

УДК 622.834

РАСЧЕТ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА БОЛЬШИХ ПЛОЩАДЯХ

Гавриленко Ю. Н.
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Запропоновано методика та інформаційну технологію розрахунку зрушень і деформацій земної поверхні на великих площах, яка базується на сітковій моделі і враховує змінення залягання порід. Наведено приклад використання методики для розрахунків на загальній території 11-ти шахт у Донецько-Макіївському районі Донбасу з сумарною площею шахтних полів 140,5 км². Встановлені закономірності розподілу зрушень і деформацій по площі.

The methods of calculation and information technology of ground movement and deformation of the land surface in large areas, which is based on the grid model and takes into account the change of rock bedding. Application of these methods for the calculation on the territory of 11 mines in the Donetsk-Makeyevka region of Donbass, with a total area of mines' fields 140 km², is shown. Regularities of the distribution of ground movements and deformations by the area are determined.

Актуальность задачи. Деформирование зданий и сооружений, и возникающие при этом повреждения, являются следствием деформирования их оснований в результате сдвижения толщи горных пород и земной поверхности. Для установления общих закономерностей распределения сдвижений и деформаций земной поверхности на застроенных территориях необходимо выполнить расчеты компонентов сдвижений на больших площадях. При решении данного вопроса желательно максимально использовать имеющиеся методики расчета от отдельных выработок,

т.к. они дают удовлетворительную сходимость с данными наблюдений, что подтверждается многолетними исследованиями.

До недавнего времени расчет сдвижений и деформаций земной поверхности от большого числа выработок на большой площади, даже в пределах одного шахтного поля шахт практически не выполнялся. Это объясняется следующими причинами: в таких расчетах не было острой необходимости; существовавшие методики прогноза позволяли определять сдвижения и деформации только от идеализированных лав; выполнить такие расчеты без современных информационных технологий было невозможно как с точки зрения вычисления сдвижений от нескольких сотен выработок, так и в нескольких тысячах расчетных точках.

В последние годы расчет сдвижений и деформаций на больших площадях требуется выполнять при проектировании раскройки шахтных полей, а также на полях закрывающихся шахт. На полях шахт, которые закрываются, подобные расчеты необходимы для следующих целей:

1) определение оседаний земной поверхности за весь период отработки запасов для определения участков возможного заболачивания, подтопления и затопления.

2) выделение участков с максимальными вертикальными деформациями, определяющих зоны с максимальными зависаниями слоев горных пород, которые могут в последствии активизироваться при затоплении.

3) выделение участков с максимальными горизонтальными деформациями, к которым могут быть приурочены максимальные повреждения зданий и сооружений.

Для решения первой и второй задач необходимы величины за весь период отработки запасов, а для третьей желательно иметь сдвижения и деформации за период существования конкретных зданий и сооружений.

Существующие в нашей стране подходы к расчету ожидаемых сдвижений и деформаций [1, 2, 3], разработанные в середине 20 века, предполагают несколько ограничений на выполнение расчетов, а именно: очистная выработка должна иметь форму прямоугольника; стороны (границы) выработки должны быть ориентированы параллельно элементам залегания пласта. Компо-

менты сдвижений и деформаций земной поверхности получают по направлениям главных сечений, т.е. по простиранию и вкрест простирания пласта. По этим направлениям производится суммирование величин от отдельных выработок.

Такой подход оправдан при выполнении расчетов от небольшого числа выработок, что имеет место при разработке и согласовании мер защиты. Эти проекты на практике, как правило, составляют на одну, максимум две лавы. При этом предыдущее влияние и возникшие ранее деформации обычно не учитываются.

Для оценки сдвижений и деформаций земной поверхности на больших площадях такой подход не годится. Это объясняется тем, что даже в пределах одного шахтного поля направление элементов простирания пластов может изменяться. Примеры различной степени изменения простирания пластов представлены на рисунке 1, где штриховыми линиями показаны изогипсы.

