

УДК 550.348. (571.66)

СЕТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СРЕЛЬЦОВСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Рассказов И.Ю., Федотова Ю.В., Саксин Б.Г.

ИГД ДВО РАН, г. Хабаровск, fjulia@mail.ru

В связи с увеличивающимися техногенными воздействиями на верхнюю часть земной коры на территориях с крупномасштабной разработкой месторождений (Кольский п-ов, Урал, Сибирь, Дальний Восток и др.) возрастает роль оценки опасности современных геодинамических процессов (деформаций, трещинообразования, перемещения отдельных блоков) в массивах горных пород в пределах рудных и шахтных полей на разных этапах их эксплуатации.

Соотношение природной и техногенной сейсмичности в таких районах постоянно изменяется в сторону увеличения техногенной. В этой связи для обеспечения безопасности при освоении групп месторождений, в особенности стратегического минерального сырья, локализованного в сложных горно-геологических условиях (например, Стрельцовское рудное поле), требуется выполнять постоянный мониторинг современных геодинамических процессов.

К Юго-Востоку Забайкалья относится территория, ограниченная долинами рек Онона и Газимура на западе и севере, Аргунью на востоке и государственной границей страны на юге. Юго-восток – это невысокие хребты: Аргунский, Нерчинский, Кличкинский, Урюмканский, разделенные обширными впадинами и широкими долинами многочисленных рек. Главными тектономагматическими особенностями Юго-Восточного Забайкалья являются аномально высокая неоднородность коры и мантии, повышенная сейсмичность, существование нескольких глубинных георазделов. Положение района в пределах планетарного Монголо-Охотского подвижного пояса определяет современную повышенную сейсмическую активность геологических структур и неоднородность напряженно-деформированного состояния породных массивов. Однако этот тектонически-активный район Юго-Восточного Забайкалья до сих пор является недостаточно изученным, а постоянные наблюдения за протеканием сейсмических и деформационных процессов до недавнего времени не проводились [14].

Стрельцовское рудное поле (СРП), расположено в Тулукуевской кальдере, на юго-востоке Забайкалья в России (зона соприкосновения территорий трех государств – России, Монголии и Китая).

В радиусе 500 км от центра кальдеры на территории России (рис.1) в настоящее время действуют 3 региональные сейсмические станции СГТ, КРС, ТУР (перечислены по мере удаления от центра). Ближайшая телесеизмическая станция находится на юго-западе оз. Байкал, т.е. на расстоянии более 1000 км.

Что касается Монголии и Китая, то ближайшие к району наблюдений телесеизмические станции на их территориях также находятся на расстоянии порядка 1000 км.

В таблице 1 приведены параметры землетрясений, зарегистрированных в период с 1991 по 2018 год по данным ФИЦ ЕГС РАН, а на рис.2 показано их пространственное распределение (за центр взят г. Краснокаменск) [18].

Усиление внимания к данному направлению исследований обусловлено тем, что в районе СРП не только регистрируются землетрясения с магнитудами в диапазоне 3.2–5.2 [18], но и сам район является одним из ключевых объектов добычи минерального сырья для выработки атомной энергии в России. Здесь ПАО «ППГХО» осуществляет эксплуатацию уникальных по запасам месторождений и переработку молибден-урановых руд.

Как видно из приведенных выше данных, район разработки месторождений пересекают сейсмоактивные разломы, на что необходимо обращать самое пристальное внимание при планировании ведения горных работ. Связано это с тем, что главной рудоносной структурой Стрельцовского рудного поля является северо-восточная крутопадающая Аргунская «тектонически ослабленная» (разломно-трещинная) зона, контролирующая размещение как центров вулканизма – жерловин, субвулканических тел, так и уранового оруденения в залежах различной морфологии среди пород выполнения кальдеры (слоистой толщи), а также местами в породах фундамента [2]. Дифференциация физических свойств горных пород разреза и наличие активных разрывных структур обуславливают сложные горно-геологические условия разработки месторождений (с глубины 500м от поверхности они склонны и опасны по горным ударам). Наблюдается четкое нарастание со временем техногенной сейсмической активности на действующих рудниках.



Рис. 1. Схема размещения сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН в районе исследований

Таблица 1. Параметры землетрясений, зарегистрированных в районе г. Краснокаменск (широта 50.06, долгота 118.02, радиус 300 км).

