

УДК 622.83

doi: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-1-73-78>

Б.А. Кодунов

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦ В МУЛЬДЕ СДВИЖЕНИЯ

*Целью* исследования является установление пространственного положения точек земной поверхности в контуре мульды сдвижения для определения их траекторий и предрасчета деформаций земной поверхности при любом расположении движущегося очистного забоя.

*Методика исследования.* Для установления закономерностей перемещения частиц использован метод компьютерного моделирования, основанный на представлении массива горных пород в виде дискретной слоистой среды блочной структуры. При моделировании исходные координаты частицы преобразовывались в конечные, что позволяло построить вектор перемещения частицы и рассчитать все виды деформаций в мульде сдвижения. Моделирование проводилось с учетом горнотехнических и горно-геологических параметров отработки лав.

*Результаты.* В ходе моделирования установлен характер развития мульды сдвижения при перемещении очистного забоя и изменений вертикальных и горизонтальных сдвижений. Рассмотрены особенности возникновения горизонтальных сдвижений земной поверхности при подземной разработке угольных пластов. Сравнение результатов моделирования с фактическими данными показало их удовлетворительную сходимость.

*Научная новизна* исследования состоит в определении пространственной траектории точки земной поверхности под влиянием движущегося очистного забоя. Использование предлагаемого метода позволяет изучать процесс сдвижения и устанавливать его закономерности.

Предлагаемый метод определения пространственных траекторий перемещения точек в мульде сдвижения подтверждается натурными наблюдениями и может применяться для прогнозирования сдвижений и деформаций при подвигании очистного забоя.

*Практическая значимость* исследования состоит в возможности своевременного осуществления мер охраны подрабатываемого объекта земной поверхности, зная величину горизонтальных сдвижений при любом расположении очистного забоя.

*Ключевые слова:* сдвижение земной поверхности; мульда сдвижения; компьютерное моделирование; горизонтальные сдвижения; оседания; траектория точки; очистной забой.

### Введение.

Техногенное сдвижение горных пород представляет собой их перемещение и деформирование в результате нарушения равновесия под влиянием горных разработок. Пласт угля или часть рудного тела после извлечения из недр Земли оставляют после себя полость, которая под действием сил гравитации заполняется слоями пород, вызывая перемещение следующих слоев, залегающих выше. Этот процесс продолжается и при некоторых условиях достигает земной поверхности, на которой образуется прогиб - мульда сдвижения. При перемещении слоев горных пород возникают собственно сдвижения, то есть перемещение пород в горизонтальном, вертикальном или в любом направлении. Наряду с этим возникают и деформации, вызванные неравномерностью сдвижений. Принято рассматривать вертикальные сдвижения - оседания, и горизонтальные - перемещение точек в горизонтальном направлении. К деформациям относят горизонтальные деформации растяжения и сжатия, возникающие при растяжении или сжатии некоторого начального

горизонтального интервала. К вертикальным деформациям относят наклоны - отношение разницы оседаний концов интервала к длине этого интервала и кривизну, как степень изменения наклонов на данном интервале.

Сдвижения и деформации могут вызвать негативные последствия для объектов, которые находятся в мульде сдвижения.

Для выбора мер охраны при подработке объектов на земной поверхности необходимо уметь прогнозировать величину сдвижений и деформаций. Поэтому установление закономерностей процесса сдвижения, совершенствование методов прогнозирования сдвижений и деформаций земной поверхности является актуальной научной и практической задачей.

### Анализ последних исследований.

Традиционная концепция распределения горизонтальных сдвижений в мульде и их зависимость от вертикальных сдвижений (оседаний) земной поверхности заключается в следующем. Горизонтальные смещения в части мульды, где векторы вертикальных сдвижений одинаковы, то есть

в зоне полных сдвижений, должны равняться нулю. Также величина горизонтальных сдвижений должна быть пропорциональной величине вертикальных сдвижений. Но фактические данные, полученные на наблюдательных станциях свидетельствуют о другом.

