

УДК 622.834

Дрибан Виктор Александрович

доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
и.о. директора ФГБНУ «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

младший научный сотрудник,
отдел горного давления,
Республиканский академический
научно-исследовательский и
проектно-конструкторский институт горной
геологии, геомеханики, геофизики и маркшей-
дерского дела (ФГБНУ "РАНИМИ")
e-mail: ministrxp@mail.ru

**ОЦЕНКА РИСКОВ
ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ
ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ***Аннотация:*

В приведенной статье представлены данные геодинамического наблюдения за горным отводом шахты «Антрацит», проводимого в условиях неконтролируемого поступления шахтных вод в выработанное пространство и горные выработки.

Добыча полезных ископаемых, в частности, каменного угля, приводит к формированию обширных территорий земной поверхности с повышенной техногенной нагрузкой. Данная тенденция характерна для различных месторождений, будь то Кузнецкий, Печерский или Донецкий угольные бассейны.

Среди наиболее актуальных проблем, вызванных подъемом уровня грунтовых вод и затоплением выработанных пространств в связи с прекращением работы шахтных водоотливов, создающих угрозу безопасности людей и сохранности имущества, можно выделить следующие:

- подтопление застроенных территорий и сельскохозяйственных угодий, приводящее к их заболачиванию;
- проникновение газа в подвалы жилых зданий и подземные сооружения промышленных объектов.;
- перемещение токсичных веществ и высокоминерализованной шахтной воды в подработанных горных породах с последующим выходом их на земную поверхность;
- возобновление процессов сдвижения горных пород над выработками, что приводит к образованию про-

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.065

Driban Viktor A.,

Doctor of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Acting Director of "Republican Academic
Research and Design Institute of Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying",
Donetsk, 291 Chelyuskintsev Str.
e-mail: viktor-driban@yandex.ru.

Khokhlov Boris V.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Head of the Rock Pressure Department,
Republican Academic Research
and Design Institute of Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying
e-mail: hbv@bk.ru.

Antipenko Anton V.

Junior Researcher,
Department of Rock Pressure,
Republican Academic Research and Design
Institute of Mining Geology, Geomechanics,
Geophysics and Mine Surveying
e-mail: ministrxp@mail.ru

**ASSESSMENT OF RISKS OF SINKHOLES
FORMATION DURING FLOODING
OF COAL MINES***Abstract:*

The article presents data from geodynamic monitoring of the mining allotment of the Antratsit mine, conducted under conditions of uncontrolled flow of mine water into the mined-out space and mine workings.

Extraction of minerals, in particular coal, leads to the formation of vast areas of the earth's surface with increased technogenic load. This trend is typical for various deposits, be it the Kuznetsk, Pechersk or Donetsk coal basins.

Among the most pressing problems caused by rising groundwater levels and flooding of mined-out spaces due to the cessation of mine drainage operations, which pose a threat to human safety and property, the following can be highlighted:

- flooding of built-up areas and agricultural lands, leading to their swamping;
 - gas penetration into basements of residential buildings and underground structures of industrial facilities;
 - movement of toxic substances and highly mineralized mine water in worked-out rocks with their subsequent exit to the earth's surface;
 - resumption of rock displacement processes above workings, which leads to the formation of surface failures in areas where such processes have long since ended.
- During the work, calculations and mapping of near-surface zones characterized by increased failure hazard were performed, both according to the normative methodology and using a neural algorithm. The use of the

валов земной поверхности в тех районах, где подобные процессы давно завершились.

При выполнении работы произведены расчеты и картографирование приповерхностных зон, характеризующихся повышенной провалоопасностью, как по нормативной методике, так и с применением нейронного алгоритма. Использование нормативного подхода позволило определить 21 зону, представляющую опасность в части образования провалов земной поверхности. Учитывая тот факт, что значительная часть выявленных зон располагается на территориях жилой застройки или сельскохозяйственных угодий, был осуществлен прогноз их провалоопасности с использованием нейросетевого моделирования. Результаты прогноза показали сокращение количества зон, опасных по возникновению провалов в течение ближайших 20 лет до 11, а также уменьшение их общей площади в 2,5 раза. Данный прогноз позволяет оптимизировать расходы на реализацию мероприятий по защите земной поверхности от негативного воздействия горных работ.

Ключевые слова: горный отвод, обводненный массив, провалы земной поверхности, горные выработки.

normative approach made it possible to identify 21 zones that pose a danger in terms of the formation of surface failures. Considering the fact that a significant part of the identified zones is located in residential areas or agricultural lands, a forecast of their failure hazard was made using neural network modeling. The results of the forecast showed a reduction in the number of zones dangerous for the occurrence of failures over the next 20 years to 11, as well as a decrease in their total area by 2.5 times. This forecast allows optimizing the costs of implementing measures to protect the earth's surface from the negative impact of mining operations.

Key words: mine allotment, flooded massif, dips in the Earth surface, mine workings.

Введение

Добыча полезных ископаемых, в частности, каменного угля, приводит к формированию обширных территорий земной поверхности с повышенной техногенной нагрузкой. Данная тенденция характерна для различных месторождений, будь то Кузнецкий, Печерский или Донецкий угольные бассейны.

Добыча каменного угля в Донецком угольном бассейне ведется свыше двухсот лет. В начале XX века в регионе функционировало около двух тысяч шахт, подавляющее большинство которых (95 %) было расположено на глубине до ста метров. После окончания Великой Отечественной войны для ускоренного восстановления угольной промышленности в Донецком бассейне было построено более шестисот мелких наклонных шахт. Они осуществляли добычу угля как вручную, так и с применением механизированных технологий, непосредственно от выходов пластов на поверхность или с границ пригодных для добычи участков на малых глубинах [1]. В результате такой интенсивной деятельности практически вся территория региона, включающая западную, центральную и восточную части Донбасса, оказалась подработанной на малых глубинах.