N	Время [GMT]	Шир. гр.	Долг. Гр.	Глуб. км	Ms	mb	I0	Регион
1	2017-01-21 16:43:32	52.05	119.91	10	-	4.1/8	3-3.5	В. Россия - С.В. Китай погран. область
2	2017-01-17 08:53:48	49.73	118.39	10	-	4.0/8	3	В. Россия - С.В. Китай погран. область
3	2013-06-27 09:14:01	48.06	116.71	10	-	4.2/8	3.5	Северо-Восточный Китай
4	2012-12-09 06:47:02	49.13	117.17	33	-	4.0/6	-	В. Россия - С.В. Китай погран. область
5	2011-07-22 14:52:57	49.94	118.82	15	-	4.9/14	4.5-5	В. Россия - С.В. Китай погран. область
6	2009-05-13 00:53:03	49.55	114.22	15	3.9/1	3.5/1	4.5-5	Россия - Монголия погран. область
7	2006-05-03 00:26:32	48.43	121.13	15	-	3.8/3	-	Северо-Восточный Китай
8	2006-03-24 10:55:29	51.76	116.53	20	4.2/1	4.2/1	4.5-5	Восточное озера Байкал, Россия
9	2006-01-06 01:56:38	51.84	116.56	10	-	4.7/8	6	Восточное озера Байкал, Россия
10	2005-09-19 03:27:58	49.99	120.52	60	-	5.2/7	3-3.5	Северо-Восточный Китай
11	2003-10-25 07:33:09	51.38	118.06	33	3.8/3	3.6/2	3-3.5	Восточное озера Байкал, Россия

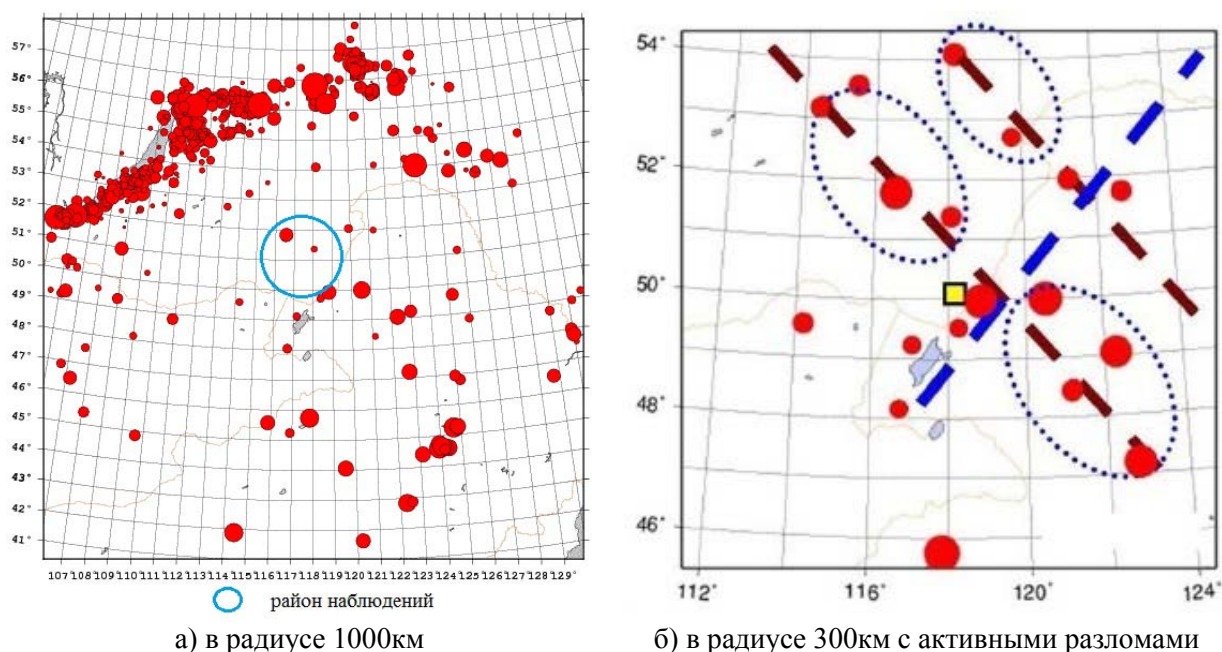


Рис. 2. Землетрясения, зарегистрированные в период 1991-2018гг по территории юго-восточного Забайкалья (за центр взят г. Краснокаменск) по данным ФИЦ ЕГС РАН.

