УДК 622.834:658.011.56
doi:10.24412/0136-4545-2023-2-74-85
EDN:XEWFNC

©2023. **В.Б. Скаженик**[1], **И.В. Чернышенко**[2], **Н.Н. Грищенков**[3], **Ф.М. Голубев**[4]

ПРОГНОЗ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведен анализ методов прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности при подработке подземными горными выработками. Выделены особенности методов, их достоинства и недостатки. Рассмотрены численные методы и программные средства, реализующие эти методы. Отмечены современные требования к методам прогноза сдвижений и деформаций на основе компьютерного моделирования. Представлены результаты использования программного обеспечения для пространственной визуализации сдвижений земной поверхности а также результаты визуального сравнения мульды сдвижения, полученной при использовании метода типовых кривых и вероятностного метода. Сформулированы основные направления совершенствования методов прогноза последствий подработки земной поверхности на основе компьютерного моделирования.

Ключевые слова: *сдвижения земной поверхности, вероятностный метод, программное обеспечение, пространственная визуализация, методы прогноза.*

Введение. Одной из насущных проблем Донбасса является проявление последствий подработки горными выработками угольных шахт территорий насе-

[1] *Скаженик Владимир Борисович* – канд. техн. наук, доцент каф. разработки месторождений полезных ископаемых ДонНТУ, Донецк, e-mail: geosoft.svb@gmail.com.

Skazhenik Vladimir Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Donetsk National Technical University, Chair of Development of Mineral Deposits.

[2] *Чернышенко Иван Владимирович* – аспирант каф. разработки месторождений полезных ископаемых ДонНТУ, Донецк, e-mail: i.w.tschernyschenko@gmail.com.

Chernyshenko Ivan Vladimirovich – Postgraduate, Donetsk National Technical University, Donetsk, Chair of Development of Mineral Deposits.

[3] *Грищенков Николай Николаевич* – доктор техн. наук, зав. отд. сдвижения земной поверхности и защиты подрабатываемых объектов РАНИМИ, Донецк, e-mail: gringm@gmail.com.

Grishchenkov Nikolai Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Head of Department, Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying, Donetsk, Department of Earth Surface Displacement and Protection Objects Above Mining.

[4] *Голубев Филипп Максимович* – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. отд. сдвижения земной поверхности и защиты подрабатываемых объектов РАНИМИ, Донецк, e-mail: f_golubev@list.ru.

Golubev Philipp Maksimovich – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying, Donetsk, Department of Earth Surface Displacement and Protection Objects Above Mining.

ленных пунктов и инфраструктурных объектов. Вызванные подземными очистными работами сдвижения и деформации земной поверхности приводят к разрушению сооружений, объектов инфраструктуры и природных объектов, к значительному экономическому ущербу.

Повышение качества принимаемых решений и, соответственно, снижения ущерба, можно достичь за счет повышения достоверности прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности на основе адекватных моделей. Однако моделирование процессов, происходящих при подработке слоев горных пород, является сложной задачей из-за большого количества влияющих факторов и их неоднозначного влияния в различных условиях.

Многообразие моделей прогноза сдвижений и деформаций массива горных пород предопределяется множеством возможных состояний моделируемой среды, ее неоднородностью и различными свойствами горных пород. Обычно рассматривают модели упругого, неупругого, пластического деформирования, а также модели разрушения, потери сплошности массива горных пород. Выделяют модели сплошных, блочных, слоистых, дискретных сред. Однако в силу неточности исходной информации о структуре и качественных характеристиках массива горных пород, а также неадекватности теоретических моделей, обусловленной упрощениями, в основу многих методов прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности положены зависимости и закономерности, установленные экспериментальным путем [1].

Развитие компьютерных технологий обработки информации предопределяет возможность и целесообразность разработки новых методов моделирования и прогноза процессов сдвижений и деформаций горных пород.

Цель данной работы заключается в анализе существующих методов прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности и разработке методических подходов к созданию систем прогноза на основе компьютерного моделирования.

1. Характеристика подходов к решению рассматриваемой проблемы. При расчете сдвижений и деформаций горных пород и земной поверхности выделяют эмпирические, полуэмпирические, численные методы (табл. 1).

Наиболее распространенными являются эмпирические или полуэмпирические методы. Эмпирические методы основаны на экспериментальных зависимостях и закономерностях, полученных в частных условиях. В силу неповторимости условий разработки месторождений, точность и надежность прогноза на основе этих методов может существенно снижаться.

