

УДК 622.834

Дрибан Виктор Александрович

доктор технических наук,
старший научный сотрудник, и. о. директора,
Республиканский академический
научно-исследовательский и
проектно-конструкторский институт
горной геологии, геомеханики, геофизики и
маркшейдерского дела ФГБНУ "РАНИМИ",
г. Донецк, ул. Челюскинцев, 291
e-mail: viktor-driban@yandex.ru

Хохлов Борис Валентинович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
заведующий отделом горного давления,
Республиканский академический
научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт
горной геологии, геомеханики, геофизики и
маркшейдерского дела ФГБНУ «РАНИМИ»
e-mail: hbv@bk.ru

Антипенко Антон Викторович

ведущий инженер, отдел горного давления,
Республиканский академический
научно-исследовательский и
проектно-конструкторский институт
горной геологии, геомеханики, геофизики и
маркшейдерского дела ФГБНУ «РАНИМИ»
e-mail: ministrxp@mail.ru

**ПРОГНОЗ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ
НА ПОДРАБОТАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ
МЕТОДОМ ИСКУССТВЕННОГО
ИНТЕЛЛЕКТА НА ОСНОВЕ
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ***Аннотация:*

В статье приведены результаты анализа геомеханической обстановки в пределах горного отвода шахты им. В. М. Бажанова.

В настоящее время массовое закрытие угольных шахт с их последующим затоплением привело к кардинальному перераспределению гидродинамического режима подземных вод. Это стало причиной активизации геомеханических процессов, в том числе процессов самоликвидации сохранившихся горных выработок и пустот в горном массиве, вплоть до образования провалов земной поверхности. Как следствие, нарушаются эксплуатационные способности (в некоторых случаях вплоть до разрушения) зданий, сооружений и других объектов, расположенных на земной поверхности, что существенно увеличивает риски при ведении хозяйственной деятельности, а также создает угрозу жизни и здоровью людей.

Поэтому для поля шахты им. В. М. Бажанова был выполнен прогноз вероятности образования провалов земной поверхности по двум методикам: нормативной и с применением искусственного интеллекта. Представленная нейронная сеть разработана в отделе горного давления ФГБНУ «РАНИМИ» на основе нормативной методики, с учетом требований нормативных документов и проведенных исследований.

DOI:

Driban Viktor A.

Doctor of Technical Sciences,
Senior Researcher,
acting Director of the Republican Academic
Research and Design Institute of Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics and Surveying,
RANIMI Federal State Budgetary Institution,
Donetsk, 291 Chelyuskintsev Str.
e-mail: viktor-driban@yandex.ru

Khokhlov Boris V.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Head of the Mining Department,
Republican Academic Research and Design
Institute of Mining Geology, Geomechanics,
Geophysics and Surveying of RANIMI
Federal State Budgetary Institution
e-mail: hbv@bk.ru

Antipenko, Anton V.

Leading Engineer, Mining Department,
Republican Academic Research and Design
Institute of Mining Geology, Geomechanics,
Geophysics and Surveying of RANIMI
Federal State Budgetary Institution
e-mail: ministrxp@mail.ru

**USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE
METHODS TO PREDICT
THE DANGEROUSNESS OF UNDERMINED
AREAS OF THE EARTH'S SURFACE***Abstract:*

The article presents the results of an analysis of the geomechanical situation within the mining allotment of the mine named after V. M. Bazhanov.

Currently, the mass closure of coal mines with subsequent flooding has led to a radical redistribution of the hydrodynamic regime of underground waters. This has led to the activation of geomechanical processes, including the self-liquidation processes of remaining mine workings and voids in the rock mass, up to the formation of ground surface collapses. As a result, the operational capabilities (in some cases, up to destruction) of buildings, structures, and other objects located on the ground surface are disrupted, significantly increasing the risks associated with economic activities and posing a threat to the lives and health of people.

