

УДК 622.831

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО СТОХАСТИЧЕСКИМ МУЛЬДАМ ОСЕДАНИЯ

Бугаёва Н.А., Яремчук К.В., Назимко В.В.
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина) victor_nazimko@mail.ru

Виконано стохастичне моделювання процесу зрушень масиву гірських порід на чисельній моделі. Установлена закономірність розкиду нахилів у межах мульди зрушень

Ключові слова: мульда зрушень, нахили, стохастичне моделювання

Stochastic simulation has been used to investigate inclinations variance along trough subsidence

Key words: trough subsidence, stochastic simulation

ВВЕДЕНИЕ

Энергетической основной независимости нашего государства остаются запасы каменного угля, которые в состоянии покрывать потребности страны в энергии на 95%. Однако в результате выемки угольных пластов в недрах земли образуются пустоты значительных размеров. Породы под действием силы тяжести и горного давления приходят в движение, смещаются в выработанное пространство, образуя при этом мульду сдвижения на земной поверхности.

Сдвигения и деформации горных пород и земной поверхности при неблагоприятных условиях могут в свою очередь вызывать разрушение наносов и фундаментов зданий и сооружений, нарушение равновесия природных объектов, подтопление лесных массивов или исчезновение водных

объектов расположенных в зоне влияния подземных разработок (в мульде сдвижения).

В связи с этим актуальной задачей является прогнозирование параметров сдвижения, основными из которых являются: оседания, наклоны, горизонтальные деформации, кривизна и ее радиус. Однако существующие методы прогноза ориентированы на детерминированный характер процесса сдвижений. При этом в качестве исходных данных принимаются постоянные определенные величины деформационных и прочностных показателей подрабатываемого массива горных пород. В результате в одной и той же точке мульды получают одинаковое абсолютно определенное значение сдвижения и деформаций.

Вместе с тем натурные инструментальные наблюдения свидетельствуют о том, что часто форма экспериментальной мульды сдвижений значительно отличается от формы расчетной. В качестве типичного примера приведем результаты сопоставления расчетных и измеренных величин оседаний, опубликованных в [1]. Длина лавы была равна примерно 300 м. Глубина разработки составляла около 500 м. Средний угол падения пласта составляет 6° . Мощность пласта 2,0 м. Угольный пласт отрабатывается по столбовой системе разработки. Управление кровлей осуществлялось путем полного обрушения кровли. Из рисунка 1,а видно, что расчетные оседания имеют форму, которая согласуется с мульдами сдвижений построенных по нормативным документам Правил [2]. Однако распределение измеренных оседаний имеет скачкообразный вид, с оседаниями близкими к расчетным, но в некоторых местах их разница достигает 10-20%. На рисунке представлена разница между измеренными и расчетными величинами оседаний. Анализ этой кривой позволяет сделать вывод о том, что над центром лавы разброс оседаний имеет максимальные значения достигающий 1,5 м. Это согласуется с результатами, полученными ранее в работе [3].

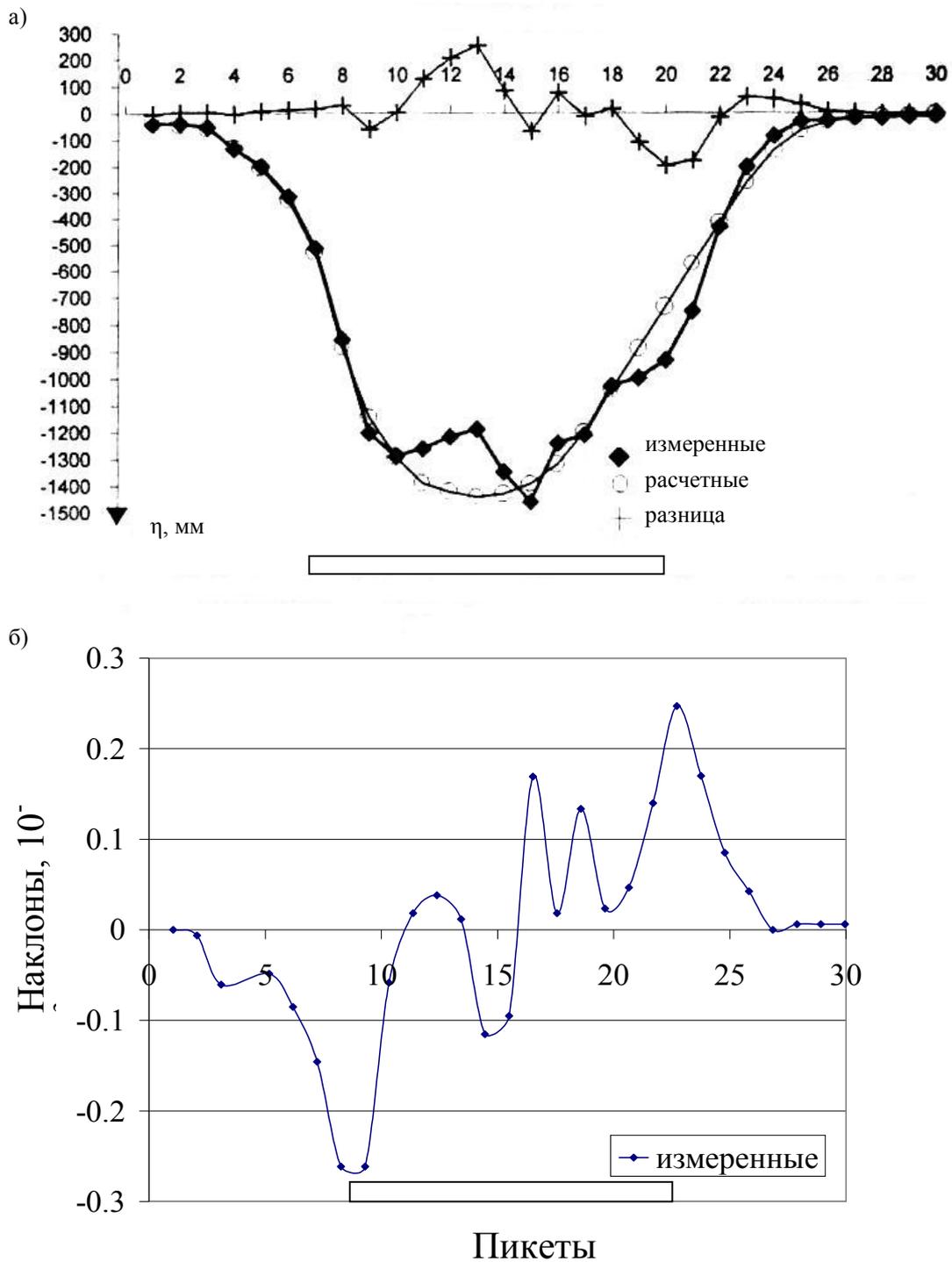


Рис. 1 Распределения измеренных и расчетных оседаний и их разница (а) и наклонов (б)

Важно отметить, что случайные отклонения измеренных в натуральных условиях величин оседаний от расчетных имеют объективные причины, не связанные с повреждением реперов.

Такие отклонения практически всегда регистрируются в условиях отработки американских и австралийских угольных месторождений, где профильные наблюдательные линии закладываются в большинстве случаев на частных территориях, куда доступ посторонним запрещен, а реперы закладываются на глубину 2 м и надежно закрепляются цементно-песчаным раствором.

Существует целый ряд факторов различной природы, которые обуславливают естественный разброс оседаний земной поверхности при ее подработке. К горно-геологическим факторам относятся принципиальная невозможность определить деформационные или прочностные свойства горных пород с абсолютной точностью, невозможность определить мощность слоев вмещающих пород на интервалах между разведочными скважинами, вариация угла залегания угольного пласта, его вынимаемой мощности.

К горно-техническим относим погрешности определения координат горных выработок и скважин в плане (XY) и по высоте (Z). Так в работе [4] показано, что на глубине 1000 м погрешность определения координат в плане составляет ± 20 м, а по высоте ± 5 м при доверительном интервале, соответствующем трем стандартам. Особенно существенно на величину оседания подработанной толщи влияет положение краевых частей охранных сооружений (например, бутовых полос) и их жесткости, которая может варьировать в реальных условиях на 100% и более. Скорость подвигания очистных забоев изменяется при отработке лав в два и более раза, а регистрируется, как правило, не чаще одного раза в месяц, что также вносит вклад в неопределенность конечных величин сдвижения.

К геомеханическим факторам, вносящим неопределенность в величину сдвижений массива горных пород, следует отнести параметры периодики обрушения и сдвижения кровли, (шаг посадки, коэффициент разрыхления, коэффициент подбутовки), которые могут изменяться в несколько раз по мере отработки одной и той же лавы, а их точная и даже более менее достоверная регистрация практически невозможна.

Хорошо известно также, что измеренные в натуральных условиях величины деформации земной поверхности существенно зависят от расстояния между рабочими реперами [5]. В связи с этим указанным нормативным документом рекомендуется принимать расстояние между рабочими реперами, равное 5м при глубине разработки до 100м, 10м при глубине до 300м и 20м для больших глубин отработки длинных очистных забоев.

Величины деформаций также зависят от типа сооружения или объекта, который подрабатывается на земной поверхности. Так мощные и прочные фундаменты сооружений активно взаимодействуют с наносами, на которых они заложены, что приводит к механическому сглаживанию скачков деформаций. Вместе с тем подработка природных объектов типа лесов, водоемов и т.п., или объектов, имеющих малое основание протекает без дополнительных возмущений, когда проявляются все деформации свободной земной поверхности в чистом виде.

Таким образом, вследствие различных неоднородностей в массиве горных пород и вариации процессов сдвижения возникают случайные отклонения оседаний и деформаций от детерминированных распределений по площади мульды сдвижения. В данной статье обсуждаются результаты исследования воздействия вариации деформационных и прочностных показателей горных пород, естественный случайный разброс которых составляет порядка 100% от их среднего значения [6, 7], что приводит к случайной изменчивости оседаний на 30-60%. Это в свою очередь порождает неопределенность результатов расчета параметров деформации земной поверхности.

Предварительный анализ показал, что основной вклад в разброс параметров деформации земной поверхности при ее подработке вносит естественная случайная вариация механических свойств коренных горных пород и наносов. Так от вариации прочностных и деформационных свойств горных пород зависит более 70% общего разброса оседаний земной поверхности.

На сегодняшний день не исследованы закономерности разброса основных параметров деформации вдоль мульды (горизонтальных деформаций, наклонов и кривизны) в зависимости от неопределенности физико-механических свойств горных пород. Таким образом, оценка величины разброса деформаций земной поверхности является актуальной проблемой. Работа, над данной проблемой начата в [3], где выполнено стохастическое моделирование процесса сдвижений породного массива при разных наборах случайных значений физико-механических свойств горных пород. В результате этого была установлена закономерность изменения разброса оседаний в пределах мульды сдвижений над одиночной лавой. Однако исследование распределения разброса деформаций земной поверхности вдоль мульды сдвижений ранее не проводилось.

Из вышесказанного вытекает цель данной работы, которая заключается в установлении закономерностей распределения разброса деформаций земной поверхности вдоль мульды сдвижения над одиночной лавой. В данной работе основное внимание уделяется наклонам, поскольку они весьма часто используются в качестве параметра, по которым оценивается опасность подрботки объектов на земной поверхности.

Для определения случайных величин сдвижения и деформаций земной поверхности использовался метод стохастического моделирования, а также теория вероятности и математическая статистика при оценке параметров разброса деформаций вдоль мульды сдвижения.