С 1994 года в Российской Федерации реализуются масштабные мероприятия по реорганизации угольной промышленности [2]. Основным методом закрытия убыточных шахт является так называемая «мокрая консервация» – полное затопление выработанного пространства и горных выработок. Водонасыщение породного массива приводит к изменению физико-механических свойств горных пород, способствует активизации процессов сдвижения и увеличению рисков провалообразования на земной поверхности. *Риск провалообразования* – это вероятностный показатель опасности образования провалов и оседаний земной поверхности. Такие явления наблюдаются практически во всех горнодобывающих районах страны. Добыча полезных ископаемых привела к понижению уровня земной поверхности, что способствовало подъему уровня грунтовых вод. Это, в свою очередь, создает ряд негативных последствий и реальные угрозы для территорий, прилегающих к ликвидированным шахтам [3, 4].

Среди наиболее актуальных проблем, вызванных подъемом уровня грунтовых вод и затоплением выработанных пространств в связи с прекращением работы шахтных водоотливов, можно выделить следующие:

- подтопление застроенных территорий и сельскохозяйственных угодий, приводящее к их заболачиванию;
- проникновение газа в подвалы жилых зданий и подземные сооружения промышленных объектов;
- перемещение токсичных веществ и высокоминерализованной шахтной воды в подработанных горных породах с последующим выходом их на земную поверхность;
- возобновление процессов сдвижения горных пород над выработками, что приводит к образованию провалов земной поверхности в тех районах, где подобные процессы давно завершились.

В результате вышеуказанных факторов значительно возрастает вероятность нарушения условий эксплуатации зданий и сооружений. Это может повлечь за собой невозможность их полноценного использования, привести к повреждениям, а в худшем случае – к полному разрушению, что, несомненно, создаст угрозу для жизни и безопасности людей.

Кроме того, рентабельные глубокие шахты сталкиваются с дополнительной проблемой при затоплении брошенных шахт, расположенных на верхних горизонтах. Им приходится функционировать в условиях обводнения горного массива. Данная проблема распространена практически во всех угольных районах Донбасса [5]. Актуальность данной проблемы выходит за рамки территории Донецкого бассейна и затрагивает все техногенно-нагруженные и подработанные территории.

ФГБНУ «РАНИМИ» занимается разработкой теоретических основ поведения и взаимодействия обводненных породных массивов с горными выработками. В ходе исследований созданы модели формирования и изменения напряженного состояния обводненного массива горных пород, а также модели взаимодействия крепи выработок с горными породами при отработке свиты пластов. Ведутся работы по разработке методов и средств активного управления горным давлением и гидроизоляции в подземных горных выработках. Кроме того, разработан новый метод прогнозирования образования провалов в приповерхностной зоне, основанный на методах искусственного интеллекта.

Новый метод прогнозирования рисков образования провалов в приповерхностной зоне водонасыщенных массивов основывается на двухэтапном подходе. На первом этапе на планах поверхности осуществляется построение и картирование провалоопасных зон по нормативной методике. Далее с помощью нейронной сети для выделенных зон производится оценка рисков возникновения провалов в ближайшее время.

Площадь участков земной поверхности, опасных по образованию провалов достаточно велика, и составляет до 30 % относительно общей площади шахтного поля. При этом достаточно часто эти зоны находятся под жилой или промышленной застройкой и сельхозугодиями. Поэтому для обеспечения безопасности необходим точный прогноз развития опасных деформаций поверхности земли и формирования провалов.

Правильная оценка вероятности возникновения провала и определение времени его возможного появления позволит своевременно принять меры по минимизации ущерба подземным коммуникациям и наземным объектам [6, 7]. Также точная локализация зоны риска и понимание периода, в течение которого выработка представляет угрозу земной поверхности, поможет минимизировать площади, выводимые из эксплуатации.

Целью данной работы является геодинамический мониторинг горного отвода шахты «Антрацит».

Задача исследования: определение объектов, над которыми возможно формирование провалов земной поверхности; расчет провалоопасных зон и их картирование, обследование и проведение геодинамического мониторинга на горном отводе шахты, определение степени опасности выделенных провалоопасных зон.

Метод построения провалоопасных зон земной поверхности

Для реализации поставленной цели была применена «Методика построения и обследования зон, опасных по провалам» [8]. В ее основе лежат следующие принципы:

1. У вертикальных горных выработок (стволов, шурфов и технических скважин) диаметром более 2,0 м зона, опасная по образованию провалов земной поверхности, ограничивается окружностью радиусом $R_0 = 40$ м от центра выработки.

2. У вертикальных горных выработок (стволов, шурфов и технических скважин) диаметром до 2,0 м зона, опасная по образованию провалов земной поверхности, ограничивается окружностью радиусом $R_0 = 20$ м от центра выработки.