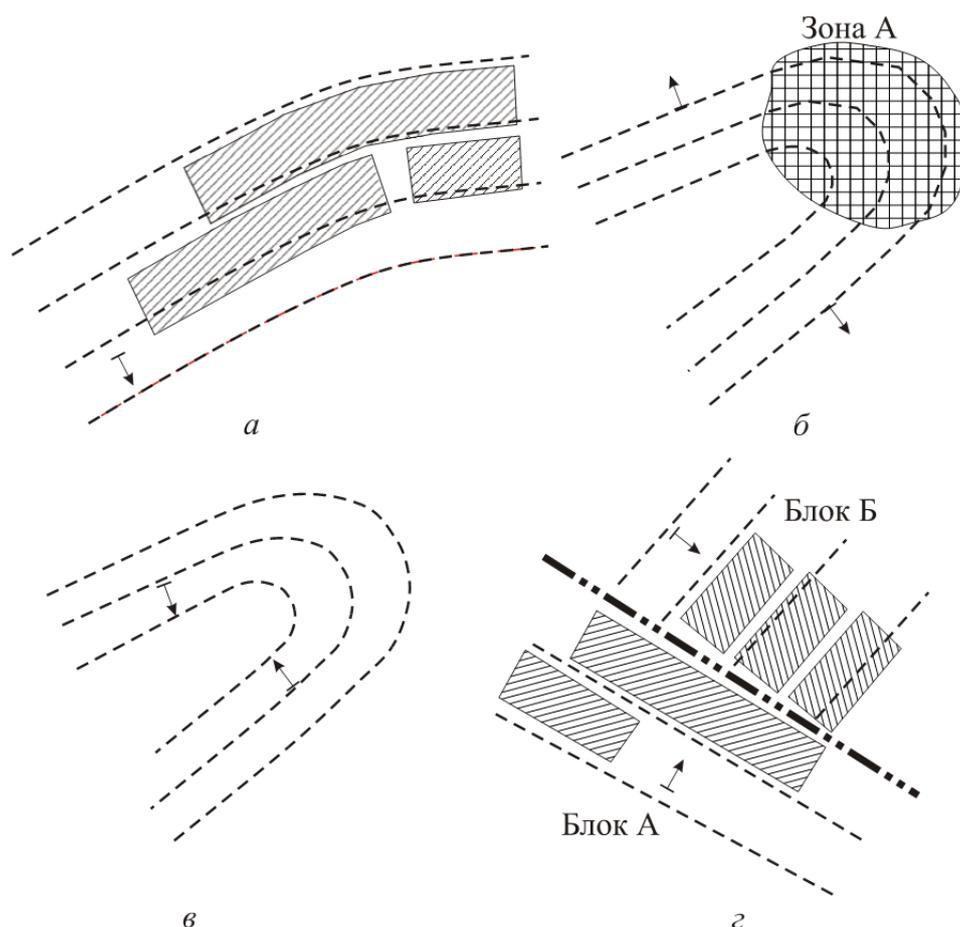


Рис. 1. Изменение простирания пластов в пределах отдельных шахтных полей или группы соседних шахт

1. В пределах шахтного поля часто наблюдается небольшое постепенное изменение простирания, которое практически не влияет на технологию отработки запасов (рис. 1, а). Вместе с тем, если рассматривать выработку значительной протяженности, то возникает существенное отклонение выработки от прямоугольника. Для применения стандартной методики расчета протяженные выработки необходимо разбивать их на несколько выработок, которые будут характеризоваться постоянным углом разворота относительно генерального простирания пластов.

2. При залегании пластов в виде антиклинальной складки (рис. 1, б) горные работы в противоположных крыльях, как правило, не оказывают перекрывающегося действия. Исключение составляют работы в замковой части по простиранию (зона А, рис. 1, б), где наблюдается взаимное влияние выработок и постепенное изменение простирания. Простирание крыльев складки может отличаться на величину до 130-180°.

3. В синклинальных складках (рис. 1, в) наоборот происходит сложение мульд сдвижения, т.к. влияние противоположных крыльев накладывается друг на друга. Общая зона влияния концентрируется внутри складки. Характер изменения простирания пластов остается таким же, как и в антиклинальной складке.

4. При относительно устойчивом и в целом моноклинальном залегании пластов в блоках, ограниченных разрывными нарушениями, могут наблюдаться изменение направления падения и простирания пластов (рис. 1, г). Например, блоки А и Б разделены разрывным нарушением. При этом в блоке А породы падают к нарушению, а в блоке Б – вдоль нарушения.

Все перечисленное вызывает необходимость новых подходов в оценке сдвижений и деформаций на больших площадях. Этот подход должен базироваться на отходе от сдвижений и деформаций по простиранию и вкрест простирания, которые являются не однозначными, изменяющимися и не позволяющими производить суммирование величин от отдельных выработок.

Методика и технология расчета сдвижений и деформаций на больших площадях.

Предлагаемая методика расчета базируется на сеточной модели. Принципиальным является то, что от каждой очистной вы-

работки рассчитываются три компоненты вектора сдвига, а именно: оседание (вертикальная составляющая вектора сдвига); горизонтальные сдвиги по направлениям осей выработки (горизонтальные составляющие вектора сдвига). Суммирование сдвигов и вычисление вертикальных и горизонтальных деформаций производится в каждой отдельной ячейке сетки по составляющим вектора сдвига.