В статье часто используются такие термины как детерминированная мульда сдвижения и стохастическая мульда сдвижения. Под детерминированной мульдой сдвижения понимается мульда сдвижения, полученная расчетным путем согласно «Правил охраны...» [2], или другим расчетным методом (например, методом конечных элементов) при допущении, что строение массива горных пород, его физико-механические свойства и геомеханическое состояние являются определенными и достоверно известными.

Стохастической мульдой сдвижения считается мульда сдвижения, рассчитанная с учетом неопределенности и возможного случайного разброса физико-механических параметров вмещающих горных пород. При этом прочностные и деформационные свойства пород рассматриваются как случайные величины с заданным распределением.

ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕКТА И ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

На сегодняшний день большинство исследователей для получения величин оседаний и деформаций земной поверхности используют методы конечных разностей, методы конечных элементов, методы граничных элементов, методы дискретных элементов. Однако как уже было сказано, полученные оценки данных параметров имеют детерминированный характер [8-13].

Поэтому в качестве исходных данных были приняты результаты, полученные из работы [3]. В данной работе используется метод конечных элементов, так как он дает возможность рассчитывать сложные области любой формы и позволяет учесть запредельное деформирование толщи вмещающих пород. Данный метод впервые применялся для исследования влияния стохастических факторов на случайный разброс параметров сдвижений.

Исходные параметры для расчета сдвижений и деформаций земной поверхности приведены в таблице 1.

Были приняты средние горно-геологические и горнотехнические условия. Для условий Донбасса эти условия характеризуются мощностью угольного пласта составляющего около 1,7 м, породами средней обрушаемости, класса A_1 , A_2 . Породы представлены перемежающимися слоями алевролитов и песчаников средней прочности, которые изменяются в пределах 40-70 МПа. Залегание пород пологое. Способ управления кровлей осуществляется путем её полного обрушения. Угольный пласт отрабатывается по столбовой системе разработки, скорость подвигания лавы 100-150 м/мес. Массив подработан одиночным

очистным забоем. По этим данным была построена цифровая модель массива для расчета сдвижения земной поверхности.

Таблица 1 Исходные данные условий подработки

Наименование параметра	Значение
Глубина разработки, м	310
Длина лавы, м	290
Мощность горизонтально залегающего пласта, м	1,7
Мощность наносов, м	60
Мощность слоев, м	10-15
Модуль упругости, ГПа	1-10
Коэффициент Пуассона	0,25
Угол внутреннего трения, град	30
Сцепление, Па	50000
Плотность, кг/м ³	2500
Объемный вес, МН/м ³	0,025

На рис. 2,а показано распределение оседаний земной поверхности при детерминированных исходных данных, то есть при средних физико-механических свойствах, соответствующих условиям Донецко-Макеевского угледобывающего района. Полученная мульда сдвижения согласуется с «Правилами...» [2] с погрешностью, которая не превышает 10-15 %. Максимальное оседание наблюдается над центром лавы и составляет 1,19 м.

После построения детерминированной мульды сдвижения было проведено стохастическое моделирование. При этом модель была создана по подобию реального массива, представляющего собой неоднородное твердое тело с механическими свойствами, значения которых являются случайными величинами и которые с абсолютной достоверностью определить в конкретной точке массива невозможно. В результате получили профиль мульды оседаний, который имеет неправильный (ступенчатый) вид и в отличие от детерминированной мульды несимметричен относительно центра лавы (рис. 2, б).

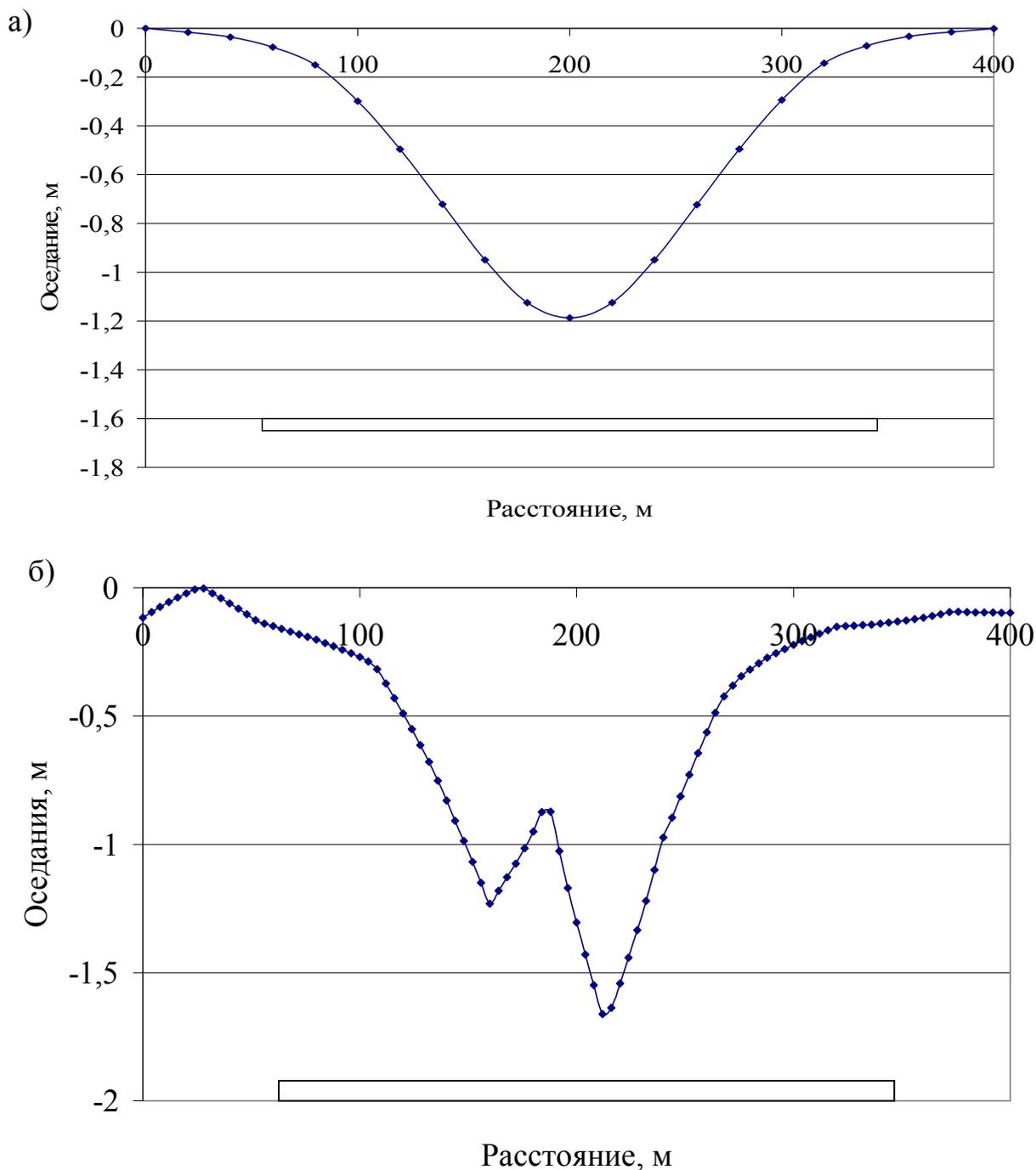


Рис. 2 Расчетные распределения оседаний земной поверхности:
(а) - при детерминированных, (б) – одна из реализации
стохастических исходных данных

Для подтверждения правильности полученных распределений проведем сопоставление с распределениями измеренных и расчетных оседаний, опубликованных в [1].

На рис. 1,б приведены наклоны земной поверхности, вычисленные по измеренным оседаниям, приведенным на рис. 1,а. Из графиков видно, что наклоны имеют значения в пределах $0,25 \cdot 10^{-3}$ в обе стороны относительно оси. На краевых частях наклоны уменьшаются до нуля. Абсолютный разброс наклонов составляет $0,5 \cdot 10^{-3}$. В левой полумульде преобладают отрицательные наклоны, в правой положительные.

В целом, судя по виду данное распределение наклонов отражает основные закономерности, которые прогнозирует теоретическое распределение. Однако отдельные величины фактических наклонов превышают по абсолютной величине на 58% среднюю величину наклонов полученных с помощью детерминированного подхода [2]. Более того, величина разброса, составляющая $0,5 \cdot 10^{-3}$, уже на порядок превышает детерминированный уровень, что подтверждает актуальность задачи и необходимость её решения.

На рис. 3 представлено распределение отклонений наклонов земной поверхности между измеренными и рассчитанными данными, которое является неравномерным. На краевых частях отклонения наклонов близки к нулевому значению. Максимальные отклонения наклонов наблюдаются над центром лавы ($0,013-0,015 \cdot 10^{-3}$). Суммарный диапазон отклонения наклонов составляет $0,028 \cdot 10^{-3}$.

Для оценки разброса было проведено стохастическое моделирование путем решения одной и той же задачи с разными наборами случайных значений механических свойств вмещающих пород. В результате объединения всех стохастических мульд сдвижений получено распределение оседаний, приведенное на рис. 4. Суммарный разброс оседаний на краевых частях составляет 1 м, в то время как над центром лавы он достигает 2,5 м. Таким образом, появляется область ограниченная максимальными и минимальными значениями оседаний. График свидетельствует о том, что в окрестности мульды оседаний наблюдается полоса стохастического разброса величин оседаний относительно детерминированного уровня.

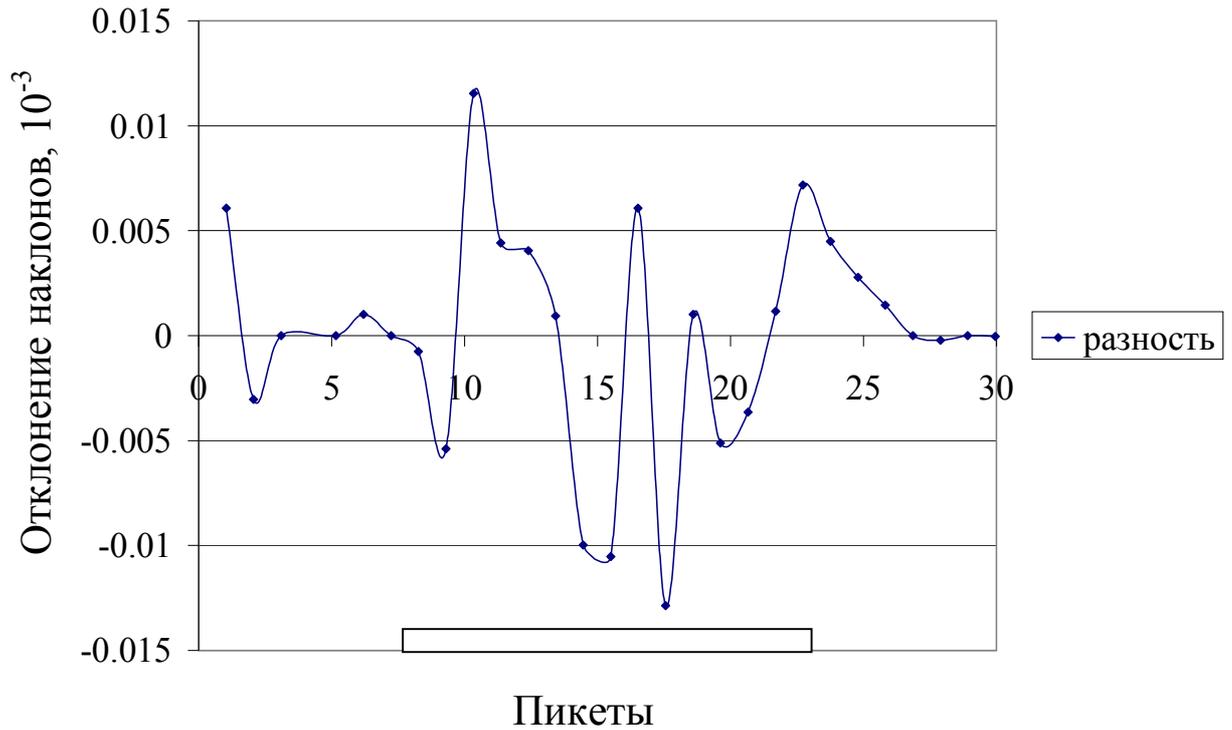


Рис. 3 Разница между измеренными и рассчитанными наклонами, полученными по рис. 1а

