

### Заключение

Обобщая опыт проведения мониторинговых и повторных гравиметрических наблюдений на Верхнекамском месторождении калийных солей, можно констатировать высокую эффективность метода. По сочетанию отрицательных локальных аномалий силы тяжести, которые интерпретируются как природные ослабленные зоны, с отрицательными динамическими аномалиями, выявленными по мониторинговым гравиметрическим наблюдениям, которые связаны с продолжением процесса разуплотнения, можно успешно прогнозировать участки опасных геологических процессов и повысить безопасность эксплуатации Верхнекамского месторождения.

По результатам долгосрочных периодических наблюдений гравитационного поля можно контролировать процесс оседаний земной поверхности, фиксируя циклы разуплотнения горных пород и последующих оседаний.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-45-59001Пр\_а).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балк П.И., Долгалъ А.С. Аддитивные методы решения обратных задач гравиразведки и магниторазведки. – М.: Науч. мир, 2020. – 456 с
2. Бычков С.Г. Выявление областей природного и техногенного разуплотнения подработанной толщи по гравиметрическим данным // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 55-58. DOI: 10.7242/echo.2020.1.12.
3. Бычков С.Г. Гравиметрический мониторинг: возможности, задачи, перспективы // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 146-149.
4. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А., Хохлова В.В. Гравиметрические исследования состояния геосреды в районах интенсивного освоения недр // Горный журнал. – 2019. – №12. – С. 90-94. – DOI:10.17580/gzh.2019.12.19.
5. Бычков С.Г., Симанов А.А., Хохлова В.В. Выявление природных и техногенных разуплотненных зон в подработанном массиве по данным высокоточных гравиметрических наблюдений // Геофизика. – 2020. – № 5. – С. 26-30.
6. Бычков С.Г., Симанов А.А., Хохлова В.В. Контроль процесса оседания земной поверхности по мониторинговым гравиметрическим наблюдениям // Инженерная и рудная геофизика – 2021: 17-я науч.-практ. конф. и выставка, 26-30 апр. 2021 г. – Геленджик, 2021. – DOI: 10.3997/2214-4609.202152028.
7. Симанов А.А. Мониторинговые наблюдения на гравиметрическом полигоне в г. Березники // Горное эхо. – 2021. – № 1 (82). – С. 95-99. – DOI: 10.7242/echo.2021.1.17.
8. Симанов А.А. Разработка методики мониторинговых гравиметрических исследований для изучения карстовых процессов // Горное эхо. – 2020. – № 2 (79). – С. 62-66. – DOI: 10.7242/echo.2020.2.12.
9. Bychkov S., Dolgal A., Simanov A. Interpretation of gravity monitoring data on geotechnical impact on the geological environment // Pure and applied geophysics. – 2021. – V. 178, № 1. – P. 107-121. – DOI: 10.1007/s00024-020-02640-8.

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2021.4.11

### СЕЙСМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОДУКТИВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СОЛЯНОЙ ТОЛЩИ

А.А. Жикин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** Рассмотрены особенности сейсмического моделирования условий залегания солей в зоне развития гипергенных процессов в пределах Верхнекамского месторождения. Сформирован комплекс

характерных признаков проявления вторичных пород в ряде кинематических и динамических параметров волнового поля. Представлены результаты и проанализированы этапы цифровой обработки синтетических данных с целью повышения информативности анализа сейсмических атрибутов.

**Ключевые слова:** геолого-геофизическая модель, сейсмическое моделирование, шахтная сейсморазведка, синтетический временной разрез.

Как правило, при проведении дополнительных работ по изучению калийного месторождения особое внимание уделяется участкам со сложным геологическим строением: в местах проявления интенсивных дизъюнктивных и пликтивных деформаций, в зонах неполного строения водозащитной толщи (ВЗТ), а так же в пределах участков залежи, подверженных процессам вторичного изменения под влиянием гипергенеза.