Для этого вводится глобальная система координат XOY для всей территории шахтного поля или группы шахтных полей (рис. 2). Направление оси абсцисс OX принимается примерно преобладающему (генеральному) направлению простирания пластов. Ось ординат OY дополняет систему до левосторонней. Точки, в которых выполняется расчет сдвигов, располагаются в узлах сетки квадратов, стороны которых ориентируются параллельно осям глобальной системы координат.

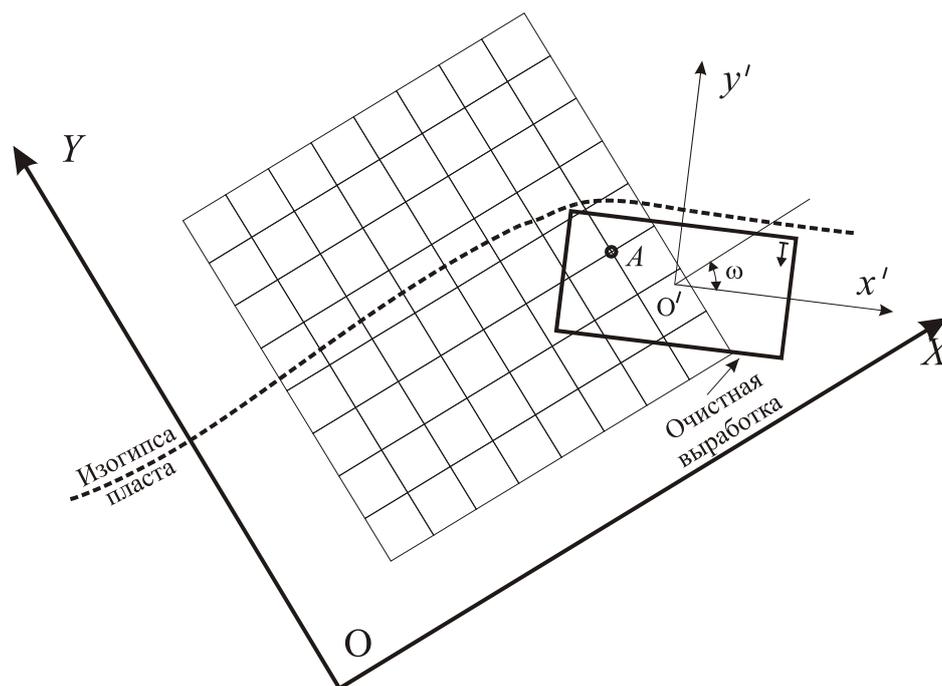


Рис. 2. Положение осей координат и расчетной сетки

Для каждой очистной выработки вводится локальная система координат $x'O'y'$. Начало этой системы располагается в геометрическом центре прямоугольника, описывающего выработку, ось ординат направляется в сторону восстания, а абсцисс – по

простиранію. Локальна система розвернута відносно глобальної на кут ω .

В локальній системі координат будується зона впливу виробки, визначаються розміри полумульд і для кожної розрахункової точки сітки визначаються зсуви:

- осідання η ;
- горизонтальне зсування по простиранію ξ'_x ;
- горизонтальне зсування вкрест простирання ξ'_y .

Після цього горизонтальні проекції вектора зсуви переобчислюються в глобальну систему

$$\xi = \begin{vmatrix} \xi_X \\ \xi_Y \end{vmatrix} = R(\omega) \begin{vmatrix} \xi'_x \\ \xi'_y \end{vmatrix}, \quad (1)$$

де $R(\omega)$ – матриця повороту

$$R(\omega) = \begin{vmatrix} \cos \omega & \sin \omega \\ -\sin \omega & \cos \omega \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Полученні величини від кожної очисної виробки послідовно алгебраїчно сумуються. Так, сумарні зсуви в певній точці j , після розрахунку від k -тої виробки виражаються наступними формулами.

$$u_k^j = \sum_{i=1}^k \xi_{X_j}^i; v_k^j = \sum_{i=1}^k \xi_{Y_j}^i; w_k^j = \sum_{i=1}^k \eta_j^i. \quad (3)$$

По отриманим величинам в межах кожної ячейки розрахункової сітки визначаються нахили і горизонтальні деформації по напрямленню осей глобальної системи і визначаються максимальні величини.

Для отримання формул визначення вказаних величин розглянемо елементарну ячейку сітки (рис. 3).

