

УДК 622.83:550.3

**МОНИТОРИНГ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРЫ ГОРНОГО МАССИВА  
ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ**

**С. В. Усанов, В. В. Мельник, А. Л. Замятин**

*Институт горного дела УрО РАН,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620219, г. Екатеринбург, Россия*

Представлены результаты мониторинга процесса сдвижения от подземных горных работ комплексом геодезических и геофизических методов на примере локального участка Высокогорского железорудного месторождения, где произошла геодинамическая подвижка. При проведении мониторинга использовались как традиционные геодезические наблюдения за деформированием земной поверхности, так и наблюдения за изменением структуры подработанного горного массива с помощью метода спектрального сейсмопрофилирования. Наблюдения проводились с целью установления пространственных параметров области дезинтеграции горных пород, разработки рекомендаций по дальнейшему ведению горных работ и охране объектов в мульде сдвижения, определения причин, вызвавших потерю устойчивости вмещающих пород.

*Сдвижение горных пород, повреждения на поверхности, геодинамические явления, мониторинг, деформации, геофизические методы, структура массива*

Мониторинг геомеханических явлений и процессов традиционно осуществляется с помощью геодезических методов и инструментов. Неоспоримые преимущества — это непосредственное измерение превышений и длин межреперных интервалов, по которым вычисляются деформации, характеризующие опасность движений горного массива для объектов и сооружений. Пожалуй, наиболее существенным недостатком маркшейдерско-геодезического контроля является то, что инструментально на поверхности фиксируются уже произошедшие процессы, а контроль зарождения и развития их в горном массиве остается недоступным.

Исследование геомеханических процессов в массиве доступно в основном дистанционными (геофизическими) методами, которые не дают количественных оценок сдвижений и деформаций, а отражают структурную модель горного массива. При мониторинге дистанционными методами критерием оценки протекающих геомеханических процессов является изменение структуры массива в результате естественного или техногенного воздействия [1]. Изменение структуры массива определяется путем сравнения вертикальных разрезов по профильным линиям, полученным в разные временные срезы. Кроме того, по набору разрезов из одной серии наблюдений путем интерполяции на поверхности отстраивается карта структурных особенностей массива. Такие карты, получаемые в разные серии наблюдений, так же как и разрезы, подлежат сравнению и выступают в роли однородных данных.

В практике исследования сдвижения горных пород на разрабатываемых месторождениях встречаются случаи выхода деформационных процессов на поверхность, в то время как геомеханические условия отработки залежи, рудного тела или отдельного очистного блока указывают на локализацию сдвижения в массиве без развития опасных деформаций поверхности. Исследование природы их возникновения и закономерностей развития требует комплексного экспериментального подхода, сочетающего геодезические наблюдения за деформационными процессами с геофизическими исследованиями структурных преобразований массива горных пород [2].

В качестве примера комплексного экспериментального подхода приведены результаты мониторинга деформационных процессов и структурных преобразований в горном массиве и на земной поверхности над изолированным участком в северной торцевой части Восточно-Ревдинских залежей Высокогорского железорудного месторождения [3]. Залежь представлена свитой из трех рудных тел (2, 4 и 7), которые обрабатываются в интервале глубин 410–650 м системой с обрушением (рис. 1). По предварительным расчетам устойчивости выработанного пространства изолированных рудных тел [4] установлено, что отработка залежи не вызовет опасных деформаций земной поверхности. Коэффициент надежности прогнозных оценок составил 1.70.



Рис. 1. Разрез вкрест простирания залежей, совмещенный с сейсмограммой спектрального сейсмопрофилирования (ССП), на момент обрушения пропластка между рудными телами (май 2009 г.).

На поверхности над изолированным участком в северной торцевой части Восточно-Ревдинских залежей, где расположена товарная станция рудника “Гора Высокая” и промышленные трехэтажные здания, оборудована наблюдательная станция из трех реперных линий. За 9 лет наблюдений оседания поверхности составили от 50 до 110 мм, а деформации  $\varepsilon = (0.5 - 1.0) \cdot 10^{-3}$  и  $\iota = (1 - 2) \cdot 10^{-3}$ . При этом обрушение выработанных пространств практически не развивалось и произошло зависание пустот.

В марте 2009 г. пропласток между рудными телами резко обрушился и вызвал воздушную волну в выработках рудника. Обрушилась и часть горных пород над отработанными залежами, образовав свод обрушения, который из существовавших выработок отслежен до глубины 330 м.

