

УДК622.1:622.834

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ ТОЧЕК ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ПРОСТИРАНИЮ

EMPIRICAL RELATIONSHIPS BETWEEN THE VERTICAL SUBSIDENCE AND HORIZONTAL DISPLACEMENTS OF INDIVIDUAL POINTS ON THE UNDERMINED SURFACE ALONG STRIKE

Свирко Сергей Владимирович, аспирант, e-mail: svirko@ngs.ru

Svirko Sergey V., Postgraduate

Ренев Алексей Агафангелович,

доктор техн. наук, профессор, e-mail: raa@kuzstu.ru

Renev Aleksey A., Dr. Sc. in Engineering, Professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация. Актуальность работы: Закономерности движения точек муьды сдвижения в плоскости вертикальных оседаний и горизонтальных сдвижений в зависимости от подвигания очистного забоя большинством исследователей не рассматривались, развитие муьды сдвижения на стадии ее формирования остается практически неизученным.

Цель работы: Целью работы является установление взаимосвязи между вертикальными и горизонтальными сдвижениями отдельных точек подрабатываемой поверхности на профильной линии по простиранию.

Методы исследования: Закономерности процесса сдвижения отдельных точек земной поверхности, подрабатываемой горными работами, выявляются частотными инструментальными наблюдениями на профильных линиях. Дальнейший анализ производится математическими методами, в том числе и с привлечением теории случайных чисел.

Результаты: Установлены функциональные зависимости между вертикальными и горизонтальными сдвижениями отдельных точек подрабатываемой поверхности на разрезе по простиранию. Эти исследования с учетом ранее достигнутых результатов позволят прогнозировать развитие оседаний и горизонтальных сдвижений отдельных точек в динамике (в зависимости от положения очистного забоя относительно монтажной камеры) с учетом скорости подвигания фронта очистных работ.

Abstract. The urgency of the discussed issue: The regularities of individual point's displacements in the mold formation process have not been considered by most researchers. This phenomenon indicates insufficient level of knowledge in this area.

The main aim of the study: The study aim is establishment the relations between the vertical and horizontal point's displacements on profile line along strike.

The methods used in the study: Patterns of individual point's displacement of the undermined earth's surface are identified by frequency instrumental observations on the relevant lines. Further analysis is done by mathematical methods, including with the random numbers theory.

The results: Empirical relationships between the vertical subsidence and horizontal displacements of individual points on the undermined surface are established. These studies are based on previously achieved results will help predict the development of subsidence and horizontal displacement of individual points in the dynamics (depending on the position of the working face to the mounting chamber). The influence of rate of face advance is taken into account.

Ключевые слова: Земная поверхность, подработка, динамическая муьда, оседание, горизонтальное сдвижение, скорость подвигания забоя, закономерность, расчет.

Key words: Daylight surface, undermining, dynamic zone of displacement, subsidence, horizontal displacements, rate of face advance, regularity, calculation.

Одной из основных задач при рассмотрении вопросов безопасной подработки объектов на земной поверхности является определение прогно-

ных величин сдвижений и деформаций для выбора мер охраны сооружений, находящихся в зоне влияния очистных работ. Основным действующим

нормативным документом, регламентирующим охрану подрабатываемых сооружений и природных объектов при разработке угольных месторождений, являются «Правила охраны...» [1]. Нормативный документ разработан ВНИМИ на основе результатов многолетних инструментальных наблюдений, обобщения опыта ведения горных работ под зданиями, сооружениями и природными объектами, лабораторных и аналитических исследований процесса сдвижения горных пород и земной поверхности и является основополагающим в методологии расчета деформаций земной поверхности для условий закончившегося процесса сдвижения. В нём указаны детерминированные значения углов сдвижения, граничных углов, углов полных сдвижений и максимальных оседаний, а также функции типовых кривых профиля мульды сдвижений, которые получены как средние по обобщениям наблюдений 60 – 70-х годов прошлого века, когда скорости подвигания очистных забоев не превышали 150м/мес (5м/сут) при размерах выемки вкрест простирания до 80-120м.

В настоящее время средняя скорость подвигания высокомеханизированных очистных забоев достигает 15м/сут и более. Выросли и размеры выработок вкрест простирания. В рамках познания геомеханических процессов, протекающих в новых условиях, на шахтах Кузбасса были заложены наблюдательные станции с проведением на них серий частотных наблюдений. Закладка наблюдательных станций грунтовых реперов производилась типовым традиционным способом [2] – в главных сечениях мульды сдвижения. Это позволило накопить достаточные по статистическим нормам инструментальные наблюдения, позволяющие производить репрезентативные оценки динамических явлений в подрабатываемой земной поверхности.