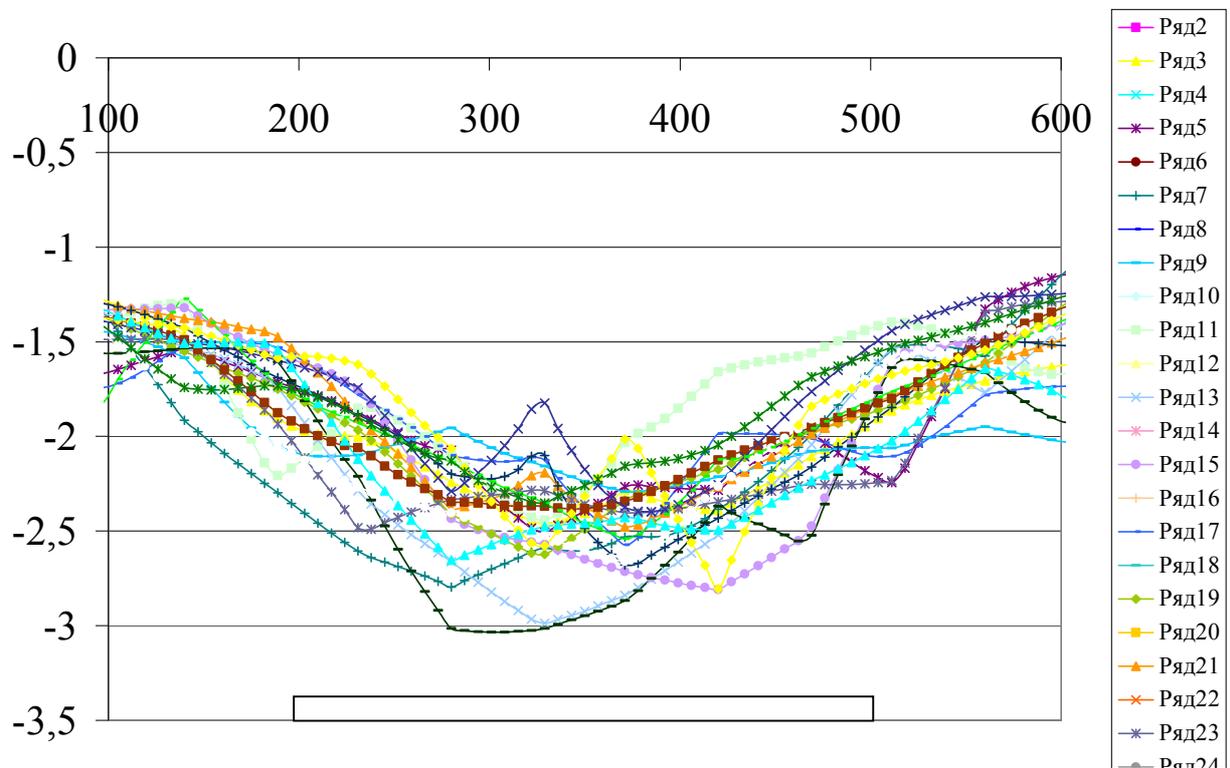


Рис. 4 Распределение оседаний земной поверхности при случайных выборах исходных данных

Для определения разброса отклонений стохастических мульд оседаний земной поверхности от среднего значения в долях, было построено распределение, в котором учитывалось совместное влияние на оседание земной поверхности вариации основных механических свойств вмещающих пород: коэффициента Пуассона, модуля упругости, сцепления и угла внутреннего трения (рис. 5).

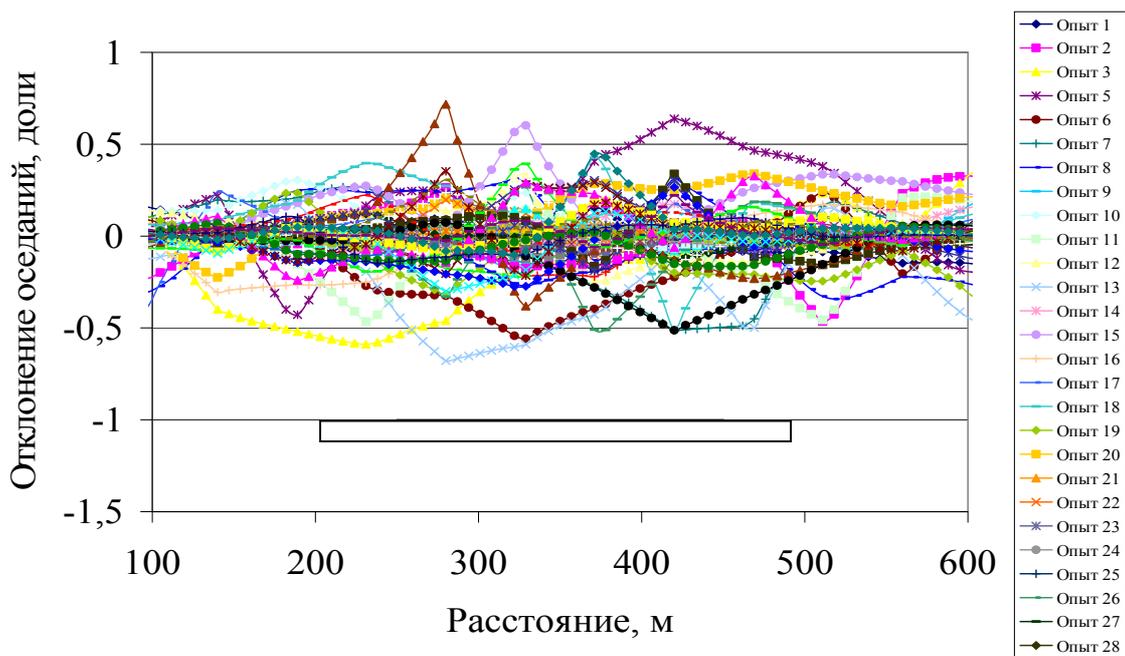


Рис. 5 Распределение величин отклонений оседаний земной поверхности при испытании плоской модели с изменением всех физико-механических свойств пород

Известно, что из существующих гипотез и теорий прочности наиболее удовлетворительно описывает поведение горных пород теория Кулона-Мора. Согласно этой теории разрушения происходят от растяжения или касательных напряжений, а само разрушение носит характер отрыва или сдвига по площадкам, на которых достигается предельное состояние, причем величина предельного касательного напряжения является функцией нормального напряжения, действующего на площадке скольжения.

Прочностные свойства определяют способность пород сопротивляться разрушению под действием приложенных

механических напряжений. Они характеризуются пределами прочности при сжатии и растяжении, сцеплением и углом внутреннего трения.

К деформационным свойствам относят упругие свойства горных пород, которые характеризуются модулем упругости E при одноосном напряженном состоянии, модулем сдвига G , модулем объемной упругости K и коэффициентом поперечных деформаций ν (коэффициент Пуассона) [14].

Равномерные оседания и горизонтальные сдвиги не всегда представляют собой реальную опасность. Более опасными являются наклоны i , кривизна K и растяжения – сжатия в плоскости земной поверхности ε . Одним из показателей допустимости подработки инженерных сооружений, технологического оборудования и санитарно-технических сетей (телевышки, дымоходные трубы, водонапорные башни, системы канализации) являются наклоны. Неравномерность разброса оседаний точек мульды сдвига создает разброс наклонов ее отдельных участков.

Наклон в любой точке представляет собой тангенс угла наклона касательной к кривой оседаний, который рассматривается как первая производная от функции оседания по горизонтальной координате.

Далее выполняется нахождение вариации наклонов от функции оседания при стохастическом изменении деформационных и прочностных свойств горных пород, для каждого из которых было проведено по 20 опытов. Первую производную от оседаний, которая является, по существу наклоном i вычисляем по следующей формуле:

$$\Delta i = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1)$$

где Δy – отклонение оседаний от детерминированной величины, м;

Δx - длина интервала, м.

Все полученные результаты содержатся в электронных таблицах. Ниже приведена часть одной такой таблицы.

Таблица 2 – Пример расчета наклонов при вариации модуля упругости.

Расстояние вдоль мурьды X	Абсцисса середины интервала, в котором бралась производная, м	Длины интервалов, м	Отклонение оседаний от детерминирова нной величины, м	Опыт 1	Разность оседаний, м	Наклон
1	2	3	4	5	6	
700	696,5		-0,0792			
693	689,5	7	-0,0632	0,0160	0,0030	
686	682,5	14	-0,0503	0,0129	0,0024	
679	675,5	21	-0,0400	0,0103	0,0019	
672	668,5	28	-0,0315	0,0086	0,0016	
665	661,5	35	-0,0239	0,0076	0,0014	
658	654,5	42	-0,0167	0,0072	0,0013	
651	647,5	49	-0,0127	0,0040	0,0007	
644	640,5	56	-0,0150	-0,0023	-0,0004	
637	633,5	63	-0,0167	-0,0018	-0,0003	
630	626,5	70	-0,0180	-0,0013	-0,0002	
623	619,5	77	-0,0186	-0,0006	-0,0001	
616	612,5	84	-0,0185	0,0001	0,0000	
609	605,5	91	-0,0175	0,0010	0,0002	
602	598,5	98	-0,0157	0,0018	0,0003	
595	591,5	105	-0,0129	0,0028	0,0005	
588	584,5	112	-0,0095	0,0034	0,0006	
581	577,5	119	-0,0056	0,0038	0,0007	
574	570,5	126	-0,0015	0,0041	0,0008	
567	563,5	133	0,0026	0,0042	0,0008	
560	556,5	140	0,0067	0,0040	0,0008	
553	549,5	147	0,0053	-0,0014	-0,0003	
546	542,5	154	0,0036	-0,0017	-0,0003	
539	535,5	161	0,0017	-0,0019	-0,0004	
532	528,5	168	-0,0004	-0,0021	-0,0004	
525	521,5	175	-0,0025	-0,0021	-0,0004	
518	514,5	182	-0,0047	-0,0022	-0,0004	
511	507,5	189	-0,0080	-0,0032	-0,0006	
504	500,5	196	-0,0128	-0,0049	-0,0009	
497	493,5	203	-0,0175	-0,0047	-0,0009	
490	486,5	210	-0,0217	-0,0042	-0,0008	
483	479,5	217	-0,0253	-0,0036	-0,0007	
476	472,5	224	-0,0279	-0,0026	-0,0005	
469	465,5	231	-0,0293	-0,0014	-0,0003	
462	458,5	238	-0,0254	0,0039	0,0007	

После обработки данных, полученных ранее, строятся графики распределений стохастических отклонений наклонов

вдоль мульды при случайной вариации каждого основного механического свойства горных пород (рис. 6 - 9).