Широкое распространение получили методы типовых кривых, устанавливающих характер и параметры сдвижения земной поверхности [1]. Среди этих методов выделяют: метод характерных точек (определяются границы влияния подземных горных работ и отдельные точки, характеризующие мульду оседания); метод типового распределения оседаний в мульде сдвижений (общий вид мульды устанавливается предварительно и задается в относительных единицах; в зависимости от конкретных условий кривая оседания масштабируется).

Метод Кнотте в качестве исходных данных использует максимальное воз-

Таблица 1. Особенности и недостатки методов прогноза сдвижений горных пород

Название метода	Особенности метода, достоинства	Недостатки метода
Метод интеграционных сеток.	Интеграционная сетка строится по данным натурных измерений оседаний.	Учитываются не все значимые факторы.
Методы типовых кривых.	Параметры деформационных процессов определяются через переменные коэффициенты, установленные в результате натурных наблюдений.	Применение ограничено районами, где условия идентичны.
Основанные на функциях влияния (метод Кнотте, метод Санна, метод Бейера, метод Литвинишина [2], Тригонометрическая функция Бальса, степенная функция Бейера, экспоненциальная функция Занна и Эрхардта-Зауэра [3].	Функции влияния описывают характер и степень влияния элементарных площадок подработки на земную поверхность.	Форма мульды идеализирована. В качестве исходных данных используются не все факторы, которые в действительности влияют на процесс.
Метод конечных элементов (FEM - Finite Element Method).	Основан на теории упругости. Учитывается картина распределения напряжений в очистной выработке. Есть возможность учета нелинейного характера деформирования. Есть возможность учета фактора времени. Реализован в программах Ansys, Comsol, Midas, Plaxis, Abaqus, ZSoil.	Требуются большие вычислительные возможности компьютерной техники [4]. Используются методы неявного решения, тогда как проблемы с высокой нелинейностью, лучше всего решаются кодами, использующими метод явного решения [5].
Метод конечных разностей (FDM - Finite Difference Method).	Используется схема расчета Лагранжа, позволяющая материалам поддаваться и течь, а сетке деформироваться (в режиме больших деформаций) и перемещаться вместе с представленным материалом, и встроенный язык программирования, позволяющий создавать новые функции и изменение моделей поведения или параметров - [5, 6]. Реализован в программах FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), FLAC3D.	Ограничения при работе со сложными геометрическими областями.

Таблица 1. Продолжение

Название метода	Особенности метода, достоинства	Недостатки метода
Метод дискретных элементов (DEM - Discrete Element Method).	DEM применяется для условий, описываемых как блочные, когда необходимо явно моделировать множество стыков. [5]. Реализован в программах PFC2D, UDEC, 3DEC, DDA.	Ограничения на количество рассматриваемых в модели элементов, обусловленное вычислительными возможностями.
Метод граничных элементов (BEM - Boundary Element Method).	Возможно моделирование бесконечно больших областей; требует меньших вычислительных возможностей, чем метод конечных элементов; обеспечивает моделирование распространения трещин в сплошных средах.	Ограничения при моделировании неоднородных материалов, при моделировании нелинейного поведения материала (например, пластичности) или процессов развития разрушения.

можное оседание и предельный (граничный) угол сдвижения. В данном методе влияние элементарного объема подработки характеризуется кривой нормального распределения вероятностей – кривой Гауса. Такое предположение основано на аналогии влияния подработки и свойства нормального распределения вероятностей, заключающегося в том, что данному распределению подвержены случайные величины, которые являются суммой многих случайных слабо взаимозависимых величин. Данный метод широко распространен в Китае и рекомендуется правилами Национального угольного бюро [2].

При обосновании вида компьютерной модели для прогноза сдвижений земной поверхности из-за уплотнения горных пород, в работе [7] авторы выделяют эмпирические, аналитические и теоретические модели. Подчеркивается, что эти модели отличаются количеством учитываемых параметров, требуемым на разработку модели временем а также требуемой производительностью компьютерной техники. Для построения компьютерной модели процессов авторы делают выбор в пользу стохастичекой модели (модели функции влияния). На основе этой модели разработана компьютерная программа, обеспечивающая корректировку параметров моделирования и прогноз сдвижений земной поверхности.