Многочисленными исследованиями установлено, что массивы удароопасных месторождений, как правило, сложены прочными, хрупкими и высокоупругими горными породами, склонными к разрушению в динамической форме. При этом в массивах горных пород действуют неравнокомпонентные поля напряжений сжатия и растяжения, и в 1.5 – 3 раза превышают гравитационную составляющую от веса налегающей толщи пород [11].

Превышение горизонтальных (обусловленных действием тектонических сил) сжимающих напряжений над вертикальными (гравитационными) во многом определяется их геодинамической позицией в пределах тектонически активной Амурской плиты, характеризующейся высокой структурной неоднородностью, тектонической раздробленностью и наличием областей повышенных напряжений [21]. Также отмечено, что для Стрельцовского рудного поля действия наибольших сжатий ориентированы в направлении от северо-восточного до юго-восточного.

Проведенный анализ удароопасности на подземных рудниках Юго-Восточного Забайкальского региона указывает на усложнение горнотехнической ситуации и увеличение геодинамического риска при ведении горных работ, обусловленные ростом выработанных пространств и глубины разработки. Причем, наблюдается активизация геодинамических процессов, протекающих в форме перестройки и самоорганизации блочного массива горных пород в природно-техногенном поле напряжений. Эти процессы сопровождаются смещениями и подвижками вдоль тектонических нарушений различного масштабного уровня, выделением значительной упругой энергии и проявлением техногенной сейсмичности.

В подобных условиях наиболее эффективным методом исследования природных и техногенных процессов в массиве горных пород является организация комплексных многоуровневых режимных наблюдений, основанных на ряде методов, направленных на изучение верхней части земной коры [3, 4, 15-17, 19, 23].

Система мониторинга геомеханического состояния массива, установленная в настоящее время на месторождении «Антей» в пределах СРП, объединяет многоканальные сейсмоакустические и микросейсмические измерительные комплексы. Они обеспечивают регистрацию сейсмоакустических событий энергией от 10 до 10^6 Дж в частотном диапазоне от 10 до 12кГц.

Также в систему мониторинга входят деформационные станции, включая лазерный деформограф, способный регистрировать смещения земной коры с точностью до 0.1 нм в частотном диапазоне от 0 до 1 кГц [12,13]. В системе реализована технология временной синхронизации, дающая возможность поддерживать единое время во всех измерительных средствах с расхождением не более 10 мс, а все регистрируемые данные интегрируются в единую информационную сеть, что дает возможность оперативной совместной интерпретации результатов наблюдений [1].

В качестве основной интеграционной платформы используется программный комплекс

MineFrame [8], обеспечивающий представление и совместный анализ результатов геофизического мониторинга. При этом результаты геомеханического мониторинга фиксируются в базах данных, обрабатываются и представляются в форме карт сейсмоакустической и деформационной активности, графиков и диаграмм изменения энергетических, спектральных и других параметров геофизических полей.

По результатам анализа данных комплексного геомеханического мониторинга на рудниках Юго-Восточного Забайкалья установлено, что важной особенностью поведения потенциально удароопасного массива является формирование в нем активных зон (потенциальных очагов геодинамических явлений), на что указывает процесс кластеризации источников микро разрушений. Количественные значения показателя, при котором устанавливается категория «Опасно», определялись методами дискретного анализа и математической статистики с применением интервальных алгоритмов распознавания образов. Так, для условий месторождения «Антей» критическая величина показателя удароопасности составила 5.11. При этом надежность прогнозов динамических проявлений за последние 5 лет оказалась достаточно высокой и составила 84.4 % [9].

В рамках модели иерархии блоков [5, 6, 20] наряду с быстрыми сейсмическими волнами, генерируемыми в результате разрушения твердой породы, существуют медленные деформационные волны, сопровождающие процесс распространения энергии упругой деформации посредством взаимодействия отдельных блоков, имеющих собственные колебательные степени свободы. При этом деформационно-волновые процессы в земной коре, являются триггерным механизмом различных высокоэнергетических сейсмических событий (землетрясений, горных ударов и т.д.). Одновременно, они могут являться предвестниками этих событий [7, 10, 22, 24].