На гор. –210 м ( $H = 410$  м) по всем доступным выработкам зафиксировано классическое развитие процесса сдвижения с зоной обрушения и зоной трещин с затухающими параметрами смещений и раскрытий.

Для уточнения контура свода обрушения в мае 2009 г. методом спектрального сейсмопрофилирования проведены исследования структуры массива с поверхности [4]. Зондирования выполнены по пяти профильным линиям, общая протяженность которых 1540 м. Частота точек зондирования в профильной линии составляет 5 м. Таким образом, зондирование массива осуществлено более чем в 300 точках. Схема расположения профильных линий на протяжении последующих серий наблюдений оставалась без изменения, но с постепенным увеличением их протяженности.

В результате первой серии наблюдений методом ССП установлено, что породы, дезинтегрированные развитием обрушения, не распространяются до поверхности и мощность пород между куполом дезинтеграции и поверхностью составляет порядка 120 м (рис. 1). По пяти спектральным сейморазрезам путем интерполяции границ структурных особенностей на плане поверхности построена область дезинтеграции горных пород (рис. 2). Процесс сдвижения над рассматриваемым участком локализовался в налегающей толще пород и не представлял опасности для охраняемых объектов на земной поверхности.

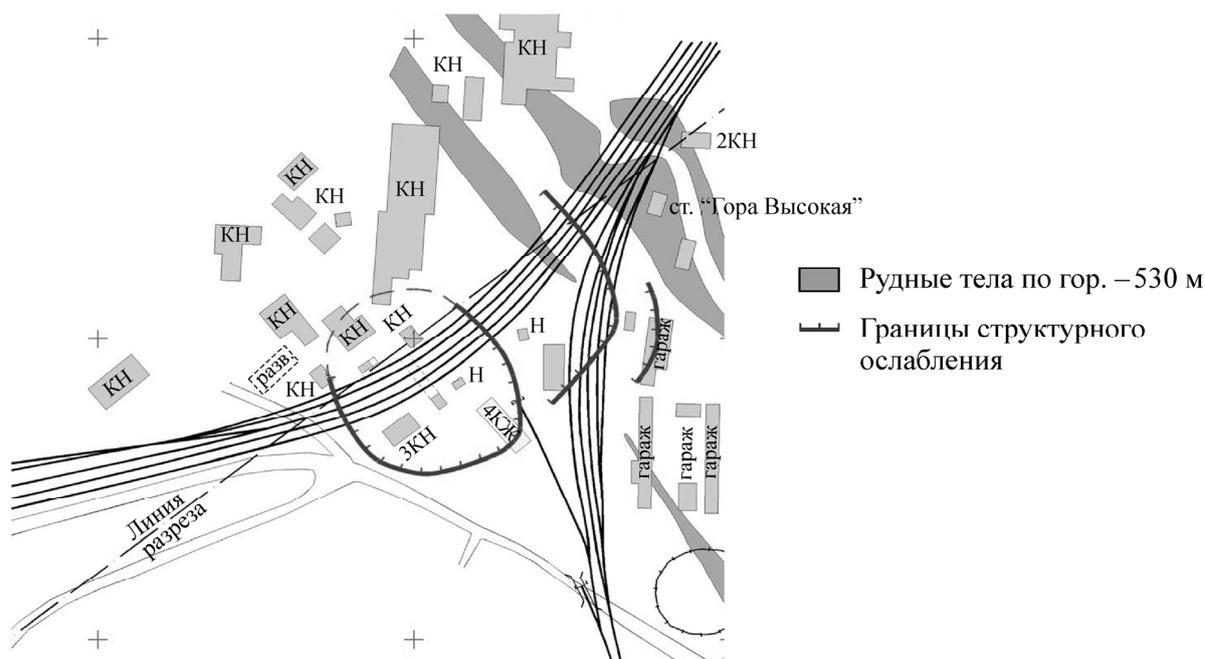


Рис. 2. Контур области дезинтегрированных пород по состоянию на май 2009 г., определенные методом спектрального сейсмопрофилирования. Здесь и на рис. 4–6 принято: 4 КЖ — четырехэтажное, каменное, жилое (цифра обозначает этажность, вторая буква — тип материала стен, третья буква — жилое/нежилое); 3КН — трехэтажное, каменное, нежилое; разв. — развалины

В 15 ч 01.10.2009 в районе исследуемого участка произошло геодинамическое событие, магнитуда которого по данным Пермской и Артинской сейсмостанций составила 2.2. Это вызвало мгновенное развитие процесса сдвижения, которое сопровождалось хлопком. По словам очевидцев, вагоны железнодорожного состава оторвались от рельсов с эффектом подпрыгивания.