Обобщение полученных экспериментальных данных с целью решения задач прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности и массива горных пород в процессе движения очистных забоев с повышенными скоростями было начато А.С. Ягуновым в монографии «Динамика деформаций...» [3]. В продолжение познания геомеханических процессов, протекающих в подземной угледобывающей геотехнической системе, на базе выполненных наблюдений авторами исследованы особенности смещения отдельных точек подрабатываемой земной поверхности высокоскоростными очистными забоями при отработке пологонаклонных угольных пластов Кузбасса. При рассмотрении элементов мульды сдвижений сохранена терминология А.С. Ягунова, введенная им в работе [3]: «динамическая микромульда» - это динамическая мульда сдвижения в начале своего развития (от начала возникновения до образования плоского дна). Микромульда при этом разбивается по простиранию лавы на 2 полумикромульды, так как распределения оседаний в каждой из них и их длины отличаются друг от друга. Полу-мульда со стороны разрезной печи называется «полу-мульда позади забоя» $l_{пз}$, полу-мульда со стороны монтажной камеры - «полу-мульда впереди забоя» $l_{вз}$.

Ранее проведенными исследованиями [4] установлено, что по характеру сдвижения точек земной поверхности в плоскости $\xi\eta$ профиль динамической мульды по простиранию делится на 4 характерные зоны А, В, С и D (рис. 1), размеры которых определяются по граничным углам δ_0, δ'_0 и углам $\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \psi_{зМ}', \psi_{зд}'$, установленным по инструментальным наблюдениям.

Установлены закономерности (функции распределения) изменения оседаний точек земной поверхности в характерных зонах (хз) А, В, С и D

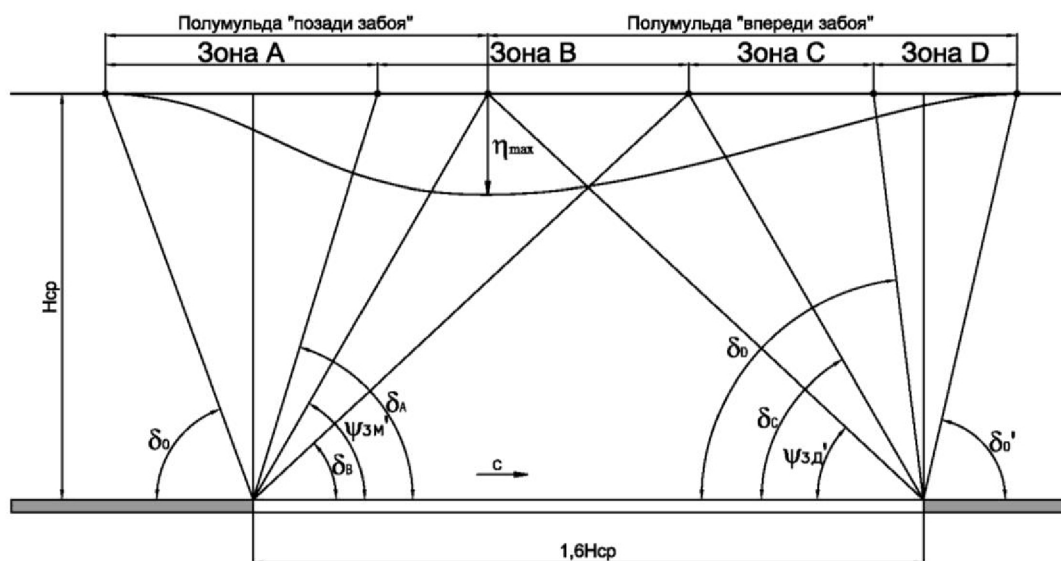


Рис. 1. Зоны сдвижения А, В, С и D в сформированной микромульде при положении очистного забоя $D_{2X} = 1,6H_{CP}$ на разрезе по простиранию лавы.

в зависимости от текущего положения очистного забоя (lt) на интервале $D_{2X} = 1,6H_{CP}$ [5]. Исходные данные инструментальных наблюдений представлены в нормализованном виде. Переход от традиционных единиц измерения к нормализованному осуществлен с использованием линейной нормализации, выполненной в пределах изменения переменных $[0, 1]$ по формуле (1):

$$x_{nik} = \frac{x_{ik} - x_{\min k}}{x_{\max k} - x_{\min k}}, i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

где x_{ik} , x_{nik} – значения переменной в традиционном измерении и в нормализованном виде в k -той выборке; $x_{\min k}$, $x_{\max k}$ – минимальное и максимальное значения переменной в k -той выборке; n – число данных в k -той выборке; N – число выборок.

Функции распределения оседаний в характерных зонах $S_{\eta, xz}(lt)$ представлены отношениями:

$$S_{\eta, xz}(lt) = \frac{\eta_{xz, ri, lt, k}}{\eta_{xz, \max, ri, Lt, k}} \quad (2)$$

где $\eta_{xz, ri, lt, k}$ – текущие значения наблюдаемых оседаний в характерных зонах (xz) отдельных то-

чек поверхности (реперов ri) в продольной профильной линии k -той наблюдательной станции в моменты положения очистного забоя (lt); $\eta_{xz, \max, ri, Lt, k}$ – максимальные оседания реперов (ri), достигаемые при положении очистного забоя $D_{2X} = 1,6H_{CP}$, которое в нормализованном виде имеет значение $Lt = 1$. Корреляционные поля исследуемых величин представлены на рис. 2. Здесь начало сдвижения каждого репера в характерных зонах помещено в начало координат.