Therefore, a forecast of the probability of ground surface collapses was carried out for the mine named after V. M. Bazhanov, using two methods: normative and with the application of artificial intelligence. The neural network presented was developed by the Mining Pressure Department of the Federal State Budgetary Institution RANIMI based on the normative methodology, considering the requirements of regulatory documents and conducted research. The resulting program can predict the probability of surface collapses over old mine workings with an accuracy of up to 94.6% and has been tested at several mines in the Donetsk-Makeevsky and Torez-

Полученная программа способна осуществлять прогноз вероятности образования провалов на земной поверхности над старыми горными выработками с точностью до 94,6 % и была опробована на ряде шахт Донецко-Макеевского и Торезско-Снежнянского угленосных районов Донбасса, а также на шахтах Восточного Донбасса.

В результате выполненного анализа с использованием нейронного алгоритма установлено, что на территории горного отвода шахты им. В. М. Бажанова вероятность провалообразования в настоящее время сохраняется только в двух нейроронах, на территории которых расположено несколько частных домовладений. При этом значительные территории земной поверхности в пределах нормативных провалоопасных зон с расположенными в них зданиями, сооружениями и промышленными объектами определены вполне безопасными, так как процессы провалообразования в них давно завершились.

Ключевые слова: горная выработка, земная поверхность, провалообразование, методика прогноза, нейронная сеть.

Snezhnyansky coal-bearing regions of the Donbass, as well as in the mines of Eastern Donbass.

As a result of the analysis using the neural algorithm, it was established that in the territory of the mine named after V.M. Bazhanov, the probability of failure formation currently only remains in two neural zones, where several private residential buildings are located. At the same time, significant areas of the ground surface within the normative failure zones, with buildings, structures, and industrial objects located in them, have been determined to be entirely safe, as the failure processes in them have long been completed.

Key words: mine workings, earth surface, failure, prediction technique, neural network.

Введение

Добыча угля в Донецком бассейне ведется уже более 200 лет. Практически вся поверхность региона оказалась подработанной на малых глубинах (20 – 100 м). В Донецком регионе имеется более 10 тыс. горных выработок, имеющих выход на земную поверхность. Только на территории города Донецка их около тысячи [1], и ликвидировались они в разные годы, зачастую без соблюдения существующих норм и правил.

Массовое затопление шахт Донецкого региона, обусловленное закрытием нерентабельных угледобывающих предприятий, вызвало кардинальное изменение гидрогеологической обстановки. Это повлекло за собой активизацию процессов сдвижения горного массива с последующей самоликвидацией подземных пустот от старых горных выработок, что, в свою очередь, привело к высоким рискам образования провалов на земной поверхности [2]. Как следствие – нарушение эксплуатационных способностей объектов на поверхности вплоть до их полного разрушения.

Для обеспечения безопасной жизнедеятельности техногенно нагруженных, подработанных территорий требуется надежный прогноз развития возможных опасных деформаций дневной поверхности и провалообразования. От правильной оценки вероятности и определения времени возможного возникновения провала зависит своевременность принятия мер по минимизации вреда, наносимого подземным коммуникациям и объектам, расположенным на земной поверхности [3].

Оценка степени провалоопасности до настоящего времени осуществляется по нормативной методике [4]. Однако полученные по этой методике расчетные параметры провалоопасных зон на территориях горных отводов шахт в изменившихся условиях не являются достаточно достоверными. Это обусловлено несколькими причинами. На сегодняшний день не существует единого нормативного документа, устанавливающего правила построения границ провалоопасных зон на дневной поверхности. Разработанная в ФГБНУ «РАНИМИ» методика [4] опирается на несколько нормативных документов, в которых уделялось внимание вопросам провалообразования над горными выработками. Применяемые в них расчетные формулы встречаются еще в нормативных документах 1970-х годов, и выводились они без учета возможности подтопления потенциально провалоопасных территорий и возраста горных выработок. Нормативная методика предполагает, что дневная поверхность представляет собой плоскость. Такое допущение может приводить к существенным ошибкам при определении глубины расположения выработок, так как мезорельеф представляет собой поверхность топографиче-

ского порядка со значительной разницей высотных отметок в пределах исследуемых участков.

В отделе горного давления ФГБНУ «РАНИМИ», с учетом исследований [4] – [10] и нормативных документов [11] – [13], была разработана и натренирована нейронная сеть [1] для прогноза образования провалов на земной поверхности над старыми горными выработками, с точностью около 95 %. Эта система основана на искусственных нейронных сетях и генетических алгоритмах. В качестве исходных факторов, способствующих развитию повреждений земной поверхности над старыми горными выработками, были выбраны глубина расположения выработки; степень диагенеза вмещающих пород; возраст выработки; углы наклона породных слоев и самой выработки; а также техногенный фактор, учитывающий взаимовлияние смежных выработок, влияние зон ПГД, обводненность, наличие пльвунов и прочих негативных факторов, повышающих вероятность образования провала.