По результатам анализа данных геомеханического мониторинга выявлена взаимосвязь динамических проявлений горного давления и сейсмических волн от природных (землетрясения) и техногенных (технологические взрывы) источников. Так, по данным высокоточного деформационного контроля на геодинамическом полигоне в районе Стрельцовского рудного поля установлено, что сейсмические волны от сильных землетрясений оказывают заметное влияние на деформационное поле, что отражается в повышении сейсмоакустической активности в 2 – 3 раза в сравнении со средним уровнем.

Сейсмические волны выступают в роли триггера и инициируют разрушение в динамической форме участков массива горных пород, находящихся в предельно напряженном состоянии [1]. При этом увеличение сейсмической активности приводит не только к обрушению пород с кровли и стенок подземных выработок, но и к смещению блоков при действии горизонтальных напряжений во время землетрясения (рис.3).

Оценка влияния землетрясений на устойчивость массива горных пород в районе разрабатываемых урановых месторождений Стрельцовского рудного поля выполнена на основании анализа баз данных мониторинга лазерным деформографом [13] и многоканальной автоматизированной геоакустической системой контроля горного давления “PROGNOZ ADS (АСКГД) за период с 2015 по 2018 годы.

Рассмотрим оценку воздействия на горный массив крупного удаленного землетрясения магнитудой 7.8, произошедшего в заливе Аляска 23 января 2018 г. в 18:31:39 местного времени на расстоянии 5750 км от района наблюдения.

Анализ данных лазерного деформографа (за сутки до землетрясения и сутки после) показал, что после землетрясения произошла разгрузка массива, при этом время релаксации составило около суток (рис.4).

Если рассматривать только низкочастотную область сигнала (децимация 10000), то видно, что в результате землетрясения произошло резкое увеличение смещения с 0.9 мкм до 6.1 мкм, с момента начала прихода сейсмической волны до момента окончания ее влияния на массив горных пород в течение 21 мин (рис.5).

Как видно из данных, представленных на рисунке 6, величина энергетического параметра на время регистрации землетрясения составляла 363.64 Дж, после которого последовал спад значений до 22.73 Дж и затем резкое увеличение до 2399.14 Дж через 8 минут от момента регистрации события (то есть, когда волна дошла до района работ). При этом количество зарегистрированных событий АСКГД после землетрясения увеличилось на 55 шт., то есть, более чем в 3 раза.

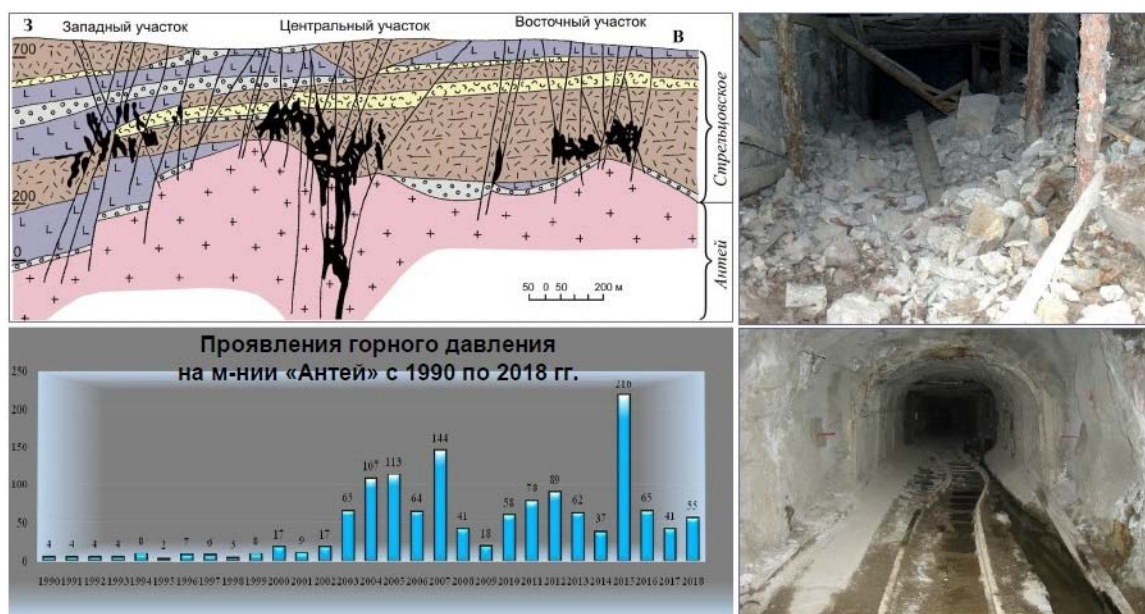


Рис. 3. Результаты проявлений максимальной сейсмической активности в выработках месторождения «Антей» Стрельцовского рудного поля.