Размеры мульды оседания на земной поверхности составили приблизительно  $200 \times 300$  м. Оседание в центре мульды по отдельным реперам наблюдательной станции превысило 1.5 м. Образовались террасы и трещины раскрытием до 0.5 м. Рельсы железнодорожных путей изо-

гнуло в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Необратимым деформациям подверглось трехэтажное здание бывшей проходной завода (рис. 2, разв.), а трехэтажное здание диспетчерской (рис. 2, ЗКН), находящееся практически в эпицентре зоны реализации геодинамической подвижки, осталось совершенно невредимым. Примерно в 22:00 того же дня Пермской и Артинской сейсмостанциями зафиксировано сейсмическое событие с магнитудой 2 в районе Естюнинского месторождения, которое расположено приблизительно в 10 км от места описываемых событий. Однако ввиду слабой освоенности местности на поверхности следов проявления этого события не найдено.

На следующий день (02.10.2009) проведено спектральное сейсмозондирование массива исследуемого участка с целью выявления изменений структуры, на основе которого предполагалось определить пространственные параметры области дезинтегрированных пород. На сейсмограмме (рис. 3) отчетливо видно изменение структуры массива по сравнению с предыдущими измерениями (см. рис. 1). Непосредственно в зоне максимальных оседаний поверхности, ограниченной террасами с уступом до 0.5 м, на глубине 40–50 м образовалась корытообразная граница, соответствующая модельным представлениям о расслоении массива при оседании. Пробуренные с поверхности 4 скважины подтвердили существование этой границы, которая характеризовалась наличием воздушной прослойки. За контуром корытообразной границы образовались крупные трещины, прослеживающиеся на сейсмограмме до глубины 100–120 м и зафиксированные как вкрест залегания рудных тел, так и по простиранию. Трещины на поверхности и на сейсмограммах полностью совпадают.

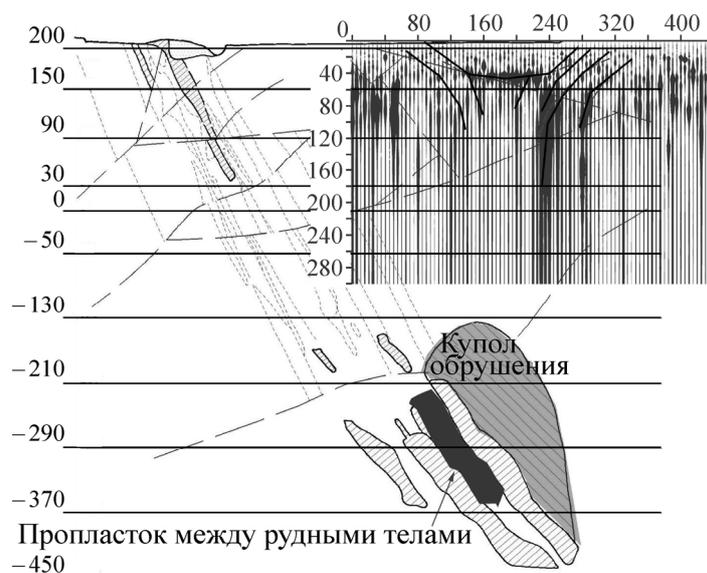


Рис. 3. Совмещенный геологический и спектральный сейморазрез вкрест простирания залежей после геодинамической подвижки 01.10.2009

Данные с профилей ССП проанализированы, и в результате интерполирования получена схема распределения нарушений целостности массива в плане, зафиксированных после геодинамической подвижки (рис. 4). Сопоставление итоговых результатов измерений до геодинамического события (см. рис. 2) и после (рис. 4) показывает расширение области дезинтегрированных пород и образование второй кольцевой границы по аналогии с явлением зональной дезинтеграции горных пород вокруг горной выработки [6] с отличием в масштабах явления и с подменной выработки зоной обрушения. Таким образом, проведенные измерения стали представлять собой вторую серию наблюдений методом спектрального сеймопрофилирования.