Сеть была создана на основе перцептрона и генетического алгоритма, включающего в себя шесть входных нейронов, семь промежуточных и два исходящих нейрона. Подобная архитектура сети обусловлена физическим смыслом процессов, лежащих в основе прогнозируемого явления.

На шесть входных нейронов подаются главные факторы, обуславливающие процесс долговременного уменьшения устойчивости массива горных пород над старой горной выработкой. На вход первого нейрона поступает сигнал глубины расположения выработки. На второй – степень диагенеза. На третий – время от момента проведения выработки до момента возникновения провала. Если провала не было – до настоящего времени. На четвертый – угол залегания пород. На пятый – угол наклона выработки. На шестой – фактор условий эксплуатации выработки.

Нейроны 7 – 13 организованы в два скрытых слоя. Именно эти нейроны отвечают за моделирование нелинейных процессов, которые являются основными физическими процессами в механизме потери устойчивости нагруженного собственным весом массива горных пород. Нейроны 14 и 15 выдают исходящие данные в виде наличия/отсутствия вероятности провала и времени его образования.

Были построены три группы номограмм для слабо-, средне-, и высокометаморфизованных горных массивов. Номограммы позволяют провести предварительную оценку сроков появления провалов на дневной поверхности в зависимости от глубины расположения выработок, при действующих шести группах влияющих факторов: благоприятные условия поддержания выработки; выработка находится в зоне тектонической нарушенности; выработка находится в зоне влияния горных работ; негативные гидрогеологические условия; выработка находится в зоне пльвунов; комплекс негативных факторов. Данная методика была апробирована на шахтах Донецко-Макеевского и Торезско-Снежнянского районов Донбасса [14] и на шахтах Восточного Донбасса [15].

Шахта им. В. М. Бажанова расположена в северо-восточной части города Макеевки, Донецкой Народной Республики. Часть территории горного отвода шахты отнесена к потенциально провалоопасным, и имеет весьма сложное строение. В приповерхностной зоне отрабатывались два сближенных пласта n_1^B и n_1^H с мощностью междупластья 6 – 10 м. Выходы под наносы обоих пластов расположены на западном склоне балки «Сухая Калиновая». Направление падения пород – с запада на восток. Несмотря на то что вдоль дна балки по обоим пластам расположены целики, они неоднократно были прорезаны наиболее опасными с точки зрения провалообразования протяженными горными выработками различного назначения.

Возраст горных выработок находится в достаточно большом диапазоне от 55 до 100 лет и более. Угол падения увеличивается с глубиной от 3 до 5°. В кровле верхнего пласта залегает песчаник мощностью 20 – 30 м. О мощности наносов имеются лишь фрагментарные данные, однако следует отметить, что при прогнозе опасности провалообразования необходимо учитывать только глубину по карбону, т.е. коренным поро-

дам. Так как прочностные характеристики наносов на порядок ниже, чем у коренных пород, то купол обрушения, развивающийся до поверхности карбона, неизбежно выйдет на дневную поверхность в виде провала. Все эти факторы делают прогноз провалообразования на основе нормативной методики чрезвычайно сложным и недостаточно надежным. В связи с этим было принято решение применить метод прогноза на основе расчетов нейронной сети.

На начальном этапе работ были выполнены следующие подготовительные работы:

- проведен анализ планов горных работ по отработанным и действующим горизонтам и пластам, а также горно-геологических и горнотехнических условий отработки угольных пластов на горном отводе шахты;

- на горном отводе определены все выработки, имеющие выход на земную поверхность и участки близкого к поверхности расположения горных выработок;

- проведено обследование выработок, имеющих выход на земную поверхность и участков близкого к поверхности расположения горных выработок с оценкой их состояния;

- выполнено координатное позиционирование каждого объекта на спутниковой карте с визуализацией в геоинформационной системе “*Google Earth Pro*” (рис. 1). Полученные материалы позволили создать координатную базу позиционирования всех известных устьев горных выработок, выходящих на поверхность в пределах горного отвода шахты, и дают возможность проанализировать окружающий ее рельеф местности.