Недостатки использования функции времени Кнотте рассмотрены в работе [8]. С целью устранения этих недостатков, как подчеркивают авторы, применяются методы модификации параметров, кусочного моделирования и теоретического анализа.

В работе [5] авторы отмечают ограниченность применения эмпирических методов областью, соответствующей месту получения исходных данных. По мнению авторов, физические модели помогают понять механизмы смещений горных пород, но являются дорогостоящими и не всегда применимыми для прогноза сдвижений и деформаций горных пород.

Характеризуя численные методы прогноза сдвижений земной поверхности, авторы отмечают их строгость и возможность расчета напряжений и деформаций в анализируемой области, но для использования этих методов необходимо определять характеристики горных пород с высокой точностью.

Среди численных методов выделяют метод граничных элементов (BEM), метод дискретных элементов (DEM), метод конечных элементов (FEM), метод конечных разностей (FDM) (табл. 1).

Характеризуя эти методы, авторы отдают предпочтение методу конечных разностей, отмечая его преимущества по сравнению с методом конечных элементов: использование метода явного решения в условиях высокой нелинейности функций; моделирование деформирования и перемещения сетки в режиме больших деформаций за счет использования схемы расчета Лагранжа.

В работе [9] прогноз оседания поверхности, вызванной горными работами, также проводится с помощью метода конечных разностей. В качестве исходных данных задаются значения механических параметров массива горных пород. Калибровка модели производится на основе имеющихся данных мониторинга оседания земной поверхности под влиянием подземных горных работ. В результате использования методов экспериментального проектирования и численного моделирования уточняются основные механические характеристики пласта и вмещающих горных пород. Наличие модели позволяет рассматривать различные сценарии развития горных работ и выбирать наиболее рациональный с позиции минимизации отрицательных последствий подработки земной поверхности.

Вопросы точности и надежности прогноза параметров сдвижения горных пород при подработке земной поверхности рассмотрены в работе [10].

Известные программные комплексы, используемые для численного моделирования сдвижений и деформаций земной поверхности, обладают обширным набором моделей поведения горных пород, однако не обеспечивают возможности комплексного моделирования сети горных выработок и динамики развития горных работ. Кроме того, решения, полученные с использованием этих программ, трудно проверяемы [11]. Как правило, в этих моделях нет прямой связи между вариантом развития горных работ и моделью поведения горного массива.

2. Применение модифицированных подходов. С целью повышения точности методов прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности использовался программный комплекс, обеспечивающий пространственное компьютерное моделирование и анимацию процессов, происходящих при подработке территорий угольными шахтами.

Для пространственного моделирования объектов угольной шахты использовалась система «Шахта 3D» [12]. Программное обеспечение реализовано на языках высокого уровня; для программирования графических функций используется библиотека OpenGL. Структура программного комплекса включает модули, обеспечивающие пространственное моделирование следующих объектов: угольные пласты, существующие горные выработки, проектные горные выработки, дневная поверхность, отработанное пространство, данные геологической разведки (траектории скважин и структура пласта), геологические нарушения. Проектные варианты развития горных работ отстраиваются в полуавтоматизированном режиме. Для заданных сечений горных выработок в трехмерной модели указывается трасса проектируемой горной выработки. При этом возможна привязка трассы к поверхности пласта (для пластовых выработок), либо к произвольной плоскости (для полевых выработок). Параметры сформированных объектов фиксируются в базе данных (длины, объемы и др.). Программа имеет развитый экспорт-импорт графических и цифровых данных (форматы Autocad, Gemcom, Micromine).

С использованием разработанного программного обеспечения произведено визуальное сравнение мульды сдвижения земной поверхности, рассчитанной в соответствии с утвержденной методикой, основанной на методе типовых кривых, и мульды, рассчитанной в соответствии с методом Кнотте.

Расчет максимального оседания, в соответствии с утвержденной методикой, производится по формуле [13]

$$\eta_m = q_0 m \cos \alpha N_1 N_2, \tag{1}$$

где q_0 – относительная величина максимального оседания; m – вынимаемая мощность пласта, м; a – угол падения пласта в пределах очистной выработки, градусы; N_1, N_2 – условные коэффициенты, характеризующие степень подработанности земной поверхности, соответственно вкрест простирания и по простиранию.