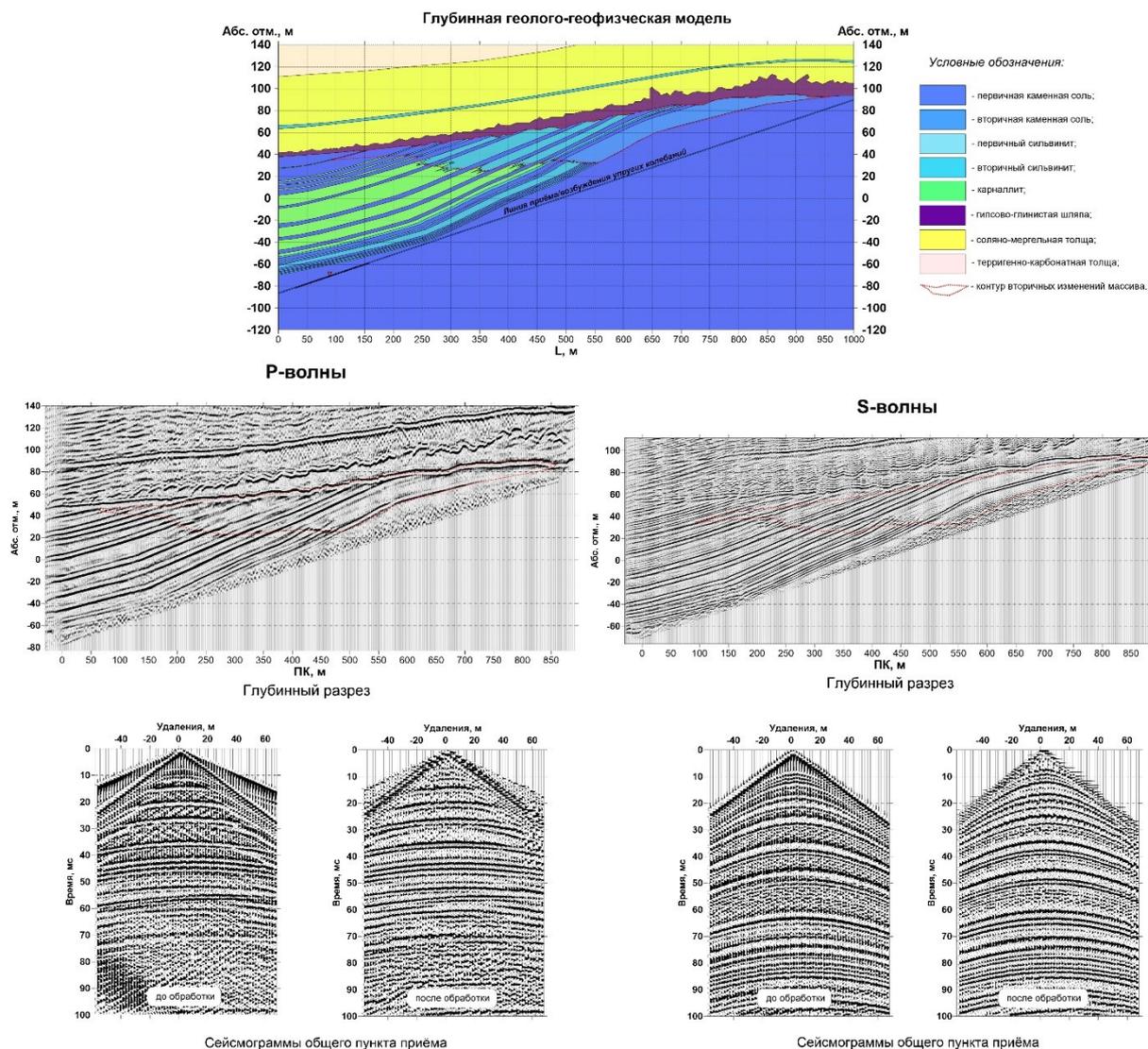
Наличием подобных участков аномального строения продуктивной толщи характеризуется Верхнекамское месторождение солей (ВКМКС). Объектами повышенного интереса выступают зоны выраженной локальной изменчивости минерального состава калийной залежи с размерами от одного до нескольких десятков квадратных километров [6]. Специалисты в области геологии и тектоники ВКМКС [2-6] разделяют такие зоны на типы согласно составу пород, морфологическим особенностям гипергенной залежи или взаимному расположению относительно крупных структур месторождения.