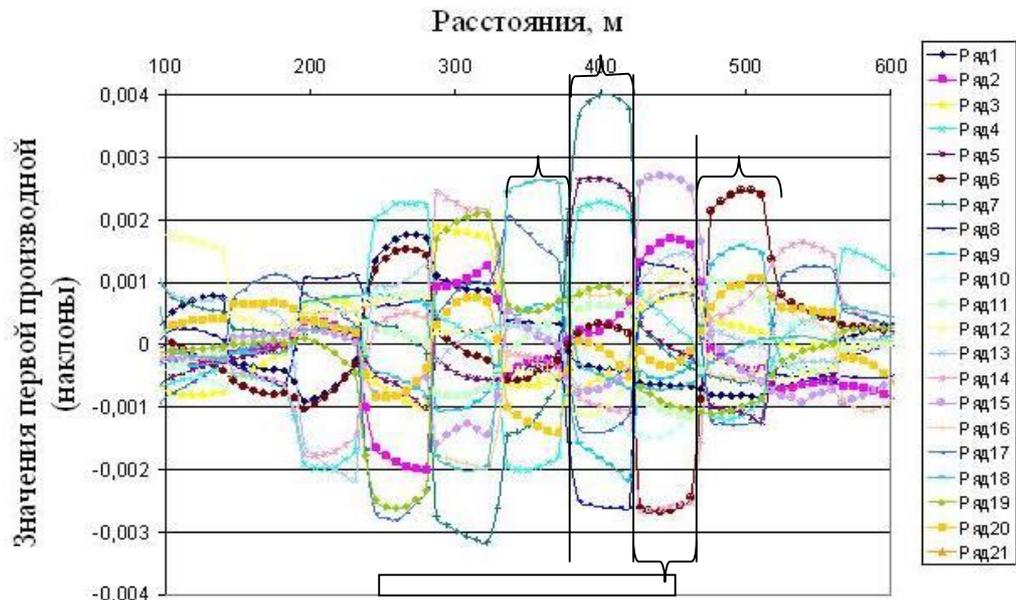


Рис. 6 Распределение стохастических отклонений наклонов вдоль мульды при случайной вариации модуля

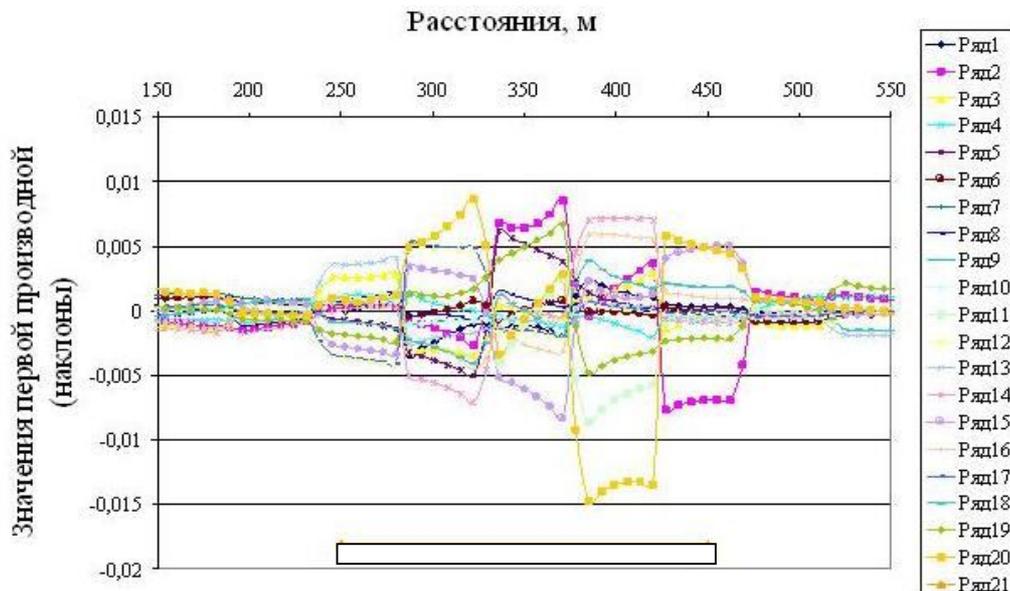


Рис. 7 График распределения отклонений наклонов вдоль мульды оседаний со стохастической вариацией

На рис. 6 приведено распределение стохастических отклонений наклонов вдоль мульды при случайной вариации модуля упругости. Видно, что наклоны имеют положительный и

отрицательный знаки, а их значения находятся в пределах 0,004 и 0,003. На краевых частях наклоны уменьшаются до 0,001 по обе стороны оси. Абсолютный разброс наклонов составляет 0,007.

На рис. 7 демонстрируется график распределения отклонений наклонов со стохастической вариацией коэффициента Пуассона. В данном случае наклоны принимают значения крайние значения, которые равны 0,01 и -0,015. Суммарный диапазон отклонений наклонов составляет 0,025. На краевых частях наклоны также уменьшаются до значений 0,002 по обе стороны относительно оси.

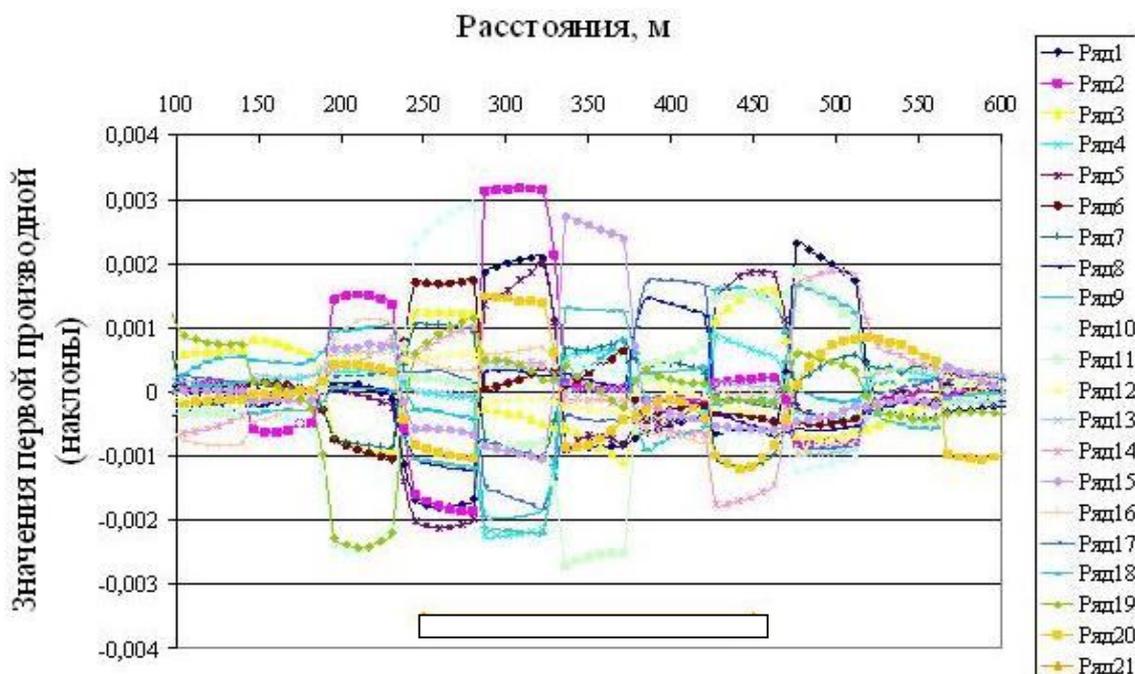


Рис. 8 Распределение стохастических отклонений наклонов при испытании модели со случайным изменением сцепления

На рис. 8 представлено распределение стохастических отклонений наклонов со случайным изменением сцепления. Наклоны составляют 0,003 по обе стороны относительно оси. Абсолютный разброс отклонений наклонов равен 0,006, а на краевых частях наблюдается уменьшение значений наклонов до 0,001 в обе стороны.

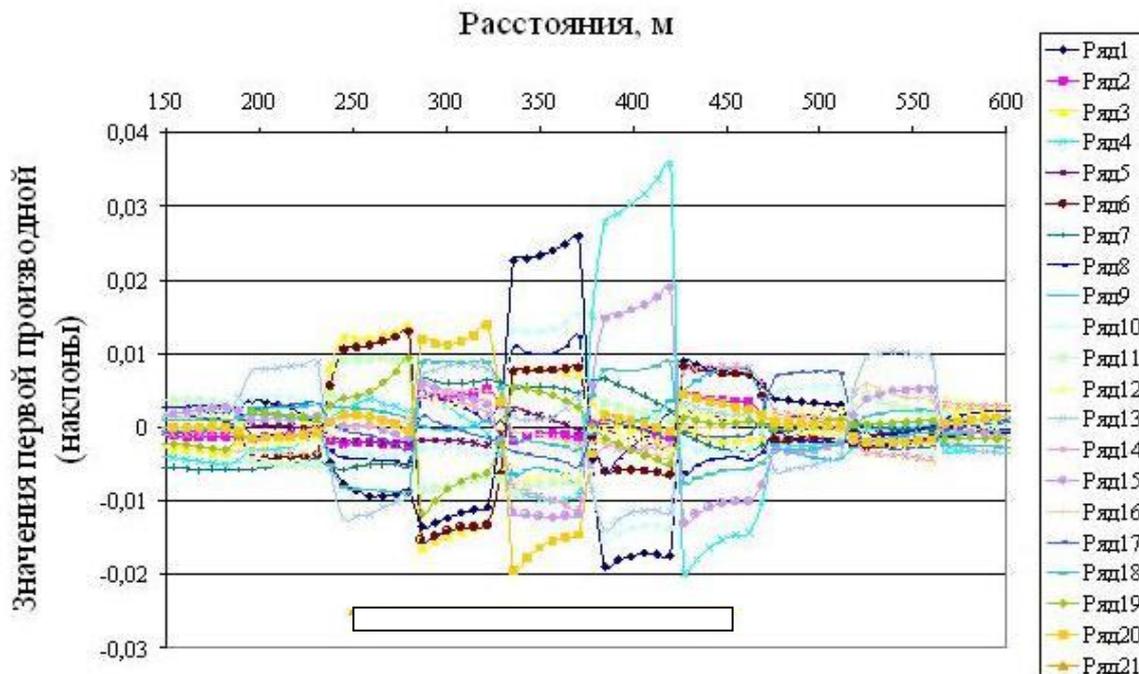


Рис. 9 Распределение отклонений наклонов вдоль мульды при стохастической вариации углов внутреннего трения

На рис. 9 приведено распределение отклонений наклонов вдоль мульды при стохастической вариации углов внутреннего трения. Из рисунка видно, что наклоны составляют 0,035 и -0,02. При этом суммарный диапазон отклонений наклонов равен 0,055. И снова наблюдается уменьшение наклонов до 0,005 по обе стороны относительно оси на крайних частях.

Сопоставляя амплитуды вариации наклонов при воздействии разных факторов, следует сделать вывод о том, что естественная вариация прочностных свойств гонных пород и наносов вносит больший вклад в разброс величины наклонов. Так максимальная амплитуда разброса значений наклонов при вариации угла внутреннего трения в семь раз больше чем при случайном изменении деформационных показателей (модуля деформации). Такой результат закономерен и объясняется тем, что сколь-нибудь заметные сдвигения на земной поверхности возникают только после того, как в коренных породах

происходит разрушение, сопровождающееся необратимыми движениями массива горных пород.

