1000 м и l = =100 м получим, что увеличение ширины зоны влияния границы блока существенно увеличивает вероятность попадания на нее объекта (табл. 4).

Таблица 4
Влияние ширины границы блока на вероятность пересечения ее объектом

h, м	0	10	50	100
P	0,06	0,07	0,11	0,15

9. В условиях задачи 8 добавим к условию *L>l* условие *l>h* и найдем вероятность *P* того, что *l* пересечет какую-нибудь полосу шириною *h* (рис. 5).

Решение. По условию, все положения центра иглы и ее ориентировка на плоскости равновероятны. Легко обнаружить геометрически, что игла *l* пересечет какую-нибудь из полос только тогда, когда пересечет какую-нибудь из внешних границ смежных полос (рис. 5). Эти границы отстоят друг от друга на расстоянии $L' = L + 2h$. Этим поставленная задача сводится к задаче Бюффона с расстояниями между линиями $L' = L + 2h$, что и определяет ответ в этой задаче:

$$P = \frac{2l}{\pi(L + 2h)}. \qquad (11)$$

Заметим, что вероятность *пересечения* какой-нибудь полосы целиком меньше на $\frac{2h}{L}$, чем вероятность попасть

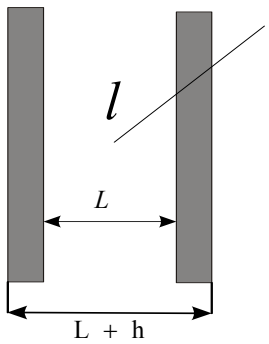

Рис. 5

в полосу части (или полностью) отрезка l (иглы, линейного объекта) или целиком (см. задачу 8). И это естественно из логических соображений.

10. На плоскость, разграфленную параллельными полосами шириной h и расстоянием между полосами L (фигурирующую в предыдущих задачах) случайным образом бросается отрезок длиною l (как в задаче 9, но снимается условие $l<L$).

Найти математическое ожидание числа пересечений отрезком l параллельных полос, которыми разграфлена плоскость.

Решение. Разобьем отрезок l на n элементарных участков

$$\Delta l = \frac{l}{n} = const < L, \text{ но больше } h. \quad (12)$$

Рассмотрим случайную величину Y - число пересечений отрезком l полос; она равна сумме n случайных величин:

$$\mathrm{Y} = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{Y}_i, \quad (13)$$

где Y_i - число пересечений полос *i-ым* участком Δl_i отрезка l.

Так как по (8) $h < \Delta l < L$, то случайная величина Y_i может иметь только два значения: 1 и 0 с вероятностями

$$P(1) = \frac{2\Delta l_i}{\pi\left(L+2h\right)} \text{ (см. задачу 9)} \quad (14)$$

и $$P(0) = 1 - P(1) = 1 - \frac{2\Delta l_i}{\pi\left(L+2h\right)}. \quad (15)$$

Математическое ожидание этой величины равно (по задаче Бюффона 7.31):

$$\mathrm{M}\left[\mathrm{Y}_i\right] = P(1)\cdot 1 + P(0)\cdot 0 = \mathrm{M}\left[\frac{2\Delta l_i}{\pi\left(L+2h\right)}\right]. \quad (16)$$

Здесь $\Delta l_i = \dfrac{L}{h}$ и по теореме сложения математических ожиданий окончательно получим по (9)

$$\mathrm{Y} = \frac{2l}{\pi\left(L+2h\right)}. \quad (17)$$

Пример. Пусть *L = 100 км, h = 0.5 км и l = 500 км.*

$$\mathrm{Y} = \frac{2\cdot 500}{\pi\left(100+1\right)} \approx 3{,}2,$$

а при *h = 10 км*

$$\mathrm{Y} = \frac{2\cdot 500}{\pi\left(100+20\right)} \approx 2{,}7.$$

Как можно видеть, при больших значениях L и l, что характерно для крупных блоков I-II рангов, не так уж сильно влияет ширина зоны границ блоков на вероятности попадания объектов эти зоны и во многих более сложных задачах достаточно моделировать их просто линиями

Задача 4.

На плоскость, фигурирующую в предыдущих задачах бросается случайным образом любой контур (выпуклый или невыпуклый, замкнутый или незамкнутый) длины l.

Определить математическое ожидание числа пересечений этим контуром полос нарушений.