Функции распределения оседаний, представленные на рис. 2, аппроксимированы выражениями:

$$S_{\eta, A} = 1 - e^{-7 \cdot lt}$$

$$S_{\eta, B} = 0.362 \cdot \text{arcctg}(-13.3 \cdot lt + 3.5) - 0.1 \quad (3)$$

$$S_{\eta, C} = 0.37 \cdot \text{arcctg}(-10 \cdot lt + 4.1) - 0.09$$

$$S_{\eta, D} = 0.03 \cdot e^{3.536 \cdot lt} - 0.03$$

Максимальные оседания точек поверхности в выражении (2) зависят от их положения в мульде сдвижения. Распределение максимальных оседаний $S_{\eta, i, \max}$ на интервале $D_{2X} = 1,6H_{CP}$ (то есть в сформировавшейся динамической микромульде)

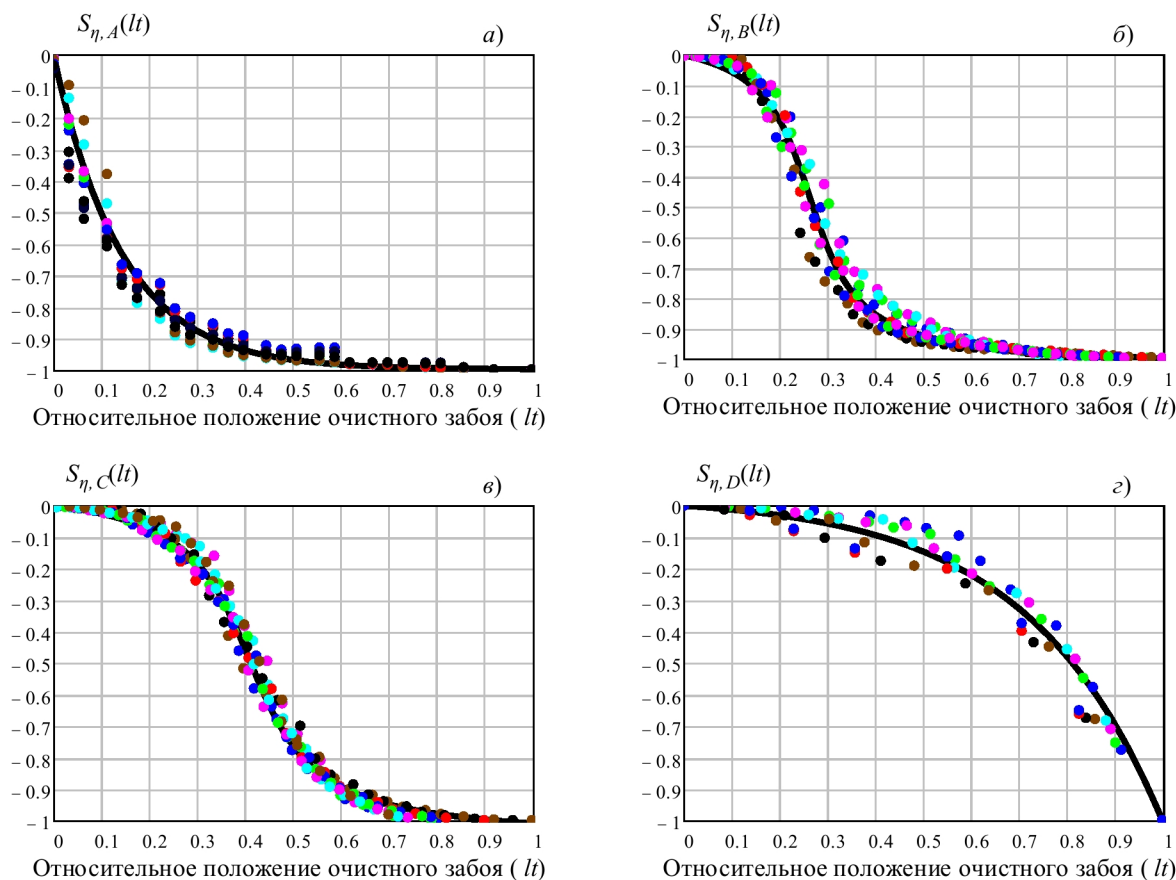


Рис. 2. Функции распределения оседаний (типичные кривые) отдельных точек подрабатываемой земной поверхности в продольном сечении лавы в характерных зонах сдвижений А, В, С, D в зависимости от положения очистного забоя относительно монтажной камеры.