Рис. 4. Изменение деформаций массива горных пород месторождения «Антей» за период с 22 по 24 января 2018 г.

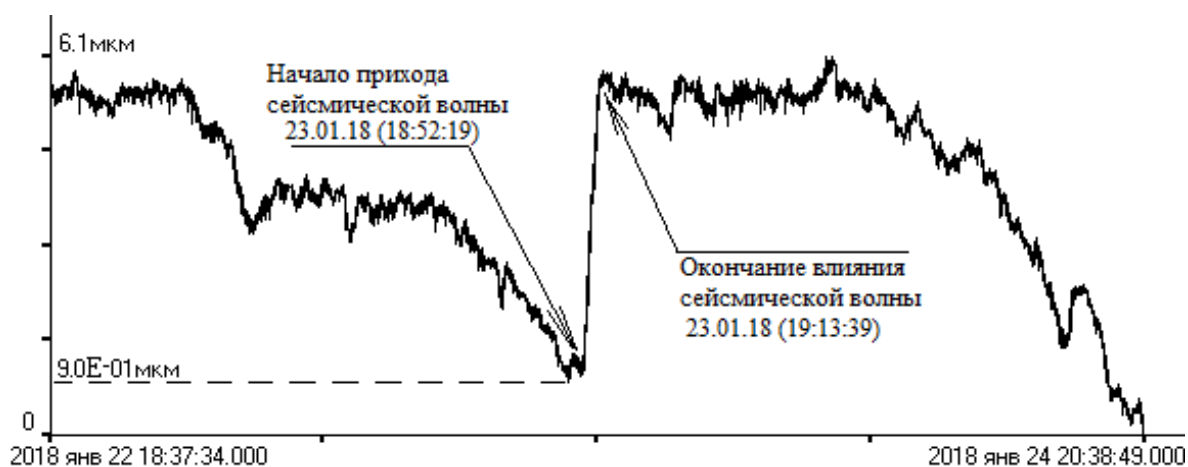


Рис. 5. Деформация массива по данным в низкочастотной области (децимация 10000).