В работах [2] и [4] в результате обработки и анализа данных, полученных на наблюдательных станциях в условиях Западного Донбасса, установлено следующее:

- соотношение между горизонтальными и вертикальными сдвигами не подчиняется закону пропорциональности, который характеризуется постоянной величиной относительных горизонтальных сдвижений;

- кривые горизонтальных сдвижений в главном сечении мульды сдвижения, параллельном движению очистного забоя, характеризуются явно выраженной асимметричностью;

- в плоском дне мульды наблюдаются горизонтальные сдвиги в направлении очистного забоя, величина которых составляет 30-33% от максимального оседания.

Полученные данные не совпадают с традиционными представлениями о механизме протекания процесса сдвижения и требуют теоретического обоснования.

#### Цель исследования.

Для большинства объектов на земной поверхности особенно опасны деформации растяжения-сжатия, которые зависят от неравномерности горизонтальных сдвижений земной поверхности. Кроме того, для своевременного осуществления мер охраны объекта необходимо знать величину горизонтальных сдвижений при любом расположении очистного забоя, который постоянно движется. Существующие официальные методики [5] позволяют определять сдвиги и деформации земной поверхности только после остановки очистного забоя при условии окончания процесса сдвижения.

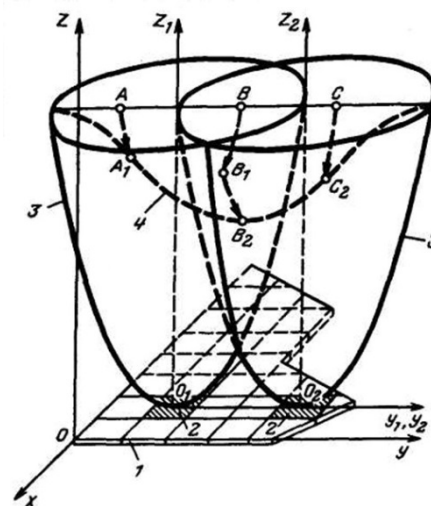
При подвигании очистного забоя для отдельной точки горизонтальные сдвиги могут приобретать значительно большие значения, чем после окончания процесса сдвижения. Поэтому целью данного исследования является установление

пространственного положения точек земной поверхности в контуре мульды сдвижения для определения их траекторий при любом расположении очистного забоя.

#### Методика исследований.

Для прогнозирования сдвижений и деформаций и установление закономерностей процесса сдвижения в работе [1] предложен метод компьютерного моделирования, основанный на представлении массива горных пород в виде дискретной слоистой среды блочной структуры. В результате моделирования частицы (участки) горных пород или земной поверхности перемещаются, образуя векторы сдвижения. По направлению и величине данных векторов можно судить об изменениях в положении исходной линии или поверхности, а также о соответствующих сдвиганиях и деформациях, вызванных этими изменениями.

Сущность метода заключается в следующем. Площадь отрабатываемой лавы разбивают на участки, которые после отработки инициируют возникновение эллиптических зон сдвижения пород. Точки земной поверхности и породной толщи сдвигаются в том случае, если попадают в одну или несколько зон сдвижения (рис.1).



**Рис. 1.** Схема перемещения точек в процессе сдвижения: 1 - угольный пласт; 2 - участки, инициирующие сдвигания; 3 - зоны сдвижения пород; 4 - мульда сдвижения; A, B, C - точки земной поверхности

Характерной особенностью и достоинством данного метода является возможность получения пространственных координат любой точки в области сдвижений горных пород после перемещения под воздействием выработанного пространства, что позволяет построить вектор ее перемещения. Зная координаты точек, которые переместились в результате сдвижения толщи горных пород, можно определить все виды сдвижений и деформаций.

Исходными данными для моделирования служат:

- горнотехнические параметры (размер выработанного пространства по простиранию и падению);

- горно-геологические факторы (глубина залегания пласта, угол падения, показатель сдвигаемости горных пород - интегральный параметр, учитывающий свойства горного массива, влияющие на его сдвижение);

- геометрические параметры моделирования (положение точек профильной линии в пространстве, которое определяется координатами начальной точки, углом разворота, расстоянием между точками, размеры элементарной области пласта, инициирующего процесс сдвижения, угол направления области сдвижений);

- дополнительные параметры моделирования (направление движения забоя лавы, мощность наносов, расстояния между горизонтальными и вертикальными сечениями для расчета вертикальных деформаций или объемов мульды сдвига).