Оценка провалоопасности конкретных участков поверхности проводилась в три этапа. **На первом этапе** производились предварительные построения. В графическом редакторе к цифровой растровой копии плана поверхности привязывались аналогичные копии планов горных выработок обоих пластов. За основу была взята поверхность верхнего пласта n_1^B как более опасного. На план поверхности переносилась линия выхода пласта n_1^B под наносы. Далее эта линия клонировалась в сторону падения с интервалами по глубине в 20 м, учитывающими изменение угла падения. Таким образом, на плане дневной поверхности был получен график изолиний, приблизительно соответствующий поверхности пласта.

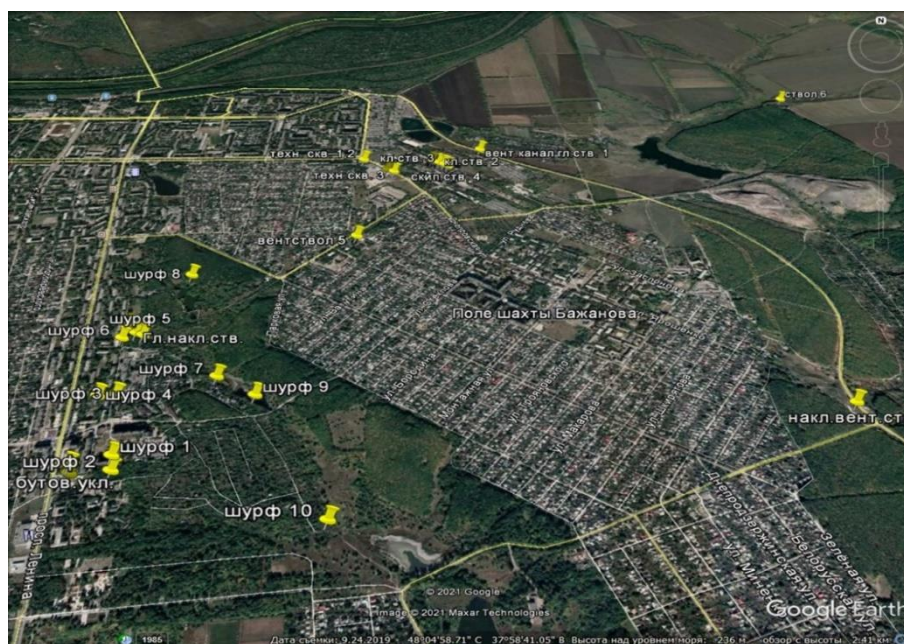


Рис. 1. Обследованные объекты шахты им. В. М. Бажанова

Таблица 1

**Результаты определения провалоопасности выделенных участков
земной поверхности, по номограммам**

№ зоны	Интервал глубин по карбону, м	Средний возраст выработок, лет	Время формирования провалов, лет		
			Благоприятные условия (график 1)	В зоне влияния горных работ (график 3)	Гидрогеологический фактор (график 4)
1	2	3	4	5	6
1.1	0-8	100	0	0	0
1.2	0-5	100	0	0	0
1.3	8-15	100	0	0	0
1.4	8-20	100	0	0	0
2	10-20	80	0	0	0
3.1	5-8	90	0	0	0
3.2	8-20	90	0	0	0
4	20-40	75	0-35	0	0
5	20-40	100	0-35	0	0
6	20-40	85	0-35	0	0
7	54-60	55	60-75	25-35	0-10
8	40-60	70	35-75	0-35	0-10
9	40-60	100	35-75	0-35	0-10
10	40-60	75	35-75	0-35	0-10
11	46-60	75	45-75	—	0-10
12	60-80	55	75-110	35-75	10-45
13	60-80	65	75-110	35-75	10-45
14	60-80	100	75-110	35-75	10-45
15	60-80	70	75-110	35-75	10-45
16	60-80	70	75-110	—	10-45
17	80-100	55	110-145	75-110	45-85
18	80-100	60	110-145	75-110	45-85
19	80-100	100	110-145	75-110	45-85
20	80-100	60	110-145	75-110	45-85
21	80-100	65	110-145	—	45-85
22	83-100	55	110-145	—	45-85
23	100-120	55	145-175	110-145	85-120
24	100-120	60	145-175	110-145	85-120
25	100-120	60	145-175	110-145	85-120
26	100-120	60	145-175	110-145	85-120
27	100-120	60	145-175	—	85-120
28	100-120	55	145-175	—	85-120
29	100-120	55	145-175	—	85-120
30	120-140	55	175-205	145-165	120-155
31	120-140	60	175-205	145-165	120-155
32	120-140	60	175-205	145-165	120-155
33	120-140	60	175-205	145-165	120-155
34	120-140	60	175-205	—	120-155
35	120-140	55	175-205	—	120-155
36	140-160	55	205-235	165-205	155-185
37	140-160	60	205-235	165-205	155-185
38	140-160	60	205-235	165-205	155-185
39	140-160	60	205-235	165-205	155-185
40	140-160	60	205-235	—	155-185
41	140-160	55	205-235	—	155-185