В результате по полученным графикам можно сказать, что они имеют примерно симметричный вид, максимальные значения наклонов наблюдаются над серединой лавы, а минимальные на краевых частях границы мульды. При этом форма огибающей разбросов имеет колоколообразный вид.

На рис. 10 показана гистограмма вариации наклонов в характерном сечении мульды сдвижения в зависимости от стохастического разброса величины сцепления в подрабатываемой толще горных пород. Проверка показала, что во всех сечениях мульды гистограммы удовлетворительно согласуются с нормальным распределением. При этом средняя величина стандарта близка к 0,0015.

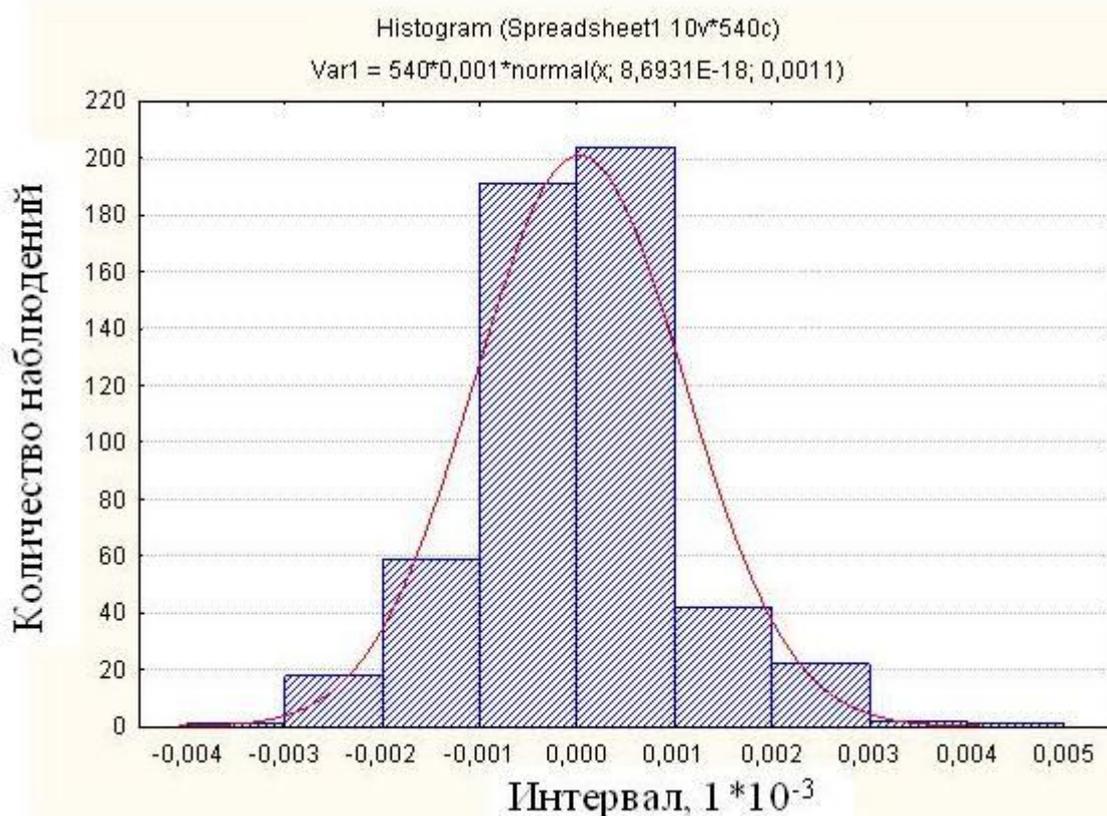


Рис. 10 Распределение стохастических отклонений наклонов при вариации модуля упругости

На рис. 11 показано распределение разброса кривизны деформированной земной поверхности при естественной вариации сцепления горных пород. Заметно, что и разброс кривизны также распределен согласно закону, который установлен для вариации наклонов. Однако детальное исследование параметров разброса кривизны при естественной вариации механических свойств горных пород и наносов будет выполнено отдельно и является предметом дальнейших исследований.

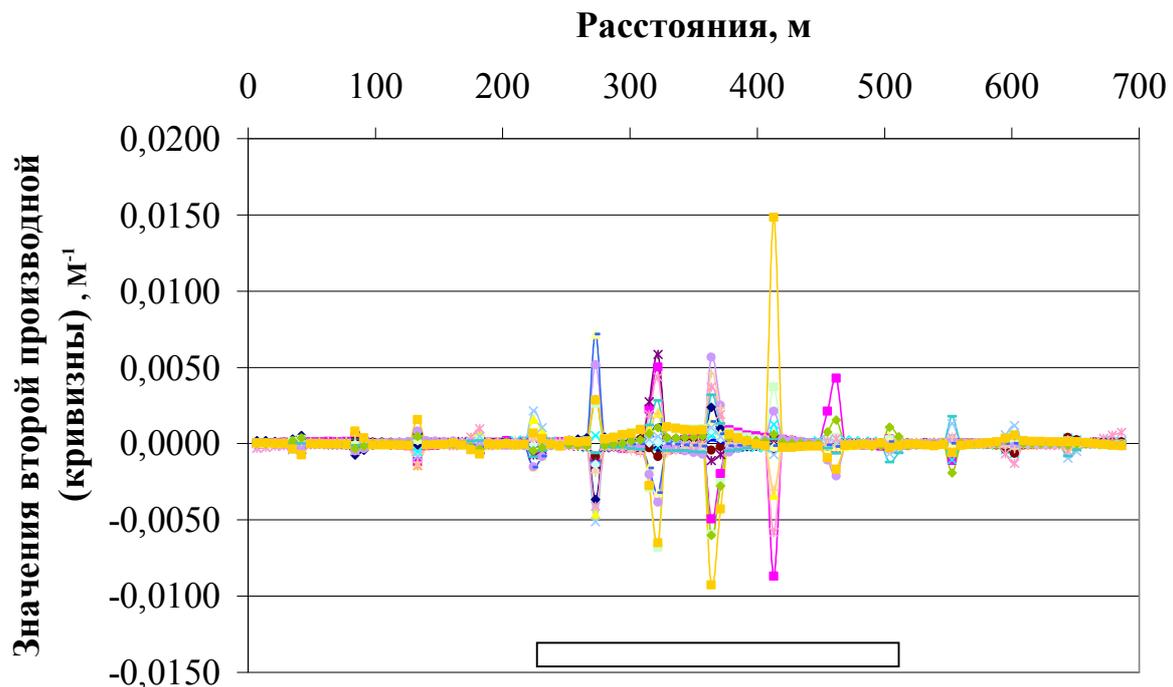


Рис. 11 Распределение стохастических отклонение кривизны вдоль мульды при случайной вариации сцепления

Для примера выполнения статистического анализа используются данные, которые показаны на рис. 6 построенного для наклонов при стохастическом изменении модуля упругости. Статистические выборки данных компоновались из характерных сечений взятых по длине мульды. При этом, учитывая симметричность задачи данные левого и правого крыла совмещаются, что увеличивает исходную выборку и повышает достоверность результатов статистического анализа. После того,

как по всем сечениям сделана выборка характерных точек, формируется таблица, которая будет выглядеть следующим образом (табл. 3).

Таблица 3 – Выборка характерных точек сечения для модуля упругости

Длина интервала, м	Наклон для опыта 1	Наклон для опыта 2	Наклон для опыта 3	Наклон для опыта 4	Наклон для опыта 5	Наклон для опыта 6	Наклон для опыта 7	Наклон для опыта 8	Наклон для опыта 9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
98	0,0003	-0,0003	-0,0007	-0,0007	-0,0006	0,0000	0,0010	0,0001	-0,0003
119	0,0007	-0,0003	-0,0008	-0,0005	-0,0004	-0,0001	0,0006	0,0002	-0,0003
140	0,0008	-0,0003	-0,0007	-0,0004	-0,0003	-0,0004	0,0005	0,0001	-0,0003
161	-0,0004	-0,0001	-0,0004	-0,0005	-0,0001	-0,0007	0,0002	-0,0005	0,0000
182	-0,0004	0,0000	-0,0001	-0,0007	0,0000	-0,0008	0,0002	-0,0006	0,0001
196	-0,0009	0,0004	0,0007	-0,0019	0,0002	-0,0010	0,0005	0,0011	0,0007
210	-0,0008	0,0004	0,0008	-0,0020	0,0003	-0,0008	0,0005	0,0011	0,0007
231	-0,0003	0,0001	0,0006	-0,0017	0,0001	-0,0003	0,0005	0,0011	0,0008
238	0,0007	-0,0010	-0,0001	0,0007	-0,0002	0,0006	0,0004	0,0008	0,0008
252	0,0016	-0,0018	-0,0007	0,0021	-0,0006	0,0014	0,0003	0,0006	0,0008
273	0,0018	-0,0020	-0,0009	0,0023	-0,0009	0,0015	0,0000	0,0007	0,0007
287	0,0011	0,0009	0,0019	0,0005	-0,0003	0,0002	-0,0028	0,0002	-0,0010
301	0,0009	0,0010	0,0018	0,0003	-0,0005	0,0000	-0,0030	0,0002	-0,0010
322	0,0009	0,0013	0,0017	0,0000	-0,0006	-0,0002	-0,0032	0,0002	-0,0008
329	0,0007	0,0007	0,0010	-0,0007	-0,0005	-0,0004	-0,0026	0,0003	-0,0003
322	0,0003	-0,0005	-0,0006	-0,0020	-0,0005	-0,0006	-0,0014	0,0004	0,0003
301	0,0003	-0,0002	-0,0006	-0,0020	-0,0003	-0,0004	-0,0011	0,0003	0,0007
287	0,0003	-0,0003	-0,0005	-0,0018	-0,0001	-0,0002	-0,0006	0,0002	0,0006
273	-0,0003	0,0002	-0,0007	0,0022	0,0026	0,0002	0,0037	-0,0025	-0,0016
252	-0,0004	0,0003	-0,0004	0,0023	0,0026	0,0003	0,0040	-0,0026	-0,0019
238	-0,0004	0,0007	-0,0003	0,0021	0,0024	0,0002	0,0038	-0,0026	-0,0022
231	-0,0006	0,0013	0,0006	0,0008	0,0003	-0,0026	0,0004	0,0013	-0,0004
210	-0,0007	0,0017	0,0008	0,0004	0,0000	-0,0027	-0,0002	0,0012	-0,0005
196	-0,0007	0,0016	0,0008	0,0001	-0,0002	-0,0025	-0,0004	0,0011	-0,0003
182	-0,0008	-0,0001	0,0004	-0,0011	-0,0010	0,0021	-0,0005	-0,0002	0,0013
161	-0,0008	-0,0004	0,0003	-0,0011	-0,0011	0,0025	-0,0006	-0,0004	0,0016
147	-0,0008	-0,0004	0,0002	-0,0009	-0,0012	0,0024	-0,0006	-0,0004	0,0015
140	-0,0007	-0,0006	0,0001	-0,0003	-0,0006	0,0014	-0,0005	-0,0005	0,0003
119	-0,0006	-0,0006	-0,0001	0,0004	-0,0004	0,0006	-0,0005	-0,0005	-0,0004

По каждому сечению накапливалось несколько сотен точек, что позволяло подобрать достоверные параметры распределения,

характеризующего гистограмму в данном сечении. Оценка закона распределения осуществлялась с помощью критерия Пирсона. Оказалось, что все экспериментальные гистограммы симметричны и не противоречат нормальному распределению (рис. 10).

