

УДК 622.831.32.001.25:550.349

Четверик М.С., д-р техн. наук, профессор,
Бубнова Е.А., канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
Бабий Е.В., канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
 (ИГТМ НАН Украины),
Батур М.А., магистр
 (Босфорский университет,
 Кандильская обсерватория и НИИ землетрясений)

ТЕХНОГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНЫХ РАЗРАБОТОК

Четверик М.С., д-р техн. наук, професор,
Бубнова О.А., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Бабій К.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.
 (ІГТМ НАН України),
Батур М.О., магістр
 (Босфорський університет,
 Кандільська обсерваторія та НДІ землетрусів)

ТЕХНОГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНЫХ РАЗРАБОТОК

Chetverik M.S., D.Sc. (Tech.), Professor,
Bubnova O.A., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Babiy K.V., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
 (IGTM NAS of Ukraine),
Batur M.O., M.S. (Tech.)
 (Bogazici University,
 Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute)

TECHNOGENEOUS EARTHQUAKES AND MINING OPERATION SAFETY

Аннотация. Целью статьи является обоснование механизма возникновения техногенных землетрясений в районах добычи полезных ископаемых во взаимосвязи с глубинными геологическими нарушениями и выполнение прогноза времени возникновения очередного техногенного землетрясения, для определения направлений по снижению их интенсивности.

Разработаны и изучены модели неравновесного состояния плит-блоков с расположенными на них горными объектами с учетом направлениями перемещения горных пород. Показано, что при перемещении горной массы с одной плиты-блока на другую изменяется центр тяжести плиты, что приводит к ее неравновесному состоянию и возникновению деформаций. На основе анализа параметров предыдущих техногенных землетрясений, выполнен прогноз времени возникновения очередного техногенного землетрясения.

Впервые обоснован механизм техногенных землетрясений в районах добычи полезных ископаемых во взаимосвязи с глубинными геологическими нарушениями, разработаны рекомендации по снижению их интенсивности.

Разработана методика прогноза возникновения землетрясений в зависимости от объемов вынимаемых и перемещаемых горных пород, а также с учетом глубинных геологических нарушений.

Ключевые слова: плита-блок, неравновесное состояние, крутящий момент, смещение, техногенное землетрясение, прогноз, снижение интенсивности.

Введение. Увеличение населения земли и рост его потребностей привели к высокой масштабности и интенсивности добычи полезных ископаемых. Их ежегодные объемы добычи составляют свыше 20 млрд. т. Особенно характерным по интенсивности добычи руды является Криворожский железорудный бассейн. Выемка в огромных объемах вскрышных пород и полезного ископаемого при открытой разработке с образованием карьеров, отвалов; обогащение бедных руд с образованием хвостохранилищ. При подземной добыче руд без закладки выработанного пространства - создание огромных пустот. Все это сосредоточено на относительно небольшой площади (415 км²). Глубина карьеров достигла около 400 м – 450 м, отвалы высотой до 150 м и более. Из-за этого естественное поле напряжений огромного горного массива существенно изменилось. Техногенный горный массив стал более напряженным. Этому также способствует тектоническое нарушение - Криворожско-Кременчугский глубинный разлом. Примыкают к нему субразломы, которые представляют собой плиты-блоки различных размеров. Переход горного массива от природного равновесного состояния к техногенному неравновесному состоянию, приводит к образованию в нем микродеформаций, а затем, при их развитии с определенной скоростью, к техногенным землетрясениям.

В Кривом Роге с 1996 года по 2017 год произошло десять землетрясений разной интенсивности [1], эпицентры которых находятся вблизи Криворожско-Кременчугской зоны разломов, относящейся к типу очаговых зон, связанных с протяженными разломами древнего и новейшего заложения. При этом характерным является увеличение частоты и мощности землетрясений, что представляет опасность, как для ведения горных разработок, так и для населения и промышленных объектов.

Ниже приведены данные о параметрах землетрясений, полученные из различных источников.

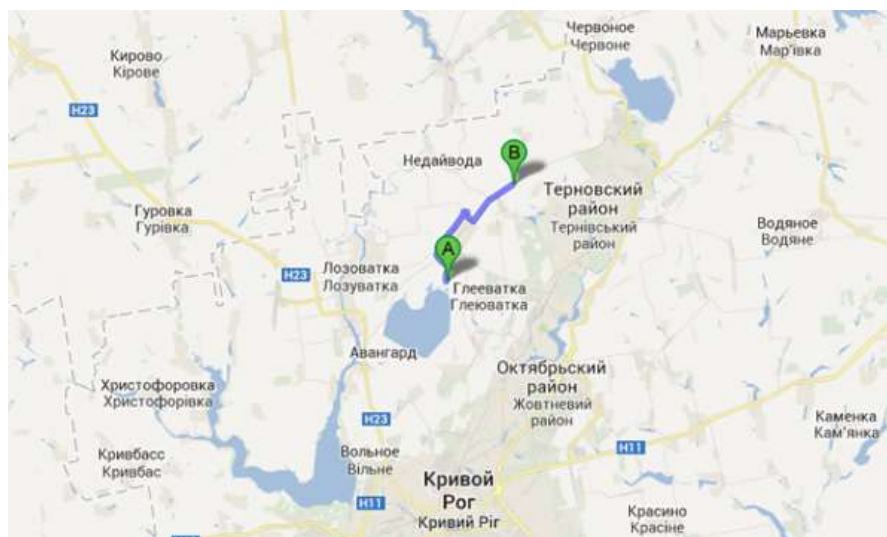
Землетрясение 09.12.2000 г. Очаг расположен в верхнем слое земной коры на глубине 10 км и находятся на расстоянии 3 км от разломной Криворожско-Кременчугской зоны. Очаг землетрясения 25 декабря 2007 г. приурочен к верхним слоям земной коры ($h=(10\pm 5)$ км) сложной зоны сочленения разновозрастных и разнонаправленных разрывных нарушений - Криворожско-Кременчугского и Ледекинского.

Землетрясение 14 января 2011 г. Глубина очага $h=(3\pm 5)$ км. Было зарегистрировано сейсмологическими станциями как отечественными, так и зарубежных центров. Подземные толчки были особенно интенсивны в районе остановки Пионер, площади им. Артема, на бульваре Вечернем, жилых массивах Юбилейный и Восток. В результате на территории ЦГОКа образовалась ворон-

ка, размерами 50 м на 70 м и глубиной 20 м. Она отстояла от образованной в 1985 г. (250 м на 200 м, глубиной 100 м) на 200 м.

Отсутствуют данные о природе происхождения землетрясений 25 декабря 2007 г. и 14 января 2011 г. – техногенные, техногенно-тектонические или сугубо тектонические. Сомнения исследователей связаны с тем, что эти сейсмические события возникали ранним утром в то время, когда проводятся наиболее мощные взрывы в шахтах. Однако надо отметить, что данных относительно проведения взрыва утром 25 декабря 2007 г. нет.

Землетрясение 23 июня 2013 г. Согласно исследований [2-3] землетрясение 23 июня 2013 г., одно из наиболее значительных по магнитуде на юго-западе Восточно-Европейской платформы за последние десятилетия. Это свидетельствует о сейсмической активизации территории Кривбасса, расположенной в центральной части асейсмичного Украинского щита. Авторы [3] рассматривают возможность существования взаимосвязи роста напряжений в зонах тектонических нарушений и деформаций геологической среды Кривбасса в связи с разработкой рудных месторождений и применением мощных взрывов. Эпицентр землетрясения находился возле села Лозоватка Криворожского района. О параметрах этого землетрясения имеются различные данные. По данным Геологической службы США его магнитуда составила 4,5 баллов, а эпицентр удален от с.Лозоватка на 5 км и очаг находился на глубине 14,5 км. Средиземноморский сейсмологический центр оценивает магнитуду толчков в 4,6 и указывает расстояние от села до эпицентра 14 километров, а глубину очага – 2 км. (рис.1).