По результатам анализа данных табл. 1 ячейки выделены по следующим правилам:

– прочерк (отсутствие данных) в ячейках пятой колонки означает, что в данной зоне отрабатывался только пласт n_1^B без подработки по нижнему пласту, соответственно, фактор влияния горных работ можно исключить;

– светло-серым цветом обозначены ячейки, в которых время образования провалов меньше, чем средний возраст выработок (третья колонка). Это означает, что в данных зонах процесс провалообразования уже должен был завершиться и для объектов на поверхности угроза отсутствует;

– косой штриховкой обозначены ячейки, в которых время образования провалов существенно больше среднего возраста выработок (третья колонка). Соответственно, в ближайшем будущем образование провалов в этих зонах маловероятно;

– темно-серым цветом обозначены ячейки четвертой и пятой колонок, если возраст выработок зоны укладывался в диапазон времени образования провалов. Ячейки шестой колонки обозначены таким же цветом, если при появлении гидрогеологического фактора время провалообразования становилось равным либо меньше возраста выработок. Известно, что при насыщении водой прочность горных пород существенно снижается, а это, в свою очередь, ускоряет процесс провалообразования;

– вертикальная штриховка ячеек шестой колонки означает ситуацию некоторой неопределенности. Например, зона № 7 по фактору благоприятных условий станет опасной через 5 лет. В то же время по фактору влияния горных работ процесс провалообразования в ней должен был уже закончиться. Так как данная оценка носит вероятностный характер, нельзя исключать возможность обоих вариантов и при затоплении выработок вероятность образования провалов в зоне резко возрастет.

Предварительный анализ ситуации показал следующее:

– зоны № 1-6 и 9 уже неопасны, так как процессы провалообразования в них уже должны были закончиться;

– зоны № 23-41 еще не опасны, а с учетом того, что выработки этих зон находятся на глубинах 100 м и более, вероятность провалообразования в них невелика;

– зоны № 7-22 (за исключением № 9) требуют более подробного изучения на третьем этапе анализа.

На третьем этапе выполнялся детальный анализ времени образования провалов методом прямого расчета по нейронному алгоритму.

Первым шагом анализа стал поиск в пределах указанных зон объектов, представляющих наибольшую опасность с точки зрения возможности образования провалов на земной поверхности. К таковым были отнесены охраняемые целиками выработки на обоих пластах при отсутствии их непосредственной подработки или надработки горными работами соседнего пласта. Очистные работы, с учетом незначительной мощности междупластья (6-10 м), существенно нарушают исходное состояние массива и исключают возможность развития над протяженными выработками узких куполов обрушения, которые и приводят к образованию провалов.

Наличие объектов, являющихся источниками возможного образования провалов, установлено в трех зонах № 14, 19 и 20. Зоны № 14 и 19 были построены над центральным уклоном пласта n_1^H . В зоне № 20 объекты-источники локализованы в пределах двух небольших участков, поэтому были выделены две зоны с номерами 20.1 и 20.2.