Оседание в произвольной точке мульды определяется из выражения

$$\eta = \eta_m S(z_x) S(z_y). \tag{2}$$

Значения функций $S\,(z)$, отражающих характер распределения деформаций в мульде сдвижения, в соответствии с утвержденной методикой определены из данных натурных наблюдений и приняты в расчетах для условий Донецкого угольного бассейна. При этом аргумент z отражает отношение расстояния от расчетной точки до проекции на поверхность линии максимального оседания к длине полумульды.

В соответствии с методом Кнотте, оседание в каждой точке земной поверхности η под влиянием отработки запасов в области S определяется следующим образом [14]:

$$\eta(x, y) = \eta_m \iint\limits_S f(x) f(y) dx dy, \tag{3}$$

где $f(x)$ и $f(y)$ – функции влияния Кнотте;

$$f(x) = \frac{1}{R} e^{-\pi (x/R)^2}; \tag{4}$$

$$f(y) = \frac{1}{R} e^{-\pi (y/R)^2}, \tag{5}$$

где R – радиус влияния подработки, который определяется через среднюю глубину разработки H и предельный (граничный) угол сдвижения β

$$R = H/tg\beta. \tag{6}$$

Оседание в каждой точке земной поверхности $\eta(x, y)$ можно представить через коэффициенты распределения оседания $C(x)$, $C(y)$ [14]

$$\eta(x, y) = \eta_m C(x) C(y); \tag{7}$$

$$C(x) = \frac{1}{2} \left\{ \left[erf(\sqrt{\pi} \frac{x}{R}) + 1 \right] - \left[erf(\sqrt{\pi} \frac{x - l}{R}) + 1 \right] \right\}; \tag{8}$$

$$C(y) = \frac{1}{2} \left\{ \left[erf(\sqrt{\pi} \frac{y}{R}) + 1 \right] - \left[erf(\sqrt{\pi} \frac{y - L}{R}) + 1 \right] \right\}. \tag{9}$$

С целью сравнения методов задавались одинаковые исходные данные, приведенные в таблице 2.

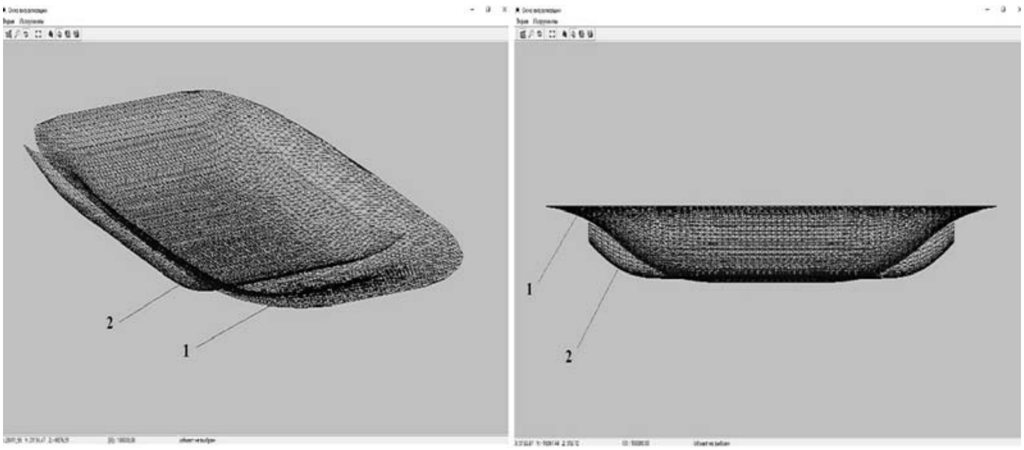
Таблица 2.

Исходные данные при построении мульды сдвижения земной поверхности

Наименование фактора	Обозначение	Значение
Средняя глубина разработки, м	H	600
Вынимаемая мощность пласта, м	m	1
Угол падения пласта, град	α	18
Длина отработки, м	l	1200
Ширина отработки, м	L	900
Предельный (граничный) угол сдвижения, град	β	70
Коэффициент оседания	q	0,878

Расчеты проводились по сетке 20х20 метров. Результаты визуализации мульды сдвижения, полученной двумя методами, представлены на рисунке 1. Полученные результаты свидетельствуют об идентичности оценки максимального оседания двумя методами, однако область полной подработки, рассчитанная утвержденным методом, меньше.