3. Над наклонными и крутонаклонными вскрывающими и подготовительными выработками границы зоны, опасной по образованию провалов земной поверхности, устанавливаются:

– возле устья выработки со стороны восстания – линией, перпендикулярной оси выработки и удаленной от ее устья на 10 м плюс 5 м бермы;

– со стороны падения – линией, перпендикулярной оси выработки и проходящей через проекцию на земную поверхность точки, находящейся на глубине, равной $H_{\text{п}}$, вычисляемой по формуле

$$H_{\text{п}} = \frac{2,5h_{\text{в}}}{k_{\text{р}} - 1}, \quad (1)$$

где $h_{\text{в}}$ – высота выработки вчерне, м;

$k_{\text{р}}$ – коэффициент остаточного разрыхления, который для однородной толщи пород кровли принимается равным: 1,15 – для аргиллитов, 1,20 – для алевролитов, 1,25 – для песчаников. Для слоистого массива горных пород, залегающих выше выработки, значение коэффициента $k_{\text{р}}$ рассчитывается по формуле

$$k_{\text{р}} = \frac{1,15 \sum m_{\text{арг}} + 1,20 \sum m_{\text{ал}} + 1,25 \sum m_{\text{пес}}}{\sum m_{\text{арг}} + \sum m_{\text{ал}} + \sum m_{\text{пес}}}, \quad (2)$$

где $\sum m_{\text{арг}}$, $\sum m_{\text{ал}}$, $\sum m_{\text{пес}}$ – суммарная мощность слоев аргиллита, алевролита и песчаника, расположенных в кровле выработки, м;

– вдоль продольной оси выработки – прямыми линиями, удаленными от оси со стороны падения на $l_{\text{п}} = 10h_{\text{в}}$ плюс 5 м бермы, где $h_{\text{в}}$ – высота выработки вчерне, м (при отсутствии фактических данных высота выработки вчерне принимается равной 2,5 м) и со стороны устья на 10 м плюс 5 м бермы.

4. Над подготовительными или одиночными выработками провалы земной поверхности могут образовываться, если глубина кровли выработки $H_{\text{гв}}$ от поверхности карбона меньше высоты распространения обрушения пород над выработкой $H_{\text{п}}$ в метрах, которая определяется по формуле (1). Граница провалоопасной зоны на земной поверхности ограничивается контуром горной выработки, увеличенным на 5 м со стороны падения и простирающегося пласта. Со стороны восстания угольного пласта граница зоны строится от пятиметровой бермы под углом сдвижения – γ .

5. Над очистными выработками при разработке пластов с углами падения $\alpha \leq 45^\circ$ границы зоны возможных провалов на земной поверхности ограничиваются контуром горной выработки, увеличенным на 5 м в каждую сторону. Если нижняя граница горной выработки располагается на глубине более $12m$ (где m – вынимаемая мощность угольного пласта в метрах), то граница провалоопасной зоны со стороны падения угольного пласта строится на расстоянии 5 м по падению от проекции изогипсы пласта, проведенной на глубине $12m$. Со стороны восстания пласта граница провалоопасной зоны строится от пятиметровой бермы под углом сдвижения – γ .

Обследование горного отвода шахты «Антрацит»

Шахта «Антрацит» (№ 15/16, «Платовская») – угледобывающее предприятие, расположенное в г. Гуково (Ростовская область). До закрытия в 1997 году входила в

состав ОАО «Гуковуголь». Была введена в эксплуатацию в 1931 году с проектной мощностью 450 тыс. т угля в год и вела отработку угольных пластов k_2^{1B} , k_2 и i_3^H .

После закрытия шахта «Антрацит» была реорганизована в участок «Водоотлив-Запад» шахты «Ростовская» с целью предотвращения дополнительного притока шахтных вод.

В начале марта 2016 года работа подземного водоотлива шахты «Антрацит» была остановлена работниками в связи с задолженностью по выплате заработной платы, что привело к началу неконтролируемого затопления горных выработок. В настоящее время шахта затоплена до отметки + 226,9 м. Уровень воды поддерживается за счет работы водоотливного комплекса шахты «Ростовская».

Шахтное поле находится в северном крыле Должано-Сулино-Садкинской синклинали. Административно шахта расположена на территории Красносулинского района и города Гуково Ростовской области. При этом восточная часть шахтного поля расположена непосредственно под жилой застройкой города Гуково. В результате обследования горного отвода шахты «Антрацит» зафиксировано 37 горных выработок, имеющих выход на земную поверхность, из них стволов вертикальных – 5, наклонных стволов и сбоек – 11, шурфов вертикальных – 21 (табл. 1).

В соответствии с «Методикой построения и обследования зон, опасных по провалам» [8], на поле шахты «Антрацит» выделен 21 участок земной поверхности, опасный по возникновению провалов. Дополнительно была определена площадь каждого из таких участков (см. табл. 1). Так, провалоопасные зоны занимают порядка 3 % (0,4 км²) из 12,65 км² площади горного отвода шахты. При этом суммарная площадь зон, опасных по провалам земной поверхности, расположенных под сельскохозяйственными угодьями и под жилой застройкой, составляет 54,5 % или 219 621 м². Учитывая этот факт, а также то, что нормативная методика [8] не предусматривает изменения физико-механических свойств массива горных пород при его увлажнении, для выделенных зон был выполнен прогноз провалоопасности с применением нейронной сети.