Следующим шагом анализа было уточнение исходных параметров объектов, а именно глубины расположения и возраста выработок. Так же для прямого расчета по нейронному алгоритму требуются следующие данные: степень метаморфизма (в данном случае Г); угол падения пород (изменяется от 3 до 5°); угол наклона выработки; фактор влияния горных работ и горно-геологических условий (в отобранных зонах отсутствует). Далее для установленных условий был произведен расчет времени образования провалов с точностью до одного года. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Ячейки табл. 2 выделены так же, как и ячейки табл. 1.

Таблица 2

Результаты прямого расчета провалоопасности с учетом затопления выработок

№ зоны	Опасный объект	Возраст объекта, лет	Глубина по карбону, м	Угол падения пород, град	Угол наклона выработки, град	Время провала по расчету, лет	
						Благоприятные условия	Гидрогеологический фактор
1	2	3	4	5	6	7	8
14	Центральный уклон пл. n_1^H	100	70-90	4	4	75-107	11-45
19	Центральный уклон пл. n_1^H	100	90-110	5	5	107-137	45-77
20.1	Участок 4-го транспортного штрека пл. n_1^H в целике под вент. ств. №5	65	110	5	0	151	94
20.2	Центральные вспомогательный и транспортный бремсберги и ходок центрального бремсберга пл. n_1^H	60	110	5	5	137	77

По результатам анализа полученных расчетных параметров установлено, что зоны № 20.1 и № 20.2 даже в случае затопления не должны представлять особой опасность еще в течение 20 – 30 лет. Возраст выработок зон № 20.1 и 20.2, позволяет предположить, что они были закреплены металлической рамной крепью и полноценно погашены, и с учетом их фактической глубины расположения и наличия мощного песчаника в кровле пласта n_1^B эти зоны можно считать достаточно безопасными.

Возраст выработок зон № 20.1 и 20.2 позволяет предположить, что они были закреплены металлической рамной крепью и полноценно погашены, и с учетом их фактической глубины расположения и наличия мощного песчаника в кровле пласта n_1^B эти зоны можно считать достаточно безопасными.

Наиболее велика вероятность образования провалов на сегодняшний день в зоне № 14. В зоне № 19 вероятность образования провалов незначительна, но в случае затопления выработок она существенно возрастет. Большая часть нормативной зоны № 8 (построенной по нормативной методике) относится к этому же уклону, но она не пересекается с нейронными зонами № 14 и 19, а заканчивается выше по падению. Таким образом, нормативная зона № 8 занимает те участки (нейрозоны № 1.4, 5 и частично 9 в табл. 1), которые по нейрорасчетам относятся к уже безопасным с точки зрения возможного провалообразования.

Нормативные зоны № 21 и 22 занимают значительную площадь и на большей ее части накладываются друг на друга, что по нормативной методике означает повышенную опасность провалообразования, в то время как предварительный анализ по номограммам (см. рис. 3) показал, что большая часть этой территории уже безопасна, поскольку процессы провалообразования на них уже завершились.

Выводы

1. Разработанная нейронная сеть позволяет прогнозировать время образования провалов на земной поверхности со средней погрешностью не более 5 %. Такая погрешность является полностью приемлемой и объясняется природными случайными погрешностями определения исходных данных.

2. По результатам проведенного дополнительного анализа вероятность провалообразования на территории горного отвода шахты им. В. М. Бажанова существует только в нейроzone № 14 и в нейроzone № 19 при условии затопления горных выработок. В границах этих нейрозон на поверхности расположены несколько частных домов-строений. В то же время значительные территории в границах нормативных зон с расположенными на них промышленными и хозяйственными объектами, многоэтажными домами и пр. признаны вполне безопасными, так как процессы провалообразования в них или уже завершились, или возможность образования провалов в них отсутствует.

Список литературы

1. Driban V., Nazimko V., Feofanov A., Khalymendyk I., 2010. Vorhersage des erdoberflächeabsturzes oberhalb der alten kohlegrubenräumen. *Altbergbau – Kolloquium*, Freiberg, 04. bis 06. November, P. 391-400.

2. Славиковская Ю.О., 2021. Техногенные пустоты недр как фактор негативного воздействия на окружающую среду при разработке месторождений твердых полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 2, С. 33-44.

3. Кирков А.Е., Федосеев В.В., Кужим О.М., 2022. Превентивное обнаружение и локализация провалов подработанной земной поверхности – основа решения региональных проблем моногородов в горнопромышленных регионах. *Золото. Полиметаллы. XXI век: Устойчивое развитие: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Челябинск, 02–03 марта 2022 года*. Челябинск: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, С. 49-51.