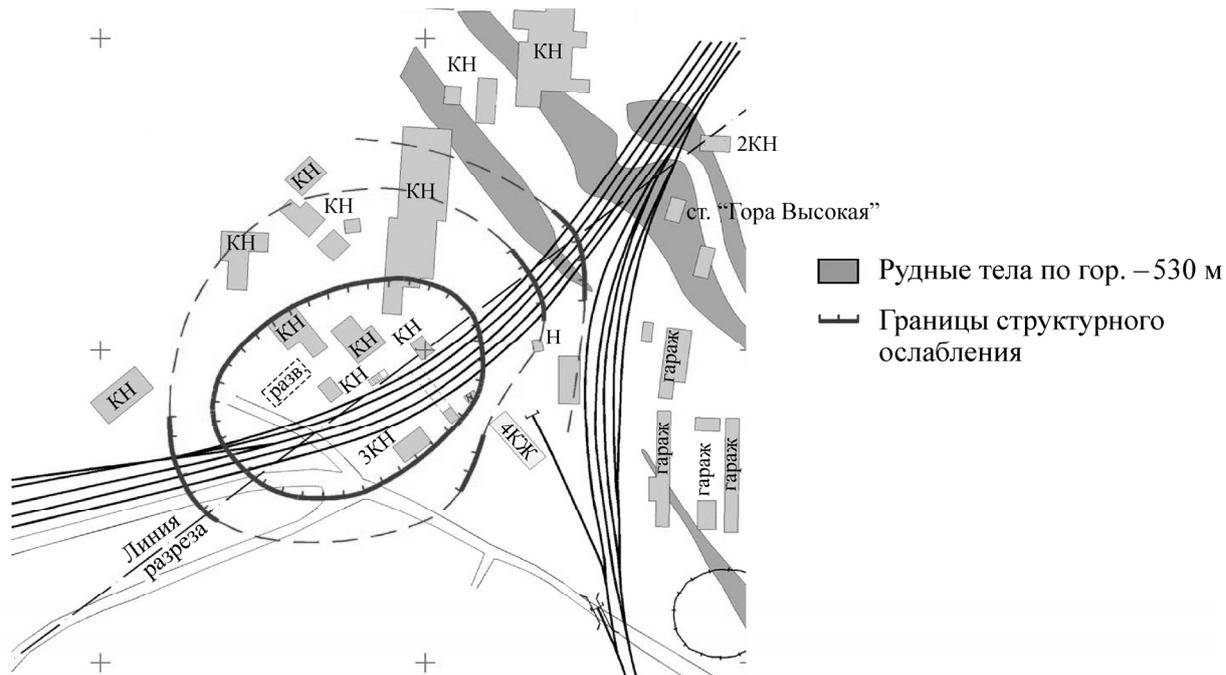


Рис. 4. Контуры структурных нарушений горного массива, зафиксированные после геодинамической подвижки 01.10.2009

Следующая (третья) серия измерений методом ССП выполнена спустя месяц после геодинамического события. Сопоставление результатов двух серий (октябрь и ноябрь 2009 г.) показало, что вокруг центра структурных трансформаций начавшее формироваться второе кольцо расширилось и захватило гораздо большую область горных пород по сравнению с предыдущей серией (рис. 5).