Сравнение результатов математического моделирования указанным методом показало их хорошую сходимость с натурными наблюдениями в условиях изменяющейся мощности пласта, сложной формы выработанного пространства, холмистом рельефе земной поверхности, для которых существующие методики неприменимы.

### Результаты исследований.

В результате моделирования установлен характер развития мульды сдвижения при подвигании очистного забоя и изменений вертикальных и горизонтальных сдвижений. Как видно из рис. 2 при подвигании лавы растут оседания земной поверхности. Также происходит изменение величины и даже направления

горизонтальных сдвижений. Это объясняется количеством и расположением эллиптических зон сдвижений, в которые попадает данная точка (см. рис. 1) Чем больше зон будет влиять на эту точку, тем больше будет оседание. Горизонтальное сдвижение в некотором направлении будет расти при увеличении количества зон, влияющих на точку, смещая ее в этом направлении.

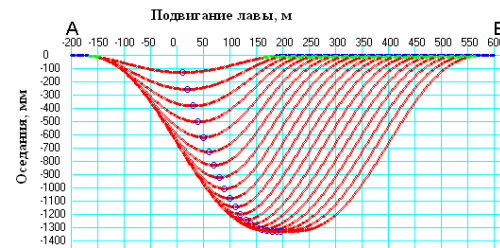


Рис. 2. Развитие мульды сдвижения при подвигании лавы

При моделировании получены координаты траектории перемещения одной из точек в мульде сдвижения. Моделирование выполнялось для следующих условий: мощность пласта 2 м; пласт горизонтальный; размер лавы по простиранию 400 м, в перпендикулярном направлении - 200 м. Точка находилась на расстоянии 50 м от разрезной печи (начала отработки лавы) и на расстоянии 50 м от оси лавы. На рис. 3 показана траектория точки в проекции на горизонтальную плоскость.

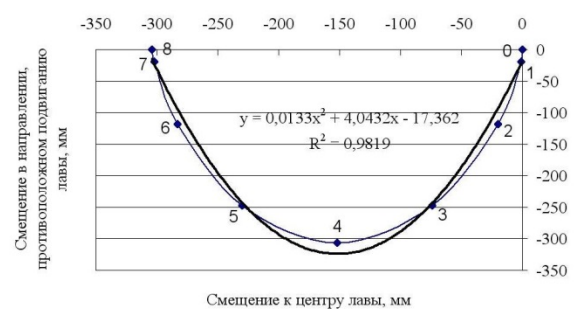


Рис. 3. График горизонтальных сдвижений точки: 1 - 8 - позиции, соответствующие подвиганию лавы через 50 м с 50 по 400 м

Данная траектория с достаточно высокой точностью ( $R^2 = 0,9819$ ) описывается уравнением параболы.

При своем движении точка перемещается не только в горизонтальном направлении, но и в вертикальном. График пространственной траектории точки показано на рис. 4.

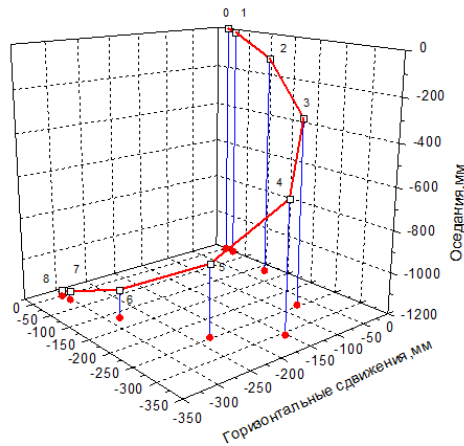


Рис. 4. Пространственная траектория точки в мульде сдвижения

При подвигании лавы на 50 м точка сместилась на 19 мм в сторону разрезной печи и опустилась на 14 мм. Больше всего горизонтальное перемещение составило 306 мм при осадке 586 мм (позиция 4). После этого точка начала перемещаться в направлении, противоположном подвиганию лавы и вернулась в исходное положение относительно разрезной печи, сместившись на 304 мм в направлении центра лавы и опустившись на 1171 мм.