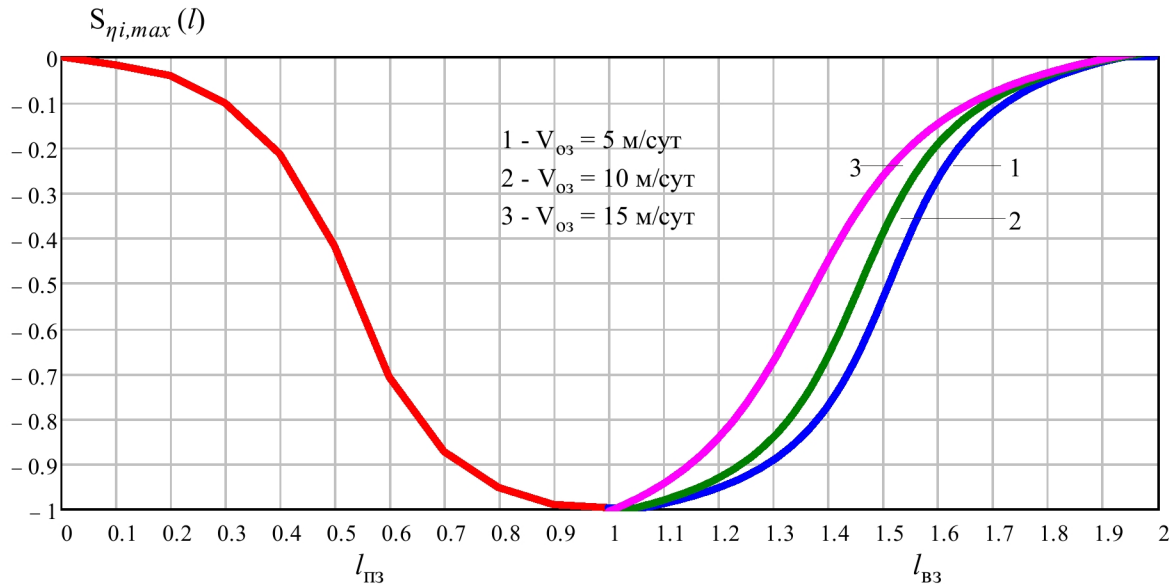


Рис. 3. Функции распределения максимальных оседаний точек поверхности в главном сечении по простиранию лавы в сформировавшейся микромульде при разных скоростях подвигания очистного забоя

установлены по базе данных инструментальных наблюдений.

Функции $S_{\eta i, \max}(l_{ПЗ})$, $S_{\eta i, \max}(l_{ВЗ})$ выражены соотношениями

$$S_{\eta i, \max}(l_{ПЗ}) = \frac{\eta_{ПЗ, \max, ri, Lt, k}}{\eta_{\max, k}}; \quad (4)$$

$$S_{\eta i, \max}(l_{ВЗ}) = \frac{\eta_{ВЗ, \max, ri, Lt, k}}{\eta_{\max, k}};$$

$$l_{ПЗ} \in [0; 1]; \quad l_{ВЗ} \in [1; 2]$$

где: $l_{ПЗ} = \frac{l_{ПЗ}}{L_{ПЗ}}$, $l_{ВЗ} = \frac{l_{ВЗ}}{L_{ВЗ}}$ – текущие относительные (нормализованные) величины полумульд позади забоя и впереди забоя. Величины $L_{ПЗ}$ и $L_{ВЗ}$

определяются через средние динамические углы полных сдвижений $\Psi'_{зм}$ и $\Psi'_{зд}$ (рис. 1). Начало отсчета $l_{ПЗ}$ принято со стороны монтажной камеры, а $l_{ВЗ}$ – от максимального оседания динамической микромульды; $\eta_{\max, k}$ – наблюдаемое максимальное оседание динамической мульды сдвижения в k-той наблюдательной станции (прогнозная оценка производится по формуле .

$$\eta_{\max} = m \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot q_0 \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

где: m – вынимаемая мощность пласта, м;
 α – угол падения пласта, град.;
 N_1 и N_2 – коэффициенты подработанности;
 q_0 – относительное максимальное оседание, вычисляемое для условий Кузбасса по формуле:

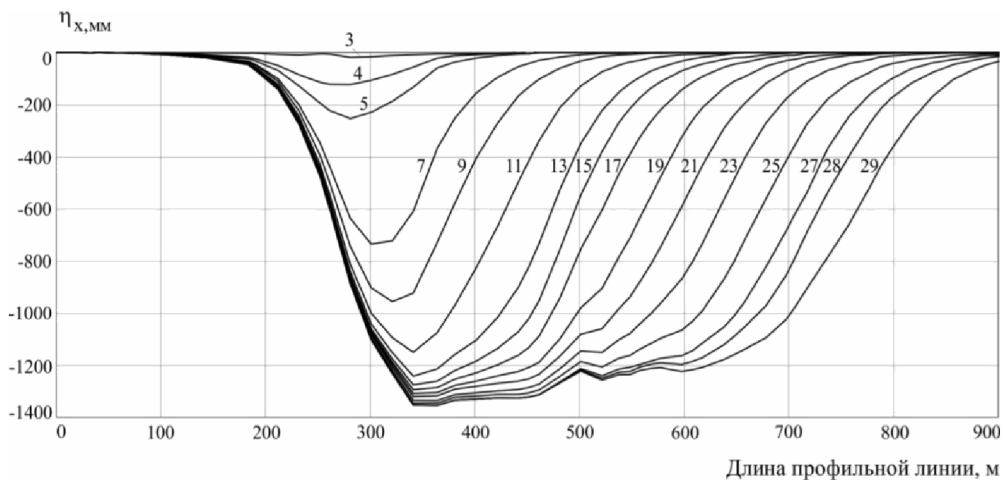


Рис. 4. Процесс развития оседаний по простиранию пласта при отходе очистного забоя от монтажной камеры на шахте им. Кирова (лава 2452).

