

**Рис. 3.** Результаты определения скоростей вдоль профиля вблизи строящегося шахтного ствола без учета геометрического отношения (а) и для отношения менее 0,75 (б). Интервал действия скважин заморозки показан прямоугольником

Таким образом, для повышения точности скоростного анализа предлагается использовать коэффициенты скоростного спектра в качестве весовых множителей при построении распределений эффективных скоростей. Кроме этого, скоростной анализ целесообразно проводить с учетом отношения длины годографа к ожидаемой глубине отражения ( $L/H$ ).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санфиров И.А., Жикин А.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И. Идеи А.К. Урупова в скоростном анализе данных малоглубинной сейсморазведки // Геофизика. – 2013. – № 5. – С. 12-16.
2. Neidell N.S., Taner M.T. Semblance and other similarity measurements // Geophysics. – 1971. – № 36(3). – P. 482-497.
3. Fomel S. Velocity analysis using AB semblance // Geophysical Prospecting. – 2009. – № 57. – P. 311-321. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2008.00741.x.
4. Gan S., Wang S., Chen Y., Qu S., Zu S. Velocity analysis of simultaneous-source data using high-resolution semblance – coping with the strong noise // Geophysical Journal International. – 2016. – V. 204, № 2. – P. 768-779.
5. Deng P., Chen Y., Zhang Y., Zhou H-W. Weighted stacking of seismic AVO data using hybrid AB semblance and local similarity // Journal of Geophysics and Engineering. – 2016. – V. 13, № 2. – P. 152-163. DOI: 10.1088/1742-2132/13/2/152.
6. Пригара А.М. Прогноз строения и свойств горного массива на основе сейсмомоделирования: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16: защищена 28.11.03 / Пригара Андрей Михайлович. – Пермь, 2003. – 140 с.
7. Урупов А.К., Левин А.Н. Определение и интерпретация скоростей в методе отраженных волн. – М., Недра, 1985. – 288 с.: ил.
8. Маловичко А.А. Новое представление годографа отраженных волн для горизонтально-слоистых сред // Прикладная геофизика. Вып. 91. – М., 1978. – С. 47-53.
9. Luo S., Hale D. Velocity analysis using weighted semblance // Geophysics. – 2012. – V. 77, № 2. – P. U15 - U22. DOI: 10.1190/geo2011-0034.1.
10. Бляс Э.А. Новый взгляд на скорости ОГТ в слоистых латерально-неоднородных средах: аналитическое и численное исследование // Технологии сейсморазведки. – 2005. – № 3. – С. 7-25.

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2019.3.15

## ОТРАЖЕНИЕ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ СТВОЛОВ В СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЛНОВОМ ПОЛЕ

А.Г. ЯРОСЛАВЦЕВ

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Рассматривается возможность использования сейсмоакустических методов для контроля толщины ледопородного ограждения на различных стадиях строительства шахтных стволов. Приводится методическое обоснование реализации технологии сейсмоакустического просвечивания замороженной части массива с использованием отраженных волн. Сейсмоакустическое профилирование по технологии общей глубинной точки (скважинное ОГТ) предлагается проводить в специальной контрольно-термометрической скважине, пробуренной с внешней стороны контура заморозки. В сравнении с известными ультразвуковыми методами, основным техническим результатом предлагаемых технологий является снижение трудозатрат и повышение надежности определения толщины промерзания породного массива.

**Ключевые слова:** контроль ледопородного ограждения, шахтные стволы, сейсмоакустика, скважинное просвечивание, инженерная сейсморазведка.

Искусственное замораживание грунтов, является одним из основных специальных способов, применяемых при строительстве шахт, тоннелей, метрополитенов в сложных гидрогеологических условиях [8, 9]. При подземной разработке соляных месторождений формирование ледопородного ограждения (ЛПО) применяется, как правило, на начальной стадии строительства – проходке вертикальных шахтных стволов.

Целевой интервал формирования ЛПО определяется глубиной распространения в разрезе водоносных рыхлых и водоносных трещиноватых пород. Например, для Верхнекамского и Старобинского месторождений требуемая глубина замораживания не превышает 150-300 м. В этом интервале геологический разрез достаточно дифференцирован по вертикали и содержит несколько водоносных горизонтов.