Таблица 1

**Выработки, имеющие выход на земную поверхность
в пределах горного отвода шахты «Антрацит»**

№ п.п	Наименование выработки	Год ликвидации	Глубина, м	Угол наклона, градус	Состояние устья
1	2	3	4	5	6
1	Главный ствол № 1	2001	140,7	90	Удовлетворительное
2	Вспомогательный ствол	–	136,7	90	Удовлетворительное
3	Шурф № 20 пл. k_2^{1-B}	1996	50,0	90	Удовлетворительное
4	Вент. ствол № 20 пл. k_2^{1-B}	1963	127	17	Удовлетворительное
5	Шурф шах. № 17 пл. k_2^{1-B}	1932	36,9	90	Удовлетворительное
6	Шурф № 18 пл. k_2^{1-B}	1996	70	90	Удовлетворительное
7	Накл. ств. шах. № 25 пл. k_2^{1-B}	1951	90	15	Удовлетворительное
8	Вент. шурф пл. k_2^{1-B}	1951	24,5	90	Удовлетворительное
9	Шурф № 3 пл. k_2^{1-B}	1945	30	90	Удовлетворительное
10	Шурф № 9 пл. k_2^{1-B}	1945	24	90	Удовлетворительное
11	Наклонный ствол пл. k_2^{1-B}	1949	150	15	Удовлетворительное
12	Шурф № 7 пл. k_2^{1-B}	1946	25	90	Удовлетворительное
13	Наклонный ствол пл. k_2^{1-B}	1946	100	17	Удовлетворительное
14	Шурф № 5 пл. k_2^{1-B}	До 1941	20	90	Удовлетворительное
15	Шурф № 3 пл. k_2^{1-B}	До 1941	25	90	Удовлетворительное
16	Шурф б/н пл. k_2^{1-B}	До 1941	30	90	Удовлетворительное
17	Уклон № 1 пл. k_2^{1-B}	До 1941	80	15	Удовлетворительное
18	Старый шурф пл. k_2^{1-B}	До 1941	15	90	Удовлетворительное
19	Наклонный ствол №16 пл. k_2	До 1941	125	17	Удовлетворительное

1	2	3	4	5	6
20	Шурф б\н пл. k_2^{1-B}	До 1941	25	90	Удовлетворительное
21	Накл. ств. № 15-бис пл. k_2^{1-B}	До 1941	45	19	Удовлетворительное
22	Уклон пл. k_2^{1-B}	До 1941	40	18	Удовлетворительное
23	Накл. ств. пл. k_2^{1-B}	До 1941	80	18	Удовлетворительное
24	Шурф № 4 пл. k_2^{1-B}	До 1941	25	90	Удовлетворительное
25	Шурф № 6 пл. k_2^{1-B}	До 1941	25	90	Удовлетворительное
26	Шурф № 3 пл. k_2	До 1941	38	90	Удовлетворительное
27	Шурф № 13 пл. k_2	До 1941	35	90	Удовлетворительное
28	Шурф № 1 пл. k_2	До 1941	25	90	Удовлетворительное
29	Шурф № 2 пл. k_2	До 1941	25	90	Удовлетворительное
30	Шурф № 4 пл. k_2	До 1941	75	90	Удовлетворительное
31	Шурф № 14 пл. k_2	До 1941	30	90	Удовлетворительное
32	Шурф № 6=бис пл. k_2	1987	88	90	Удовлетворительное
33	Наклонный ствол № 01 пл. i_3^H	2018	466	25	Удовлетворительное
34	Конв. накл. ств. № 01 пл. i_3^H	2018	144	11	Удовлетворительное
35	Вертик. ствол шх. № 26	1960	61	90	Удовлетворительное
36	Гл. ств. шх № 24	1960	64	90	Удовлетворительное
37	Вспом. ств. шх. № 24	1960	64	90	Удовлетворительное
Всего выработок – 37, в том числе ранее ликвидированных – 36					

Оценка рисков повреждения земной поверхности с применением нейросети

Для оценки рисков провалообразования на основе исследований [9 – 16] и нормативных документов [17 – 21] была разработана нейронная сеть [22]. Полученная система, основанная на принципах искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов, обеспечивает прогноз вероятности возникновения провалов земной поверхности с точностью до 94,6 %. В качестве факторов, способствующих повреждению земной поверхности над старыми горными выработками, были выбраны следующие параметры:

- глубина залегания выработки;
- степень диагенеза вмещающих пород;
- возраст выработки;
- углы наклона породных слоев и самой выработки;
- комплексный параметр, учитывающий взаимодействие смежных выработок, влияние зон повышенного горного давления, обводненность, наличие плывунов и других негативных факторов, повышающих вероятность образования провалов.

Нейронная сеть была создана на основе модели перцептрона с использованием генетического алгоритма. Ее архитектура включает шесть входных, семь промежуточных и два выходных нейрона. Алгоритм работы нейронной сети следующий.

В качестве входных данных для шести нейронов используется набор основных факторов, которые оказывают влияние на процесс долговременного снижения устойчивости массива горных пород над старой горной выработкой. Первый нейрон получает информацию о глубине залегания выработки. Второй нейрон обрабатывает данные о степени диагенеза горных пород. Третий нейрон анализирует временной интервал между проведением выработки и моментом возникновения провала (или до настоящего времени, если провал не зафиксирован). Четвертый нейрон получает данные об угле залегания пород. Пятый нейрон обрабатывает информацию об угле наклона выработки. Наконец, шестой нейрон анализирует факторы, связанные с условиями эксплуатации выработки.

Нейронная сеть включает два скрытых слоя, состоящих из нейронов 7 – 13. Данные нейроны предназначены для моделирования процессов потери устойчивости нагруженного собственным весом массива горной породы. Нейроны 14 и 15 генериру-

ют выходные данные, представленные в виде оценки вероятности провала и прогноза момента его возникновения.

Из структуры сети очевидно, что она реализует глубокое взаимодействие всех факторов через взаимные нейронные связи-синапсы, гарантирующие восприятие процесса провала как следствие взаимодействия всех входящих факторов. Это повышает надежность решения задачи достоверного прогноза провала земной поверхности. Степень взаимодействия выбирается самой сетью. Так, величины весовых коэффициентов ω между нейронами, которые взаимодействуют сильнее, будут больше, чем между теми, которые взаимодействуют слабее. Характер связи учитывается знаком коэффициента, а нелинейность связи моделируется нелинейной формой сигмоидальной пороговой функции.

Предложенная методика была проверена на шахтах Донецко-Макеевского и Торезско-Снежнянского районов Донбасса [23].