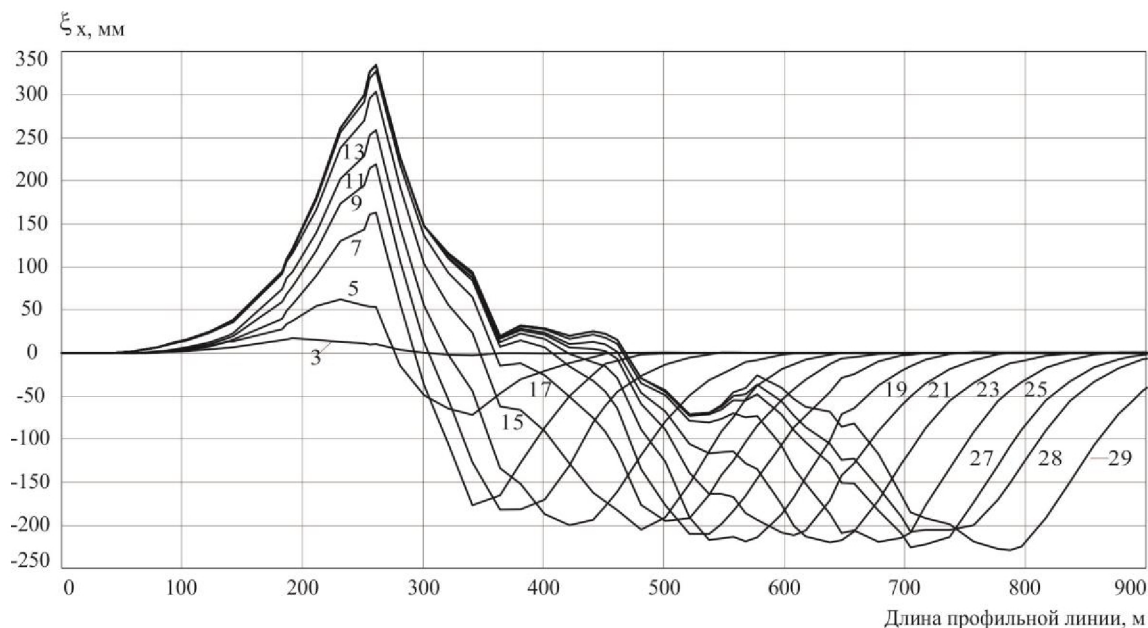


Рис. 5. Процесс развития горизонтальных сдвижений по простиранию пласта при отходе очистного забоя от монтажной камеры на шахте им. Кирова (лава 2452).

$$q_0 = 0.7 + 0.25 \frac{H_{II}}{H}$$

при $V_{O3} = 10$ м/сутки

$$S_{\eta_i, max}(l_{B3}) = 0.43 \cdot$$

$$arcctg(5.333 \cdot l_{B3} - 7.279) - 0.138$$

при $V_{O3} = 15$ м/сутки

H_{II} - мощность повторно подрабатываемых пород по линии θ , соединяющей точку максимального оседания земной поверхности с серединой очистной выработки, от которой производится расчет деформаций, м;

H - мощность всей толщи по указанной линии θ , для условий Кузбасса определяемая по формуле:

$$H = \frac{H_{CP}}{\sin(90^\circ - 0.5\alpha)}$$

Вид найденных функций максимальных оседаний точек поверхности в сформировавшейся микромульде приведен на рис. 3.

Исследованиями установлено [5], что функция распределения $S_{\eta_i, max}(l_{ПЗ})$ полумульде позади забоя практически не изменяется с увеличением скорости подвигания очистного забоя и выражена эмпирической зависимостью:

$$S_{\eta_i, max}(l_{ПЗ}) = 0.382 \cdot arcctg(-8.045 \cdot l_{ПЗ} + 4.25) - 0.089 \quad (6)$$

Функция $S_{\eta_i, max}(l_{B3})$ изменяется при возрастании скорости подвигания очистного забоя лавы. Установлены эмпирические зависимости (7):

$$S_{\eta_i, max}(l_{B3}) = 0.392 \cdot$$

$$arcctg(7.487 \cdot l_{B3} - 11.35) - 0.118$$

при $V_{O3} = 5$ м/сутки

$$S_{\eta_i, max}(l_{B3}) = 0.395 \cdot$$

$$arcctg(7.17 \cdot l_{B3} - 10.468) - 0.111 \quad (7)$$

Пример формирования профиля мульды сдвижений при движении очистного забоя лавы от монтажной камеры приведен на рисунках 4 и 5. Здесь наблюдениями 3 ÷ 29 представлен процесс развития оседаний и горизонтальных сдвижений по профильной линии в главном сечении по наблюдательной станции на шахте им. Кирова, лава 2452.