4. Хохлов Б. В., Дрибан В.А., Голдин С.В., Терлецкий А.М., Рожко М.Д., 2019. Методика построения и обследования зон, опасных по провалам. *Труды РАНИМИ: сб. науч. тр., Донецк*, № 7 (22), С. 142-157.

5. Постоев Г.П., 2020. Модели механизма формирования и расчета параметров провалов земной поверхности над подземными полостями. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, № 4, С. 36-47.

6. Хамидуллина Н.В., Проколова М.В., Прокопов А.Ю., 2019. Физическое моделирование провалов земной поверхности. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*, № 2(74), С. 124-131.

7. Гавриленко Ю.Н., Петрушин А.Г., 2003. Основные принципы моделирования сдвижений и деформаций земной поверхности методом конечных элементов. *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-геологічна*, Донецьк, Випуск 62, С. 100 – 114.

8. Усанов С.В., Мельник В.В., Замятин А.Л., 2013. Мониторинг трансформации структуры горного массива под влиянием процесса сдвижения. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 6, С.83-89.

9. Усанов С.В., Усанова А.В., 2015. Сдвигение земной поверхности при затоплении железорудной шахты. *Проблемы недропользования*, №1, С. 55-64.

10. Дрибан В.А., Феофанов А.Н., Назимко И.В., 2009. Разработка системы прогноза обрушений земной поверхности над погашенными горными выработками. *Проблеми гірського тиску. Сб. науч. праць*, №17, С.22 – 57.

11. *Методическое руководство «О порядке выделения провалоопасных зон и выбора комплекса технических мероприятий по выявлению и ликвидации пустот на ликвидируемых шахтах Восточного Донбасса»*. Москва: ИПКОН РАН, 2007, 34 с.

12. ГСТУ 101.00159226.001 – 2003. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом. Введ. 01.01.2004. Киев, 2004, 128 с.

13. Методические положения по решению гидрогеологических задач при разработке проекта ликвидации шахты (пособие проектировщику) РТМ 6.04.95. Донецк: Донгипрошахт, 1995, 17 с.

14. Дрибан В.А., Хохлов Б.В., Хламов Д.М., Антипенко А.В., 2023. Прогноз провалоопасности подработанных территорий при затоплении горных выработок шахт Торезско-Снежнянского района на основе методов искусственного интеллекта. Труды РАНМИ, № 20-21(35-36), С. 47-65.

15. Дрибан В.А., Хохлов Б.В., Антипенко А.В., Голдин С.В. 2024. Прогноз вероятности образования провалов земной поверхности на горном отводе шахты «Ростовская» при ее затоплении. Труды РАНМИ, № 1(39), С. 63-77.

References

1. Driban V., Nazimko V., Feofanov A., Khalymendyk I., 2010. Vorhersage des erdoberflächeabsturzes oberhalb der alten kohlegrubenräumen. *Altbergbau – Kolloquium*, Freiberg, 04. bis 06. November, P. 391-400.

2. Slavikovskaya Yu.O., 2021. Tekhnogennye pustoty nedr kak faktor negativnogo vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu pri razrabotke mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh [Man-made subsurface voids as a factor of negative impact on the environment during the development of solid mineral deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 2, P. 33-44.

3. Kirkov A.E., Fedoseev V.V., Kuzhim O.M., 2022. Preventivnoe obnaruzhenie i lokalizatsiya provalov podrobotannoi zemnoi poverkhnosti – osnova resheniya regional'nykh problem monogorodov v gornopromyshlennykh regionakh . [Preventive detection and localization of failures of the mined earth's surface as the basis for solving regional problems of single-industry towns in mining regions]. *Zoloto. Polimetallogy. XXI vek: Ustoichivoe razvitie: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Chelyabinsk, 02–03 marta 2022 goda. Chelyabinsk: Institut problem kom-pleksnogo osvoeniya nedr RAN*, P. 49-51.

4. Khokhlov B. V., Driban V.A., Goldin S.V., Terletskii A.M., Rozhko M.D., 2019. Metodika postroeniya i obsledovaniya zon, opasnykh po provalam [Methodology for the construction and inspection of zones dangerous for collapses]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk*, № 7 (22), P. 142-157.