А - данные Геологической службы США; В - по данным Средиземноморского сейсмологического центра

Рисунок 1 - Местонахождение эпицентра по данным сейсмологов

Украинские сейсмические службы (отдел сейсмологии института геофизики Академии наук Украины и Государственное космическое агентство Главного

центра специального контроля) оценили силу землетрясения в 6 баллов по шкале Рихтера.

Анализ исследований. О причинах происхождения рассмотренных землетрясений существуют различные точки зрения. Часть исследователей считает, что они обусловлены природными причинами – движением литосферных плит. Другая часть исследователей считает, что землетрясения обусловлены горными разработками, при которых существенное влияние на движение литосферных плит и возникновение землетрясений влияют взрывные работы.

Мы придерживаемся другой точки зрения, суть которой следующая. До 1996 г. в асейсмичном регионе Кривой Рог отсутствовали землетрясения, несмотря на большое количество массовых взрывов большой мощности. Отсюда следует, что, хотя они и способствуют происхождению землетрясений, все же главной причиной являются нарушения горного массива горными разработками. К моменту первого землетрясения они достигли такого уровня, что вызывают движение плит-блоков. Взрывные работы являются дополнительным иницирующим процессом, способствующим усилению деформаций, которые в массиве горных пород развиваются с определенной скоростью. Главными объектами, которые приводят к неравновесному состоянию плиту-блок (ограниченную геологическими нарушениями) являются расположенные на ее поверхности глубокие карьеры, большие по объемам и площади внешние отвалы, а также огромные по площади и по объемам хвостохранилища. При этом объемы горных пород перемещают из одной плиты-блока, на другую, ограниченную геологическими нарушениями, и тем самым увеличивают на нее нагрузку и изменяют ее центр тяжести. Именно эта неуравновешенная плита-блок приходит в движение для достижения равновесного состояния.

Какая бы ни была природа землетрясений в г. Кривой Рог, она представляет опасность, как для ведения горных разработок, так и промышленных, гражданских объектов и населения. Учитывая величайшую опасность этого явления, для его изучения и разработки мероприятий по исключению аварийных ситуаций необходимо привлекать широкий круг специалистов: сейсмологов, геологов, горных инженеров, геомехаников и др.

Следует отметить, что проф. Новожиловым М.Г. совместно с учениками разрабатывался проект карьера СуперГОК. При этом объединялись карьер ЮГОКа и все карьеры НКГОКа в единое целое. В таком карьере можно вести добычу магнетитовых кварцитов практически без вскрыши до глубины 1000 м [4]. Исследованиями Института физики Земли им. Шмидта АН СССР показано было, что дальнейшее увеличение глубины такого огромного карьера и выемка руды в больших объемах могут привести к изменению параметров планеты. Достоверность этих исследований высокая. Дальнейшие исследования в этом направлении не проводились. Таким образом, длительная разработка месторождений Криворожского бассейна может быть причиной техногенных землетрясений.

Для обоснования модели возникновения техногенных землетрясений рассмотрим геологическое строение Криворожского железорудного бассейна.

Украинский щит это глыбовое поднятие Восточно-Европейской платформы, обособленное в виде самостоятельной структуры в конце протерозоя и начале палеозоя в связи с формированием Днепровско-Донецкой впадины. До своего обособления от Восточно-Европейской платформы Украинский щит совместно с Воронежским кристаллическим массивом входил в состав громадной по площади структуры – Сарматского мезоконтинента. В пространстве щит занимает центральную, осевую часть Украины, протягиваясь от побережья Азовского моря в северо-западном направлении до границы с Беларусью, почти на 1000 км. Ширина его вместе со склонами меняется от 150 до 450 км, площадь в контурах выходов докембрийских образований составляет 136,5 тыс. км², а общая площадь с учётом склонов – 256,6 тыс. км², т.е. Украинский щит занимает более трети территории страны. Его кристаллические породы выходят на дневную поверхность в пределах Донецкой, Запорожской, Днепропетровской, Николаевской, Кировоградской, Черкасской, Винницкой, Хмельницкой, Киевской, Житомирской и Ровенской областей.

Криворожский регион находится в центральной части Украинского кристаллического щита, который является основным геоструктурным элементом юго-западной части Восточно-Европейской платформы. В строении района, как и щита в целом, принимают участие два структурных этажа: кристаллический фундамент, сложенный метаморфизованными вулканогенно-осадочными, гранитоидными образованиями докембрия и осадочный чехол, представленный отложениями кайнозоя (рис.2).

Тектоника Криворожско-Кременчугского глубинного разлома.

Среднеприднепровский и Кировоградский мегаблоки Украинского кристаллического щита (рис.2) разделяет Криворожско-Кременчугский глубинный разлом (ККГ разлом) мантийного происхождения (рис.3).

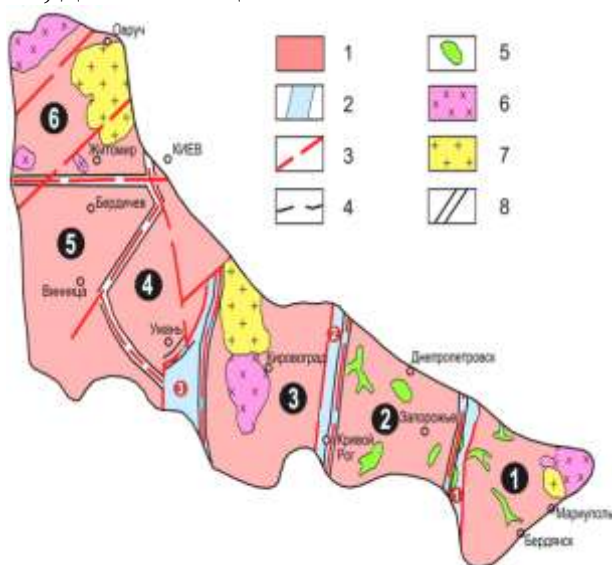
Его параметры установлены, в основном, на основании геофизических методов исследования. Криворожско-Кременчугский глубинный разлом пролегает от Кривого Рога в направлении Полтавы на расстояние 300-400 км. Примыкают к нему субразломы, которые представляют собой плиты-блоки различных размеров. Согласно сейсмическим исследованиям, они ступенчато опускаются в соответствии с падением разлома. (Термин «плиты-блоки» используют в работе [6]. Этим термином будем пользоваться в дальнейшем. Термин «литосферная плита» характеризует более крупные объекты, а не блоки).

Углы падения Криворожско-Кременчугского глубинного разлома изменяются от крутых углов ($75^{\circ} - 80^{\circ}$), вблизи поверхности, до резкого выполаживания в низах коры, на границе с мантией – ($45^{\circ} - 55^{\circ}$). Падение разлома западное, простирание - с юго-запада на северо-восток по линии, соответствующей направлению Ингулец-Желтые Воды.

В представленной карте не показаны объекты горных разработок, по которым можно было бы судить о их влиянии на движение плит-блоков второго рода. Более полная карта геологических нарушений, где происходили землетрясения, представлена Феськовой Л.В. [1] (рис.4). Падение южных стен плит-блоков – южное.