В целом из особенностей проявления гипергенных пород выделяется ряд наиболее характерных для ВКМКС, таких как:

- наличие гипсово-глинистых шляп (ГГШ) в пределах поднятий;
- неполный стратиграфический разрез соляной залежи, местами до полного выщелачивания карналлитового и сильвинитового комплексов;
- граница между гипергенно измененными породами, сформировавшимися в континентальных условиях, и соляными породами, отложившимися в солеродном бассейне и не претерпевшими постседиментационных преобразований, проходит по поверхности соляного зеркала [2];
- ярусное расположение пестрых (гипергенных) сильвинитов с постепенным сокращением их площади снизу вверх [6];
- выдержанный порядок чередования пестрых сильвинитов и карналлитовых пород: карналлитовые породы – пестрые сильвиниты (зона сильвинитизации) – каменная соль (зона галитизации), с характерным соответственным уменьшением мощности измененного слоя;
- наличие участков замещения продуктивных пластов каменной солью.

Обнаружение в пределах горного отвода пород, подверженных вторичным изменениям, может являться предиктором наличия в зоне их локализации опасных горно-геологических ситуаций. Основываясь на опыте использования дистанционных методов геофизического контроля, в частности шахтных сейсмоакустических наблюдений в горных выработках [1,7-10], предполагается проявление гипергенных пород в кинематических и динамических параметрах волновых полей.

С целью изучения особенностей распространения упругих волн и выявления наиболее информативных с позиции геологической интерпретации параметров, указывающих на размещение гипергенных сильвинитов и каменной соли в толще калиеносных пород, по обобщенным данным построена глубинная геолого-геофизическая модель, которая представляет собой вертикальный срез зоны развития гипергенных процессов в соленой толще, отражающий особенности геологического и тектонического строения, а так же ее структурные и физические характеристики.



**Рис. 1.** Результаты моделирования вторичных изменений продуктивных отложений

Расчет синтетических сейсмограмм выполнен в полноволновом моделирующем пакете Tesseral Engineering, адаптированном для решения малоглубинных задач. Получена синтетика с использованием 2.5D-вискоэластического моделирования с учетом эффектов обмена, анизотропии, трещиноватости и поглощения сейсмической энергии.

Модель представляет собой левое крыло антиклинальной структуры с полным выщелачиванием калиеносной толщи к ее вершине (рис. 1), продуктивные пласты выклиниваются на поверхность соляного зеркала, сверху соляной комплекс перекрывается слоем пород вторичного литогенеза – гипсово-глинистой шляпой (ГГШ). Физические свойства горных пород, использованных для создания модели (таблица 1), представляют средние величины по ВКМКС и определены по скважинным геофизическим методам.

С целью получения максимально достоверной фактологической базы определяемых параметров волнового поля учтены следующие структурные особенности: сформированы тонкослоистые интервалы залегания, оформлены несогласованные переходы неизменная→гипергенная соль и сложнопостроенная поверхность соляного зеркала и кровли ГГШ. Для контроля формирования отражений от кровли ГГШ в слое СМТ задан тонкий пласт каменной соли. Во избежание деструктивной интерференции

от слоя маркирующая глина, обычно расположенного чуть ниже продуктивной толщи, данный слой исключен из расчетной модели.

Таблица 1

Физические свойства горных пород

Порода	Скорость продольной волны (VP), м/с	Скорость поперечной волны (VS), м/с	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Первичная каменная соль	4500	2650	2.1
Гипергенная каменная соль	4400	2600	2.1
Карналлит	3800	2200	2.0
Пестрый сильвинит (гипергенный)	4400	2600	2.1
Полосчатый сильвинит (первичный)	4300	2400	1.9
ГГШ (Гипсово-глинистая шляпа)	5000	3000	2.3
СМТ (Соляно-мергельная толща)	3400	2000	2.3
ТКТ (Терригенно-карбонатная толща)	2800	1800	2.4