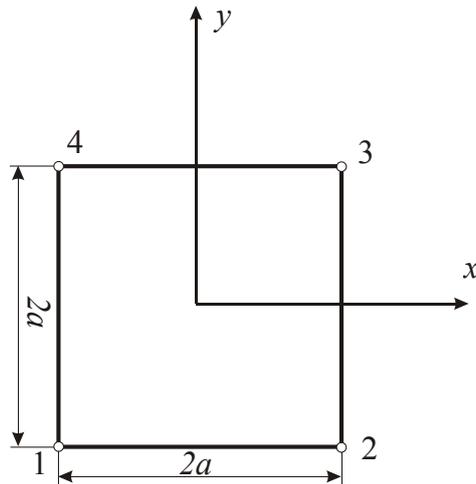


Рис. 3. Элементарная ячейка расчетной сетки

Для вычисления наклонов опишем вертикальные сдвигения узлов сетки (поверхность оседаний) полиномом второй степени [4]

$$w = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 xy, \quad (4)$$

где $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты, аппроксимирующие вертикальные сдвигения в пределах ячейки сетки.

Если начало координат поместить в центр ячейки, то уравнение (4) можно привести к следующему виду

$$w = N_1 w_1 + N_2 w_2 + N_3 w_3 + N_4 w_4, \quad (5)$$

где w_i – оседания в узлах ячейки;

N_i – функции формы, которые при нумерации вершин в соответствии с рис. 3 определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4a^2} [(a-x)(a-y)]; \\ N_2 &= \frac{1}{4a^2} [(a+x)(a-y)]; \\ N_3 &= \frac{1}{4a^2} [(a+x)(a+y)]; \\ N_4 &= \frac{1}{4a^2} [(a-x)(a+y)]; \end{aligned} \quad (6)$$

a – половина сторони квадрата.

Наклон поверхності, вираженої рівнянням (4) або (5) визначається кутом нахилу дотичної площини в відповідній точці клітинки. Цей кут нахилу визначається формулою:

$$tgi = \sqrt{\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2}. \quad (7)$$

Ураховуючи, що величини нахилів невеликі за величиною, то вираження (7) можна представити в наступному вигляді:

$$i = \sqrt{\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2}. \quad (8)$$

Частині похідні, що входять в формули (7) і (8), визначаються за наступними формулами

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial x} &= \frac{1}{4a^2} [-(a-y)w_1 + (a-y)w_2 + (a+y)w_3 - (a+y)w_4]; \\ \frac{\partial w}{\partial y} &= \frac{1}{4a^2} [-(a-x)w_1 - (a+x)w_2 + (a+x)w_3 + (a-x)w_4] \end{aligned} \quad (9)$$

Таким чином, наклон залежить від координат, і змінюється в межах клітинки сітки. Для рішення поставлених завдань найбільший інтерес представляє максимальне значення нахилу без урахування знаку в межах клітинки сітки. Цей параметр можна отримати двома шляхами. Знайти екстремуми функції (8) і вибрати з них найбільший за абсолютною величиною. При численному рішенні можна визначити значення нахилу в характерних точках і вибрати максимальне значення, а саме:

$$i_{\max} = \max(|i_1|, |i_2|, |i_3|, |i_4|, |i_0|), \quad (10)$$

де i_i – наклон в вузлах сітки;

i_0 – наклон в центрі клітинки.

Головні горизонтальні деформації в межах клітинки визначаються за формулами:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_X + \varepsilon_Y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_X - \varepsilon_Y)^2 + 4\gamma_{XY}^2}, \quad (11)$$

где ε_X и ε_Y – горизонтальные деформации в направлении осей глобальной системы координат;

ε_1 – максимальная деформация;

ε_2 – минимальная деформация;

γ_{XY} – деформация сдвига (скашивание) земной поверхности.

Выражение для вычисления деформаций в пределах ячейки в матричной форме запишется в следующем виде [4]:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}, \quad (12)$$

где $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}^T$ – вектор деформаций;

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \end{bmatrix};$$

$\{\delta\} = \{u_1, u_2, u_3, u_4, v_1, v_2, v_3, v_4\}^T$ – вектор горизонтальных перемещений (сдвижений) узлов ячейки.

После подстановки частных производных в матрицу $[B]$ получим

$$B = \frac{1}{4a^2} \begin{bmatrix} -(a-y) & 0 & (a-y) & 0 & (a+y) & 0 & -(a+y) & 0 \\ 0 & -(a-x) & 0 & -(a+x) & 0 & (a+x) & 0 & (a-x) \\ -(a-x) & -(a-y) & -(a+x) & (a-y) & (a+x) & (a+y) & (a-x) & -(a+y) \end{bmatrix}$$

С учетом координат узлов будем иметь

$$B = \frac{1}{4a^2} \begin{bmatrix} -2a & 0 & 2a & 0 & 2a & 0 & -2a & 0 \\ 0 & -2a & 0 & -2a & 0 & 2a & 0 & 2a \\ -2a & -2a & -2a & 2a & 2a & 2a & 2a & -2a \end{bmatrix}$$

или

$$B = \frac{1}{2a} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Максимальная горизонтальная деформация в пределах ячейки сетки без учета знака выбирается из двух величин:

$$\varepsilon_{\max} = \max(|\varepsilon_1|, |\varepsilon_2|). \quad (13)$$

Расчет сдвижений и деформаций земной поверхности на больших по площади территориях по предложенной методике, всесторонний анализ их распределения по площади может быть осуществлен только на основе использования современных информационных технологий и, в частности ГИС технологий. Для этих целей разработана технология и созданы соответствующие программные средства. В основе технологии лежит создание базы данных по всем очистным выработкам, включая их пространственное положение.