Для объединения всех данных в общую выборку используем ранее полученные значения и построенные графики всех отклонений при одновременной вариации всех прочностных и деформационных показателей (рис. 6-9).

Исходя из того, что графики имеют примерно симметричный вид, разделяем их по оси абсцисс и совмещаем в одну выборку. Для этой цели проводится операция зеркального совмещения левой и правой части графиков.

Далее строятся графики зеркального отображения для каждого основного механического свойства горных пород. Ниже приведен пример полученных графиков (рис. 12).

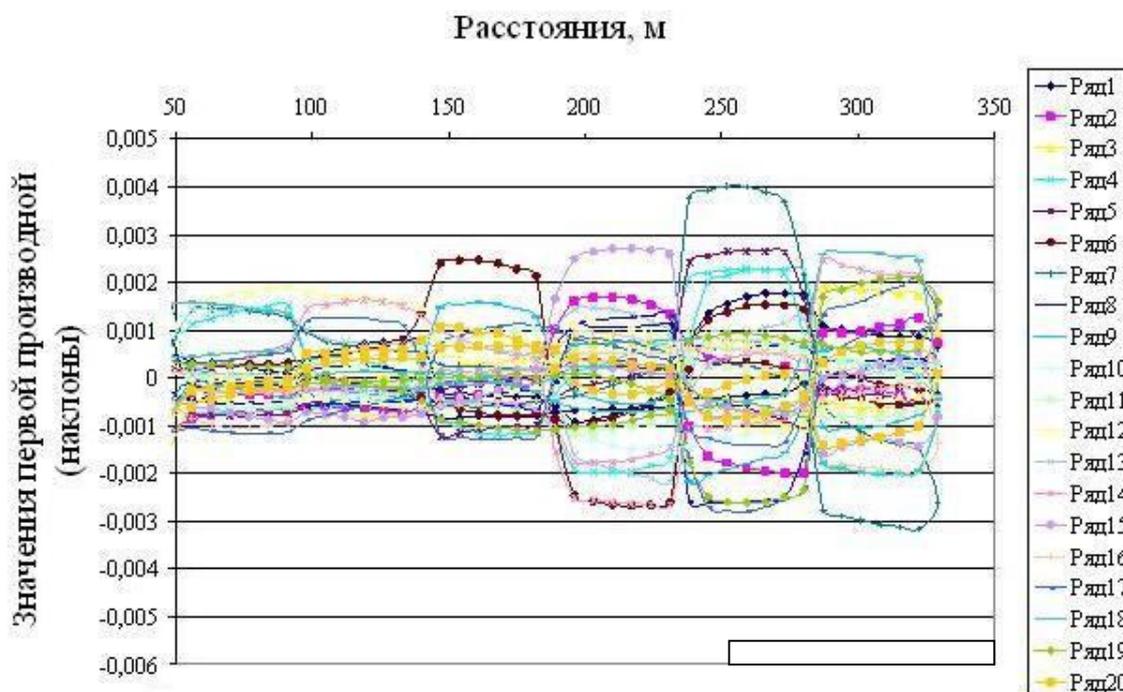


Рис. 12 Объединенные распределения стохастических отклонений наклонов при вариации модуля упругости

Судя по графикам можно сделать вывод о том, что наблюдается явный колоколообразный вид огибающих, что

свидетельствует о том, что максимальное отклонение приурочено к средней части мульды.

Далее выполняется построение огибающих разброса наклонов при вариации всех механических показателей горных пород. Для этого необходимо на ранее полученных графиках зеркального отображения выбрать сечения напротив рядов элементов (см. рис. 12). В данных сечениях сформировали выборки разбросов показателей деформаций и построены гистограммы. Затем по критерию Пирсона подобрали закон распределения, который характеризует данные гистограммы, не противоречащие нормальному закону распределения. Все значения выписываются в отдельную таблицу, которая и будет основой для построения огибающей (табл. 4).

Таблица 4 – Расчетные данные для построения огибающей при вариации модуля упругости

Расстояние вдоль мульды по X	Наклоны для модуля упругости	Разность расстояний вдоль мульды по X	Приведенные координаты мульды
1	2	3	4
56	0,0011	-217	1
63	0,0013	-210	0,9677
70	0,0014	-203	0,9355
77	0,0014	-196	0,9032
84	0,0014	-189	0,8710
91	0,0015	-182	0,8387
98	0,0018	-175	0,8065
105	0,0017	-168	0,7742
112	0,0017	-161	0,7419
119	0,0017	-154	0,7097
126	0,0016	-147	0,6774
133	0,0016	-140	0,6452
140	0,0015	-133	0,6129
147	0,0021	-126	0,5806
154	0,0023	-119	0,5484
161	0,0024	-112	0,5161
168	0,0025	-105	0,4839
175	0,0025	-98	0,4516
182	0,0024	-91	0,4194
1	2	3	4
189	0,0024	-84	0,3871
196	0,0026	-77	0,3548
203	0,0027	-70	0,3226

210	0,0027	-63	0,2903
217	0,0027	-56	0,2581
224	0,0026	-49	0,2258
231	0,0025	-42	0,1935
238	0,0037	-35	0,1613
245	0,0039	-28	0,1290
252	0,0040	-21	0,0968
259	0,0040	-14	0,0645
266	0,0039	-7	0,0323
273	0,0038	0	0

Для нахождения огибающей ее вид подбирали с помощью формулы экспоненциальной зависимости, которая записывается в следующем виде:

$$V_2 = a * \exp(-V_1^2/b) + c \quad (2)$$

где a, b, c – эмпирические коэффициенты;

V_1 – приведенные координаты X;

V_2 - величина разбросов.

Данная формула используется, потому что она удовлетворительно описывает колоколообразную форму распределений.

Таблица 5 – Окончательные данные для построения огибающей разброса наклонов и деформаций при вариации модуля упругости

Приведенные координаты по формуле	экспериментальные	расчетные	Значения разброса с вероятностью более 99%
1	0,0011	0,0014	0,0019
0,9677	0,0013	0,0014	0,0019
0,9355	0,0014	0,0015	0,0019
0,9032	0,0014	0,0015	0,0019
0,8710	0,0014	0,0015	0,0019
0,8387	0,0015	0,0015	0,0020
0,8065	0,0018	0,0015	0,0020
0,7742	0,0017	0,0016	0,0020
0,7419	0,0017	0,0016	0,0020
0,7097	0,0017	0,0016	0,0021
1	2	3	4
0,6774	0,0016	0,0017	0,0021
0,6452	0,0016	0,0017	0,0022
0,6129	0,0015	0,0018	0,0022

0,5806	0,0021	0,0019	0,0023
0,5484	0,0023	0,0020	0,0024
0,5161	0,0024	0,0021	0,0025
0,4839	0,0025	0,0022	0,0026
0,4516	0,0025	0,0023	0,0027
0,4194	0,0024	0,0024	0,0029
0,3871		0,0025	0,0030
0,3548	0,0026	0,0027	0,0031
0,3226	0,0027	0,0028	0,0033
0,2903	0,0027	0,0030	0,0034
0,2581	0,0027	0,0031	0,0035
0,2258	0,0026	0,0032	0,0037
0,1935	0,0025	0,0033	0,0038
0,1613	0,0037	0,0035	0,0039
0,1290	0,0039	0,0035	0,0040
0,0968	0,0040	0,0036	0,0041
0,0645	0,0040	0,0037	0,0041
0,0323	0,0039	0,0037	0,0042
0	0,0038	0,0037	0,0042

В результате получаем огибающую разброса наклонов и деформаций при стохастической вариации модуля упругости рис. 13. Далее для всех остальных показателей основных механических свойств огибающие строятся аналогично (рис. 14-16).

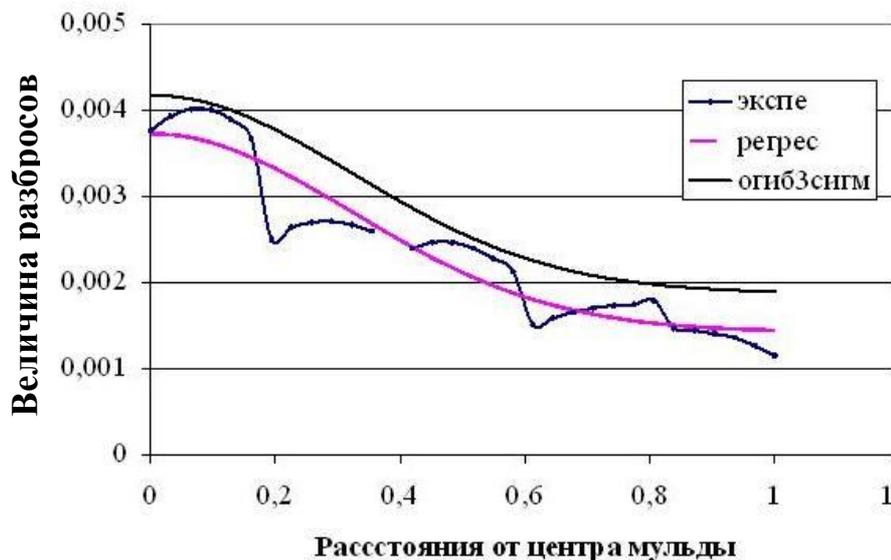


Рис. 13 Огибающая разброса наклонов и деформаций при вариации модуля упругости

Для аналитического описания подобрана зависимость экспоненциального вида. Методом наименьших квадратов определяются коэффициенты А, В, С. Регрессионная зависимость

совмещается с экспериментальной и в итоге огибающая принимает колоколообразный вид с максимальным значением разброса наклонов над центром лавы и минимальным на ее периферии.

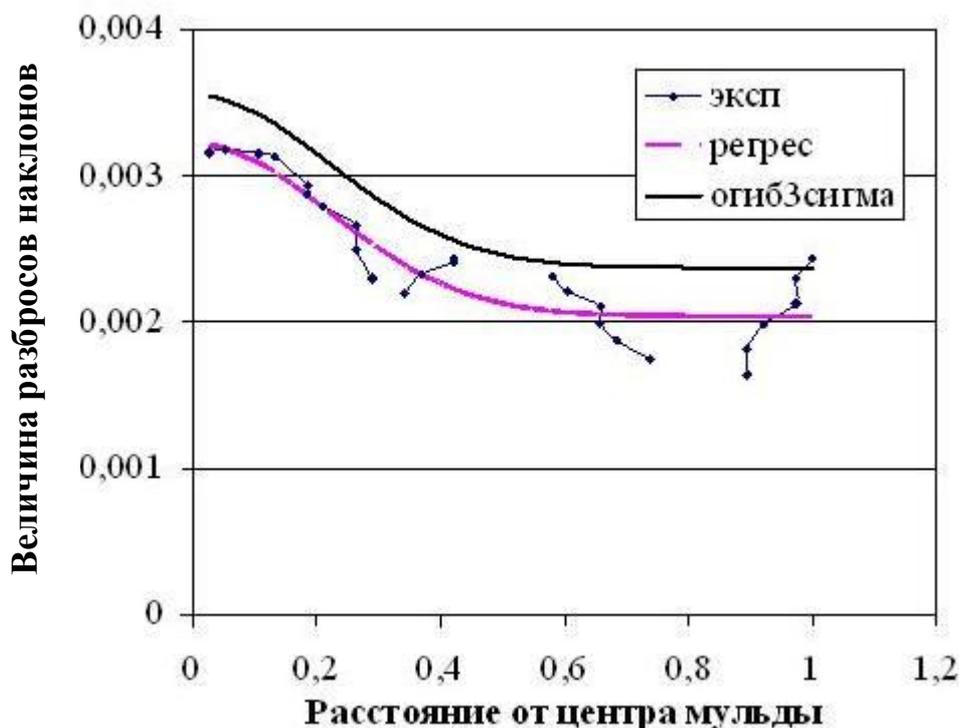


Рис. 14 Огибающая разброса наклонов и деформаций при изменении коэффициента Пуассона

Таким образом, на рис. 14 представлена огибающая разброса наклонов при вариации коэффициента Пуассона. При этом максимальные и минимальные значения составляют 0,0032 и 0,0021. При изменении сцепления (рис. 15) эти значения равны 0,0142 и 0,0021. На рис. 16 показана огибающая разброса наклонов при вариации углов внутреннего трения. Анализируя данный график можно отметить, что максимальные значения наблюдаются над центром лавы и составляют 0,0325, а минимальные на краевых частях и равны 0,0053.