Для визуализации динамических процессов при подработке подземными очистными работами в среде свободно распространяемого программного обеспечения Blender на языке Python разработаны программные модули для формирования и отображения календарных планов развития горных работ [15]. В соответствии с заданным вариантом развития горных работ и динамическими характеристиками процесса сдвижения земной поверхности моделируются смещения и деформации.



a b

Рис. 1. Мульда сдвижения, рассчитанная утвержденным методом [13] (1) и вероятностным методом (2) (а – вид в 3D; б – проекция на плоскость, параллельную линии простирания пласта)

На рисунке 2 представлена визуализация изменения продольных относительных деформаций при подработке земной поверхности (значения деформаций на рисунке для наглядности увеличены в 200 раз). Такое представление позволяет оценить изменчивость во времени параметров процесса сдвижения земной поверхности и соотнести область распространения деформаций с объектами инфраструктуры, отраженными в модели шахты.

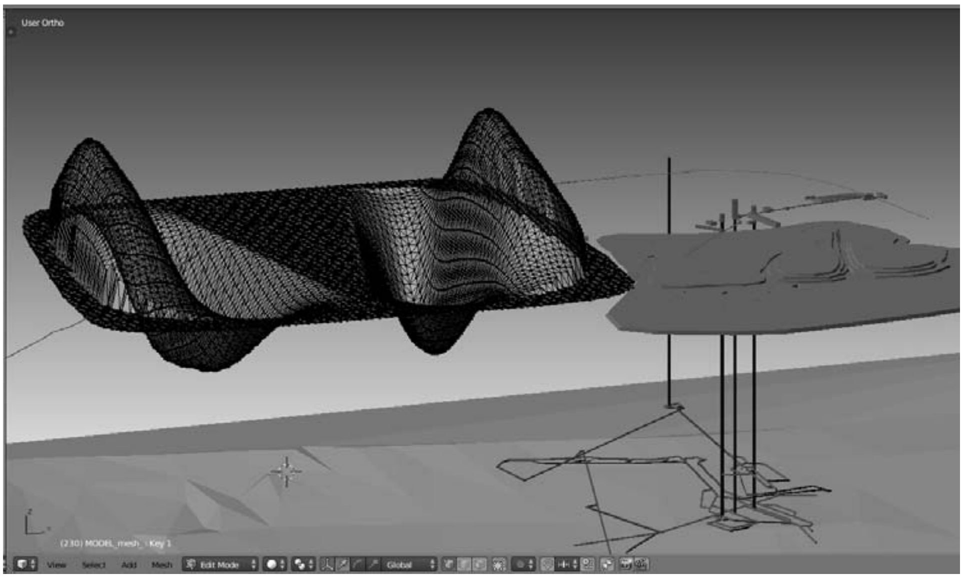


Рис. 2. Визуализация продольных относительных деформаций

С использованием разработанного программного обеспечения получена анимационная модель изменения во времени параметров процесса сдвижения земной поверхности при подработке подземного трубопровода, расположенного продольно относительно направления подвигания очистного забоя. При таком расположении трубопровода знакопеременные деформации растяжения-сжатия распространяются вдоль линии подвигания забоя, и при определенных условиях значения деформаций в распространяемых волнах могут суммироваться, что предопределяет необходимость оценки параметров в динамике [16].

С целью фиксации момента достижения критических деформаций в динамике вдоль трассы трубопровода рассчитывались оседания, горизонтальные сдвижения и горизонтальные деформации (рис. 3). Как видно из рисунка, момент достижения критических деформаций наблюдается в промежуточном положении (при отходе лавы на 980 м, рис. 3 б). В установившемся положении значение горизонтальных деформаций находится в допустимых пределах (рис. 3 в). Данный пример свидетельствует о необходимости моделирования процессов в динамике.

Выводы. Проведенное сравнение методов прогноза деформаций земной поверхности показало их полную сходимость по показателям максимальных оседаний и существенное отличие объема мульд, что может привести к существенным погрешностям расчетов при определении характера распределения деформаций в мульде. В связи с этим, актуальной задачей является совершенствование методов прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности под влиянием подземных горных работ, которое подразумевает комплексное моделирование горнодобывающих объектов и процессов, происходящих при подработке. Для их реализации разработаны программные средства, обеспечивающие:

– построение пространственной модели угольной шахты, отражающей структуру вмещающих пород, отработанные и оставшиеся запасы, конфигурацию сети горных выработок, объекты на поверхности;