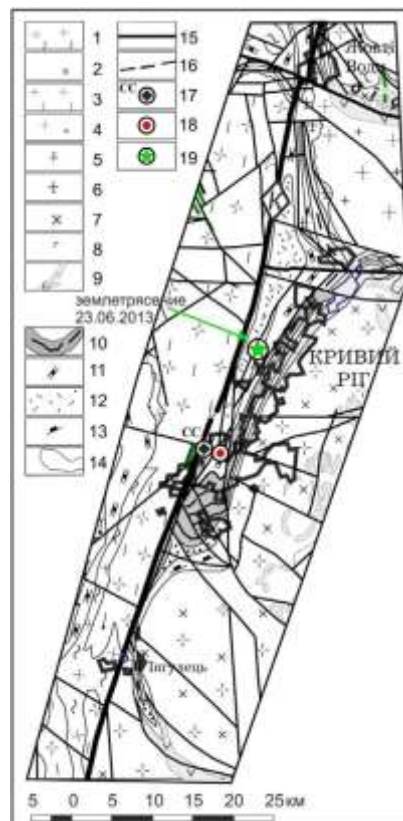
Геофизические исследования последних десятилетий указывают на широкое распространение в консолидированной земной коре сейсмических и геоэлектрических неоднородностей. В их образовании основная роль принадлежит флюидам и глубинным флюидным системам.

Наиболее близки к реальности, с нашей точки зрения, исследования, выполненные Паранько И.С. Согласно [7], криворожская геологическая структура принадлежит к зоне мощного Криворожско-Кременчугского глубинного разлома, достигающего мантии Земли.



1 – мегаблоки Украинского щита (1 – Приазовский, 2 – Средне-Приднепровский, 3 – Кировоградский, 4 – Росинско-Тикичский, 5 – Днестровско-Бугский, 6 – Северо-Западный); 2 – межблоковые шовные зоны (1 – Орехово-Павлоградская, 2 – Ингулецко-Криворожская, 3 – Голованевская); 3 – основные глубинные разломы; 4 – граница Украинского щита; 5 – архейские зеленокаменные структуры; 6 – раннепротерозойские габбро-гранитные массивы; 7 – среднепротерозойские габбро-гранитные плутоны; 8 – границы мегаблоков

Рисунок 2 - Строение Украинского кристаллического щита



14 – литологические границы; 15 – разломы разных рангов, установленные по материалам бурения; 16 – разломы, предполагаемые по МТЗ-данным и результатам моделирования гравитационного поля; 17 – месторасположение сейсмологической станции УК-15 «Кривой Рог»; 18 – месторасположение скважины гидрогеодинамического мониторинга; 19 – расположение эпицентра Криворожского землетрясения.

Рисунок 3 - Фрагмент геолого-информационной карты строения Криворожского железорудного бассейна [5]

Этот участок земной коры не однороден. Он разделен разрывными нарушениями на шесть отдельных блоков кристаллических пород - субблоки. Они разделены нарушениями на плиты-блоки размером от нескольких десятков километров до нескольких метров. Геологические блоки разделены шовными зонами - раздробленными кристаллическими и мягкими породами. Поэтому плиты-

блоки могут смещаться в горизонтальной и вертикальной плоскости в зависимости от изменяющихся нагрузок на них и других условий.

На этих плитах-блоках расположены объекты горнодобывающих предприятий, город Кривой Рог, г. Ингулец и с. Анновка. При проведении взрывных работ порождаются разовые сейсмические волны, в результате происходит деформация пород, образуются новые трещины техногенной природы, увеличиваются естественные. Паранько И.С. высказал идею, что если на геологической плите-блоке на одном ее конце изыдем руду, а на другом положим вскрышные породы, то ее естественное равновесное состояние нарушится. Вносится дисбаланс в ранее уравновешенную геологическую систему.



Рисунок 4 - Криворожско – Кременчугский глубинный разлом, геологические нарушения второго рода на территории горных разработок г. Кривой Рог (по Феськовой Л.В. [1])

Шламохранилища и пруды-накопители строят в естественных углублениях рельефа: оврагах, балках или руслах небольших рек. Русла любых рек проходят по естественным тектоническим разломам разрывного характера, то есть на стыках двух геологических блоков. То же относится к оврагам и балкам. В определенном месте возводят дамбу, а образовавшуюся емкость заполняют отходами обогащения. Суммарный вес всех криворожских хранилищ составляет порядка 6 млрд. тонн. Если произойдет большее давление на один из флангов состыкованных в этом месте геологических блоков, то может произойти деформация перекрывающей дамбы. Результатом перекоса станет мощный селе-

вой техногенный поток. Такую точку зрения, близкую к нашей, высказал И.С. Паранько.

Главные недостатки рассмотренных научных работ:

- не изучен механизм техногенных землетрясений в районах добычи полезных ископаемых во взаимосвязи с глубинными геологическими нарушениями и отсутствуют рекомендации по снижению их интенсивности;
- не рассматриваются землетрясения во взаимосвязи с объектами горных разработок, расположенных на плите-блоке, которые приводят к напряженному состоянию горного массива;
- не разработаны и не изучены модели неравновесного состояния плит-блоков с расположенными на них горными объектами;
- отсутствуют горно-геометрические исследования плит-блоков с расположенными на них горными объектами, и инструментальные высокоточные наблюдения, которые свидетельствовали бы о микроперемещениях плит - блоков и их направлении.

Основной материал. На основе проведенного анализа, выдвигается следующая гипотеза о происхождении землетрясений в Кривом Роге. Главными объектами, которые приводят к неравновесному состоянию плиту-блок, ограниченную геологическими нарушениями, являются, расположенные на ней, глубокие карьеры, большие по объемам и площади внешние отвалы, а также огромные по площади и по объемам хвостохранилища. При этом объемы горных пород перемещают из одной плиты, ограниченной геологическими нарушениями, на другую. Именно эта неуравновешенная, перегруженная плита-блок приходит в движение для достижения равновесного состояния. Ее столкновение с другими плитами-блоками приводит к землетрясениям.

Возможные случаи размещения горных объектов на поверхности плиты, ограниченной геологическими нарушениями, приведены на рис.5.

В первом случае (рис.5 а) на поверхности плиты расположены карьер, отвал вскрышных пород и хвостохранилище. При этом из недр извлечены и не расположены на поверхности плиты, полезное ископаемое и подземные воды. Плита-блок не уравновешена, главным образом из-за извлечения этих объемов, и из-за размещения вскрышных пород и хвостохранилища на другом участке поверхности этой же плиты-блока. Ниже приведены направления сил.

Второй случай (рис.5 б) характерен тем, что в хвостохранилище, расположенное на плите совместно с карьером и отвалом, дополнительно направляют отходы обогащения из других карьеров, которые расположены на другой плите. Это приводит к нарушению равновесного состояния плиты, поскольку отходы обогащения составляют около 60% от добытой руды. В данном случае плита погружается.

В третьем случае (рис.5 в) на поверхности плиты расположены карьер, отвал вскрышных пород. Из недр извлечены и не расположены на поверхности плиты, полезное ископаемое, отходы обогащения и подземные воды. В данном случае плита стала «легче» и может приподняться.

Четвертый случай (рис.5 г) отличается тем, что горные объекты (карьер и хвостохранилище), расположены непосредственно в зоне геологических нарушений на разных плит-блоках. Поскольку эти объекты ранее не располагались на этом участке, то их появление с существенными объемами может приводить к неравновесному состоянию плиты.