Исходными данными являются планы горных выработок, которые, как правило, содержат всю информацию необходимую для выполнения расчетов, а именно: пространственное положение и время проведения всех очистных выработок; абсолютные отметки горных выработок, которые позволяют определить глубину горных работ в каждой конкретной лаве; вынимаемую мощность и угол падения пласта; положение линий скрещения разрывных геологических нарушений и пластов.

В целом разработанная технология расчетов сдвижений и деформаций земной поверхности включает:

1) подготовку растровой основы планов горных выработок, состоящую в сканировании отдельных фрагментов планов, сшивку их в единое изображение, его ориентирование и последующую калибровку;

2) выбор направления осей глобальной системы координат и задание расчетной сетки;

3) векторизация и заполнение таблицы атрибутивных данных для каждой очистной выработки;

4) аппроксимация реальных контуров очистных выработок прямоугольниками с сохранением площади очистной выработки;

- 5) объединение и сортировка данных;
- 6) выполнение расчета от отдельных выработок, суммирование отдельных влияний и выбор максимальных значений сдвижений и деформаций;
- 7) анализ результатов расчета и выявление закономерностей распределения сдвижений и деформаций земной поверхности на всей рассматриваемой территории.

Пример расчета сдвижений и деформаций земной поверхности на больших площадях.

Описанная методика и технология были применены при оценке состояния земной поверхности на территориях ряда закрывающихся шахт Донбасса. В данной работе в качестве примера рассмотрим расчет компонентов сдвижений и деформаций на полях 11-ти закрытых шахт Буденновского и Пролетарского районов г. Донецка, а именно: им. 60-летия Советской Украины; «Заперевальная» № 1, «Заперевальная» № 2 и «Глубокая», входивших в шахтоуправление «Донбасс»; № 9 «Капитальная», № 6 «Красная Звезда», № 12 «Наклонная» шахтоуправления «Красная Звезда»; № 6 «Капитальная», № 2, № 12-18 шахтоуправления им. газеты «Правда». Всего в данном районе отрабатывалось 9 угольных пластов (h_{10} , h_8 , h_7 , h_6 , h_4 , h_3 , h_2^1 , h_2 , g_2), хотя число пластов отрабатываемых одной шахтой изменяется от двух (шахта «Заперевальная» № 2) до 7-ми (шахта «Мушкетовская»).

На рисунке 4 приведена общая схема шахтных полей с наложением всех выработок по всем пластам и схемы расположения горных выработок по наиболее отработанным пластам. Общая площадь всех шахтных полей рассматриваемого района составляет 140,5 км².

Расчет сдвижений и деформаций выполнялся для 3-х временных периодов: до 1958 г.; после 1958 г. и за весь период отработки запасов. Выбор этой разделительной границы обусловлен, прежде всего, тем, что с 1958 года после выхода ВТУ-01-58 [4] начинается введение конструктивных мер защиты при застройке угленосных территорий. Всего в расчете участвовало 1855 выработок, последовательность задания которых соответствовала фактическому порядку их проведения.