Решение. Разделим контур на n элементарных практически прямолинейных участков длины Δl. Согласно предыдущей задаче, математическое ожидание числа пересечений этим отрезком Δl полос нарушений будет

Таблица 5

Вероятность попадания объектов длиной 100 и 500м на границу блока IV ранга

M	Степень ГДО			
	I	II	III	IV
$P_{100м}$	0,012	0,016	0,021	0,063
$P_{500м}$	0,030	0,040	0,053	0,158

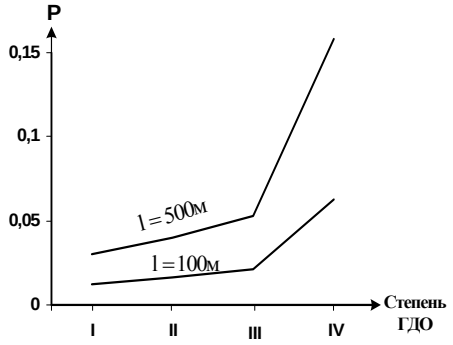

Рис. 6

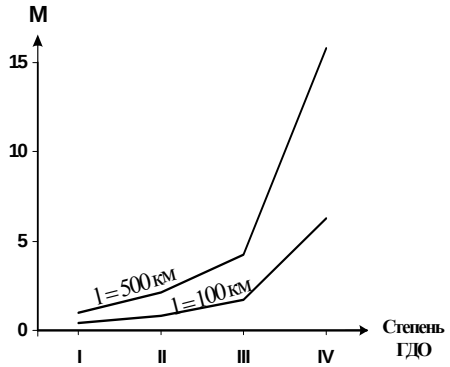

Рис. 7

$$\mathrm{M}[\mathrm{Y}] = \frac{2\Delta l}{\pi(L+2h)},$$

а для всех отрезков, на которые разделен весь контур длиной *l,* по теореме сложения математических ожиданий, ответом будет

$$\mathrm{Y} = \frac{2l}{\pi(L+2h)}, \qquad (18)$$

т.е. то же, что и (17) в предыдущей задаче.

Оценим, как изменяется вероятность попадания объекта на границу блока, а следовательно и геодинамический риск для участков различной степени геодинамической опасности. Среднее расстояние между границами блоков одного и того же ранга, но находящихся в участках различной степени геодинамической опасности, известно из результатов геодинамического районирования.

В табл. 5 представлены значения вероятностей попадания объекта длиной 100 и 500 метров на границу блока IV ранга для участков I-IV степеней геодинамической опасности, а на рис. 6 – соответствующий график.

В табл. 6 представлены значения математического ожидания числа пересечений 2-х систем границ блоков I-II ран-

Таблица 6

Математическое ожидание числа пересечений объектом длиной 100 и 500 км 2-х систем границ блоков I и II рангов

P	Степень ГДО			
	I	II	III	IV
$P_{100м}$	0,4	0,85	1,68	6,3
$P_{500м}$	1,0	2,13	4,24	15,8

гов объектами длиной 100 и 500 километров, а на рис. 7 – соответствующий график.

Как можно видеть из таблиц и рисунков, значения Р и М закономерно нарастают от участка I-й к участку IV-й степени геодинамической опасности.

Таким образом, предлагаемый подход к оценке геодинамического риска может быть использован для широкого круга задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геодинамика* недр. Методические указания/Батугина И.М., Петухов И.М и др. – Л.: ВНИМИ, 1990.- 118 с.
2. *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.
3. *Касьянова Н.А.* Экологические риски и геодинамика. - М.: Научный мир, 2003. - 332 с.
4. *Концепция* «Геодинамическая безопасность освоения углеводородного потенциала недр России»/Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О., Хитров А.М. – М.: Изд-во ИГиРГИ, 2000.-56с.
5. *Степанов В.В.* Геодинамическая опасность промышленных объектов. М., 2001.- 100 с.
6. *Вентцель Е.С., Овчаров А.А.* Теория вероятностей. – М.: Физматиздат, 1969. – 365 с.
7. *Батугин А.С.* Классификация участков земной коры по степени геодинамической опасности//Методика и техника ведения маркшейдерских и геологических работ на шахтах и разрезах: сб.науч.трудов/ВНИМИ, С-Пб., 1997. – с. 206-213.

Коротко об авторах

Батугин Андриан Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Инженерная защита окружающей среды» Московский государственный горный университет.

Р У К О П И С И ,

ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

1. *Мельников Р.В., Диев А.Е.* К вопросу о гидродинамических процессах в рабочей жидкости в гидросистемах строительных машин (491/09-06 — 19.06.06) 8 с.
2. *Алешичев А.Е., Труш М.А.* Организация процесса внедрения автоматизированных систем управления на крупных российских предприятиях (492/09-06 — 19.06.06) 2 с.