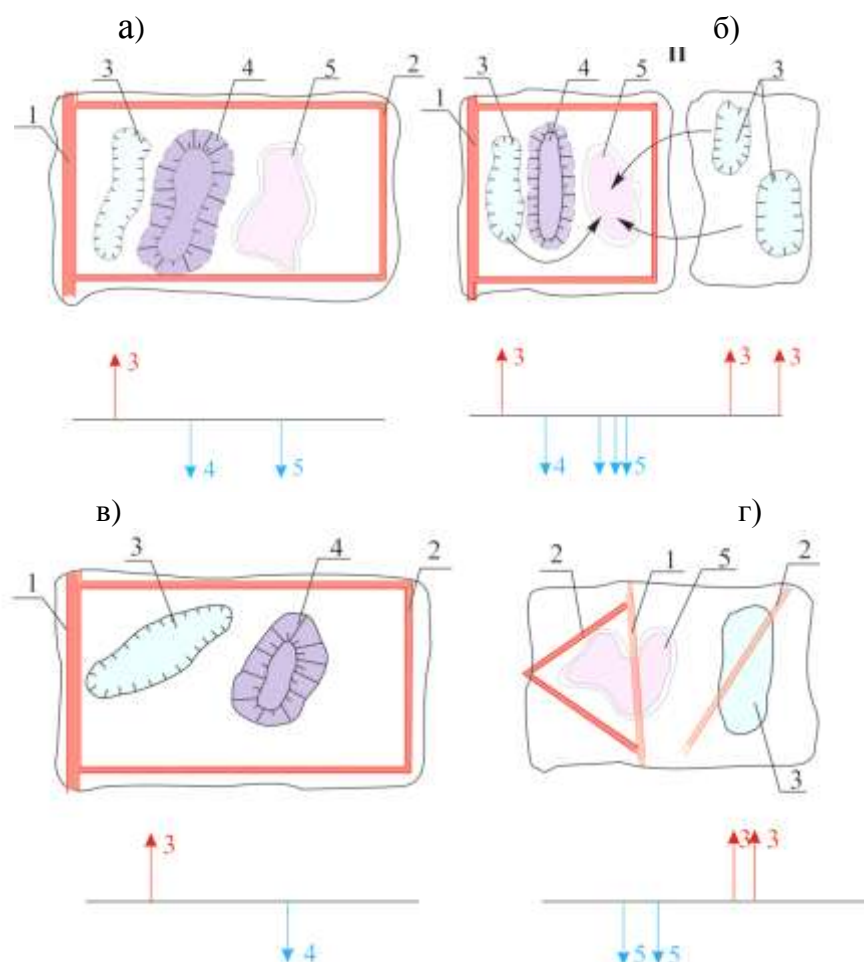


Рисунок 5 - Варианты размещения горных объектов на плите-блоке, ограниченной геологическими нарушениями

Как следует из приведенного на рис.5 направления сил при различном расположении горных объектов на плите-блоке соответствуют крутящему моменту. Следует обратить внимание на то, что глубина субразломов неизвестна. Но судя из геофизических наблюдений достаточно большая – до 10 – 15 км и более. Длина по поверхности плит колеблется от 10 – 15 км до 40 и более км.

Напряженное состояние плиты-блока попытаемся рассматривать как действие неравновесного рычага, оползневой процесс, как действие рычага при смещении центра тяжести.

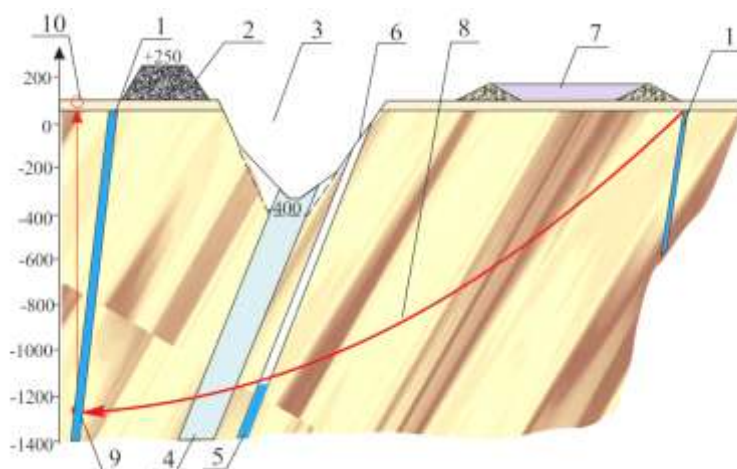
Схема напряженного состояния массива при открытой и подземной добыче руд с учетом его геологического строения

При выемке огромных объемов горных пород и их перемещении, как уже отмечалось, изменяется естественное напряженное состояние массива. И если

этот массив разграничен, например, геологическими нарушениями, примыкающими к Криворожско-Кременчугскому глубинному разлому, характерен масштабными горными выемками, то он приходит в движение.

При добыче железных руд в Кривбассе (и при добыче других твердых полезных ископаемых) расположение горных объектов может быть таким, как представлено на рис.6.

При добыче руды и ее обогащении напряженное состояние массива изменяется непрерывно. При этом нагрузка на массив в виде хвостохранилища и внешних отвалов увеличивается. Увеличивается и выработанное пространство в виде карьера и подземных горных разработок, которые приводят к снижению устойчивости массива.



1 – геологические нарушения; 2 – внешний отвал; 3 – карьер; 4 – пласт неокисленных кварцитов; 5 – пласт богатых железных руд; 6 – выработанное пространство при добыче богатых руд; 7 – хвостохранилище; 8 – линия возможного перемещения массива; 9 – точка наибольших напряжений; 10 – точка отрыва на поверхности

Рисунок 6 - Схема возможного техногенного землетрясения при добыче железных руд на глубоких горизонтах

На рисунке 7 а приведено природное состояние плиты-блока до создания горных выработок, а на рисунке 7 б при создании карьера и хвостохранилища в балке. Если в первом случае центр тяжести блока находился, например, в точке 4 (рис. 7а) или в точке 6 (рис.7 б), то при создании горных объектов он сместился в точку 7. Это привело к неравновесному состоянию плиты-блока.

Скорости развития деформаций в нарушенном массиве

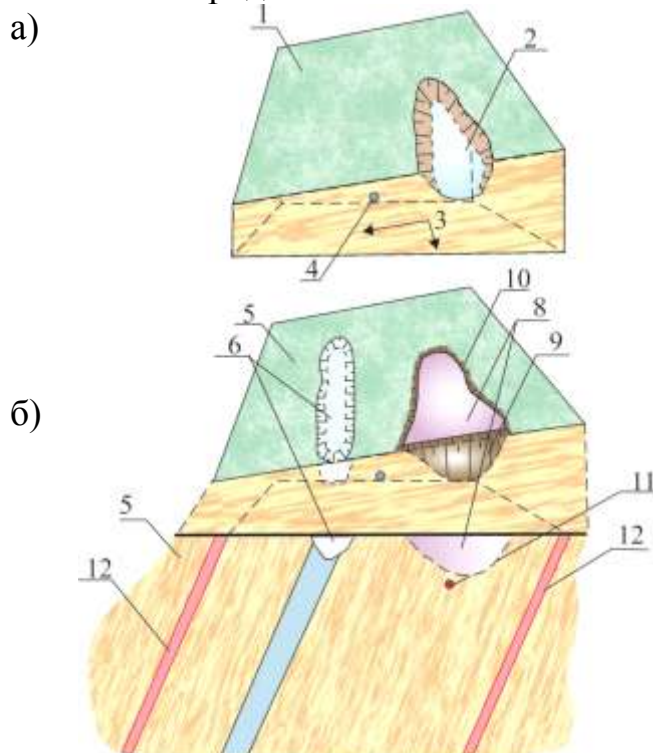
Деформационные процессы в массиве горных пород при различной степени их литификации (окаменелости) происходят с разной скоростью.

На основании обобщения инструментальных наблюдений за сдвижением поверхности в различных угольных регионах Украины, России, Польши нами [8] определены скорости развития деформаций растяжений в подработанном массиве.

По данным Куликовской Е.Е. и Ступника Н.И. [9] деформации земной поверхности в Криворожском бассейне зафиксированы на расстоянии 4,5 км от места проведения горных работ. На наиболее опасных участках вертикальные

оседания достигают 275 мм. Скорость оседания поверхности составляет 8 мм/год-10 мм/год. Приведенные данные имеют важное значение в том, что они свидетельствуют о перемещении плит-блоков и их оседании.

Следует остановиться еще на таком важном факте: установлено инструментальными наблюдениями, ежегодно приподнимается дно карьера на 5 мм - 6 мм. Возможно это происходит в результате снятия нагрузки со скальных пород.