Оценка опасности провала участков приповерхностной зоны осуществлялась в три этапа. На начальном этапе выполнялись предварительные построения. С использованием графического редактора на цифровую копию плана поверхности накладывались цифровые планы горных выработок по всем пластам, обрабатывавшимся шахтой «Антрацит». Линии выхода пластов под наносы переносились на план поверхности. Затем эти линии копировались в направлении падения пласта с интервалами, соответствующими величине угла падения, который варьировался от 15 до 18°. В результате на плане поверхности была сформирована дополнительная поверхность, соответствующая поверхности угольного пласта по карбону с шагом 80 м по глубине.

На следующем этапе над горными выработками строились нейрозоны. При этом соблюдались следующие критерии:

- по интервалу глубин выработки делились на два диапазона: 0 – 80 м и 80 - 160 м;
- по возрасту выработки группировались с разницей не более чем в 5 – 6 лет, но в отдельных случаях допускалось различие до 10 лет;
- основные наклонные выработки выделялись в отдельные зоны.

На рис. 1 приведен пример построения нейрозон на плане земной поверхности.

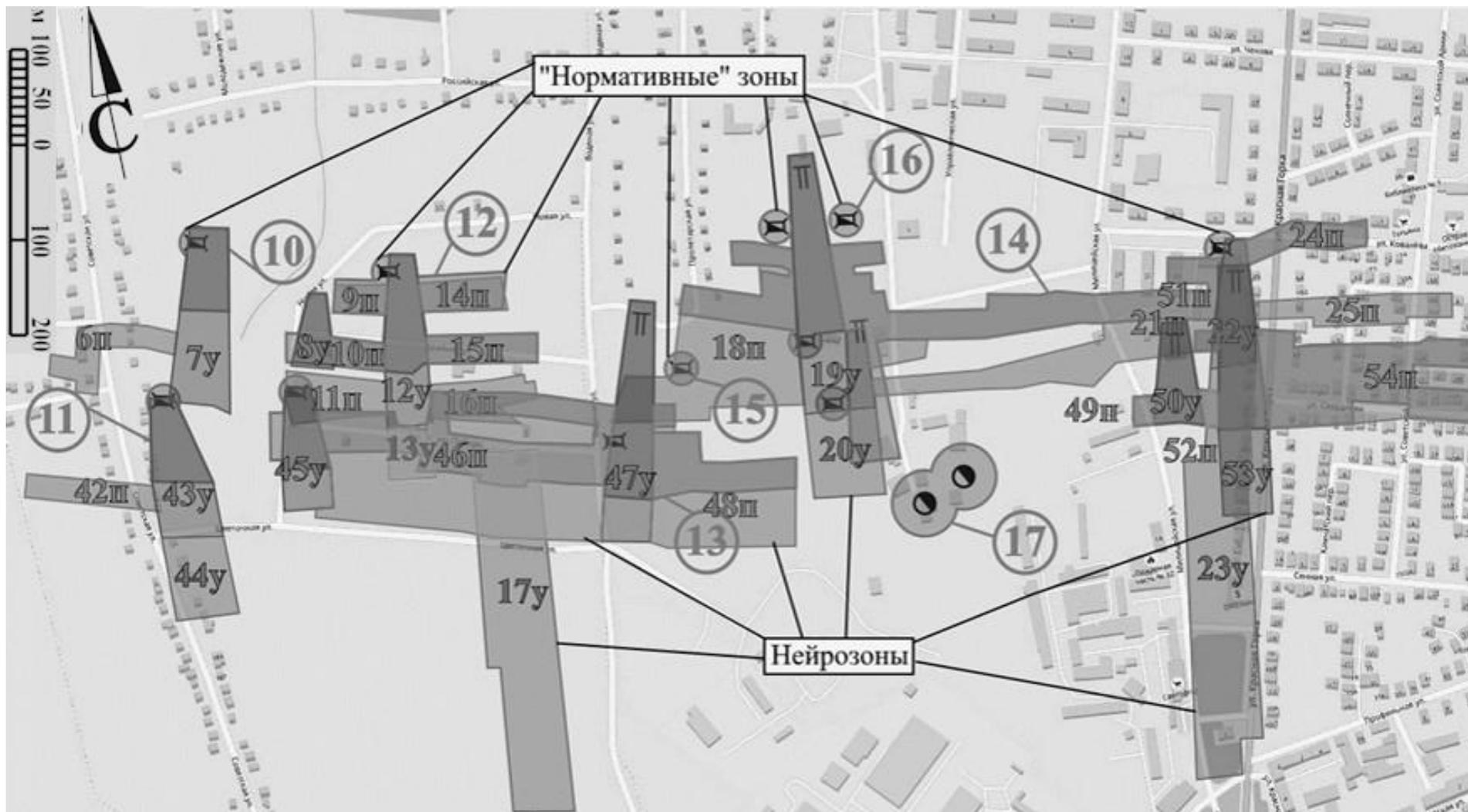
На заключительном этапе исследований был выполнен расчет в таких условиях поддержания горных выработок, при которых они представляют наибольшую опасность для земной поверхности. Рассматривались следующие параметры:

- угол падения пород 15°,
- угол наклона выработки до 30°,
- глубина залегания выработок до 160 м,
- совокупность негативных факторов.

Для каждой нейрозоны были определены интервалы глубин по карбону, средний возраст выработок, а также рассчитано время образования провалов с учетом комплекса негативных факторов.