При замораживании часть горных пород в окрестности замораживающих скважин меняет свои физико-механические свойства – плотность, угол внутреннего трения, сцепление и др. На основе изменения значений свойств пород, в первую очередь, рассчитываются проектные параметры ЛПО, при достижении которых становится возможной безопасная проходка шахтного ствола. Во-вторых, замораживание породного массива приводит к изменению его акустической жесткости, т.е., по сути, в вертикальном направлении вдоль ствола образуются контрастные акустические границы, при переходе через которые упругая волна будет менять свои кинематические и динамические параметры. Экспериментально [1, 2] определено, что при замораживании грунтов происходит скачкообразное (до 200-300 %) изменение скорости упругих волн. Причем нарастание скоростей упругих волн зависит как от природной влажности, так и от литологического состава [7].

Эти факторы обуславливают возможность использования на этапе геотехнического контроля параметров ЛПО различных сейсмоакустических [СП 32-105-2004, Табл. 6.7.1] и ультразвуковых методов [СП 45.13330.2012, Табл. 19.1]. Наиболее традиционные методы контроля основаны на данных гидрогеологических наблюдений и на результатах расчета температурного режима пород в специальных контрольно-наблюдательных скважинах [3]. При этом ни один из методов контроля формирования ЛПО, предусмотренных нормативными документами (термометрия, гидрогеология, ультразвук), не несет информации о наличии в околоствольном пространстве ослабленных по физическим свойствам зон, которые могут оказывать существенное негативное влияние как на устойчивость ЛПО о время проходки ствола, так и на крепь действующего ствола, после оттаивания породного массива.

Значительное развитие к настоящему времени аппаратной базы для сейсмоакустических исследований, позволяет предложить использовать в комплексе мер контроля состояния ЛПО хорошо зарекомендовавшую себя в условиях соляных шахт [4, 6] наземную высококоразрешающую инженерную сейсморазведку на отраженных волнах, регистрируемых по методике многократных перекрытий. В тоже время, формирование специфических сейсмогеологических условий в виде квазивертикальных физических границ создает предпосылки использования оригинальной скважинной сейсмоакустической технологии, при которой регистрация и обработка данных основана на принципах систем интерференционного.

#### **Наземная инженерная сейсморазведка**

Основной задачей для наземной инженерной сейсморазведки при комплексном контроле состояния ЛПО является локализация в околоствольном пространстве зон физико-геологических неоднородностей, которые могут значительно снижать скорость строительства ствола. Интенсификация потока подземных вод в трещиноватых зонах или присутствие в них рассолов не позволяют в достаточной степени проморозить околоствольный массив. Также риск возникновения нештатных ситуаций в направлении ослабленных зон повышается на этапе полного оттаивания массива и нагружения крепи выработок напорным давлением со стороны водоносных пластов.

В общем случае инженерные сейсморазведочные наблюдения предлагается проводить по сети профилей параметры которой определяются сейсмогеологическими особенностями площади исследований и горизонтальной разрешающей способностью сейсмического метода. Профильные линии должны выходить за пределы предположительно нарушенной зоны массива, как минимум на длину расстановки, которая сравнима с диаметром первой зоны Френеля ( $D_F$ ) на максимальной целевой глубине поиска. На профильных линиях, расположенных в непосредственной близости от ствола, применяются как продольные, так и непродольные системы наблюдений. Чтобы исключить пропуск значимых по размерам неоднородностей, расстояние между продольными профилями по возможности не должно быть значительно больше оценок  $D_F$  для целевого интервала геологического разреза.

Для выявления в околоствольном массиве ослабленных трещиноватых зон используются суммарные временные разрезы (рис.1.) общей глубинной точки (ОГТ). Дополнительно привлекаются динамические и кинематические характеристики. При интерпретации такого набора данных, в первую очередь, выполняется стратиграфическая увязка данных контрольно-стволовой скважины и выделенных на временных разрезах отражающих горизонтов (ОГ). Далее проводится качественный анализ волновой картины, заключающийся в изучении рисунка суммарных сейсмозаписей и пространственно-временного распределения их динамических и кинематических характеристик.

Основные интерпретационные заключения основываются на площадном распределении анализируемых сейсмических параметров, в том числе учитываются их изменения в различных интервалах разреза, регистрируемые на разных этапах замораживания массива (рис.2). Несмотря на то, что они представляют достаточно интегральные оценки, по ним прогнозируются участки массива, где можно ожидать непроектных параметров ЛПО на конкретном этапе заморозки.