1 - массив горных пород четвертичных отложений до начала горных разработок (плита- блок), ограниченный нарушениями в коренных породах; 2 – балка в четвертичных отложениях; 3 – направление уклона поверхности; 4 – центр тяжести плиты- блока; 5 - массив четвертичных отложений и коренных пород в период горных разработок (плита- блок), ограниченный нарушениями в коренных породах; 6 – глубокий карьер; 8 – хвостохранилище; 9 – плотина; 10 – дамбы обвалования; 11 – центр тяжести блока при создании карьера (2) и хвостохранилища (3); 12 – шовные зоны геологических нарушений

Рисунок 7 - Действие рычага при изменении центра тяжести плиты- блока

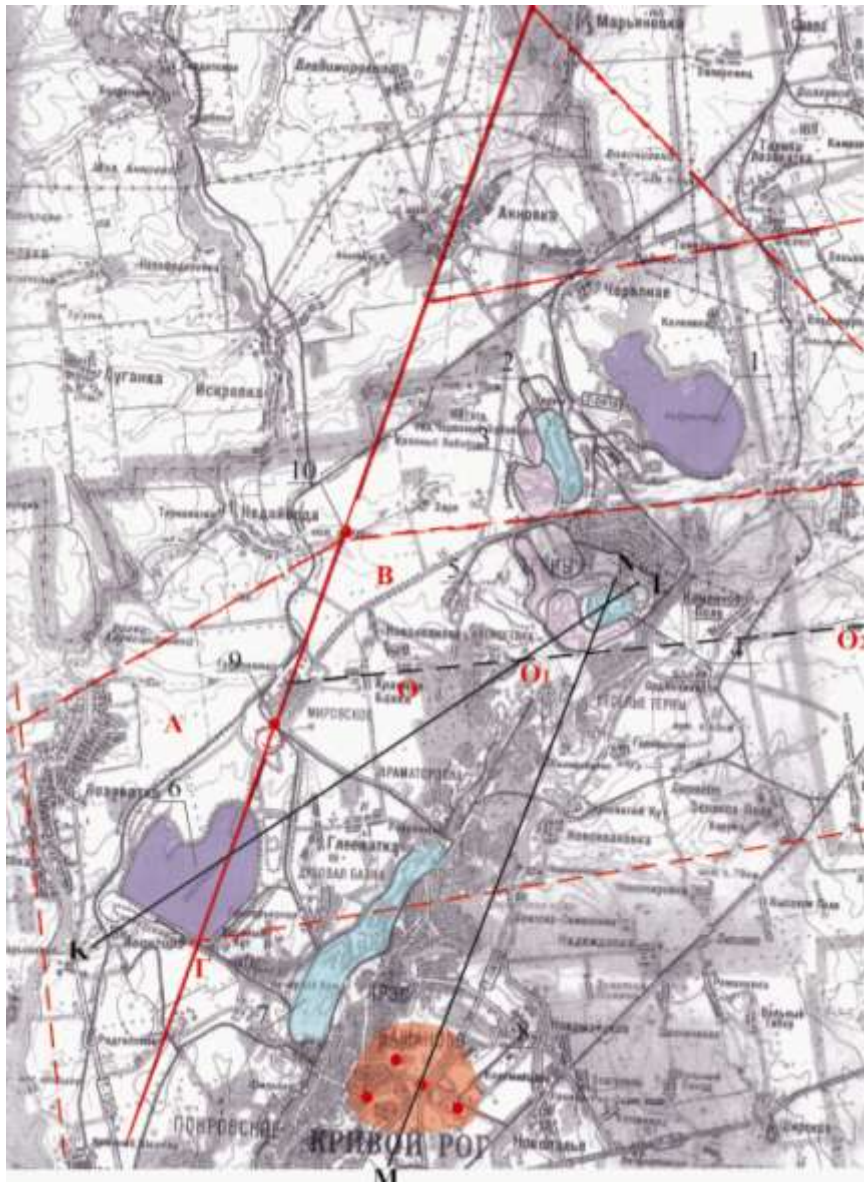
возникновению второго, что объясняется следующим. Рассмотрим 4-е смежных плиты-блоки: А, Б, В, Г и расположенные на них горные объекты (рис.8).

На плите-блоке В расположены: хвостохранилище ЦГОКа, Глееватский карьер, Первомайский карьер (он относится к СевГОКу) и его отвалы. Рассмотрим их влияние на равновесное состояние плиты-блока В.

Обоснование причин землетрясения 14.01.2011 г. при работе объектов СевГОКа и ЦГОКа

По времени в последовательности произошли (как уже отмечалось) два крупных землетрясения.

Первое -землетрясение 14 января 2011 г. в 07ч. 03 мин; подземные толчки были особенно интенсивны в районе остановки Пионер, площади им. Артема, на бульваре Вечернем, жилых массивах Юбилейный и Восток. Эпицентр этого землетрясения больше тяготеет к горным объектам ЦГОКа. Второе - землетрясение 23 июня 2013 г., одно из наиболее значительных землетрясений по магнитуде на юго-западе Восточно-Европейской платформы за последние десятилетия. Эпицентры по различным данным расположены возле сел Лозоватка и Недайвода. Этот район тяготеет к объектам СевГОКа. С нашей точки зрения, эти два землетрясения взаимно связаны, первое способствовало



1 – хвостохранилище СевГОКа; 2 – Ановский карьер; 3 – отвалы Ановского карьера; 4 – Первомайский карьер; 5 – отвалы Первомайского карьера; 6 – хвостохранилище ЦГОКа; 7 – Глееватский карьер; 8 – область эпицентра землетрясения 14 января 2011 г.; эпицентры землетрясения 23 июня 2013 г.; 9 - данные Геологической службы США; 10 - по данным Средиземноморского сейсмологического центра

Рисунок 8 - Карта горных объектов и геологических нарушений к обоснованию причин землетрясений на территории ЦГОКа и СевГОКа

Хвостохранилище ЦГОКа расположено на плите А и В. Особенностью этого хвостохранилища является то, что под его дном проходит Криворожско-Кременчугский глубинный разлом (ККГ разлом). Он разделяет хвостохранилище на части. Две его части расположены на плите А, а третья - на плите В. Его емкость заполняют три карьера: Глееватский, Петровский и Артемовский. Петровский и Артемовский карьеры не находятся на этой плите. Отходы обогащения руд этих карьеров являются дополнительной нагрузкой на плиты А и В. Под дном хвостохранилища есть гидравлическое окно. Поэтому жидкие отходы поступают как в шовную зону разлома, так и на плиту В.

Из всех карьеров ЦГОКа добыто около 1 млрд. т руды. Из них хвосты составляют около 750 млн.т. Если учесть и воду хвостохранилища, то на плиты А и В поступило по 375 млн.т. отходов.

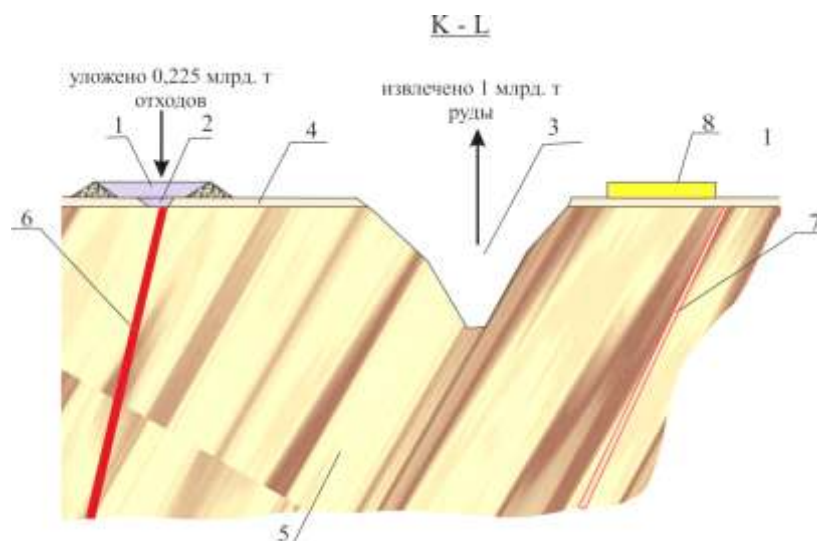
Через Глееватский карьер проходит геологическое нарушение, которое разделяет его на две неравные части. Он располагается на разных плитах: В и Г (рис.8). На плите В расположена $\frac{1}{4}$ часть карьера. За период около 50 лет работы из карьера извлечено 600 млн.т руды. Примерно 150 млн.т извлечено из части карьера, которая расположена на плите В. Часть вскрыши разместили во внутреннем отвале. Таким образом, юго-западная часть плиты В стала на 225 млн. т тяжелее естественной.