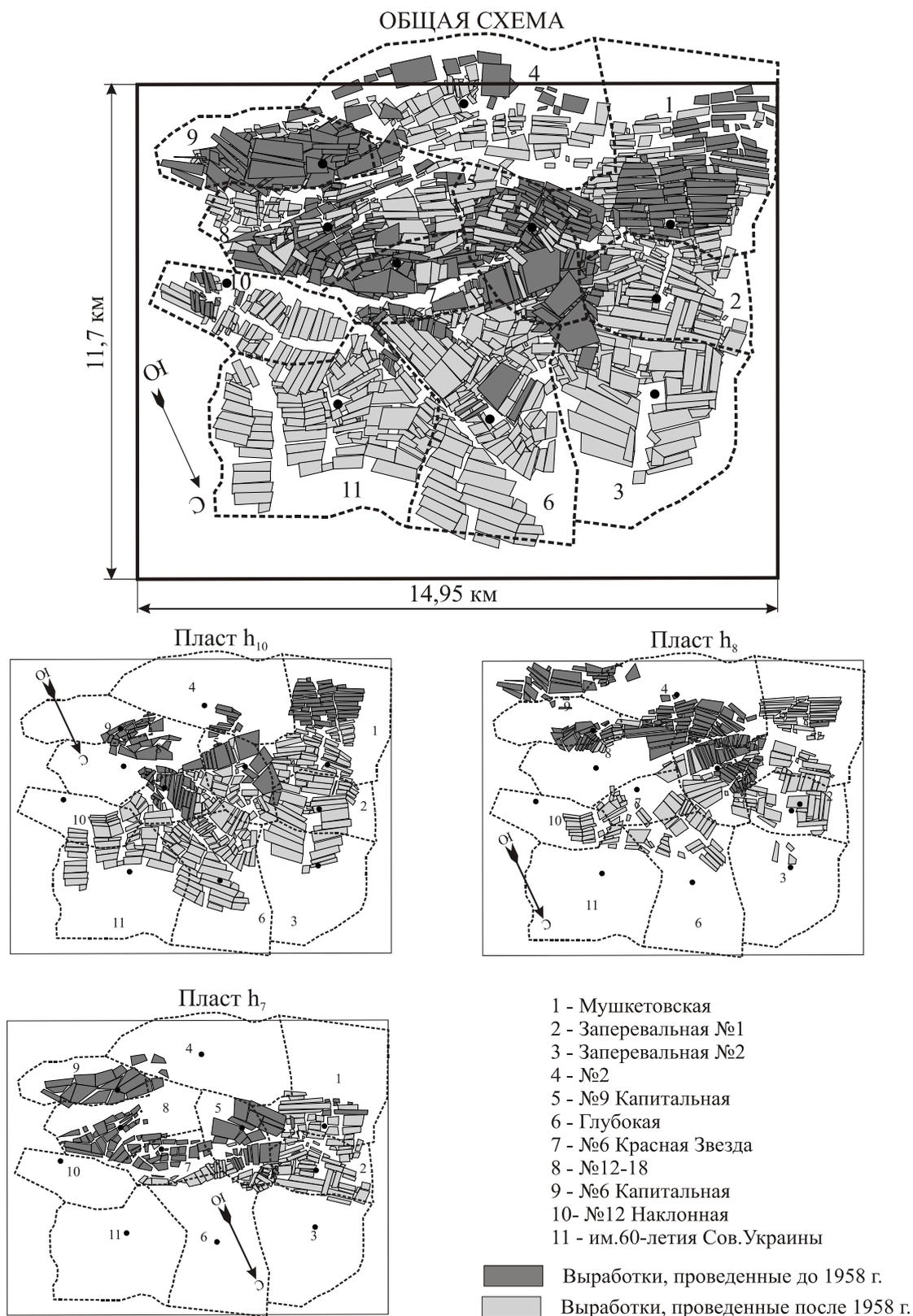


Рис. 4. Расчетная сетка и горные выработки наиболее отработанных пластов на шахтах Буденновского и Пролетарского районов г. Донецка

Расчетная сетка имела размер 14950×11700 м, что составляет площадь 174,9 км². Расчетные точки располагались через 50 м, а общее число составило более 70-ти тысяч.

На рисунке 5 приведены изолиний оседаний, которые свидетельствует о крайне неравномерной подработанности территории и мозаичном характере распределения оседаний. Четко выделяются области с различными уровнями оседаний. Число отдельных областей и их площади зависят от величин сдвижений. С увеличением оседаний уменьшается число областей, общая суммарная площадь всех областей и средняя площадь отдельной области. Это убедительно иллюстрируется данными, приведенными в таблице 1, которые получены на основе анализа графиков изолиний (рис. 5, б).

Указанная неравномерность обусловлена следующими причинами:

- наличием в отработанных пластах целиков для охраны вертикальных и наклонных выработок;
- наличием барьерных целиков между соседними шахтами;
- неполнотой отработки пластов;
- наличием в отработанных пластах зон разрывных тектонических нарушений.
- изменением вынимаемой мощности пластов.

Несомненный интерес представляет анализ распределения площадей с определенным уровнем сдвижений и деформаций. Для этих целей вычислялся показатель P_i

$$P_i = \frac{S_i}{S} 100\%, \quad (14)$$

где S_i – площадь в пределах зоны влияния, где величины превышают заданный уровень i рассматриваемого параметра;
 S – общая площадь зоны влияния.