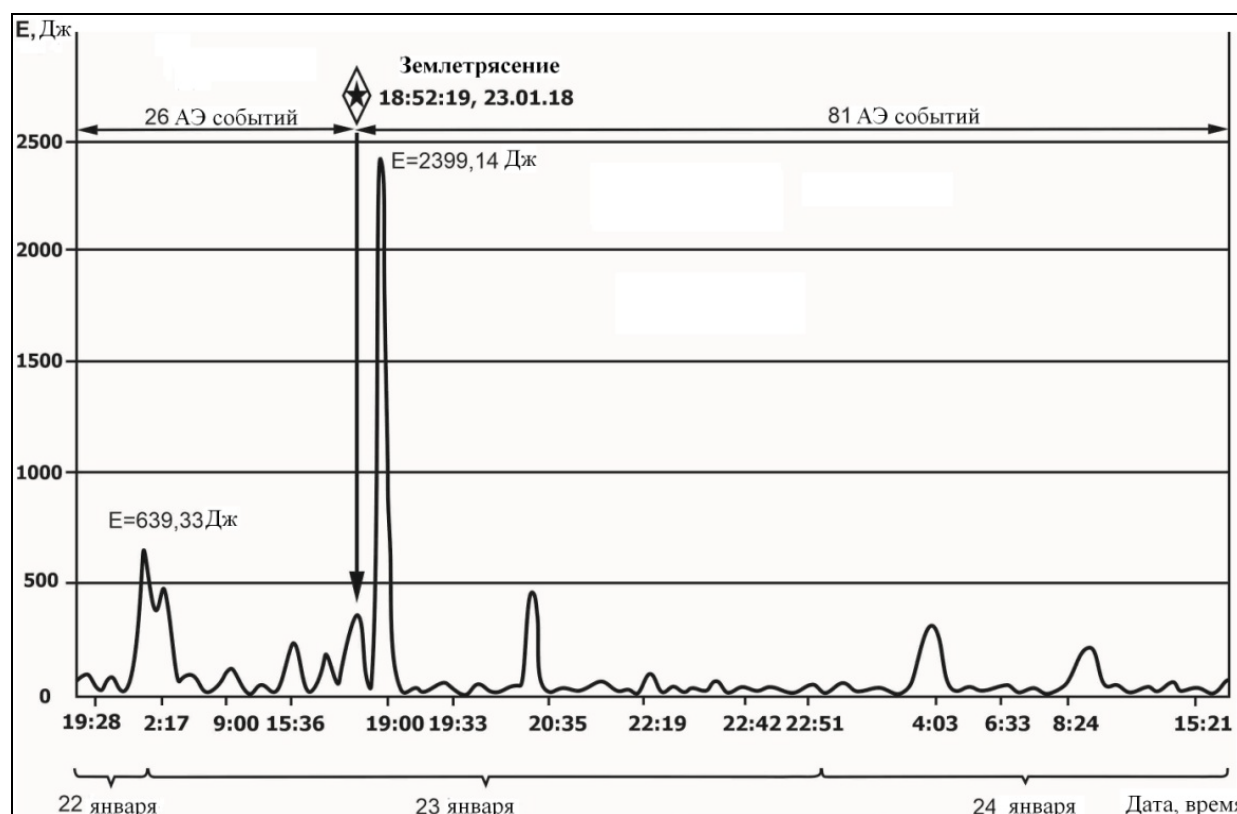


Рис. 6. График геоакустической активности до и после землетрясения.

Сопоставим полученные результаты с данными мониторинга массива АСКГД (рис.6).

Таким образом, анализ полученных результатов позволяет предположить, что имеющиеся системы мониторинга состояния массива позволяют оценить влияние естественной сейсмической активности на отклик массива горных пород в пределах разрабатываемых месторождений. Однако некоторые ограничения частотного диапазона существующей комплексной системы не могут в полной мере повысить вероятность прогноза техногенных катастроф.

Поскольку в пределах Стрельцовского рудного поля расположены другие месторождения, как разрабатываемые в настоящее время, так и перспективные к отработке, можно утверждать, что в сложившихся условиях необходимы углубленные комплексные геодинамические исследования. Они, по нашему мнению, должны включать оценку геодинамической, сейсмической обстановки и напряженно-деформированного состояния массивов горных пород.

На основании данных комплексного мониторинга изучение закономерностей геодинамических полей и процессов в области техногенного влияния горных работ с использованием сейсмических, сейсмоакустических, геодезических, сейсмодеоформационных и иных методов позволит получить принципиально новую информацию о напряженно-деформированном состоянии геологической среды, а также выделить региональные предвестников динамических явлений разного энергетического уровня в горных массивах.

Наиболее надежные прогнозные оценки удароопасности могут быть получены при применении различных инструментальных методов, в том числе и сейсмологических, объединенных в единую систему комплексного геомеханического мониторинга, созданную в районе месторождений урановых руд в Юго-Восточном Забайкалье [12].

В настоящее время сейсмическая сеть мира настывает несколько тысяч сейсмических станций. В единую мировую сеть объединены опорные станции, расположенные в разных точках Земли. Единая сеть сейсмических наблюдений России объединяет опорные станции, расположенные в разных частях нашей страны.

Составными элементами в эту сеть входят локальные сети, целью которых является изучение сейсмичности региона. При этом опорные станции предназначены для регистрации сейсмических сигналов на эпицентральных расстояниях свыше 2000 км. Эти станции снабжены стандартной сейсмической аппаратурой: короткопериодными сейсмографами высокой чувствительности (в полосе пропускания 10-0.7 Гц), широкополосными сейсмографами средней чувствительности (10-0.05 Гц),

часть станций оснащена длиннопериодными сейсмографами средней чувствительности (0.2-0.015 Гц).

Региональные станции используются для регистрации близких землетрясений с эпицентрными расстояниями до 2000 км. Эти станции оснащены короткопериодной аппаратурой, а также регистрируют сильные движения в полосе частот 10-0.1 Гц.