Таблица 2

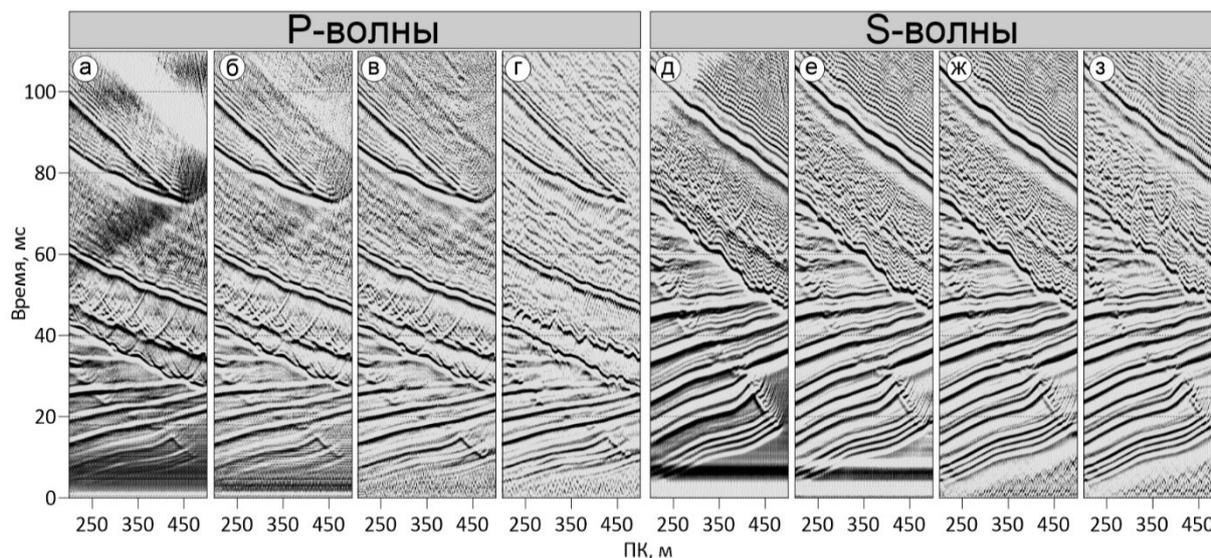
Параметры системы наблюдения

Тип системы наблюдения	симметричная
Шаг пунктов приема	2 м
Шаг пунктов возбуждения	2 м
Максимальное удаление источник-приемник	68 м
Шаг дискретизации	0.1 мс
Длина записи	150 мс
Тип источника	точечный
Тип сигнала	одионый
Максимальная частота сигнала	800 Гц

Линия возбуждения совпадает с линией приема и располагается ниже контура продуктивной залежи в массиве каменной соли (рис. 1). В сумме рассчитано два ансамбля трасс для продольных (P) и поперечных волн (S), по 430 сейсмограмм общего пункта возбуждения для каждого типа, с использованием параметров системы наблюдения, указанных в таблице 2.

Анализ суммарных временных разрезов, полученных по исходным синтетическим трассам, выявил высокую степень зашумленности, особенно в начальном интервале записи до 40 мс для S-волн (рис. 2д) и практически во всем полезном интервале регистрации P-волн (рис. 2а). Кроме того, отмечается повсеместная деконструкция осей

синфазности целевых отражающих границ различными комплексами низко и средне-скоростных волн-помех, а также интенсивными дифракционными событиями, возникающими от структур сложной формы.



**Рис. 2.** Фрагменты синтетических временных разрезов, полученных для продольных и поперечных волн, на различных этапах обработки:  
а, д – ввод кинематических поправок; б, е – результат пространственно-временной фильтрации;  
в, ж – рекурсивная фильтрация; г, е – предсказывающая деконволюция, полосовая фильтрация и миграция Столта

Минимизировать вышеуказанные эффекты на результирующих волновых полях удалось с применением специализированной цифровой обработки, включающей в себя процедуры пространственно-временной, рекурсивной и полосовой фильтрации. Миграционные преобразования во временной области, выполненные по методу Столта с постоянной скоростью, избавили от искажений, вносимых за счет сейсмического сноса и дифрагированных волн. Полосовая фильтрация в интервале 100-800 Гц, предсказывающая деконволюция, масштабирование сигнала и суммирование по методу общей глубинной точки (ОГТ) повысили разрешенность сейсмической записи, ослабили влияние кратных волн и низкочастотных составляющих волн-помех.