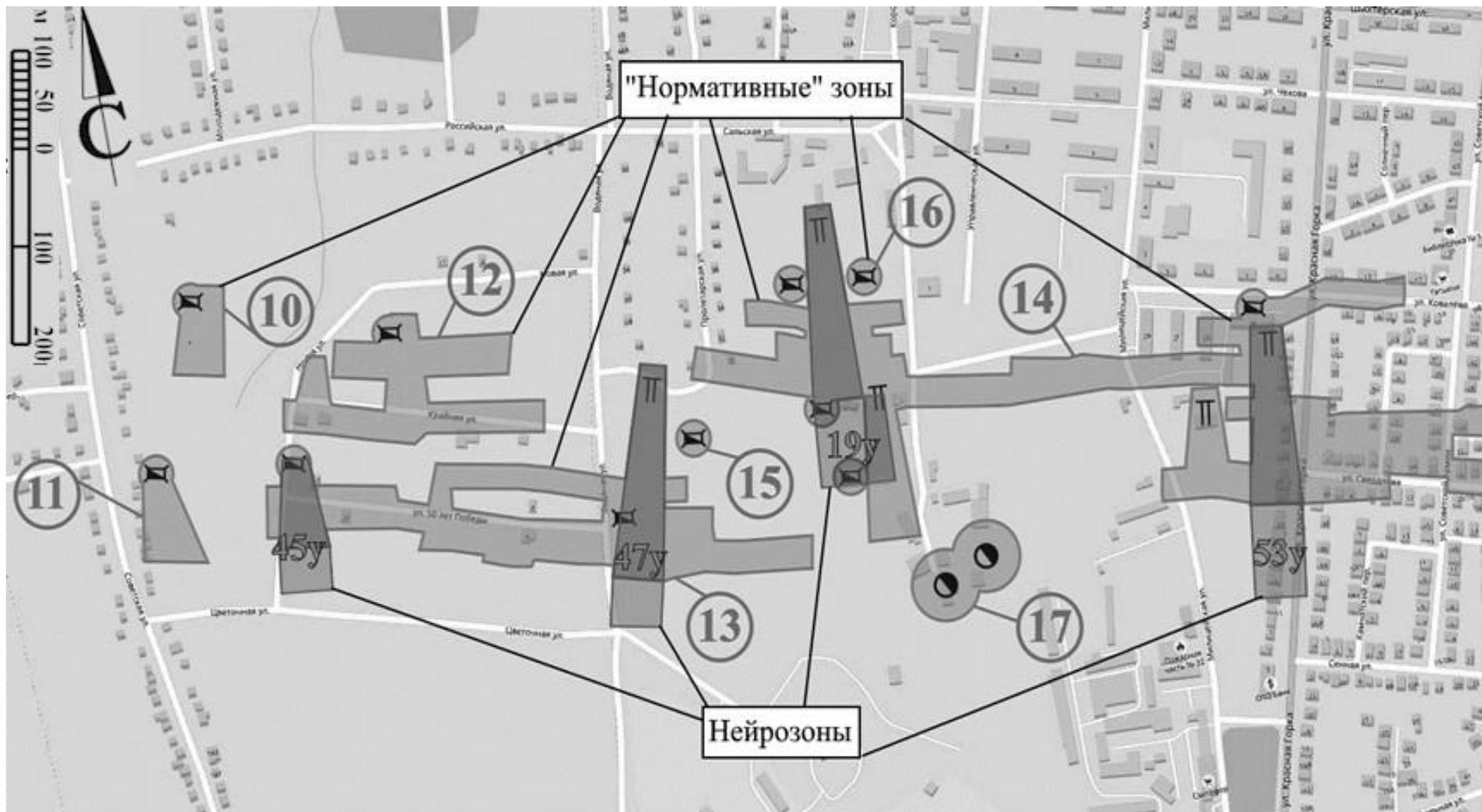
В контексте данного исследования, учитывая временной горизонт прогноза возникновения провалов земной поверхности в 20 лет с момента проведения анализа, количество провалоопасных зон было уменьшено до 11. При этом прогнозируемая площадь провалоопасных участков земной поверхности в течение ближайших двух десятилетий составляет 160 649 м². Эта величина соответствует 39,9 % от общей площади зон, выделенных провалоопасными согласно нормативной [8] методике (рис. 2).

Анализ данных показывает, что площадь зон, опасных по провалам земной поверхности на сельскохозяйственных угодьях, уменьшилась с 99 156 до 46 853 м² (на 47,3 %). Сокращение площади провалоопасных зон в жилых районах составило с 120 465 до 40 004 м² (33 %), а на неиспользуемых землях и промышленных площадках шахтных стволов – с 183 425 до 73 792 м² (на 40,2 %).



Условные обозначения: ● -вертикальный ствол, ▣ -вертикальный шурф, ▧ -наклонный ствол

Рис. 1. Фрагмент плана поверхности шахты «Антрацит» с зонами, опасными по образованию провалов земной поверхности, построенными как по нормативной методике, так и с применением нейронного алгоритма



Условные обозначения:  -вертикальный ствол,  -вертикальный шурф,  -наклонный ствол

Рис. 2. Фрагмент плана поверхности шахты «Антрацит» с «нормативными» зонами, опасными по образованию провалов земной поверхности, и нейрозоны, представляющими угрозу провалообразования в ближайшие 20 лет

Таким образом, из 21 провалоопасной зоны, определенной по нормативной методике, в ближайшие два десятилетия непосредственную угрозу представляют только 11 и на существенно меньших территориях.

Выводы

В ходе геодинамического мониторинга горного отвода шахты «Антрацит» по нормативной методике были выполнены расчет и построение 21 провалоопасной зоны земной поверхности. Учитывая, что значительная часть этих зон расположена на сельскохозяйственных угодьях и в жилых районах, а также тот факт, что затопление шахты повлекло изменение физико-механических свойств горных пород, был дополнительно проведен прогноз провалоопасности этих зон с использованием нейронной сети.