Для идентификации предложенного метода выполнено сравнение результатов моделирования с фактическими данными, полученными на наблюдательной станции [2].

Наблюдательная станция №13 состояла из 52 реперов, расположенных над центром 604 лавы шахты «Степная» параллельно направлению подвигания очистного забоя и 14 реперов, расположенных в перпендикулярном направлении (рис. 5).

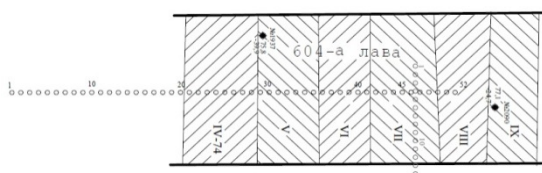


Рис. 5. План наблюдательной станции №13 [2]

Глубина залегания пласта - 120 м, вынимаемая мощность - 1, 0 м. Длина очистного забоя - 180 м. Расстояние между рабочими реперам -10 м.

По результатам наблюдений получены оседания реперов и их горизонтальные смещения в направлении, параллельном подвиганию очистного забоя при его различных положениях.

Сравнение фактических данных и результатов моделирования выполнено для репера №25 (рис. 6).

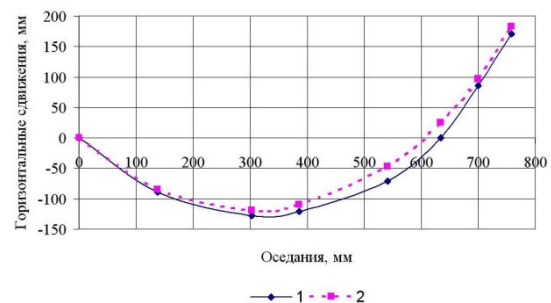


Рис. 6. Графики горизонтальных и вертикальных сдвижений репера №25:  
1 - данные наблюдений; 2 данные моделирования

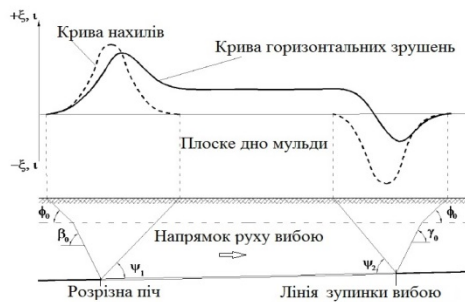
Как видно из рис. 6, фактические и рассчитанные значения горизонтальных сдвижений достаточно близки, что свидетельствует о возможности применения данного метода на практике.

Необходимо отметить, что с помощью предлагаемого метода можно изучать процесс сдвижения и устанавливать его закономерности.

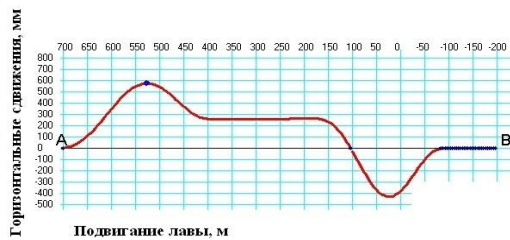
Например, в работе [3] приводятся результаты наблюдений, по которым горизонтальные смещения в плоском дне мульды не равны нулю (рис. 7).

По этому поводу авторы делают вывод о несоответствии существующих теоретических представлений фактическому механизму протекания процесса сдвижения, но своих объяснений не предлагают.

С помощью компьютерного моделирования нами построен график горизонтальных сдвижений (рис. 8), который по характеру распределения сдвижений полностью соответствует графику на рис. 7.



**Рис. 7.** Схема распределения наклонов и горизонтальных сдвижений в сечении, параллельном направлению подвигания очистного забоя [3]



**Рис. 8.** Компьютерное моделирование возникновения горизонтальных сдвижений

Необходимо отметить, что данный эффект, то есть наличие положительных горизонтальных сдвижений в плоском дне мульды, возникает при подвигании очистного забоя по восстанию пласта. В этом случае положительные горизонтальные сдвигения не компенсируются отрицательными, так как полный вектор сдвигения направлен почти перпендикулярно к плоскости пласта.