В связи с этим ИГД ДВО РАН, совместно с ПАО «ППГХО» и другими заинтересованными научными институтами, приступил к разработке программы мониторинга «Геодинамический полигон СРП», в рамках которой планируется создание локальной сети сейсмических наблюдений в пределах Тулукуевской кальдеры для обеспечения безопасности разработки месторождений.

Проработка материала на подготовительном этапе показала, что для обеспечения качества регистрации событий на обрабатываемых месторождениях СРП при минимальном наполнении сети, необходима установка:

- телеметрической станции с привязкой к ФССН (регистрация событий с магнитудой от 3.0-3.5);
- трех региональных станций (регистрация событий с магнитудой от 1.5-2.0), увязанных с ней в региональную сеть наблюдений (рис. 7).

Станции предполагается оснастить современным цифровым оборудованием для производства непрерывных телесейсмических и региональных наблюдений и передачи данных по каналам связи.

Созданная сеть будет связана с локальными рудничными микросейсмическими сетями - действующей в настоящее время на месторождении «Антей» и планируемыми к созданию еще на двух месторождениях. Для этого на одном из рудников ПАО «ППГХО» будет создан единый информационно-обрабатывающий центр и организованы телекоммуникационные системы обмена данными.

Таким образом, созданная сеть позволит решить поставленные задачи по мониторингу и выполнению оценки вероятности реализации техногенных катастроф для обеспечения безопасной разработки удароопасных месторождений в районе Стрельцовского рудного поля.

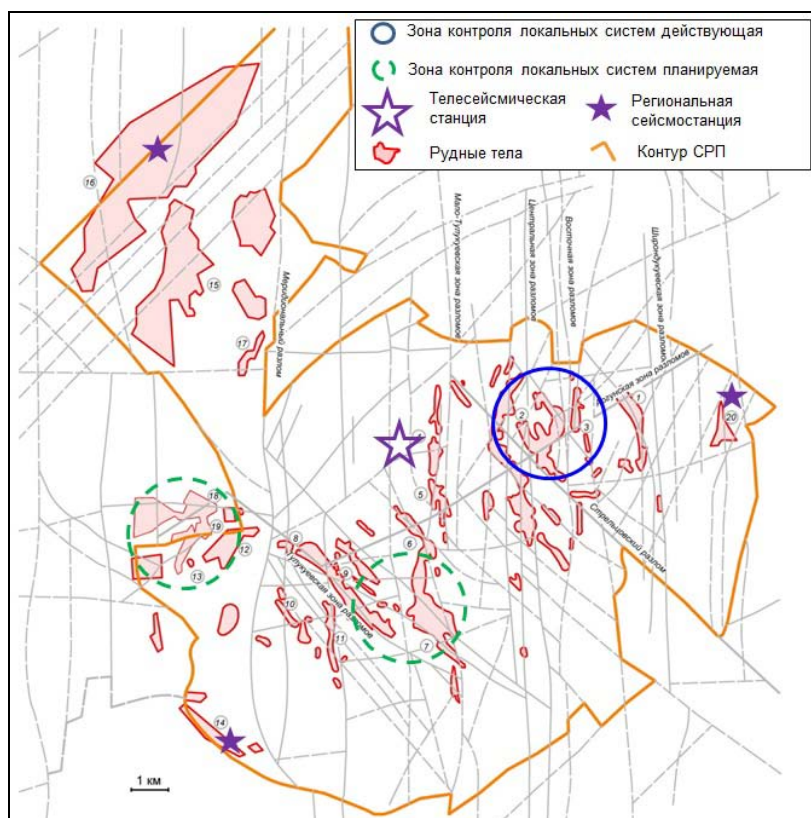


Рис. 7. Предлагаемая схема расположения сейсмических пунктов наблюдения в районе Стрельцовского рудного поля. Цифрами в кружках обозначены месторождения: 1 – Широндукуевское; 2 – Стрельцовское; 3 – Антей; 4 – Октябрьское; 5 – Лучистое; 6 – Мартовское; 7 – Мало-Тулукуевское; 8 – Тулукуевское; 9 – Юбилейное; 10 – Весеннее; 11 – Новогоднее; 12 – Пятилетнее; 13 – Красный Камень; 14 – Юго-Западное; 15 – Дальнее; 16 – Полевое; 17 – Безречное; 18 – Аргунское; 19 – Жерловое; 20 – Восточно-Широндукуевское.