Первомайский карьер расположен в северо-восточной части плиты В (рис.8). За период его эксплуатации из карьера извлечено около 1 млрд. т руды. Отходы от ее обогащения размещены в хвостохранилище (балка Приворотная) СевГОКа на плите Б, т.е. на другой блок- плите.

Таким образом, северо-восточная часть плиты В стала на 1 млрд. т легче естественной, и в результате возможно частично приподнялась.

Полученные данные позволяют установить механизм землетрясения 14 января 2011 г.

Рассмотрим схематический разрез по линии К-Л (см. рисунки 8 и 9).



1 - хвостохранилище ЦГОКа; 2 – гидравлическое окно; 3 – Первомайский карьер;
4 – четвертичные отложения; 5 – коренные породы; 6 – Криворожско – Кременчугский
глубинный разлом; 7 – геологическое нарушение; 8 – поселок Терны

Рисунок 9 - Схематический разрез по линии К-Л

Как следует из приведенного разреза, в связи с выемкой руды в Первомайском карьере в объеме около 1,0 млрд. т и укладки отходов обогащения в восточной части хвостохранилища ЦГОКа в объеме 225 млн. т плита–блок В стала неуравновешенной по сравнению с естественной. Кроме того, следует учесть и уклон поверхности с превышением около 30 м. Он направлен с северо-востока на юго-запад плиты В. Таким образом, можно заключить:

- в связи с выемкой около 1,0 млрд. т руды из Первомайского карьера северо-восточный угол плиты В мог приподняться;

- юго-западный угол плиты В (а возможно и часть плиты А) опустился в связи с укладкой 0,225 млрд. т отходов обогащения от руд Глееватского, а также руд Петровского и Артемовского карьеров, которые находятся на другой блок-плите;

- часть отходов обогащения хвостохранилища ЦГОКа возможно поступила в Криворожско – Кременчугский глубинный разлом. Поэтому опустившийся юго-западный угол плиты В был незначительно подвинут в восточном направлении;

- под этим усилием плита В переместилась в южном направлении и подвинулась под плиту Г на большом участке. Плита переместилась параллельно ККГ разлому. Об этом свидетельствует линия MN, соединяющая очаг землетрясения 8 (см. рис.8) и Первомайский карьер 4;

- в результате произошли подземные толчки в районе остановки Пионер, площади им. Артема, на бульваре Вечернем, жилых массивах Юбилейный и Восток, что, возможно, и определяет очаг землетрясения.

Изложенное позволяет сделать вывод, что это землетрясение обусловлено горными разработками. Исходя из показанного механизма землетрясения можно утверждать, что произошел крутящий момент, поскольку движение плиты произошло в результате внутреннего усилия, возникшего в плите В под действием приложенных нагрузок.

Прогноз времени возможного возникновения землетрясения в результате воздействия горных разработок на геологическую среду

Прогноз времени возможного возникновения землетрясения в результате воздействия горных разработок на геологическую среду вначале рассмотрим из общих позиций. Рассмотрим блок-плиту, ограниченную геологическими нарушениями с расположенными на ней горными объектами: карьер и хвостохранилище. Определим величину предельно опасного оседания поверхности, которое может привести к смещению блок - плиты и, следовательно, к землетрясению. Установим параметры крутящего момента: длину рычагов применительно к землетрясению 14 января 2011 г. Затем установим время, когда может произойти техногенное землетрясение в результате воздействия горных разработок на геологическую среду.

Величину предельно опасного оседания поверхности, которая может привести к смещению блок – плиты можно определить исходя из следующего. Как природные, так и техногенные землетрясения происходят, в основном, в одних и тех же районах. При этом происходят смещения блок-плит. Если известна, например, общая сумма величины оседаний поверхности $\sum h_i$ за n землетрясений, то предельно опасное оседания поверхности h_0 (западный рычаг) приближенно можно определить так $h_0 = \sum h_i / n$.

Определим величину предельно опасного оседания поверхности, которая может привести к смещению блок–плиты применительно к техногенным землетрясениям в г.Кривой Рог. Для этого воспользуемся следующими инструмен-

тальными наблюдениями. Согласно данным [9] деформации земной поверхности в Криворожском бассейне зафиксированы на расстоянии 4,5 км от места проведения горных работ. На наиболее опасных участках вертикальные оседания достигают 275 мм. Эти оседания, как мы допускаем, обусловлены тремя землетрясениями, которые произошли с 2007 г. по 2011 г. Допустим, что оседания происходили на одинаковую величину между землетрясениями. Тогда $h_0 = h_1/3 = 91$ мм. Принимаем, что опускание земной поверхности величиной в 90 мм является опасным и может привести к возникновению техногенного землетрясения (эта величина требует более глубокого обоснования).

Принимаем, что до предельного изменения заполняемого хвостохранилища ЦГОКа отходами и выемке руды из Первомайского карьера, система находилась в равновесии (рис. 10).

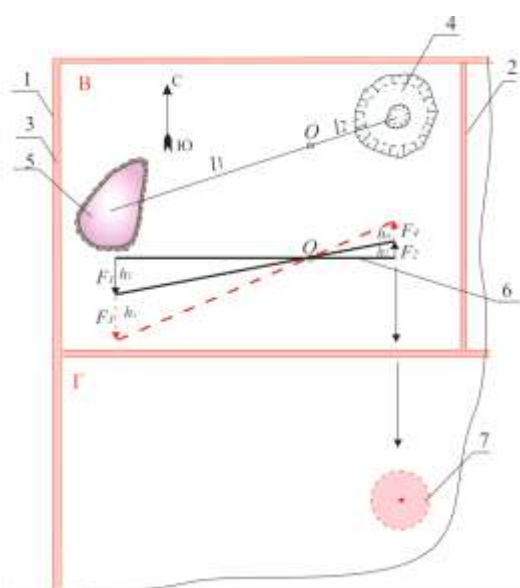


Рисунок 10 - Схема к определению времени возможного возникновения землетрясения в результате воздействия горных разработок на геологическую среду

Тогда

$$l_2/l_1 = F_1/F_2; \quad l_2/(l - l_2) = F_1/F_2$$

$$l_2 = F_1 l / (F_1 + F_2).$$

Из приведенных соотношений получим: общую длину (от точки 6 до точки 4) $l = 8,5$ км. Юго-западный рычаг (точки $6O_1$) составляет $l_1 = 7$ км; северо-восточный рычаг (точки O_1O_2) составляет $l_2 = 1,5$ км.

Исходя из полученных данных, определили предполагаемую ось вращения $O O_1 O_2$ (рис.10). Следует отметить, что при увеличении складирования отходов обогащения в относительно небольших объемах, длина рычага l_2 увеличивается несущественно.

Принимаем, что момент силы относительно оси вращения проектируется на плоскость без искажения (хотя это и не совсем так).

Определение высоты поднятия поверхности возле Первомайского карьера. В соответствии с инструментальными наблюдениями Е.Е Ковалевской по данным Н.И. Ступника величина опускания поверхности на расстоянии около 4,5 км от горных объектов ЦГОКа составила $h_1 = 275$ мм.