5. Postoev G.P., 2020. Modeli mekhanizma formirovaniya i rascheta parametrov provalov zemnoi poverkhnosti nad podzemnymi polostyami [Models for the mechanism of formation and calculation of parameters of sinkholes of the Earth's surface over underground cavities]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, № 4, P. 36-47.

6. Khamidullina N.V., Prokopova M.V., Prokopov A.Yu., 2019. Fizicheskoe modelirovanie provalov zemnoi poverkhnosti [Physical modeling of sinkholes of the Earth's surface]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, № 2(74), P. 124-131.

7. Gavrilenko Yu.N., Petrushin A.G., 2003. Osnovnye printsipy modelirovaniya sdvizenii i deformatsii zemnoi poverkhnosti metodom konechnykh elementov [Basic principles of modeling the movements and deformations of the Earth's surface by the method of fi-

nite elements]. Naukovi pratsi DonNTU. Seriya girnicho-geologichna, Donets'k, Vipusk 62, P. 100 – 114.

8. Usanov S.V., Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2013. Monitoring transformatsii struktury gornogo massiva pod vliyaniem protsessa sdvizheniya [Monitoring the transformation of the mountain range structure under the influence of the displacement process]. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, № 6, P.83-89.

9. Usanov S.V., Usanova A.V., 2015. Sdvizhenie zemnoi poverkhnosti pri zatoplenii zhelezorudnoi shakhty [Displacement of the Earth's surface during the flooding of an iron ore mine]. Problemy nedropol'zovaniya, №1, P. 55-64.

10. Driban V.A., Feofanov A.N., Nazimko I.V., 2009. Razrabotka sistemy prognoza obrusheniya zemnoi poverkhnosti nad pogashennymi gornymi vyrabotkami [Development of a system for forecasting collapses of the Earth's surface over extinguished mining workings]. Problemi girs'kogo tisku. Sb. nauch. prats', №17, P.22 – 57.

11. Metodicheskoe rukovodstvo "O poryadke vydeleniya provaloopasnykh zon i vybora kompleksa tekhnicheskikh meropriyatiy po vyyavleniyu i likvidatsii pustot na likvidiruemykh shakhtakh Vostochnogo Donbassa' [Methodological guide "On the procedure for the allocation of sinkholes and the selection of a set of technical measures to identify and eliminate voids in the liquidated mines of Eastern Donbass"]. Moscow: IPKON RAN, 2007, 34 p.

12. GSTU 101.00159226.001 – 2003. Pravila podrobotki zdaniy, sooruzhenii i prirodnykh ob'ektov pri dobyche uglya podzemnym sposobom [Rules for the mining of buildings, structures and natural objects during underground coal mining. 01.01.2004]. Vved. 01.01.2004. Kiev, 2004, 128 p.

13. Metodicheskie polozeniya po resheniyu gidrogeologicheskikh zadach pri razrabotke proekta likvidatsii shakhty (posobie proektirovshchiku) [Methodological guidelines for solving hydrogeological problems in the development of a mine liquidation project (designer's manual)] RTM 6.04.95 . Donetsk: Dongiproshakht, 1995, 17 p.

14. Driban V.A., Khokhlov B.V., Khlamov D.M., Antipenko A.V., 2023. Prognoz provaloopasnosti podrobotannykh territorii pri zatoplenii gornykh vyrabotok shakht Torezsko-Snezhnyanskogo raiona na osnove metodov iskusstvennogo intellekta [The forecast of the sinkhole hazard of the mined areas in case of flooding of the mine workings of the Torezsko-Snezhnyansky district based on artificial intelligence methods]. Trudy RANIMI, № 20-21(35-36), P. 47-65.

15. Driban V.A., Khokhlov B.V., Antipenko A.V., Goldin S.V. 2024. Prognoz veroyatnosti obrazovaniya provalov zemnoi poverkhnosti na gornom otvode shakhty "Rostovskaya' pri ee zatoplenii [The forecast of the probability of formation of sinkholes of the Earth's surface at the mining outlet of the Rostovskaya mine during its flooding]. Trudy RANIMI, № 1(39), P. 63-77.