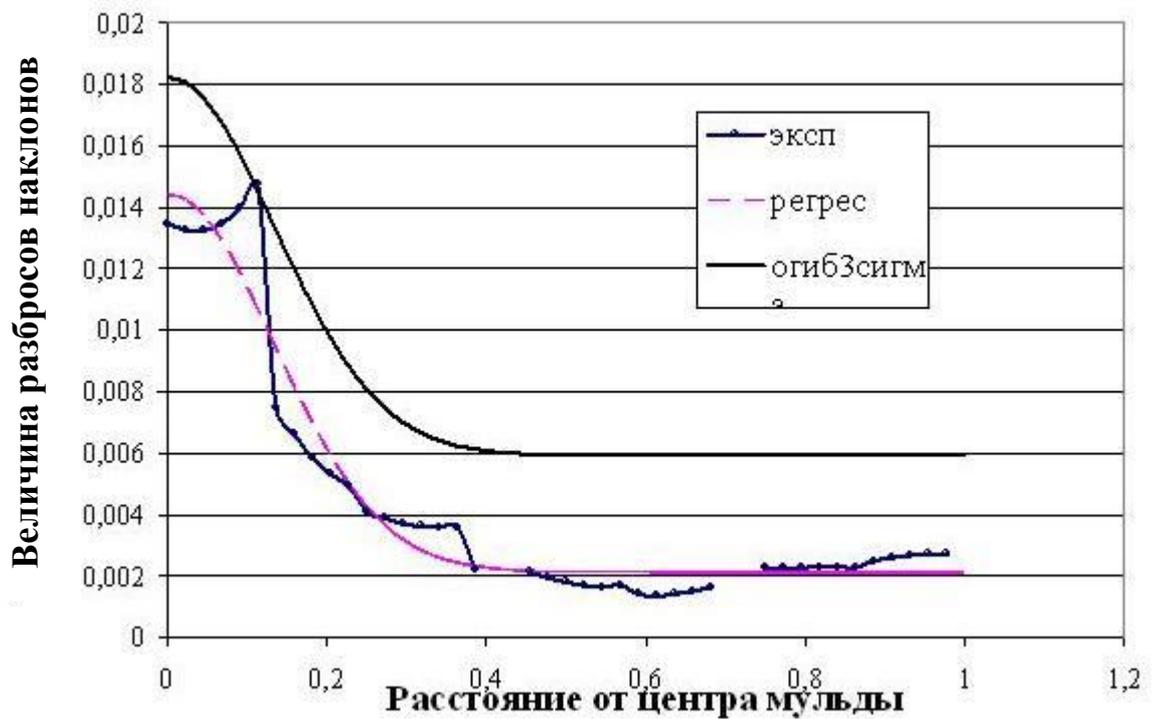


Рис. 15 График огибающей разброса наклонов и деформаций при случайном изменении сцепления

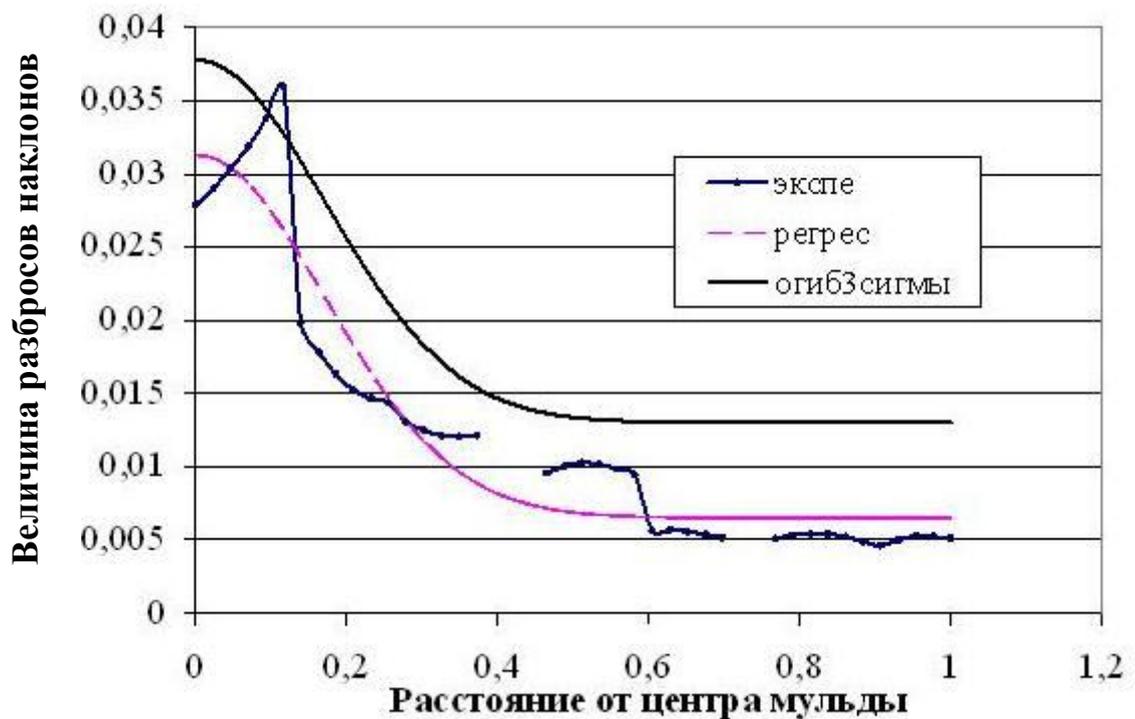


Рис. 16 Огибающая разброса наклонов при стохастической вариации углов внутреннего терния

В итоге, по полученным огибающим рис. 13-16 можно сделать вывод, что разброс показателей деформаций земной поверхности в несколько раз больше при вариации прочностных показателей пород по сравнению с вариацией деформационных. Это совпадает с физическим смыслом процесса, поскольку основная часть сдвижения возникает в результате запредельного деформирования пород, которая сопровождается их полным разрушением.

Следует подчеркнуть, что деформационные свойства вмещающих пород играют основную роль в процессе сдвижения при упругом деформировании пород, которое имеет место при оседании земной поверхности не более чем на 10-20 см. Как правило, это происходит на стадии отхода лавы от разрезной печи. Как только лава отходит от разрезной печи на расстояние большее своей длины и тем более при наступлении условий полной подработки, основную роль в механизме сдвижения играют процессы разрушения. Именно поэтому разброс показателей деформации земной поверхности определяется в конечном итоге прочностными показателями вмещающих пород.

Для учета разброса наклонов и деформаций при вариации всех механических показателей горных пород, строится итоговая огибающая (рис. 17). Эту огибающую будем использовать для внесения поправок в детерминированную величину деформаций земной поверхности. Были произведены предварительные расчеты для других исходных ситуаций и граничных условий. В частности проведено моделирование отдельно для неполной и полной подработки. Данные расчеты показали, что процентное отношение разброса наклонов остается примерно такого же порядка, что позволяет выразить закон распределения в процентах от максимальной детерминированной величины наклона для этих же условий.

Для данной модели получены значения эмпирических коэффициентов $A=0,0023$, $B=0,2074$, $C=0,0014$. Коэффициент регрессии составил $R=0,946$, при этом 89,4% отклонений объясняется случайным разбросом данных. Такая надежность

оценки эмпирических коэффициентов А, В и С является весьма высокой и вполне удовлетворяет практике.

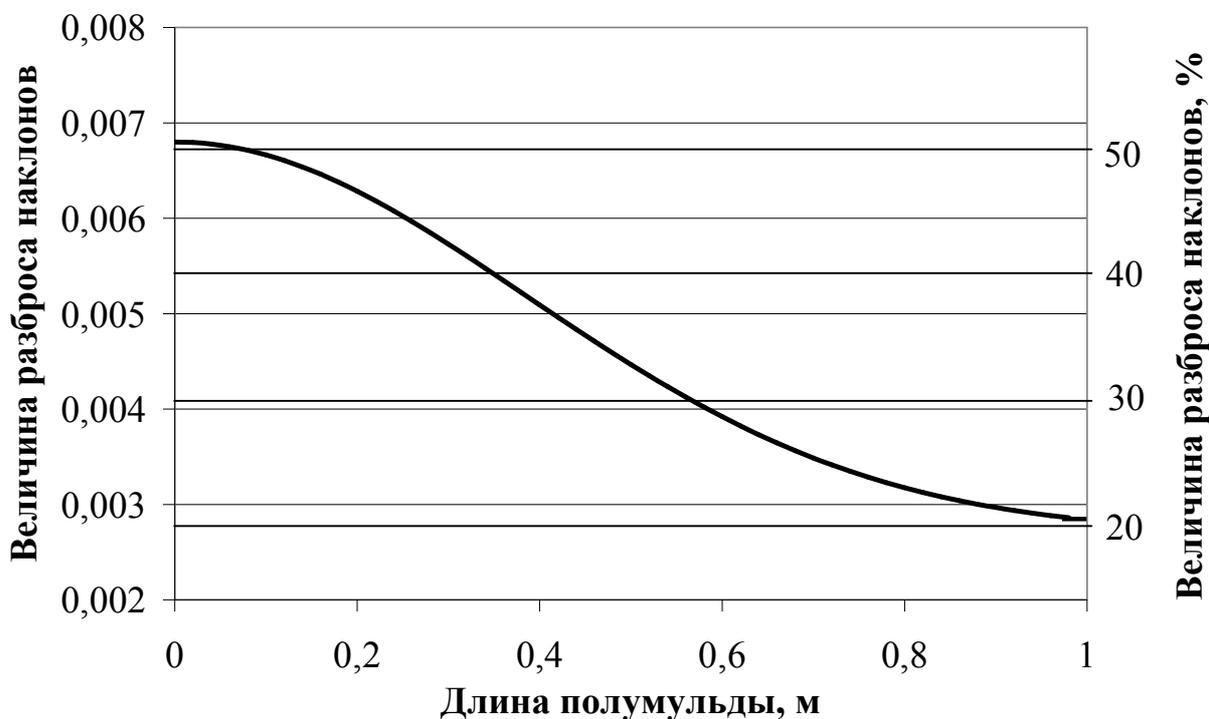


Рис. 17 Итоговая огибающая распределения разброса отклонения наклонов

Из рис. 17 видно, что в центре мульды разброс имеет максимальный абсолютный разброс равный 0,0068, а на краевых частях данный разброс составляет 0,0028. По отношению к максимальной детерминированной величине наклона, над центром лавы получили разброс равный 51%, а над краевыми частями 21%.