Список литературы

1. Гладырь А.В. Система интеграции микросейсмических и геоакустических данных геомеханического контроля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 6. С. 220–234.
2. Ищукова Л.П., Модников И.С., Сычев И.В. и др. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск, 2007. 260 с.
3. Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Федотова Ю.В. Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ в высоконапряженных скальных массивах. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. 161 с.
4. Козырев А.А., Федотова Ю.В., Журавлева О.Г. Специфика учета сейсмической активности при проектировании и ведении горных работ // Сборник научных трудов “Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий”, Санкт-Петербургский Горный университет, 2017. С. 210–216.
5. Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 1. С. 5–22.
6. Курленя М.В., Опарин В.Н. О явлении знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 4. С. 10–15.
7. Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Геоакустическая эмиссия и деформации осадочных пород // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России, г. Петропавловск-Камчатский, 1-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский, 2009. С. 216–220.
8. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Компьютерная технология инженерного обеспечения горных работ при освоении месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. 2010. № 9. С. 11–15.
9. Методы и системы сейсμοдеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. Т. 1, 2010. Т. 2.
10. Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Фомин Ю.Н. Особенности деформаций земной коры накануне близкого сильного землетрясения по данным высокочувствительных лазерных измерений // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: сборник трудов Всероссийской конференции с участием иностранных ученых, Новосибирск, 6-10 июля 2009 г. Новосибирск, 2010. С. 30–37.
11. Рассказов И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. М.: Горная книга, 2008. 329 с.
12. Рассказов И.Ю., Гладырь А.В., Аникин П.А., Святецкий В.С., Просекин Б.А. Развитие и модернизация системы контроля динамических проявлений горного давления на рудниках ОАО «ППГХО» // Горный журнал. 2013. Т. 8. №. 2. С. 9–14.
13. Рассказов И.Ю., Долгих Г.И., Петров В.А., Луговой В.А., Долгих С.Г., Саксин Б.Г., Цой Д.И. Применение лазерного деформографа в системе комплексного геодинамического мониторинга в районе Стрельцовского рудного поля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 6. С. 29–37.
14. Рассказов И.Ю., Петров В.А., Гладырь А.В., Тюрин Д.В. Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы // Горный журнал. 2018. № 7. С. 17–21.
15. Саксин Б.Г., Рассказов И.Ю., Шевченко Б.Ф. Принцип комплексного изучения современного напряженно-деформированного состояния верхних уровней земной коры Амурской литосферной плиты // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 2. С. 53–65.
16. Cai M. Prediction and prevention of rockburst in metal mines // A case study of Sanshandao gold mine. J. of Rock Mech. and Geotechn. Eng. 2016. P. 204–211.
17. Gibowicz S.J. Rockbursts and Seismicity in Mines. Rorerdam, Netherlands, 1997. 450 p.
18. <http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/mapCustom.pl?l=0&lat=50.06&lon=118.02&num=999&rad=300>
19. Kozыrev A.A., Kasparyan E.V., Fedotova Iu.V. Monitoring of mining-induced seismicity in the Khibiny rock massif // Proceedings of the 3rd International Conference on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-3), Trondheim, Norway, 26-27 June, 2018. London: Taylor & Francis Group, 2018. P. 469–474.
20. Paige E. Snelling, Laurent Godin, Stephen D. McKinnon. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. V. 58. P. 166–179.
21. Rasskazov I.Yu., Saksin B.G., Petrov V.A., Shevchenko B.F., Usikov V.I., Gil'manova G.Z. Present Day Stress Strain State in the Upper Crust of the Amurian Lithosphere Plate. Izvestiya // Physics of the Solid Earth. 2014. V. 50. No. 3. P. 444–452.
22. Takemoto Shuzo, Momose Hideo, Araya Akito, etc. A 100 m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains // Journal of Geodynamics. 2006. V. 41. P. 23–29.
23. Urbancic T.I., Trifu C.I. and Young R.P. Spase-time variations in source parameters of mining-induced seismic events with $M < 0$ // Bulletin of the Seismological Society of America. 1993. V. 83. P. 378–397.
24. West M., J.J. Sanchez, S.R. McNutt. Periodically Triggered Seismicity at Mount Wrangell, Alaska, After the Sumatra Earthquake // Science. 2005. V. 308. P. 1144–1146.