Тогда h_2 - высота поднятия поверхности возле Первомайского карьера СевГОКа может быть определена в соответствии с соотношением

$$h_1/h_2 = F_1/F_2; \quad h_2 = 275 \cdot 0,225/1,0 = 62 \text{ мм.}$$

Таким образом, дно Первомайского карьера и поверхность вокруг него, приподняты относительно исходных опорных пунктов, не находящихся на данной блок-плите, на 62 мм.

Прогноз времени возможного возникновения землетрясения в результате воздействия горных разработок на геологическую среду

Допустим, что геологическая среда представлена блок–плитами В и Г, которые ограничены глубинным геологическим разломом 1 и геологическими нарушениями второго рода 2 (рис. 10). Геологические нарушения разделены шовными зонами 3. На блок–плите В расположены: карьер 4, в котором производится добыча руды и откачиваются подземные воды, и хвостохранилище 5. Шовные зоны, ограничивающие блок- плиту В, позволяют ей перемещаться в любом направлении. До техногенного воздействия путем выемки руды и складирования отходов обогащения блок–плита В находилась в равновесном состоянии 6 (см. рис.10).

В дальнейшем, при техногенном воздействии, т.е. выемке руды и складировании отходов обогащения, равновесное состояние блок-плиты нарушилось: возник крутящий момент. В результате действия крутящего момента F_0 с рычагами l_1 и l_2 , соответственно силами F_1 и F_2 произошло вращение и некоторое смещение h_1 и h_2 концов его рычагов; где h_1 и h_2 – величины вертикальных смещений соответственно западного и восточного рычагов, мм. Это явилось причиной перемещения блок – плиты В в южном направлении под плиту Г. В результате этого перемещения произошло техногенное землетрясение 7 (см. рис.10).

Тогда можно полагать, что

$$h_1 \cdot F_0 = F_1 l_1 + F_2 l_2,$$

то есть величина смещения западного рычага h_1 вызвана крутящим моментом F_0 .

После техногенного землетрясения добыча руды и складирование отходов обогащения на блок–плите В продолжают. При этом увеличивается и напряженное состояние геологической среды: при какой-то величине крутящего момента F_k произойдут новые смещения концов рычагов h_l (левый, западный) и h_n (правый, восточный), и может произойти очередное техногенное землетрясение.

В этой связи важно знать через какое время может произойти техногенное землетрясение при воздействии горных разработок и, соответственно, объектов на геологическую среду, то есть, через какое время h_l достигнет h_0 .

Поскольку положение горных объектов не изменяется, выемку руды и складирование отходов обогащения производят в определенных объемах, длина рычагов существенно не изменяется, а изменяются только силы F_1 , F_2 на F_3 и F_4 , то

$$\begin{aligned} h_1 \cdot F_0 &= F_1 l_1 + F_2 l_2, \\ h_l \cdot F_k &= F_3 l_1 + F_4 l_2. \end{aligned}$$

Если соотношение

$$h_l / h_0 = F_0 / F_k = (F_1 l_1 + F_2 l_2) / (F_3 l_1 + F_4 l_2)$$

справедливо, то возможная величина смещения h_l (левый, западный) составит

$$h_l = h_1(F_3 l_1 + F_4 l_2) / (F_1 l_1 + F_2 l_2). \quad (1)$$

Представим силы F_1 , F_2 , F_3 , F_4 соответственно величине вынимаемой из карьера руды и складированных отходов обогащения:

F_1 – величина всех уложенных отходов обогащения v_{xy} до техногенного землетрясения, т; F_2 – величина вынутой руды $v_{кв}$ до техногенного землетрясения, т

$$F_3 = v_{zx} T; \quad (2)$$

где v_{zx} – величина отходов обогащения, которые укладывают в хвостохранилище в течение года, т.; T – текущее время, годы.

$$F_4 = GT, \text{ м}, \quad (3)$$

где G – величина выемки руды из карьера за год, т.; h_l (левый, западный) – прогнозируемая величина опускания конца западного рычага, мм.

Тогда

$$h_l = T h_1 (v_{zx} l_1 + G l_2) / (v_{xy} l_1 + v_{кв} l_2), \text{ мм}. \quad (4)$$

Примем $h_1 = 275 \text{ мм}$; $v_{zx} = 0,01 \cdot 10^9, \text{ м.}$; $l_1 = 7 \cdot 10^3 \text{ мм.}$; $l_2 = 1,5 \cdot 10^3, \text{ мм.}$; $v_{кв} = 1,0 \cdot 10^9, \text{ м.}$; $G = 0,023 \cdot 10^9, \text{ м.}$; $v_{xy} = 0,225 \cdot 10^9, \text{ м.}$

Здесь рассмотрено, что годовая производительность карьера и годовые объемы складирования отходов обогащения могут принимать различные величины независимо друг от друга, поскольку горные объекты могут относиться к разным предприятиям. Но возможно и так, что годовая производительность карьера и годовые объемы складирования отходов обогащения являются постоянными величинами на длительный период. Тогда можно принять, что

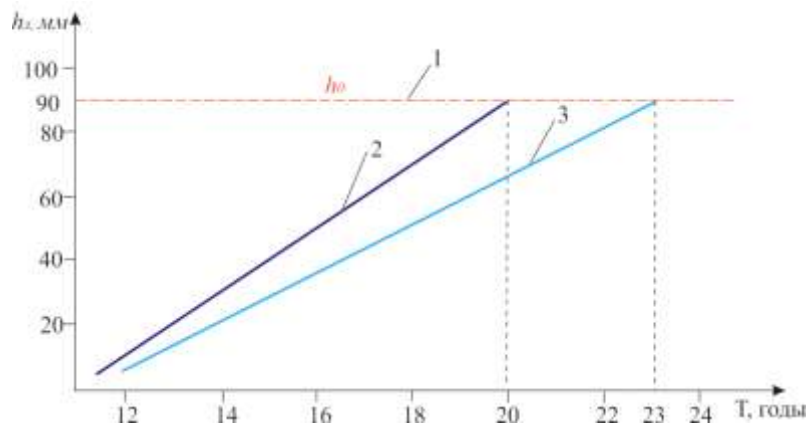
$$G / v_{zx} = R. \quad (5)$$

Подставим выражение (5) в выражение (4) и произведем необходимые преобразования. Тогда

$$h_l = h_1 GT / v_{кв}, \text{ мм}. \quad (6)$$

Используя выше приведенные данные по выемке руды из карьера и укладке отходов обогащения в хвостохранилище и на основании формул (4) и (6), определено время возникновения возможного техногенного землетрясения (рис.11).

Как следует из рисунка, техногенное землетрясение может произойти в 2020 г. (при завышенных объемах складирования отходов обогащения в шламоохранилище), и в 2023 г. – при пропорциональных объемах добычи и складирования отходов.



1 – предельное оседание поверхности; 2 – оседание поверхности при непропорциональном соотношении добычи руды по отношению к складированию отходов обогащения. 3 - оседание поверхности при пропорциональном соотношении добычи руды и складированию отходов обогащения

Рисунок 11 - Оседание юго-западной части плиты - блока В в процессе добычи руды в карьере и складировании отходов обогащения в хвостохранилище:

Выводы. Анализ выражения (6) свидетельствует о том, что важнейшим фактором, влияющим на время очередного землетрясения, является величина оседания блок-плиты в результате происходящих предыдущих землетрясений.