На основании проведенных исследований установлено, что на территории горного отвода шахты «Антрацит» участки, опасные по образованию провалов земной поверхности в ближайшие два десятилетия, находятся над наклонными выработками глубиной до 80 м, а их количество уменьшилось до 11, их суммарная площадь сократилась в 2,5 раза.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что применение нейронной сети повышает точность определения зон земной поверхности, подверженных риску образования провалов, а также позволяет прогнозировать примерный период времени, в течение которого эти зоны представляют наибольшую опасность. Дальнейшее использование нейросетевых моделей для оценки провалоопасности позволит уменьшить размеры провалоопасных зон и оптимизировать расходы на мероприятия по защите земной поверхности от негативного воздействия горных работ.

Исследования проведены в рамках выполнения фундаментальной научно-исследовательской работы FRSR – 20230006 «Исследование устойчивости и трансформации напряженно-деформированного состояния обводненных массивов горных пород».

Список литературы

1. Гавриленко Ю.Н., Ермаков В.Н., Кренида Ю.Ф. и др., 2004. *Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины: монография*. Донецк: Изд-во «Норд-Пресс», 631 с.
2. Жукова И.А., Лобунец В.С., 2014. Состояние угольной промышленности Ростовской области: проблемы и перспективы ее развития. *Terra Economicus*, Т. 12, № 2-3, С. 174-177.
3. 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.
4. Соколова И.Н., Великанов А.Е., 2020. Современный мониторинг сейсмических событий из района испытательного полигона Лобнор по данным сети ИГИ РК. *Вестник НЯЦ РК*, Вып. 3, С. 24-32.
5. Славиковская Ю.О., 2020. Техногенные пустоты недр как источник негативного воздействия на окружающую среду предприятий горнопромышленного комплекса. *Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: Труды VIII Международной конференции, Екатеринбург, 07 апреля 2020 г.* Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, С. 275-279.
6. Mikhailova I.N., Sokolova I.N., 2019. Monitoring System of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre*, Volume 53, Issue 1, P. 27–38.
7. 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: Устой-*

чивое развитие: *Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Челябинск, 02–03 марта 2022 года*. Челябинск: Институт проблем комплексного освоения недр РАН, С. 49-51.

8. 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.

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

10. Gan F., He B., Qin Z, Li Wu., 2020. Role of rock dip angle in runoff and soil erosion processes on dip/anti-dip slopes in a karst trough valley. *Journal of Hydrology, Volume 588*.

11. Zeng X., Peng X., Liu T., Dai Q., Chen X., 2024. Runoff generation and erosion processes at the rock–soil interface of outcrops with a concave surface in a rocky desertification area. *CATENA, Volume 239*.

12. Peng X., Dai Quanhou, 2022. Drivers of soil erosion and subsurface loss by soil leakage during karst rocky desertification in SW China. *International Soil and Water Conservation Research, Volume 10, Issue 2*, P. 217-227.

13. 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.

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

15. 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.

16. 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.

17. *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.

18. *НПАОТ 10.0-1.01-16 Правила безопасности в угольных шахтах. – опубл. 20.05.2016 г. с изменениями, внесенными на основании Приказа Министерства угля и энергетики Донецкой Народной Республики, Государственного Комитета горного и технического надзора Донецкой Народной Республики от 07.07.2016 г. № 63/319, от 20.06.2017 г. № 157/291. Донецк, 2016, 217 с.*

19. *Методическое руководство по прогнозу гидрогеологических условий ликвидации угольных шахт и обоснованию мероприятий, обеспечивающих предотвращение негативных экологических последствий*. Санкт-Петербург: ВНИМИ, 2007, 79 с.

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

21. *Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Руководящий документ / РАНИМИ. Утв. Мин. угля и энергетики ДНР 15.04.21*. Донецк, 2021. 267 с.

22. Дрибан В.А., Феофанов А.Н., Назимко И.В., 2009. Разработка системы прогноза обрушений земной поверхности над погашенными горными выработками. *Проблеми гірського тиску: зб. наук. пр., Донецьк, №17*, С. 22 – 57.

23. 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 РАНИМИ*, № 20-21 (35-36), С. 47-65.