Рассмотрим взаимосвязь горизонтальных сдвижений и оседаний во времени в отдельных точках динамической мульды в плоскости $\eta_i, 0\xi_x$. Примеры зависимости горизонтальных сдвижений отдельных точек земной поверхности в характерных зонах (см. рис.1) от их оседаний приведены на рис. 6.

На рис. 6 оседания выражены в относительных величинах η_i/η_{max} , где η_{max} - максимальное оседание в сформировавшейся динамической мульде, прогнозные значения которого определяются выражением (5). Горизонтальные сдвижения выражены в долях максимального оседания, начало отсчета со стороны монтажной камеры, сдвигения в сторону демонтажной камеры приняты положительными, в сторону монтажной камеры - отрицательными. Зона А примечательна тем, что при подвигании очистного забоя от монтажной камеры до образования плоского дна ($lt = 1$, то есть $D_{2x} = 1,6H_{CP}$) все точки поверхности этой зоны при оседании с закономерностью $S_{\eta, A}(lt)$

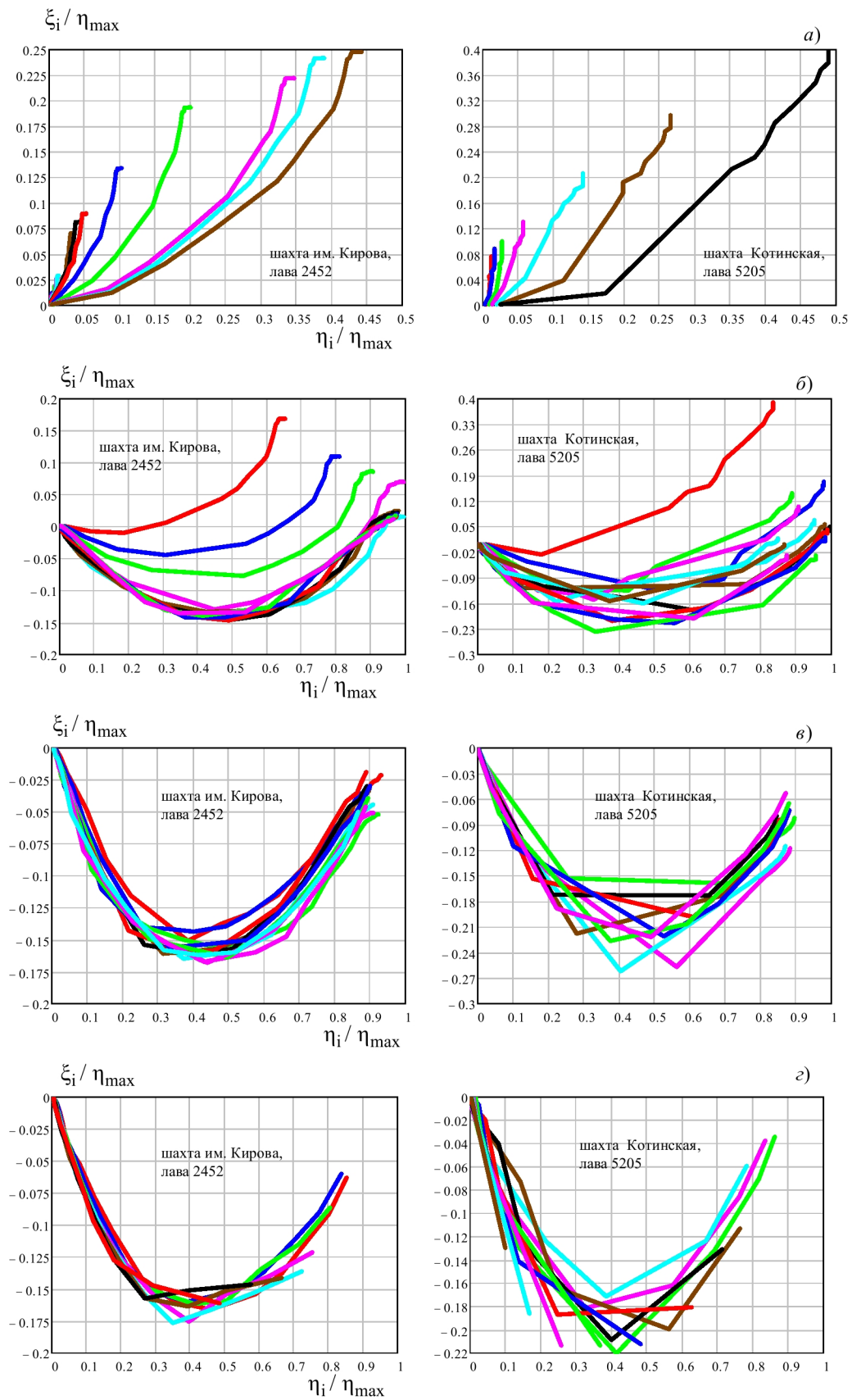


Рис. 6. Примеры характера взаимосвязи горизонтальных сдвигов и оседаний отдельных точек земной поверхности на наблюдательных станциях шахт им. Кирова и Котинская в характерных зонах динамической мульды сдвигов: а) в зоне А; б) в зоне В; в) в зоне С; г) в зоне Д.