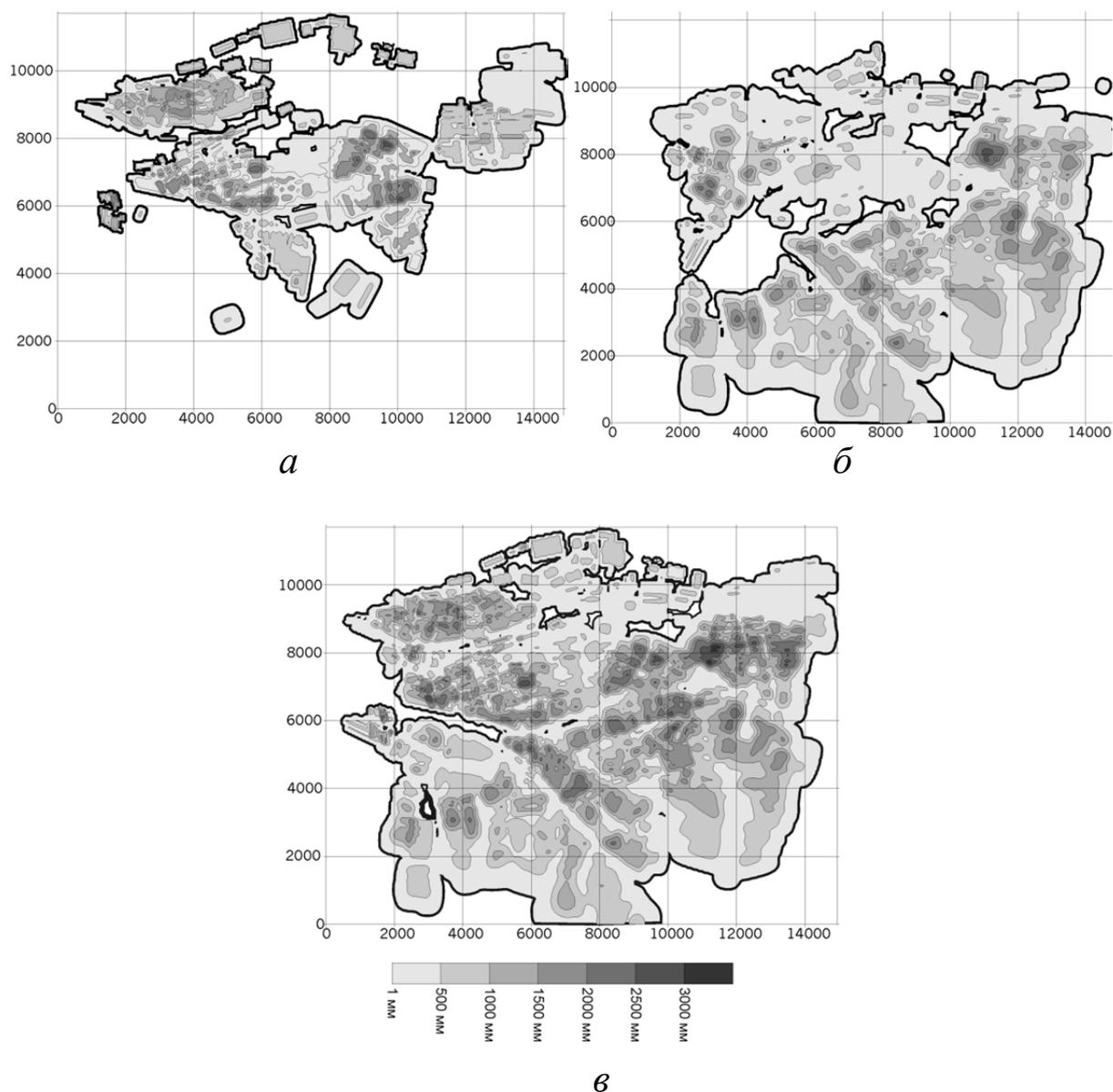


Рис. 5. Графики изолиний оседаний земной поверхности на территории горных отводов шахт Буденновского и Пролетарского районов г. Донецка: а – до 1958 г.; б – после 1958 г.; в – за весь период отработки запасов

Таблица 1

Характеристика областей с различными уровнями оседаний на территории шахт Буденновского и Пролетарского районов г. Донецка за период подработки после 1958 г.

Уровень оседаний, мм	Общая площадь зоны влияния с данным уровнем оседаний, км ²	Число отдельных областей	Максимальная площадь отдельной области, км ²	Средняя площадь отдельной области, км ²
>500	48,277	102	27,814	0,473
>1000	16,087	64	3,390	0,251
>1500	3,682	46	0,639	0,080
>2000	0,714	13	0,400	0,055
>2500	0,081	1	0,081	0,081

На рисунке 6 приведены графики изменения данного показателя в зависимости от значений оседаний. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что максимальные оседания составляют около 3 м. На 50 % подработанной площади оседания не превышают 500 мм, а на 75-85 % – 1000 мм. Оседания величиной более 2000 мм имеют место на территории не превышающей 3 %.