References

1. Gavrilenko Yu.N., Ermakov V.N., Krenida Yu.F. i dr., 2004. Tekhnogennye posledstviya zakrytiya ugol'nykh shakht Ukrainy: monografiya [Man-made consequences of the closure of coal mines in Ukraine: monograph]. Donetsk: Izd-vo "Nord-Press", 631 p.
2. Zhukova I.A., Lobunets V.S., 2014. Sostoyanie ugol'noi promyshlennosti Rostovskoi oblasti: problemy i perspektivy ee razvitiya [The state of the coal industry in the Rostov region: problems and prospects for its development]. *Terra Economicus*, Vol. 12, № 2-3, P. 174-177.
3. Slavikovskaya Yu.O., 2021. Tekhnogennye pustoty neдр как фактор негативного воздействия на okružhayushchuyu sredu pri razrabotke mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh [Man-made voids in the subsoil as a factor in the negative impact on the environment during the development of solid mineral deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 2, P. 33-44.
4. Sokolova I.N., Velikanov A.E., 2020. Sovremennyyi monitoring seismiche-skikh sobytii iz raiona ispytatel'nogo poligona Lobnor po dannym seti IGI RK [Modern monitoring of seismic events from the Lobnor test site area based on the IGI RK network data]. *Vestnik NIaTs RK*, Vyp. 3, P. 24-32.
5. Slavikovskaya Yu.O., 2020. Tekhnogennye pustoty neдр как istochnik negativnogo vozdeistviya na okružhayushchuyu sredu predpriyatii gornopromyshlennogo kompleksa [Man-made voids in the subsoil as a source of negative impact on the environment of mining enterprises]. *Ekologicheskaya i tekhnosfernaya bezopasnost' gornopromyshlennykh regionov: Trudy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii, Ekaterinburg, 07 aprelya 2020 g. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi gornyi universitet*, P. 275-279.
6. Mikhailova I.N., Sokolova I.N., 2019. Monitoring System of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre*, Volume 53, Issue 1, P. 27–38.
7. Kirkov A.E., Fedoseev V.V., Kuzhim O.M., 2022. Preventivnoe obnaruzhenie i lokalizatsiya provalov podrobotannoi zemnoi poverkhnosti – osnova resheniya regional'nykh problem mono-gorodov v gornopromyshlennykh regionakh. [Preventive detection and localization of failures of the underworked earth's surface as the basis for solving regional problems of single-industry towns in mining regions]. *Zoloto. Polimetally XXI vek: Ustoichivoe razvitiye: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Chelyabinsk, 02–03 marta 2022 goda. Chelyabinsk: Institut problem kompleksnogo osvoeniya neдр RAN*, P. 49-51.
8. 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 constructing and surveying zones hazardous for failures]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk*, № 7 (22), P. 142-157.
9. Driban V., Nazimko V., Feofanov A., Khalymendyk I., 2010. Vorhersage des erdoberflächeabsturzes oberhalb der alten kohlegrubenräumen. *Altbergbau – Kolloquium, Freiberg, 04. bis 06, November 2010*, P. 391-400.
10. Gan F., He B., Qin Z, Li Wu., 2020. Role of rock dip angle in runoff and soil erosion processes on dip/anti-dip slopes in a karst trough valley. *Journal of Hydrology*, Volume 588.
11. Zeng X., Peng X., Liu T., Dai Q., Chen X., 2024. Runoff generation and erosion processes at the rock–soil interface of outcrops with a concave surface in a rocky desertification area. *CATENA*, Volume 239.
12. Peng X., Dai Quanhou, 2022. Drivers of soil erosion and subsurface loss by soil leakage during karst rocky desertification in SW China. *International Soil and Water Conser-*

vation Research, Volume 10, Issue 2, P. 217-227.

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

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

15. Gavrilenko Yu.N., Petrushin A.G., 2003. Osnovnye printsipy modelirovaniya sdvizhenii i deformatsii zemnoi poverkhnosti metodom konechnykh elementov. Naukovi pratsi DonNTU. [Basic principles of modeling displacements and deformations of the earth's surface by the finite element method. Scientific Works of DonNTU]. Seriya girnichogeologichna, Donets'k, Vipusk 62, P. 100 – 114.

16. 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 structure of a rock massif under the influence of the displacement process]. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, № 6, P. 83-89.

17. Metodicheskoe rukovodstvo "O poryadke vydeleniya provaloopasnykh zon i vybora kompleksa tekhnicheskikh meropriyatiy po vyyavleniyu i likvidatsii pustot na likvidiruemyykh shakhtakh Vostochnogo Donbassa" [Methodological guide "On the procedure for identifying collapse-hazardous zones and selecting a set of technical measures to identify and eliminate voids in liquidated mines of the Eastern Donbass"]. Moscow: IPKON RAN, 2007, 34 p.

18. NPAOT 10.0-1.01-16 Pravila bezopasnosti v ugol'nykh shakhtakh. – opubl. 20.05.2016 g. s izmeneniyami, vnesennymi na osnovanii Prikaza Ministerstva uglya i energetiki Donetskoi Narodnoi Respubliki [NPAOT 10.0-1.01-16 Safety rules in coal mines], Gosudarstvennogo Komiteta gornogo i tekhnicheskogo nadzora Donetskoi Narodnoi Respubliki ot 07.07.2016 g. № 63/319, ot 20.06.2017 g. № 157/291. Donetsk, 2016, 217 p.

19. Metodicheskoe rukovodstvo po prognozu gidrogeologicheskikh uslovii likvidatsii ugol'nykh shakht i obosnovaniyu meropriyatiy, obespechivayushchikh predotvrashchenie negativnykh ekologicheskikh posledstviy [Methodological guidelines for forecasting hydrogeological conditions for the liquidation of coal mines and substantiation of measures to prevent negative environmental consequences]. Sankt-Peterburg: VNIMI, 2007, 79 p.

20. Metodicheskie polozheniya po resheniyu gidrogeologicheskikh zadach pri razrabotke proekta likvidatsii shakhty (posobie proektirovshchiku) [Methodological provisions for solving hydrogeological problems when developing a mine liquidation project (designer's manual)] RTM 6.04.95. Donetsk: Dongiproshakht, 1995, 17 p.

21. Raspolozhenie, okhrana i podderzhanie gornykh vyrabotok pri otrabotke ugol'nykh plastov na shakhtakh Rukovodyashchii dokument [Location, protection and maintenance of mine workings during the development of coal seams in mines. Guidance document] / RANIMI. Utv. Min. uglya i energetiki DNR 15.04.21. Donetsk, 2021. 267 p.

22. 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 predicting landslides over abandoned mine workings]. Problemi girs'kogo tisku: zb. nauk. pr., Donets'k, №17, P. 22 – 57.

23. Driban V.A., Khokhlov B.V., Khlamov D.M., Antipenko A.V., 2023. Prognoz pro-valoopasnosti podrobotannykh territorii pri zatoplenii gornykh vyrabotok shakht Torezsko-Snezhnyanskogo raiona na osnove metodov iskusstvennogo intellekta. [Forecasting the collapse hazard of underworked territories during flooding of mine workings in the Torez-Snezhny district based on artificial intelligence methods]. Trudy RANIMI, № 20-21 (35-36), P. 47-65.