Таблица 1 - Эмпирические коэффициенты a_0, a_1 выражения (8) в отдельных точках l_{An} зоны **A**.

l_{An}	a_0	a_1
0 ÷ 0,6	0,082	14,737
0,73	0,040	14,693
0,84	0,034	9,773
0,95	0,025	6,667
0,97	0,031	6,660
1,0	0,029	5,180

Таблица 2 - Эмпирические коэффициенты a_0, a_1, a_2 выражений (8) и (9) в отдельных точках l_{Bn} зоны **B**.

l_{Bn}	Сдвигение в сторону монтажной камеры		Сдвигение в сторону демонтажной камеры				
	Интервал оседаний	Эмпирические коэффициенты		Интервал оседаний	Эмпирические коэффициенты		
		a_0	a_1		a_0	a_1	a_2
0,1	0 ÷ 0,2	0,013	-10,31	0,2 ÷ 0,65	0,001	8,2	-0,016
0,2	0 ÷ 0,3	0,051	-6,413	0,3 ÷ 0,8	0,001	6,3	-0,051
0,3	0 ÷ 0,4	0,08	-8,8	0,4 ÷ 0,88	0,001	5,6	-0,087
0,4	0 ÷ 0,45	0,135	-8,08	0,45 ÷ 0,96	0,001	5,59	-0,143
0,7	0 ÷ 0,48	0,163	-8,1	0,48 ÷ 0,98	0,003	4,33	-0,184
1,0	0 ÷ 0,5	0,202	-9,35	0,5 ÷ 1,0	0,003	4,322	-0,226

Таблица 3 - Эмпирические коэффициенты a_0, a_1, a_2 выражений (8) и (9) в отдельных точках зон **C** и **D**.

Зона сдвижений	Сдвигение в сторону монтажной камеры		Сдвигение в сторону демонтажной камеры				
	Интервал оседаний	Эмпирические коэффициенты		Интервал оседаний	Эмпирические коэффициенты		
		a_0	a_1		a_0	a_1	a_2
C	0 ÷ 0,45	0,233	-5,175	0,45 ÷ 0,9	0,002	4,9	-0,21
D	0 ÷ 0,4	0,224	-5,082	0,4 ÷ 0,85	0,003	4,74	-0,215

сдвигаются в сторону демонтажной камеры. При этом отношение ξ_i/η_i в каждом единичном наблюдении возрастает до определенной величины и остается практически постоянным до образования плоского дна динамической мульды (рис. 7). Чем ближе точка поверхности к началу зоны **A**, тем больше отношение ξ_i/η_i . В крайних точках горизонтальные сдвигения могут превышать оседания этих точек ($\xi_i/\eta_i > 1$).

Установим аналитические зависимости горизонтальных сдвижений отдельных точек поверхности от изменения их оседаний в процессе движения очистного забоя. В зоне **A** эти зависимости имеют экспоненциальный вид (рис. 6а) и могут быть описаны выражением (8):

$$\xi_A(\eta_A) = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot \eta_A} - a_0 \quad (8)$$

где ξ_A – определяемая относительная (ξ_i/η_{max}) переменная горизонтальных сдвижений в зоне **A**; η_A – независимая относительная (η_i/η_{max}) переменная оседаний в зоне **A**; a_0, a_1 – эмпирические коэффициенты.

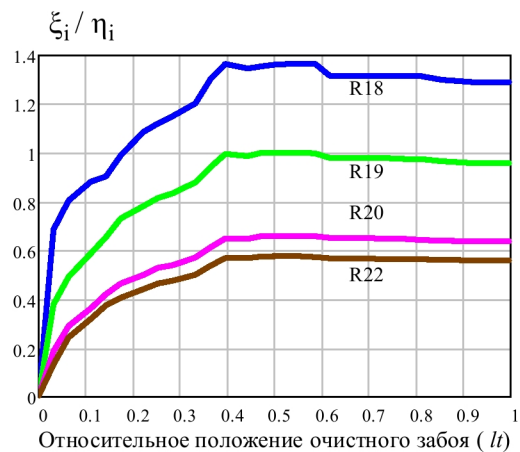


Рисунок 7 - Пример изменения соотношения ξ_i/η_i в характерной зоне **A** при формировании микромульды сдвижения поверхности на шахте им. Кирова, лава 2452.

Обозначим текущее положение отдельных точек поверхности в нормализованной длине ($L_{An}=1$) зоны **A** через l_{An} . Из базы данных инструмен-

тальных наблюдений выберем парные значения оседаний и горизонтальных сдвижений для близлежащих точек поверхности (реперов) за время формирования динамической микромульды, в результате чего получим корреляционное поле данных, пример которого показан на рис. 8. Методом наименьших квадратов для выбранных точек находим значения эмпирических коэффициентов a_0, a_1 .

Выбранные точки поверхности, положение которых в зоне А определяется значением величины l_{An} , и эмпирические коэффициенты выражения (8) приведены в табл. 1.