#### Выводы.

Во время движения очистного забоя направление горизонтальных сдвижений и их величина меняются, что влияет на формирование результирующего вектора сдвигения и величину деформаций.

Для своевременного и эффективного применения мер охраны объектов необходимо уметь прогнозировать изменение пространственных координат любой точки в мульде сдвигения при различных положениях очистного забоя.

Предлагаемый метод определения пространственных траекторий перемещения точек в мульде сдвигения подтверждается натурными наблюдениями и может

применяться для прогнозирования сдвижений и деформаций при подвигании очистного забоя.

#### Список литературы

1. Кодунов Б. А. Метод прогнозирования сдвижений горных пород и земной поверхности при подземной разработке угольных месторождений / Уголь. 1991. №2. С. 54—56.
2. Кучин А.С. Горизонтальные смещения земной поверхности над движущимся очистным забоем / Науковий вісник НГУ України. Дніпропетровськ, 2011. №3 С. 26 – 30.
3. Кучин А.С. Распределение горизонтальных и вертикальных сдвижений земной поверхности в Западном Донбассе / А.С. Кучин, Л.В. Новикова // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. Донецьк, 2011. №9 (частина I) С. 27 – 33.
4. Кучин А.С. Анализ величин максимальных вертикальных и горизонтальных сдвижений земной поверхности / Науковий вісник НГУ України. Дніпропетровськ, 2012. №2 С. 36 – 40.
5. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом: ГСТУ 101.001.00159226.001-2003. Київ, 2003.-128 с.

#### References

1. Kodunov B. A. Method of predicting the movements of rocks and the earth's surface during underground mining of coal deposits (1991) [Metod prognozirovaniya sdvizheniy gornykh porod i zemnoy poverkhnosti pri podzemnoy razrobotke ugolnykh mestorozhdeniy] / B. A. Kodunov // Coal. - 1991. - №2. - pp. 54-56 (in Russian).
2. Kuchin A.S. Horizontal displacements of the earth's surface above a moving clearing face (2011) [Gorizontal'nyye smeshcheniya zemnoy poverkhnosti nad dvizhushchemsya ochistnym zaboyem ] / A.S. Kuchin // Science Bulletin of the NSU of Ukraine. - Dnipropetrovsk, 2011. - №3 - pp. 26 – 30 (in Russian).
3. Kuchin A.S. Distribution of horizontal and vertical movements of the earth's surface in Western Donbass (2011) [Raspredeleniye gorizontal'nykh i vertikal'nykh sdvizheniy zemnoy poverkhnosti v Zapadnom Donbasse] / A.S. Kuchin, L.V. Novikov // Science Bulletins of the Ukrainian National Academy of Sciences of Ukraine. - Donetsk, 2011. - №9 (part I) - pp. 27 – 33 (in Russian).
4. Kuchin A.S. Analysis of the values of the maximum vertical and horizontal displacements of the earth's surface (2012) [Analiz velichin maksimal'nykh vertikal'nykh i gorizontal'nykh sdvizheniy zemnoy poverkhnosti] / A.S. Kuchin // Science Bulletin of the NSU of Ukraine. - Dnipropetrovsk, 2012. - №2 - pp. 36 – 40 (in Russian).
5. Rules for the forgery of buildings, structures and natural objects in the extraction of coal by underground (2003) [Pravyla pidrobky budivel', sporud i pryrodnykh ob'yektiv pry vydobuvanni vuhillya pidzemnym sposobom]: GSTU 101.001.00159226.001-2003. - Kyiv, 2003.-128 p.

Надійшла до редакції 10.06.2019  
Рецензент канд. техн. наук, доц. О.К. Носач.

**Кодунів Борис Алексеевич** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Геодезія і будівництво підземних споруд» Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, 85300, Україна).  
Email: [borys.kodunov@ii.donntu.edu.ua](mailto:borys.kodunov@ii.donntu.edu.ua).

### ЗАКОНОМІРНОСТІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЧАСТИНОК У МУЛЬДІ ЗРУШЕННЯ

*Метою* дослідження є встановлення просторового положення точок земної поверхні в контурі мульди зрушення для визначення їх траєкторій і перед-розрахунку деформацій земної поверхні при будь-якому розташуванні рухомого очисного вибою.

Для встановлення закономірностей переміщення частинок використаний *метод* комп'ютерного моделювання, заснований на поданні масиву гірських порід у вигляді дискретної шаруватого середовища блокової структури. При моделюванні вихідні координати частинки перетворювалися в кінцеві, що дозволяло побудувати вектор переміщення частинки і розрахувати всі види деформацій в мульді зсування. Моделювання проводилося з урахуванням гірничотехнічних і гірничо-геологічних параметрів відпрацювання лав.

*Результати*. В ході моделювання встановлено характер розвитку мульди зрушення при переміщенні очисного вибою і змін вертикальних та горизонтальних зрушень. Розглянуто особливості виникнення горизонтальних зрушень земної поверхні при підземній розробці вугільних пластів. Порівняння результатів моделювання з фактичними даними показало їх задовільну збіжність.

*Наукова новизна* дослідження полягає у визначенні просторової траєкторії точки земної поверхні під впливом рушійної очисного вибою. Використання запропонованого методу дозволяє вивчати процес зрушення і встановлювати його закономірності. Пропонований метод визначення просторових траєкторій переміщення точок в мульді зсування підтверджується натурними спостереженнями і може застосовуватися для прогнозування зрушень і деформацій при посуванні очисного вибою.

*Практична значимість* дослідження полягає в можливості своєчасного здійснення заходів охорони підроблюваного об'єкту земної поверхні, знаючи величину горизонтальних зрушень при будь-якому розташуванні очисного вибою.

**Ключові слова:** зрушення земної поверхні; мульда зрушення; комп'ютерне моделювання; горизонтальні зрушення; осідання; траєкторія точки; очисний вибій.

**Кодунів Борис Олексійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Геодезія та будівництво підземних споруд» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).  
Email: [borys.kodunov@ii.donntu.edu.ua](mailto:borys.kodunov@ii.donntu.edu.ua).

### REGULARITIES DISPLACEMENT OF PARTICLES IN THE SHIFT TROUGH

*Purpose.* The aim of the study is to establish the spatial position of points of the earth's surface in the contour of the displacement trough to determine their trajectories and pre-calculation of the deformations of the earth's surface at any position of the moving mining face.

*Research methods.* To establish the patterns of movement of particles, a computer simulation method was used based on the representation of an array of rocks in the form of a discrete layered medium of a block structure. In the simulation, the original coordinates of the particle were transformed into the final ones, which made it possible to construct a vector of particle displacement and calculate all types of deformations in the displacement mold. The simulation was carried out taking into account the mining and geological parameters of mining lavas.

*Results.* As a result of the simulation, the nature of the development of the displacement mold when moving the mine face and changes in the vertical and horizontal displacements is established. The features of the occurrence of horizontal displacements of the earth's surface during underground mining of coal seams are considered. Comparison of the simulation results with actual data showed their satisfactory convergence.

*The Scientific innovation.* of the study consists in determining the spatial trajectory of a point on the earth's surface under the influence of a moving mining face. Using the proposed method allows you to study the process of movement and establish its laws.

The proposed method for determining the spatial trajectories of moving points in the displacement mold is confirmed by field observations and can be used to predict displacements and deformations during moving of a mining face.

*The Practical implication* of the study lies in the possibility of timely implementation of measures for the protection of a land object being mined, knowing the magnitude of horizontal displacements at any location of the mining face.

**Keywords:** surface subsidence; shift trough; computer simulation; horizontal displacements; subsidence; point trajectory; mining face.

**Kodunov Boris** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Public higher education institution Donetsk National Technical University (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).  
Email: [borys.kodunov@ii.donntu.edu.ua](mailto:borys.kodunov@ii.donntu.edu.ua).