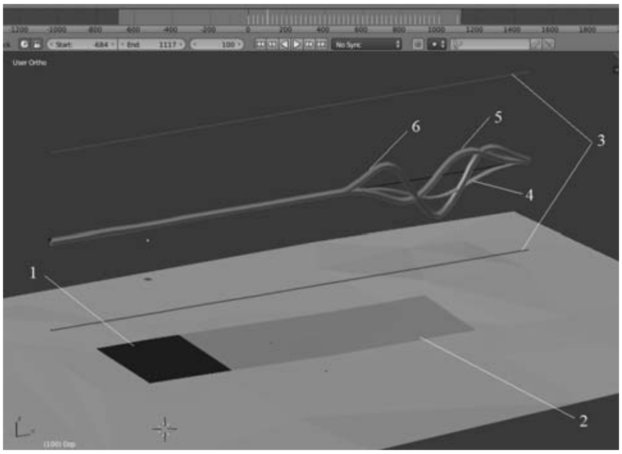
– моделирование динамики развития горных работ, включающее процедуры формирования календарных планов отработки запасов;

– визуализацию сдвижений и деформаций горных пород во времени, фиксацию моментов времени, в которые значения деформаций превышают допустимые.

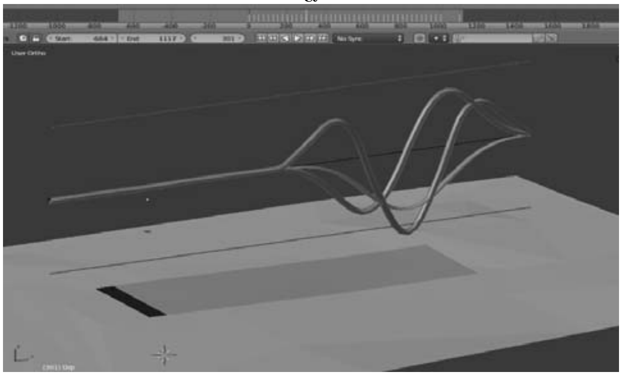
Возможные направления совершенствования методики прогноза последствий подработки земной поверхности угольными шахтами:

– разработка статистических и численных моделей прогноза, учитывающих все значимые факторы, влияющие на сдвижения и деформации земной поверхности;

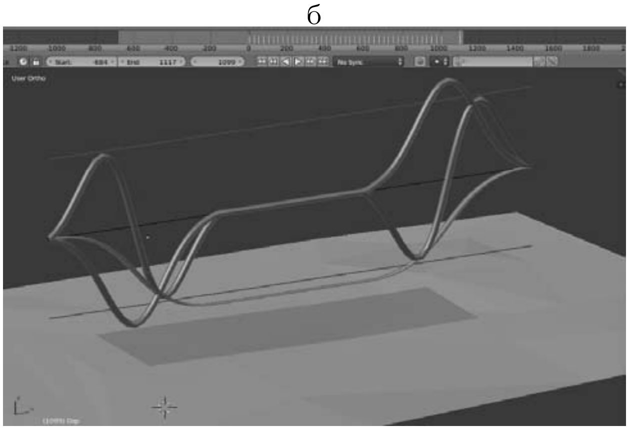
– разработка программных средств для адаптации моделей на основе обучения с использованием нейросетевых технологий, что предполагает классификацию горнодобывающих объектов в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий и прогноз изменения состояния горного массива в динамике.



а



б



в

Рис. 3. Динамика параметров процесса сдвижения земной поверхности при отходе лавы на 780 метров (а), при отходе лавы на 980 метров (б), в установившемся положении (в) (1 – выемочный столб; 2 – отработанная часть лавы; 3 – верхний и нижний уровни допустимых деформаций; 4, 5, 6 - графики изменения оседания, горизонтальных сдвижений, горизонтальных деформаций соответственно)

Исследования проводились в ФГБНУ «РАНИМИ» в рамках государственного задания (№ госрегистрации 1023020600011-0-2.7.5)