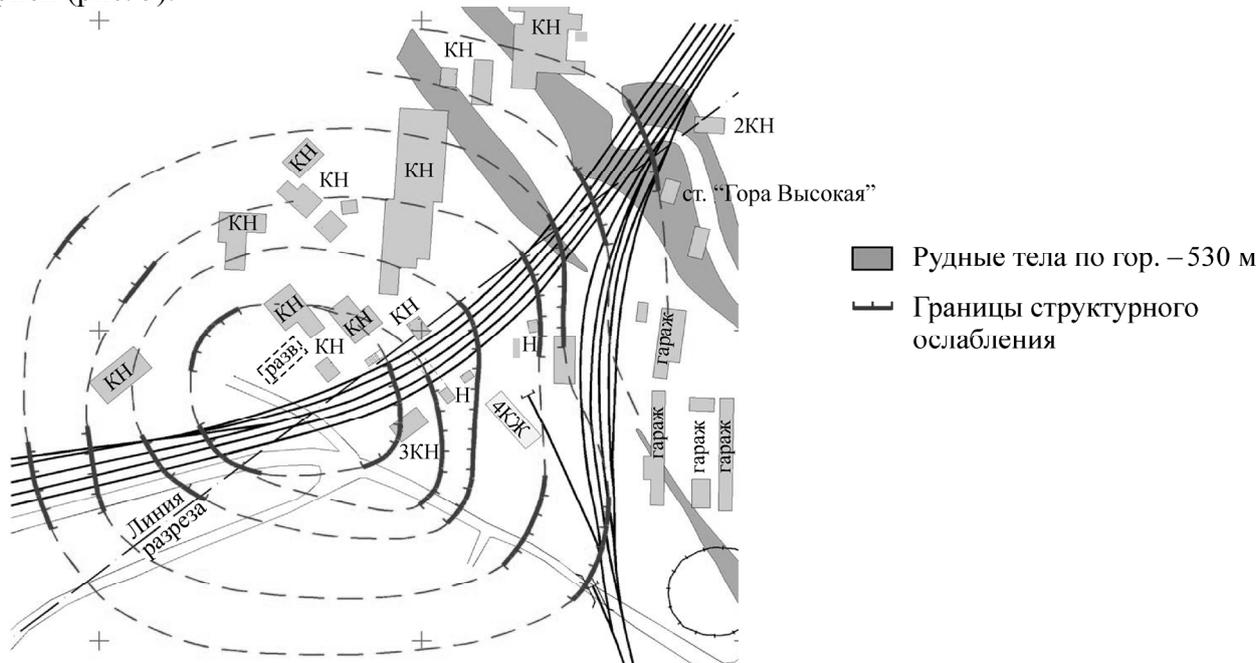


Рис. 5. Контуры структурных нарушений горного массива, зафиксированные в ноябре 2009 г.

Одновременно с геофизическими исследованиями проводились и инструментальные наблюдения за сдвижением поверхности маркшейдерской службой рудника. По результатам ежедневных, а затем еженедельных наблюдений, продолжавшихся до июля 2010 г., установлено, что деформации не имеют трендового характера. Оседания периодически сменяются поднятиями, а изменение отметок колеблется в пределах  $\pm 5-15$  мм. То есть в области, подвергшейся влиянию геодинамического события, сначала произошла резкая трендовая подвижка, вызвавшая просадку поверхности, а затем стали развиваться волновые колебания поверхности, сопровождающиеся образованием и расширением в горном массиве второй кольцевой структуры.

Сложившаяся геомеханическая ситуация указывала на то, что состоявшееся обрушение поверхности реализовало максимальные деформации поверхности мгновенно и дальнейшее развитие горных работ по отработке нижележащего горизонта существенно не осложнит состояние поверхности и расположенных на ней объектов. Однако после проведения 11.07.2010 взрыва по погашению технологической потолочины и целика на гор.  $-450$  м на поверхности обнаружили трещины, просадка железнодорожных путей и крен опор, удерживающих контактный провод. В близлежащих зданиях свежих трещин не замечено.

12.07.2010 маркшейдерскими наблюдениями зафиксировано резкое оседание поверхности с максимальной величиной 130 мм. После этого наблюдения осуществлялись ежедневно, и 13.07.2010 ежесуточное изменение высотных отметок реперов стабилизировалось с колебанием в пределах  $\pm 0-5$  мм. При этом характер изменения высотных отметок восстановился — стал волновым и знакопеременным.

К этому событию приурочена четвертая серия наблюдений методом спектрального сейсмопрофилирования. Структура массива, зафиксированная в 2009 г., изменилась приращением второй кольцевой зоны, которая еще более распространилась от эпицентра реализации геодинамического события. Возросла раздробленность массива субвертикальными структурными ослаблениями.

В июле 2011 г. над изолированным участком в северной торцевой части Восточно-Ревдинских залежей Высокогорского железорудного месторождения проведена пятая серия мониторинга структуры горного массива (рис. 6). За прошедший между сериями промежуток времени (07.2010–07.2011) резких подвижек не отмечалось, и маркшейдерские инструментальные наблюдения свидетельствуют об отсутствии постоянного трендового процесса деформирования участка. Однако наблюдения методом ССП показывают, что наметившаяся тенденция в расширении зоны структурных ослаблений сохранилась, проявившись в дальнейшем развитии и расширении второй кольцевой структуры до границы зоны сдвижения от рудных тел рассматриваемого участка Высокогорского месторождения. Развитие зоны дезинтеграции горных пород происходит с колебательным характером, который проявляется в виде изменения пространственного положения структурных границ как в направлении от центра мульды сдвижения, так и в обратном направлении, но с меньшим вектором. Таким образом, изменения структуры горного массива распространяются на все большую область, обнаруживая тем самым трендовую составляющую в этом процессе.