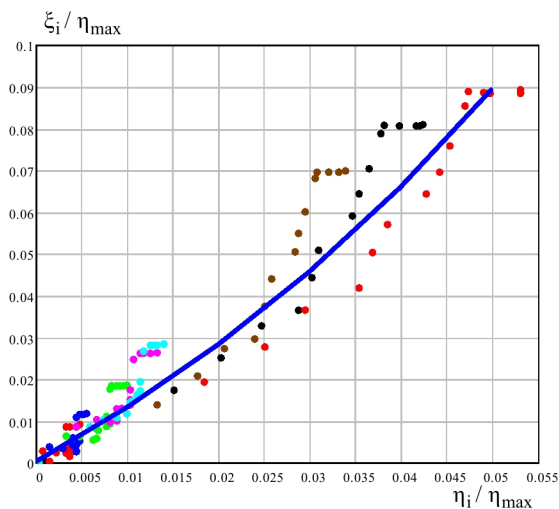


Рисунок 8 - Пример корреляционного поля инструментальных наблюдений относительных оседаний и горизонтальных сдвижений отдельных точек подрабатываемой поверхности в интервале $[0; 0.6]$ нормализованной длины l_{An} зоны А.

Значения выражения (8) для промежуточных точек табл. 1 определяются методом интерполяции.

Зона В характеризуется тем, что при развитии процесса оседаний по закономерности, приведенной на рис. 2 б, точки поверхности сначала сдвигаются в сторону монтажной камеры до некоторой максимальной величины, а затем начинают сдвигаться в сторону демонтажной камеры (рис. 6 б). Аналитически этот процесс сдвижений можно представить зависимостью горизонтальных сдвижений точек от их оседаний до максимального значения экспоненты вида (8), а после максимального горизонтального сдвижения экспонентой.

$$\xi_B(\eta_B) = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot \eta_B} + a_2 \quad (9)$$

Используя методический подход определения эмпирических коэффициентов в зоне А, найдены таковые и для зон В и С (табл. 2, 3).

Аналитические зависимости (8, 9) с учетом найденных эмпирических коэффициентов для выделенных характерных зон (табл. 1, 2, 3) отражают взаимосвязь оседаний и горизонтальных сдвижений точек подрабатываемой земной поверхности.

Исходя из всего вышеизложенного следует, что горизонтальные сдвижения произвольной точки поверхности на профильной линии по простиранию в зависимости от положения очистного забоя могут быть определены через динамическое оседание этой точки.

По установленным зависимостям (3 – 9) институтом СИГИ разработана методика прогноза ожидаемых оседаний и горизонтальных сдвижений отдельных точек подрабатываемой земной поверхности в главном сечении по простиранию лавы в динамике (в зависимости от положения очистного забоя лавы относительно монтажной камеры) с учетом скорости подвигания фронта очистных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. СПб, ВНИМИ, 1998, 290 с.
2. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях / Мин-во угольно промышленности СССР: Утв. 30.12.87. М.: Недра, 1989. - 96 с.
3. Ягунов А.С. Динамика деформаций в подрабатываемом горном массиве / Минэнерго РФ, НИИ горн. геомех. и маркшейд. дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ, Сибирский филиал. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2010. – 239 с.
4. Свирко С.В., Ренев А.А. Особенности смещения точек подрабатываемой земной поверхности высокоскоростными очистными забоями при отработке полого-наклонных угольных пластов Кузбасса. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 5 - С.32-43.
5. Свирко С.В. О влиянии скорости подвигания очистного забоя на процессы сдвижения земной поверхности. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 3 - С.51-62.

REFERANCES

1. Pravila ohrany sooruzhenij i prirodnyh ob#ektov ot vrednogo vlijanija podzemnyh gornyh razrabotok na ugol'nyh mestorozhdenijah. SPb, VNIMI, 1998, 290 s.

2. Instrukcija po nabljudenijam za sdvizheniem gornyh porod, zemnoj poverhnosti i podrabatyvaemymi sooruzhenijami na ugol'nyh i slancevyh mestorozhdenijah / Min-vo ugol'no promyshlennosti SSSR: Utv. 30.12.87. M.: Nedra, 1989. - 96 s.

3. Jagunov A.S. Dinamika deformacij v podrabatyvaemom gornom massive / Minjenergo RF, NII gorn.geomeh. i markshejd. dela – Mezhotraslevoj nauchnyj centr VNIMI, Sibirskij filial. – Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2010. – 239 s.

4. Svirko S.V., Renev A.A. Osobnosti smeshhenija toчек podrabatyvaemoj zemnoj poverhnosti vysokorostnymi ochistnymi zabojami pri otrabotke pologo-naklonnyh ugol'nyh plastov Kuz-bassa. // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2015. № 5 - S.32-43.

5. Svirko S.V. O vlijanii skorosti podviganija ochistnogo zaboja na processy sdvizhenija zemnoj poverhnosti. // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2016. № 3 - S.51-62.

Поступило в редакцию 21.09.2016

Received 21 September 2016