Основные осложнения при проведении наземной инженерной сейсморазведки ОГТ, в пределах участков строительства шахтных стволов, которые могут снижать достоверность итоговых результатов, связаны со значительным изменением поверхностных условий от этапа к этапу. Если на первом этапе «до заморозки» полевые наблюдения проводятся практически «в чистом поле», то на «промежуточном» этапе и на этапе «полной заморозки» происходит значительная трансформация поверхности за счет бетонирования площадок, выемки грунта, строительства горнопроходческой инфраструктуры. В связи с этим представляется необходимым планирование наземных сейсморазведочных мониторинговых исследований еще на этапе разработки проекта ствола.

#### Скважинная сейсмоакустика

Как уже отмечалось, решение задачи определения толщины ледопородного ограждения на разных этапах его формирования может быть достигнуто скважинными исследованиями. При переносе сейсморазведочных наблюдений во внутренние точки среды увеличивается частотный состав регистрируемых сейсмических сигналов и повышается их информативность за счёт оптимального направления распространения упругих волн относительно квазивертикальной неоднородности разреза.

Методическое обоснование предлагаемой сейсморазведочной технологии, базируется на опыте шахтных сейсмоакустических исследований.

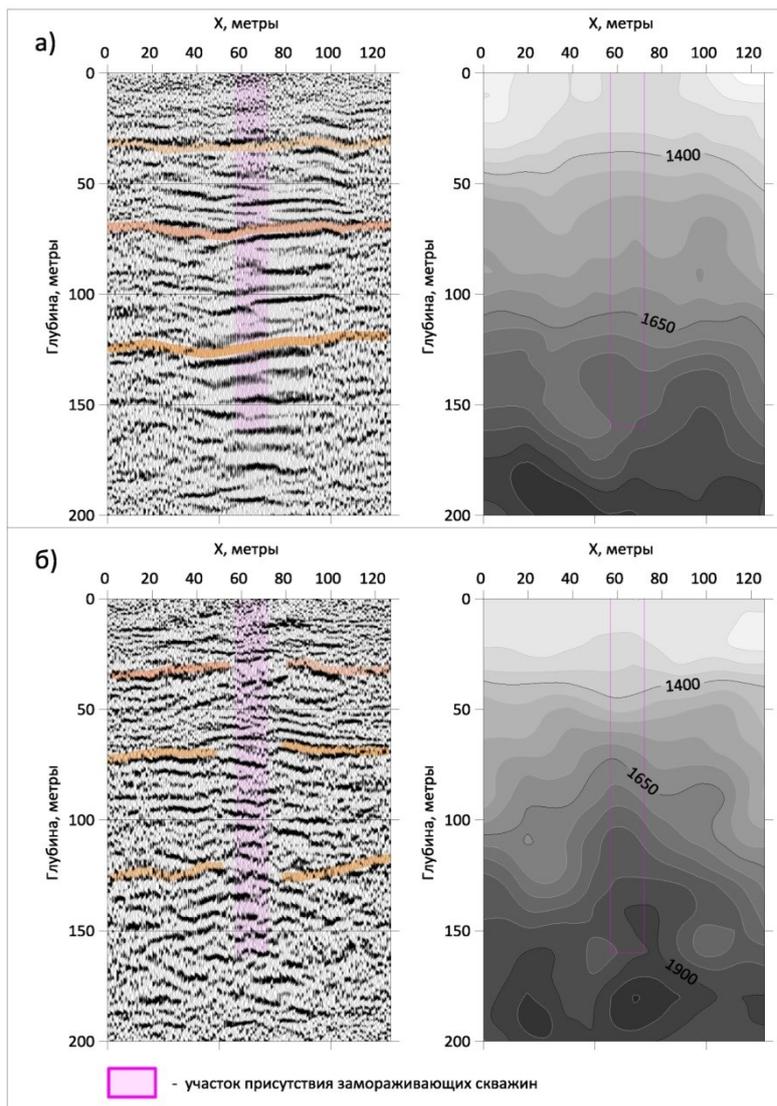
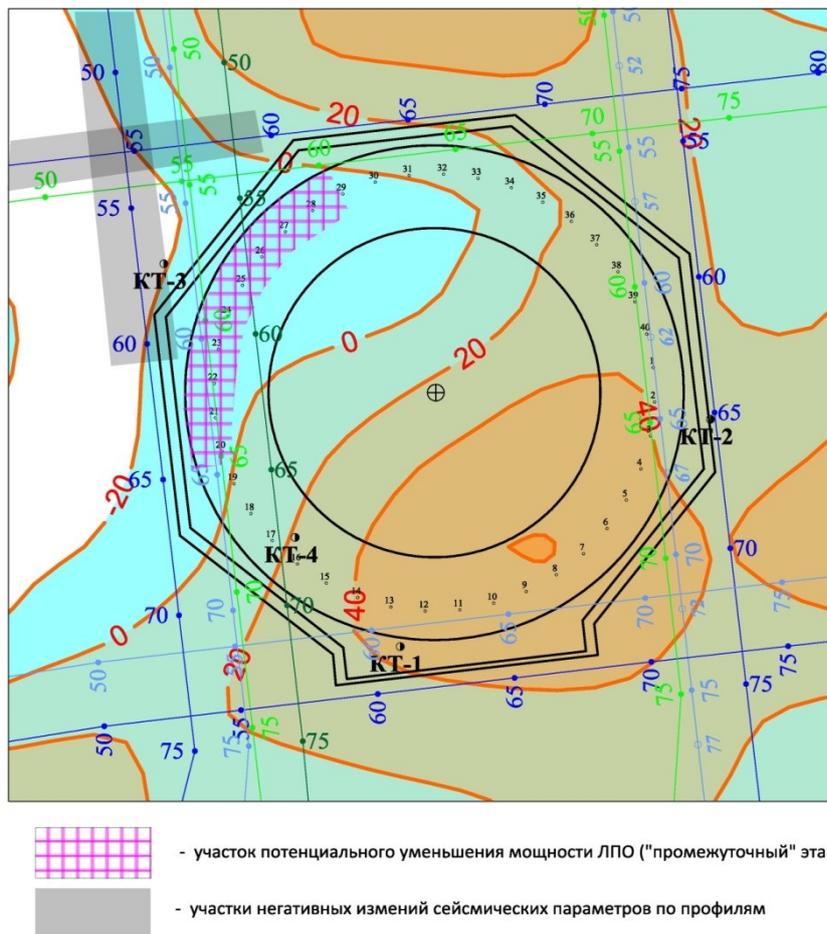