1. *Викторов С.Д.* Механика сдвижения и разрушения горных пород / С.Д. Викторов, С.А. Гончаров, М.А. Иофис, В.М. Закалинский. – М.: ИПКОН, 2019. – 354 с.
2. *Tan X.* Extraction of Irregularly Shaped Coal Mining Area Induced Ground Subsidence Prediction Based on Probability Integral Method / X. Tan, B. Song, H. Bo, Y. Li, M. Wang, G. Lu // Appl. Sci. – 2020. – 10(18), 6623. https://doi.org/10.3390/app10186623
3. *Кутепов Ю.Ю.* Численное моделирование процесса сдвижения породных массивов применительно к горно-геологическим условиям шахты имени Рубана в Кузбассе / Ю.Ю. Кутепов, Е.Б. Боргер // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 5. – С. 66–75.
4. *Дрибан В.А.* Особенности решения систем линейных алгебраических уравнений для метода конечных элементов в геомеханике / В.А. Дрибан, А.Г. Петрушин // ТРУДЫ РАНИМИ: сб. научн. трудов. – Донецк. – 2021. – № 12–13(27–28). – С. 172–184.
5. *Alejano L.* FDM predictive methodology for subsidence due to flat and inclined coal seam mining / L. Alejano, P. Ramirez-Oyanguren, J. Taboada // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1999. – V. 36, Is. 4. – P. 475–491.
6. *Назимко В.В.* Исследование экологически опасных необратимых сдвижений массива горных пород над выработками солевых шахт / В.В. Назимко // Геотехнічна механіка. – 2015. – Вип. 124. – С. 128–138.
7. *Witkowski W.T.* Software for Estimation of Stochastic Model Parameters for a Compacting Reservoir/ W.T. Witkowski, R. Hejmanowski // Applied Sciences. – 2020. – 10(9), 3287; https://doi.org/10.3390/app10093287
8. *Cheng H.* A New Dynamic Prediction Model for Underground Mining Subsidence Based on Inverse Function of Unstable Creep / H. Cheng, L. Zhang, L. Guo, X. Wang, S. Peng // Advances in Civil Engineering. — 2021. – Vol. 2021. – P. 1–9. https://doi.org/10.1155/2021/9922136
9. *Xu N.* Surface subsidence prediction for the WUTONG mine using a 3-D finite difference method / N. Xu, P. Kulatilake, H. Tian, X. Wu, Y. Nan, T. Wei // Computers and Geotechnics. – 2013. – Vol. 48, no. 3. – P. 134–145.
10. *Hejmanowski R.* Evaluation of reliability of subsidence prediction based on spatial statistical analysis / R. Hejmanowski, A. Malinowska. // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2009. – 46. – P. 432–438.
11. *Шашкин А.Г.* Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта / А.Г. Шашкин // Развитие городов и геотехническое строительство. — 2011. — № 2. — С. 1—32.
12. *Скаженик В.Б.* Проектирование разработки месторождений на основе компьютерного моделирования / В.Б. Скаженик// Вісті Донецьк. гірнич. ін-ту. – 2011. – № 1. – С. 8–14.
13. ГСТУ 101.00159226.001-2003. Правила подработки зданий и сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом. — Введ. 2003-10-28. — Киев: УкрНИМИ НАН Украины, 2004. — 128 с.
14. *Yan J.* The application and development of Knothe influence function in China / J. Yan, Y. Lun, J. Yue, A. Preube, A. Sroka // Trans. of the Strata Mech. Res. Inst. – 2018. – Vol. 20, no 1. – P. 115–122.
15. *Чернышенко И.В.* Компьютерное моделирование динамики развития горных работ на угольной шахте / И.В. Чернышенко // Сб. научн. труд. X Междунар. научн.-практич. конф. «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». – 2021. – С. 182-1–182-8.
16. *Анциферов А.В.* Маркшейдерское обеспечение охраны трубопроводных коммуникаций на подрабатываемых территориях / А.В. Анциферов, Н.Н. Грищенков, Е.В. Блинникова // Горн. информац.-аналитич. бюлл. (научн.-технич. журн.). – 2017. – № 11. – С. 82–91.

V.B. Skazhenik, I.V. Chernyshenko, N.N. Grishchenkov, Ph.M. Golubev

Prediction of displacements and deformations of the earth's surface based on computer modeling.

The analysis of methods for forecasting displacements and deformations of the earth's surface during undermining by underground mine workings has been carried out. The features of the methods, their advantages and limitations are highlighted. Numerical methods and software tools that implement these methods are considered. Modern requirements for prediction methods of displacements and deformations based on computer simulation are noted. The results of using software for spatial visualization of the earth's surface displacements are presented, as well as the results of a visual comparison of the surface subsidence using the method of type curves and the stochastic method. The main directions for improving the methods for predicting the consequences of underworking the earth's surface on the basis of computer simulation are formulated.

Keywords: *displacement of the earth's surface, stochastic method, software, spatial visualization, prediction methods.*

Получено 25.05.2023