## ВЫВОДЫ

Проведенный комплекс исследований свидетельствует об эффективности сочетания геодезических и геофизических методов и позволяет сформулировать версию о причине развития процесса сдвижения в условиях, когда он должен был локализоваться в массиве без развития опасных деформаций на поверхности: обрушение поверхности над изолированным участком Восточно-Ревдинских залежей Высокогорского месторождения произошло под воздействием геодинамической подвижки, которая создала в массиве зону запредельного деформирования горных пород — зону депрессии, в которой начались деструктивные преобразования в соответствии с явлением зональной дезинтеграции [6].

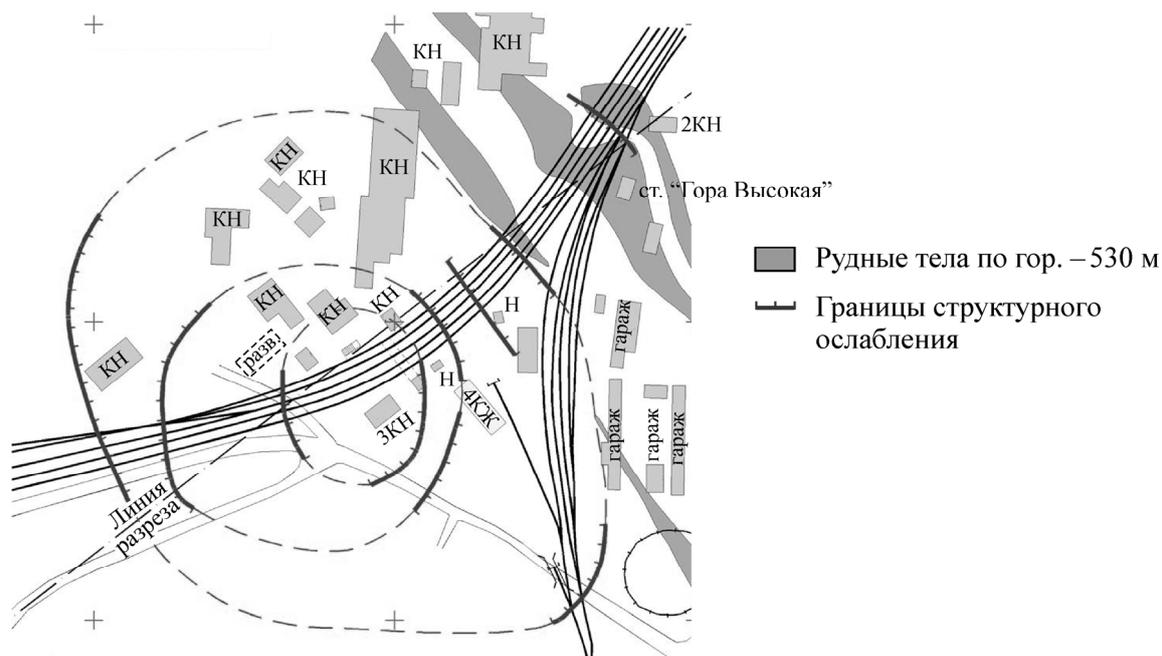


Рис. 6. Контуры структурных нарушений горного массива, зафиксированные в июле 2010 г.

В настоящее время наблюдения за трансформацией структуры горного массива при обработке поверхности приобретают все более широкий характер и входят в программу исследований процесса сдвижения. Описанные исследования по сути своей явились первым и уникальным экспериментом, когда удалось прозондировать подработанный горный массив до и после развития обрушения и наглядно продемонстрировать происходящее при этом трансформирование структуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усанов С. В. Методика оценки безопасности застройки территорий над старыми горными выработками // ГИАБ. — 2011. — Отдельный выпуск № 11.
2. Усанов С. В., Коновалова Ю. П., Желтышева О. Д. Современные технологии мониторинга процесса сдвижения // Горн. журн. — 2012. — № 1.
3. Усанов С. В. Геодинамические движения горного массива при техногенном воздействии крупного горно-обогатительного комбината // ГИАБ. — 2011. — № 11.
4. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана: утв. Минмет СССР 02.08.90. — Свердловск: ИГД Минмета СССР.
5. Гликман А. Г. Физика и практика спектральной сейсморазведки. Режим доступа: <http://www.newgeophys.spb.ru/ru/book/index.shtml>.
6. Открытие № 400 СССР. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемякин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, Ф. П. Глушихин, М. А. Розенбаум // Оpubл. в БИ. — 1992. — № 1.

Поступила в редакцию 21/IX 2013