Рис. 1. Сравнение результатов цифровой обработки по одноименному профилю: а) до заморозки, б) на этапе формирования ЛПО



**Рис. 2.** Схема временной изменчивости скоростей упругих колебаний в интервале 88-158 м на «промежуточном» этапе заморозки

ское профилирование по технологии общей глубинной точки (скважинное ОГТ) предлагается проводить в специальной или заложённой в проект контрольно-термической скважине, пробуренной с внешней стороны контура заморозки. Сеймотрассы, зарегистрированные в контрольной скважине, формируются в последовательности профилирования вниз по стволу в виде сейсмограмм ОПВ. Координаты сейсмограмм соответствуют глубине погружения источника и соответственно ближайшей к нему трассы.

С учетом проектной мощности ЛПО (2 и более метров) и его фактического удаления от контрольной скважины, требуемая разрешённость сейсмических исследований в горизонтальном направлении излучения должна составлять не более 1 м при достаточной энергетике излучаемых сейсмических сигналов. Получение требуемого частотного диапазона предлагается решать за счёт использования достаточно распространенных аппаратных решений.

При практических экспериментах нами использован электроискровой источник типа «Спаркер», предназначенный для возбуждения продольных волн в водонаполненных скважинах с диапазоном рабочих энергий до 1000 Дж. Для регистрации использован гидрофонный зонд («Geometrics», США), обеспечивающий равномерность АЧХ каналов на уровне  $\pm 1$  дБ в диапазоне 10 – 10.000 Гц. Активная часть кабеля состоит из 24 каналов с шагом 1 м.

Зарегистрированные данные подвергаются цифровой обработке в рамках известной технологии ОГТ, т.е. в рамках идеологии выделения отражающих горизонтов в слоистой среде (в нашем случае вертикально слоистой). По результирующим волновым полям определяют времена вступления и скорости распространения продольных волн, отраженных от вертикальных границ, образовавшихся при замораживании породного массива, на основании чего судят о толщине ледопородного ограждения (рис.3), сформированного на текущем этапе замораживания.

За счет особенностей конфигурации выработанного пространства возможны исследования с различной пространственной ориентацией, комплексирование которых формирует объемные представления об особенностях строения и свойствах породного массива в окрестностях горной выработки. Одно из наиболее востребованных направлений шахтных сейсмоакустических исследований – просвечивание с применением отраженных волн [5]. При этом в отличие от акустического просвечивания между двумя разнесенными выработками линия приема и линия возбуждения совмещены в пределах одной горной выработки.