Рассчитываем разброс отклонений при вариации каждого из механических показателей горных пород, используя полученную максимальную величину отклонения. В результате изменения модуля упругости данный разброс над центром лавы составляет 30%, а над краевыми частями 19%.

Аналогичным образом рассчитывается диапазон вариации для всех остальных свойств. Таким образом, при изменении коэффициента Пуассона диапазон составляет 23-17%; при

вариации сцепления – 110-16%, угла внутреннего трения – 268-90%.

Как видим, наибольшая величина разброса наклонов при одновременной вариации всех механических показателей горных пород и наносов меньше, чем возможная максимальная величина разброса при вариации механических свойств. Надо полагать, что указанная особенность является следствием нелинейного сложения эффектов случайной естественной вариации деформационных и прочностных свойств горных пород и наносов, а также следствием центральной предельной теоремы. Во всяком случае, установленную особенность следует проверить с помощью специально поставленных экспериментов.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВАРИАЦИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

При подработке земной поверхности могут возникать критические деформации, в качестве которых регламентируются наклоны, горизонтальные деформации и кривизна [2]. Предусмотрен расчет фактических величин этих деформаций и сравнение с допустимыми значениями. Например, допустимые величины наклонов изменяются от 0,03 до 0,15, в зависимости от типа, высоты, важности подрабатываемого объекта. Так, например, для башенного копра допустимая величина составляет 0,04.

Рассмотрим случай подработки телевизионной вышки высотой не более 50 м. Согласно правилам критический наклон не должен превышать 0,07.

Нахождение распределения наклонов и их разброса вдоль мульды выполняется по следующей методике:

1. Вычисляем детерминированные распределения наклонов по любой известной методике (эмпирические методы, метод конечных элементов и другие). На рис. 18 данное распределение показано сплошной линией для принятых условий.

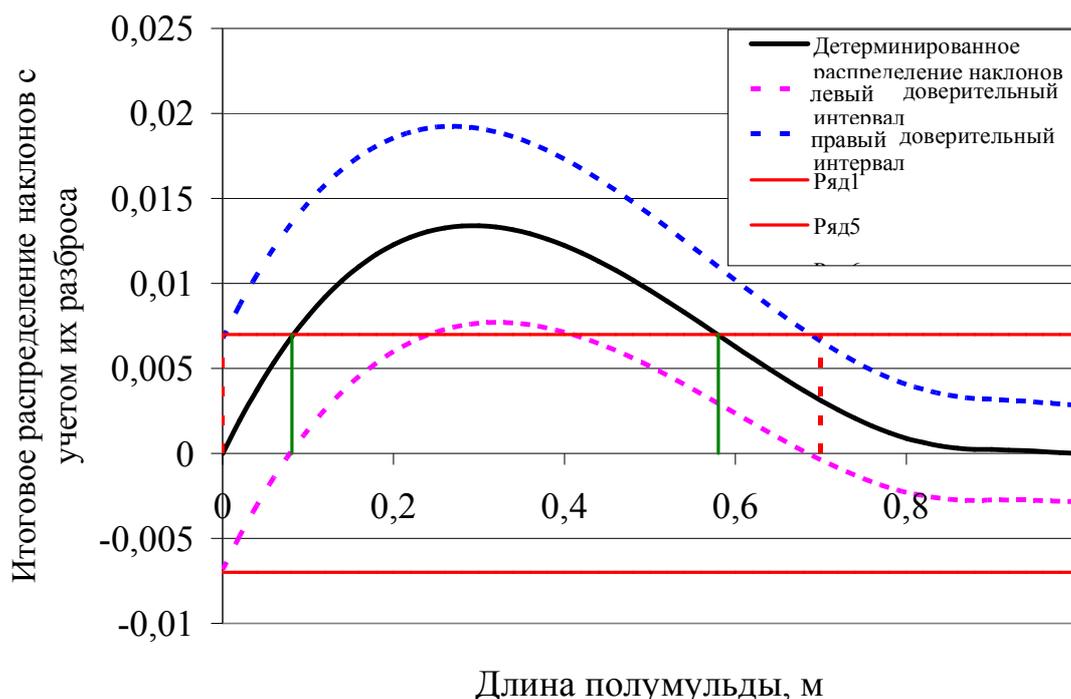


Рис. 18 Итоговое распределение наклонов с учетом их разброса

2. Вводим поправку в детерминированные величины наклонов по формуле

$$i = i_0 \pm \Delta i \quad (3)$$

где i_0 – детерминированный наклон;

Δi – определяется по формуле

$$\Delta i = \frac{i_{0\max} * \Delta}{100},$$

где Δ – величина стохастического разброса наклонов, определяемая в процентах по правой шкале рис. 17.

Результаты этих операций приведены на рис. 18 для условий описанных в начале данной работы (см. табл. 1). Анализ уточненного графика свидетельствует о том, что детерминированная величина наклонов изменяется от 0 до 0,013, при чем все наклоны в данном случае для правой полумульды направлены в сторону ее центра, то есть имеют один знак. Возможная величина наклонов с учетом его стохастического разброса достигает 0,019. То есть на самом деле наклоны могут быть в 1,5 раза больше чем предусмотрено «Правилами охраны...» [2]. Кроме того, на участках мульды от 0 до 0,07 и

далее точки 0,7 наклоны могут менять знак. Такая поправка является весьма существенной.

На этом же графике нанесены допустимые уровни наклонов вправо и влево. Совместный анализ всех графиков на рис. 18 свидетельствует о том, что диапазон опасных деформаций определенный на основе детерминированного подхода составляет 0,51 длины мульды, а сам участок расположен на интервале 0,07-0,58 от центра мульды.

После ввода поправок интервал опасных деформаций увеличивается по длине до 0,7 длины мульды, что в 1,4 раза больше. А сам интервал распространяется от центра мульды до 0,7 её длины.

Это означает, что мероприятия по защите объектов следует выполнять на большем интервале, по сравнению с тем, что вычислялся раньше на основе детерминированного подхода.

Таким образом, ввод поправки деформации на стохастичность позволяет увеличить надежность защиты подрабатываемых объектов и повысить безопасность их эксплуатации.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в любом сечении мульды сдвижения естественный разброс показателей деформации земной поверхности согласуется с нормальным распределением, причем величина разброса в центре мульды максимальна.

2. Различные механические свойства горных пород вносят разный вклад в амплитуду вариации показателей деформации земной поверхности, причем вклад вариации прочностных показателей в 5-8 раз больше чем при вариации деформационных характеристик. Так разброс наклонов при вариации сцепления изменяется в пределах 0,002-0,015, что составляет 16-110% от максимальной величины наклона определенной по детерминированной методике. При разбросе угла внутреннего трения эти пределы составляют 0,006 -0,032, или 45-268%. Естественная вариация модуля упругости создает

разброс наклонов в пределах от 0,0015 до 0,0037 или 19-30%, а флуктуация величины коэффициента Пуассона порождает разброс значения наклонов в диапазоне 0,0021-0,0032, что составляет 17-23%.

3. В естественных условиях, когда имеет место вариация всех механических показателей разброс изменяется в пределах от 0,0028 до 0,0068 или 21-51%, причем максимум наблюдается в центре и уменьшается к ее периферии.

4. Огибающая разбросов величины наклона вдоль мульды сдвижения имеет колоколообразную форму, которая с надежностью 0.99 описывается экспоненциальной зависимостью вида $V_2 = a \cdot \exp(-V_1^2/b) + c$, причем эмпирические коэффициенты равны $A=0,0023$, $B=0,2074$, $C=0,0014$.

5. Учет поправки для величины наклонов за естественную вариацию механических свойств горных пород приводит к тому, что величины наклонов в пределах полумульды даже для простейшего случая могут менять знак, а величина возможных наклонов увеличивается в 1,5 раза.

6. При детерминированном подходе диапазон опасных наклонов для радиовышки в полумульде сдвижений над одиночной лавой изменяется от 0,07-0,58 длины мульды, а длина диапазона составляет 0,51 от длины мульды. При вводе поправок за стохастичность механических свойств, длина диапазона опасных наклонов увеличивается в 1,4 раза, а сам диапазон расположен на интервале от 0 до 0,7.

7. Учет поправки за естественную вариацию механических свойств повышает безопасность эксплуатации наземных объектов благодаря повышению достоверности определения величин деформаций и участков, на которых эти деформации позволяют допустимый уровень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Schenk Jan. Dynamism of spatial displacements of points based on in-situ measurements and dependence on geomechanical properties of the roof/ - Poland, Cracow. – 2000.
2. Правила охрани сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
3. Бугаёва Н.А., Назимко В.В. Особенности распределения стохастических отклонений оседаний земной поверхности при её подработке одиночной лавой. ПРОБЛЕМИ ГІРСЬКОГО ТИСКУ. Збірник наукових праць №16/Під заг. ред. О.А. Мінаєва - Донецьк, ДонНТУ, 2008 – 260с.
4. Кузьмин В.И., Мининг С.Э., Редькин Г.М. Геометризация и рациональное использование недр – М. Недра, 1991 – 320 с.
5. Методические указания по наблюдению за сдвигами горных пород и за подрабатываемыми сооружениями.- Л.: ВНИМИ, 1987.-184с.
6. Коломиец В.А., Назимко В.В., Сажнев В.П. «Разработка метода оценки разброса параметров сдвижений земной поверхности». ПРОБЛЕМИ ГІРСЬКОГО ТИСКУ. Випуск 13/ Під заг. Ред. О.А. Мінаєва. – Донецьк, ДонНТУ, 2005.
7. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Кужель С.В. Масштабный эффект в горных породах. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2004. – 132 с.
8. Гавриленко Ю.Н., Папазов Н.М., Морозова Т.В. Динамика оседаний земной поверхности при большой глубине разработки и высокой скорости подвигания забоя // Проблеми гірського тиску.-Донецьк, ДонДТУ, 2000. - №4. - С. 108-119.
9. Кратч Г. Сдвигание горных пород и защита подрабатываемых сооружений; Пер. с нем. под ред. Р.А. Муллера и И.А. Петухова. – М.: Недра, 1978. – 496 с.
10. Назаренко В.А. Влияние скорости подвигания очистного забоя на сдвигание земной поверхности / Науковий вісник НГА України. - №13, 2002. - С. 16-20.
11. Кулибаба Я.И. О возможном способе описания сдвижения горных пород при подземной разработке //

Совершенствование технологии подземных горных работ: Научн. сообщения / Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. – 1984. – Вып. 227. – С. 97-104.

12. Peng S.S. Surface subsidence engineering. – Littleton: - SMME. – 1992. – 160 p.

13. Четверик М.С., Андрощук Е.В. Теория сдвижения массива горных пород и управления деформационными процессами при подземной выемке угля. Днепропетровск: РИА „Днепр-VAL”, 2004. – 148 с.

14. Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. Свойства горных пород и методы их определения. - М., изд-во «Недра», 1969. – 392 стр.

1. Здано до редакції 16.11.2009

2. Рекомендував до друку д.т.н. Александров С.М.