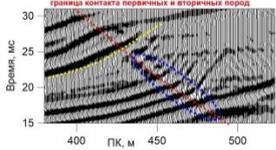
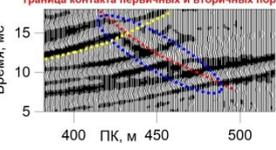
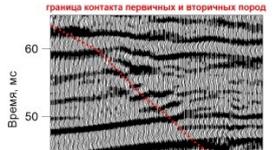
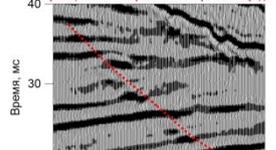
Преобразование годографов в линии  $t_0$  (кинематические поправки) с последующим суммированием выполнено с использованием постоянных скоростей: для S-волн – 2500 м/с, для P-волн – 4500 м/с.

Для решения задачи локализации вторично измененных солей в продуктивной толще с применением технологии моделирования шахтных сейсмоакустических наблюдений рассчитаны параметры сейсмической записи. По опыту исследований выявлено, что наиболее информативно значимые характеристики волновых полей представлены следующими атрибутами: амплитуда и частота сигнала, отношения сигнал/помеха, скоростная характеристика временного разреза.

Анализ распределения представленных параметров позволил сформировать набор признаков, свидетельствующих о присутствии гипергенных солей в разрезе. Наличие аномалии «яркое пятно», увеличение частотного состава записи и аномальное распределение значений отношения сигнал/помеха представляются наиболее характерными признаками проявления вторичных солей (таблица 3).

Таблица 3

Характерные признаки проявления вторичных пород в массиве продуктивной толщи по данным моделирования

	Амплитуда	Частота	Сигнал/помеха	Эффективная скорость
<p><b>Гипергенная каменная соль</b></p>	<p><b>S-волны:</b></p>  <p>на контакте первичный сильвинит-гипергенная соль потеря корреляции по сильвиниту, интенсивные дифракции, резкое изменение наклона оси синфазности вышележащего горизонта из-за наличия высокоскоростного слоя каменной соли</p> <p><b>P-волны:</b></p>  <p>потеря корреляции, наличие аномалии «яркое пятно» в месте контакта, искажения осей вышележащих отражений из-за высокоскоростного слоя</p>	<p><b>S-волны:</b></p> <p>значительный скачок частоты сигнала на контакте (~50-60%), затем пониженные значения при большой протяженности пласта гипергенной соли</p> <p><b>P-волны:</b></p> <p>увеличение частоты сигнала (~20-30%) на контакте</p>	<p><b>S-волны:</b></p> <p>резкое падение значения отношения сигнал/помеха на контакте (с 27 до 7)</p> <p><b>P-волны:</b></p> <p>ввиду наличия аномалии «яркое пятно» наблюдается незначительное увеличение значений параметра (с 21 до 26)</p>	<p><b>S-волны:</b></p> <p>незначительное увеличение эфф. скорости над пластом гипергенной соли (над пластом 2550, в пласте 2450 м/с)</p> <p><b>P-волны:</b></p> <p>равномерное распределение скоростей в пласте с небольшим увеличением на контакте (изменение на ~40-70 мс)</p>
<p><b>Гипергенный сильвинит</b></p>	<p><b>S-волны:</b></p>  <p><b>P-волны:</b></p>  <p>для обоих типов волн наблюдается наличие аномалий «яркое пятно» на контакте карналлит-вторичный сильвинит</p>	<p><b>S-волны:</b></p> <p>скачок частоты сигнала на контакте (~30-40%), с дальнейшим сохранением высоких показателей по пласту гипергенного сильвинита</p> <p><b>P-волны:</b></p> <p>незначительное увеличение частоты на контакте (~10-15 %)</p>	<p><b>P и S-волны:</b></p> <p>ввиду наличия аномалий «яркое пятно» наблюдается увеличение значений параметра для обеих типов волн на контакте, могут возникать локальные зоны уменьшения значений при резкой потере корреляции отражающей границы</p>	<p><b>P и S-волны:</b></p> <p>Характерных признаков влияния контактов карналлит-гипергенный сильвинит на значения эфф. скоростей не обнаружено</p>