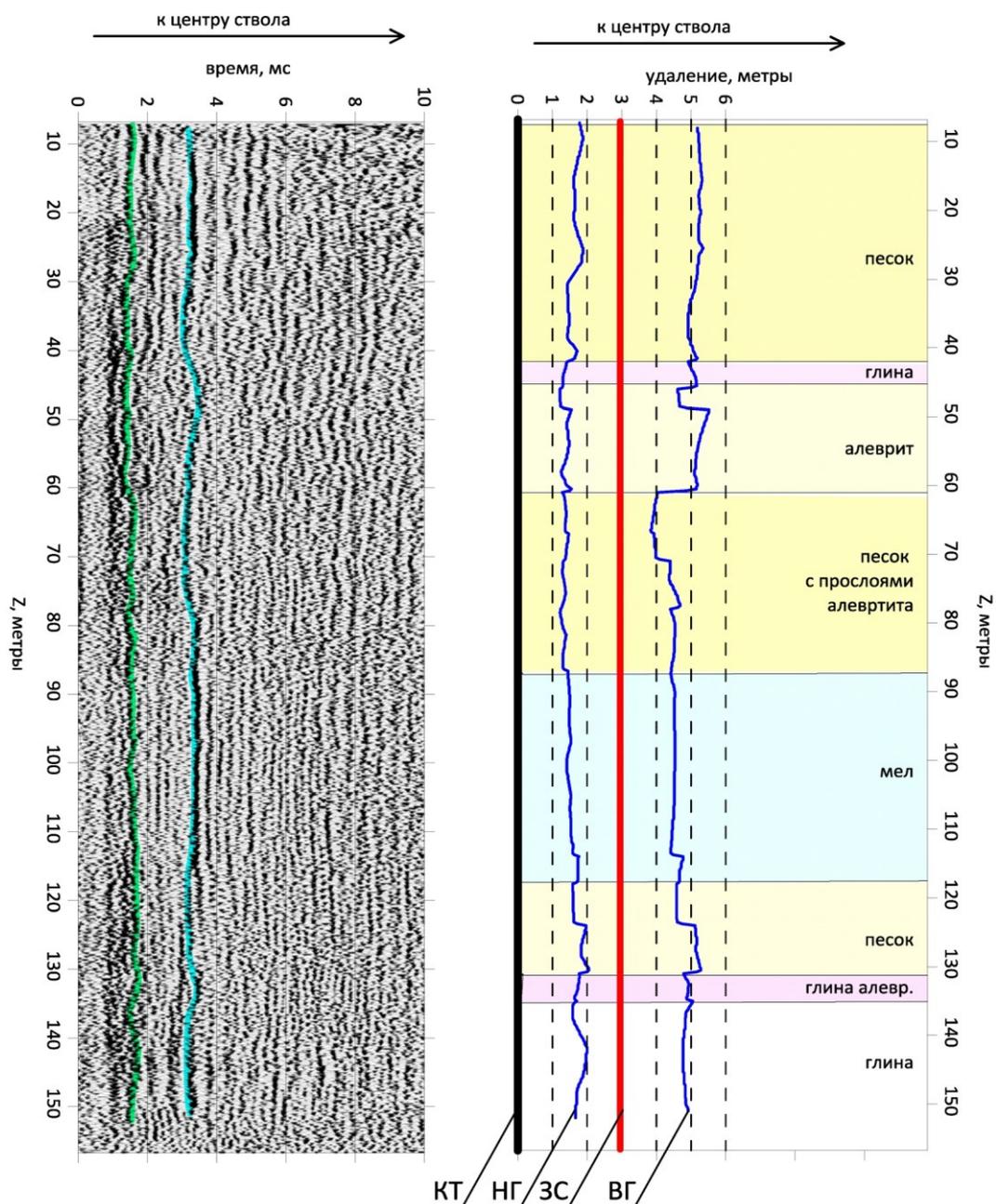
Аналогичный методический подход возможно реализовать в скважинных сейсмоакустических исследованиях при контроле толщины ЛПО. Сейсмоакустиче-

**Выводы**

Таким образом, результаты практических экспериментов, выполненных в пределах строящихся шахтных стволов на соляных месторождениях, показали, что инженерные сейсморазведочные технологии на отраженных волнах представляется вполне эффективным инструментом при решении задачи контроля качества формирования ледяных ограждений.

В сравнении с известными акустическими методами, основным техническим результатом предлагаемых технологий является, снижение трудозатрат и повышение надежности определения толщины промерзания породного массива на конкретном этапе заморозки ствола.