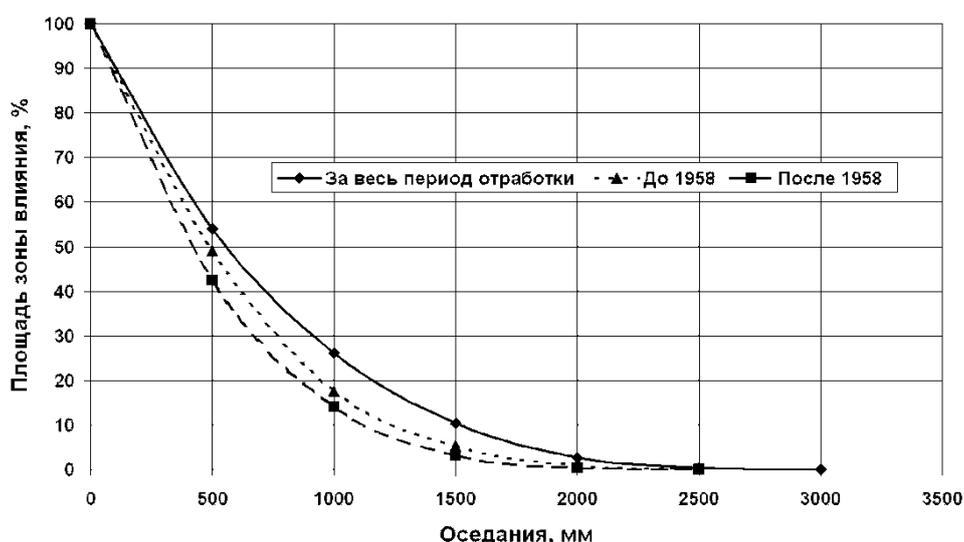


Рис. 6. Распределение площадей зон с одинаковым уровнем оседаний на территории шахт Буденновского и Пролетарского районов г. Донецка

Большинство отмеченных выше выводов можно отнести и к распределению максимальных наклонов, и горизонтальных деформаций, о чем свидетельствуют данные, приведенные в таблице 2, где в качестве уровней градации приняты граничные величины при разделении подрабатываемых территорий на группы согласно ДБН В.11-5-2000 [6].

Сопоставляя площади групп территорий по максимальным наклонам и максимальным горизонтальным деформациям, можно констатировать их очень хорошее совпадение, особенно для современного периода. Так, площадь IV группы составляет 88-89 %, группы III – 8-10 %, группы II – 2,3-2,5 % и группы I – менее 0,5 %.

Выводы.

1. Предложена методика расчета сдвижений и деформаций земной поверхности, учитывающая изменение гипсометрии залегания пород. Она базируется на сеточной модели, в которой вычисляются три составляющие вектора сдвижения в каждом узле сетки. Вертикальные и горизонтальные деформации определяются на основе перемещений узлов сетки.

2. При оценке влияния горных работ на больших территориях важны не величины сдвижений и деформаций по различным направлениям, а максимальные значения.

3. Разработана информационная технология расчета и анализа распределения сдвижений и деформаций на больших территориях на основе ГИС технологий.

4. При разработке свиты, включающих от 2 до 7 пологих пластов, в Донецко-Макеевском районе Донбасса наблюдается неравномерная подработанность территории и мозаичный характер распределения сдвижений и деформаций по площади. Максимальные оседания составляют около 3 м. Оседания, не превышающие 0,5 м, развиваются на 50 %, 1,0 м на 75-85 %, а 2,0 м на 3 % площади подработанной территории.

Вертикальные и горизонтальные деформации соответствующие IV группе территорий развиваются на 90 % площади зоны влияния горных работ. Для группы III этот показатель не превы-

шаєт 10 %. Деформації групи II можливі на 2–3 %, а групи I – на 0,5 % площі загальної зони впливу.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом: ДСТУ 101.00159226.001-2003 : Затв. Мінпаливенерго України 28.11.2003. — Київ, 2004. — 128 с.
2. Правила охорони споруджень і природних об'єктів від шкідливого впливу підземних горних розробок на вугільних місцях нагромадження / Міністерство вугільної промисловості СРСР. — М. : Недра, 1981. — 288 с.
3. Сдвиг горних порід при підземній розробці вугільних і сланцевих місць нагромадження. — М. : Недра, 1970. — 224 с.
4. Зенкевич О., Чанг И. Метод кінцевих елементів в теорії споруджень і в механіці сплошних серед. — М. : Недра, 1974. — 240 с.
5. Временні технічні умови проектування і будівництва будівель і споруджень на вугільних площах Донецького вугільного басейну (ВТУ-01-58). — Київ : Міністерство будівництва УРСР. — 1958. — 220 с.
6. Будівки і споруди на підроблюваних територіях і просідаючих ґрунтах. ДБН В.11-5-2000 // Державний комітет будівництва архітектури та житлової політики України. — Київ, 2000. — 34 с.