Моделирование условий залегания солей в зоне развития гипергенных процессов может способствовать более оперативному обнаружению опасных горно-геологических ситуаций. Полученная модель не является универсальной, а лишь отражает один из возможных вариантов залегания измененных солей. Синтетические расчеты широкого разнообразия обстановок залегания вторичных руд на основе физико-геологических моделей обеспечат горнодобывающую промышленность обширной фактологической базой признаков их проявления.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-45-590015)*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Байбакова Т.В., Ярославцев А.Г., Миронов С.А. Шахтные сейсмические исследования литологических неоднородностей // Инженерная и рудная геофизика – 2020: 16-я науч.-практ. конф., 14-18 сент. 2020. – Пермь, 2020. – DOI: 10.3997/2214-4609.202051061.
2. Бельтюков Г.В. Карстовые и гипергенные процессы в эвапоритах: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук: 04.00.01 / Бельтюков Герман Всеволодович. – Пермь, 2000. – 42с.
3. Джиноридзе Н.М., Мелкова Н.В., Павленский А.Н., Ковалевич В.М., Кузнецов Н.В., Плотников Ю.А. К проблеме происхождения зон замещения в пределах Верхнекамского месторождения калийных солей // Условия образования месторождений калийных солей: сб. науч. тр. / Ин-т геологии и геофизики АН СССР, Сиб. отд-ние. – Новосибирск, 1990. – С. 165-174.
4. Иванов А.А. О пестрых сильвинитах Верхнекамского месторождения калийных солей // Геология месторождений калийных солей: [сб. ст.]. – Л., 1963. – С. 153-180. – (Тр. ВСЕГЕИ. Нов. сер. Т. 99).
5. Копнин В.И. Строение водозащитной толщи Верхнекамского месторождения и вопросы ее формирования // Проблемы изучения водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных солей: материалы II регион. совещ. / АО «Уралкалий». – Березники, 1991. – С. 56-65.
6. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. – 2-изд., перераб. – М.: Эпсилон Плюс, 2013. – 368
7. Санфилов И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / ГИ УрО РАН. – Екатеринбург, 1996. – 168.
8. Санфилов И., Бабкин А., Ярославцев А., Герасимова И., Фаткин К., Глебов С. Картирование локальных нарушений водозащитной толщи комплексом многоуровневых сейсморазведочных исследований различной размерности // Инженерная и рудная геофизика – 2019: 15-я юбилейная конф. и выставка, 22-26 апр. 2019. – Геленджик, 2019. – С. 485-495. – DOI: 10.3997/2214-4609.201901743.
9. Санфилов И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г. Комплексные методические решения в шахтной сейсмоакустике // Геофизика. – 2014. – № 5. – С. 10-15.
10. Ярославцев А.Г., Фаткин К.Б. Шахтные сейсмоакустические исследования при контроле предохранительных целиков в калийных рудниках // Инженерная и рудная геофизика – 2020: 16-я науч.-практ. конф., 14-18 сент. 2020. – Пермь, 2020. – DOI: 10.3997/2214-4609.202051043.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2021.4.12

## ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ МОНИТОРИНГОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Е.С. Зубрикова, А.А. Тайницкий  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** В работе приводятся результаты мониторинговых электроразведочных наблюдений методом сопротивлений, выполненных в окрестностях обрушения на шахтном поле ВКМКС. Построенные схемы изменения кажущегося сопротивления во времени отражают процессы укрепления горного массива посредством закладки провала и закачивания по скважинам глинистого материала.

**Ключевые слова:** электроразведка, шахтное поле, провал, мониторинг, симметричное электропрофилеирование, кажущееся сопротивление, закладочный материал.