Предлагаемая технология сейсмоакустических исследований во внутренних точках среды (скважинное ОГТ) потенциально может быть использована при подземном строительстве для контроля результатов специальных мероприятий по укреплению грунтов, подразумевающих значимое изменение их физико-механических свойств.



**Рис. 3.** Результат интерпретации скважинного ОГТ: КТ – контрольно-термометрическая скважина (она же для сейсмометрических наблюдений), ЗС – замораживающая скважина, ВГ – внутренняя граница ЛПО, НГ – наружная граница ЛПО

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архипов А.Г. Искусственное замораживание грунтов и контроль сплошности ледогрунтовых ограждений методом межскважинного акустического просвечивания: Сайт ООО «Геодиагностика». – [СПб.], 2012–2016. – URL: <https://geodiagnosics.ru/ControlLGO.htm> (дата обращения: 27.02.2019). – Текст: электронный.
2. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / под ред. Н.Н. Горяинова. – М.: Недра, 1992. – 259 с.: ил.
3. Желнин М.С., Плехов О.А., Семин М.А., Левин Л.Ю. Численное решение обратной задачи определения объемной теплоемкости породного массива в процессе искусственного замораживания // Вестн. ПНИПУ: Механика. – 2017. – № 4. – С. 56-75. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.05.
4. Санфиоров И.А. Бабкин А.И. Ярославцев А.Г. Прийма Г.Ю. Фатькин К.Б. Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 53-58.
5. Санфиоров И.А. Бабкин А.И. Ярославцев А.Г. Комплексные методические решения в шахтной сейсмоакустике // Геофизика. – 2014. – № 5. – С. 10-15.
6. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин Ю.И., Прийма Г.Ю., Чугаев А.В. Применение малоглубинной сейсморазведки отраженными волнами для оценки состояния околоствольного массива // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 12. – С. 31-33.
7. Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли. – 2014. – Т. XVIII, № 2. – С. 83-90.
8. Трупаков Н.Г. Замораживание грунтов при сооружении вертикальных шахтных стволов. – М.: Недра, 1983. – 270 с.: ил.
9. Шуплик М.Н. Специальные способы строительства подземных сооружений // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2013. – № S1. – С.595-625.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2019.3.16

### ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИНТЕРВАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ В ПРЕДЕЛАХ АВАРИЙНОГО УЧАСТКА СКРУ-2

М.М. КАЛАШНИКОВА

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Малоглубинные сейсморазведочные исследования на аварийном участке СКРУ-2 проводятся с 1995 года силами Горного института. На участке аварии развернута сеть комплексного мониторинга за состоянием водозащитной толщи, включающая маркшейдерский, геомеханический, сейсмологический и сейсмический и другие виды контроля с целью оценки и предупреждения негативных последствий аварии на руднике. В статье представлены результаты мониторинговых исследований на подработанной территории аварийного участка.

**Ключевые слова:** малоглубинная сейсморазведка, интерпретации сейсморазведочных данных, осложнения волнового поля, мониторинг.

Малоглубинные сейсморазведочные исследования на аварийном участке СКРУ-2 проводятся с 1995 года силами Горного института. На участке аварии развернута сеть комплексного мониторинга за состоянием водозащитной толщи, включающая маркшейдерский, геомеханический, сейсмологический и сейсмический и другие виды контроля.

Участок аварии находится в пределах достаточно сложной в геологическом отношении территории. В тектоническом отношении это склоновая часть Соликамской брахиантиклинали. Интенсивность складчатости соляных пластов, ее характер и размеры изменяются как в плане, так и по разрезу. В южной части зоны обрушения расположен обширный участок замещения карналлита пласта В пестрым силвинитом, в пределах которого проводилась трехпластовая отработка. К особенностям строения разреза участка также относится резкое увеличение мощности глинистых тел в нижней части соляно-мергельной толщи, разрывы в надсоляной толще, зона аномального строения водозащитной толщи 3 группы, выделяемая по горно-геологическим данным [2]. Все эти параметры естественной и техногенной природы сложным образом влияют на характер регистрируемого волнового поля, вызывая аномалии различной интенсивности.

В 2018 году, с целью контроля изменений состояния горного массива ежемесячно проводились сейсморазведочные наблюдения. В пределах аварийного участка развернута сеть из 21-ти профильных линий (рис. 1). Для каждого этапа исследований по объективным технологическим причинам выбиралась разная компоновка профильных линий в пределах исследуемого участка.