Таким образом, впервые обоснован механизм техногенных землетрясений в районах добычи полезных ископаемых во взаимосвязи с глубинными геологическими нарушениями, разработаны рекомендации по снижению их интенсивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Феськова, Л. В. Анализ проблемы техногенной сейсмичности / Л.В. Феськова. // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2015. – №1. – С. 114–122.
2. Инструментальные сейсмологические наблюдения на Восточно-Европейской платформе / А.А. Маловичко, И.П. Габсатарова, Л.С. Чепкунас, О.Е. Старовойт / В кн. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Книга 1. Землетрясения: под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – С. 14-66.
3. Новое сейсмическое событие в Криворожье и механизм его очага / И.П. Габсатарова А.В. Кендзера, Л.И. Надежка [и др.] // Весник Воронежского гос.ун-та. Серия: Геология. – 2013. - №2. – С. 134-140.
4. Технология открытой разработки южной группы месторождений железистых кварцитов Кривбасса на больших глубинах / М.Г. Новожилов, С.А. Бондарь, А.Ю. Дриженко // Глубокие карьеры. – К.: Наукова думка, 1973. – С. 16– 22.
5. Регистрация и анализ техногенных и природных сейсмических событий в г. Кривой Рог / С.В. Щербина, П.И. Пигулевский, И.Ю. Гурова, О.А. Калиниченко // Геоінформатика. – 2013. - № 4(48). – С. 74 – 84.
6. Kendzera, O. Seismicity of the Platform Part of Ukraine / O. Kendzera, V. Omelchenko // The Fourth International Conference "Science and Technology for Safe Development of Life Line Systems: Natural Risk - Investigations in Earth Sciences and Protection of Environment in CEI Countries", 2009 August 30 September 1. - Ohrid, Macedonia: CEI, International Center of Theoretical Geophysics, University "Ss.Cyril and Methodius", IZIIS. – 2009. – P. 20.
7. Природнича географія Кривбасу / В.Л.Казаков, І.С.Паранько, М.Г.Сметана [та ін.]. - Кривий Ріг: Видавничий дім, 2005. - 151с.

8. Четверик, М.С. Изучение скорости развития деформаций в массиве на основе маркшейдерских наблюдений на земной поверхности / М.С. Четверик, Е.А. Бубнова, Е.В. Бабий // *Mining of Mineral Deposits*. – 2017. - Т.11, № 1. – С. 57-64.

9. Куліковська, О.Є. Співставлення сучасних рухів земної поверхні Криворізького залізородного басейну з особливостями будови його геологічного середовища / О.Є. Куліковська // *Вісник Криворізького технічного університету*. – Кривий Ріг, 2004. – Вип. 24. – С. 52-57.

REFERENCES

1. Feskova, L.V. (2015), "Analysis of the problem of technogenic seismicity", *Suchasni resursoenergozberigayuchi technologii girnychogo vyrobnytstva*, no.1, pp. 114-122.

2. Malovichko, A.A., Gabsatarova, I.P., Chepkunas, L.S. and Starovoit, O.E. (2007), "Instrumental seismological observations on the East European Platform", in Sharov, N.V., Malovichko, A.A. and Shchukin, Yu.K., *Zemletryaseniya i mikroseymsichnost v zadachakh sovremennoy geodinamiki Vostochno-Evropeyskoy platform* [Earthquakes and microseismicities in the problems of modern geodynamics of the East European platform], Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia.

3. Gapsatarova, I.P., Kendzera, A.V., Nadezhka, L.I. et al. (2013), "New seismic event in Krivorozhye and the mechanism of its focus", *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya: Geologiya*, no.2, pp. 134-140.

4. Novozhilov, M.G., Bondar, S.A. and Drizhenko, A.Yu. (1973), "The technology of open development of the southern group of deposits of ferruginous quartzites Krivbass at great depths", *Glubokie karery, Naukova.dumka*, pp. 16–22.

5. Shcherbina, S.V., Pigulevsky, P.I., Gurova, I.Yu. and Kalinichenko O.A. (2013), "Registration and analysis of man-made and natural seismic events in the city of Krivoy Rog", *Geoinformatika*, no.4 (48), pp. 74 - 84.

6. Kendzera, O. and Omelchenko, V. (2009), "Seismicity of the Platform Part of Ukraine", Risk - Environmental Risk - Investigations in the Earth in CEI Countries ", 2009 August 30 September 1. - Ohrid, Macedonia: CEI, International Center of Theoretical Geophysics, University" Ss. Cyril and Methodius", IZIS, p. 20.

7. Kazakov, V.L., Paranko, I.S., Smetana M.G. et al. (2005), *Pryrodnycha geografiya Kryvbasu* [Natural geography of Krivbas], Vydavnychiy Dim, Kriviy Rig, Ukraine.

8. Chetverik, M.S., Bubnova, O.A. and Babiy, K.V. (2017), "Studying the rate of development of deformations in an array based on surveying observations on the earth's surface", *Mining of Mineral Deposits*, vol.11, no. 1, pp. 57-64.

9. Kulikovska, O.E. (2004), "Comparison of modern movements of the earth's surface of the Krivoy Rog iron ore basin with features of the structure of its geological environment", *Visnyk Kryvorizhskogo technichnogo universytetu*, vol. 24, pp. 52-57.

Об авторах

Четверик Михаил Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, m.s.chetverik@gmail.com.

Бубнова Елена Анатольевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина bubnova@nas.gov.ua.

Бабий Екатерина Васильевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, katebabiy@i.ua.

Батур Марина Александровна, магистр, Босфорский Университет, Кандильская обсерватория и НИИ землетрясений, Стамбул, Турция, marina@rambler.ru.

About the authors

Chetverik Mikhailo Sergiyovych, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine,

m.s.chetverik@gmail.com.

Bubnova Olena Anatoliivna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, bubnova@nas.gov.ua.

Babiy Katerina Vasilevna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, katebabiy@i.ua.

Batur Marina Oleksandrivna, Master of Sciences (M.Sc.), Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Istanbul, Turkey, marina@rambler.ru.

Анотація. Метою статті є обґрунтування механізму виникнення техногенних землетрусів в районах видобутку корисних копалин у взаємозв'язку з глибинними геологічними порушеннями і виконання прогнозу часу виникнення чергового техногенного землетрусу, для визначення напрямків щодо зниження їх інтенсивності.

Розроблено і вивчено моделі нерівноважного стану плит-блоків з розташованими на них гірничими об'єктами з урахуванням напрямків переміщення гірських порід. Показано, що при переміщенні гірської маси з однієї плити-блоку на іншу змінюється центр ваги плити, що призводить до її нерівноважного стану і виникненню деформацій. На основі аналізу параметрів попередніх техногенних землетрусів, виконано прогноз часу виникнення чергового техногенного землетрусу.

Вперше обґрунтовано механізм техногенних землетрусів в районах видобутку корисних копалин у взаємозв'язку з глибинними геологічними порушеннями, розроблено рекомендації щодо зниження їх інтенсивності. Розроблено методіку прогнозу виникнення землетрусів в залежності від обсягів гірських порід, що виймаються і переміщуються, а також з урахуванням глибинних геологічних порушень.

Ключові слова: плита-блок, нерівноважний стан, крутний момент, зміщення, техногенний землетрус, прогноз, зниження інтенсивності.

Annotation. Main objective of the work was to substantiate mechanism of technogeneus earthquake occurrence in its connection with deep geological faults in the mining area, as well as to forecast time of the next earthquake in order to formulate strategies and to decrease its intensity. In this regard, models of nonequilibrium state of the fault blocks were studied and developed with taking into account mining objects located on them and direction of the rock transportation. It is shown that when rock mass is moved from one fault block to another center of gravity is shifted, hence, leading to the fault block nonequilibrium state and occurrence of deformation. In this work, real-time forecast of the next technogeneus earthquake was made on the basis of analysis of previous earthquake data. Also, it is for the first time when mechanism of technogeneus earthquakes is explained in its connection with deep geological faults, which occur in the mining areas. In addition, effective recommendations on reducing intensity of earthquakes were prepared. Further, the method of earthquake prediction was developed, which takes into account volume of extracted and transported rock mass and geological fault depth.

Keywords: fault block, nonequilibrium state, torque, displacement, technogeneus earthquake, prediction, intensity reduce.

Статья поступила в редакцию 30.04.2017

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Минеевым С.П.