

УДК 550.834

**КОНТРОЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ШАХТНОГО СТВОЛА
КОМПЛЕКСОМ НАЗЕМНЫХ И СКВАЖИННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ МЕТОДОВ**

И. А. Санфиров, А. Г. Ярославцев, А. В. Чугаев, А. И. Бабкин, Т. В. Байбакова

*Горный институт УрО РАН, E-mail: chugaev@mi-perm.ru,
ул. Сибирская, 78-А, 614007, г. Пермь, Россия*

Рассмотрена возможность контроля ледопородного ограждения, возводимого при строительстве шахтных стволов на соляных месторождениях, комплексом сейсмических методов. Малоглубинная сейсморазведка локализует участки с ослаблением свойств пород и интенсификацией водных потоков в околоствольном пространстве. Скважинные методы, включающие межскважинное просвечивание и способ скважинного вертикального профилирования по методике общей глубинной точки, позволяют определить мощность замерзшей породы. Предлагаемый комплекс направлен на снижение рисков аварийных ситуаций при строительстве шахтных стволов.

Дистанционный контроль, ледопородное ограждение, заморозка грунтов, шахтный ствол, сейсмоакустика, ультразвуковой каротаж, межскважинное просвечивание, малоглубинная сейсморазведка

DOI: 10.15372/FTPRPI20200304

Строительство подземной части рудника на соляном месторождении начинается с проходки шахтных стволов — сложного горнотехнического объекта, пересекающего толщу пород от поверхности до продуктивных отложений, которая включает один или несколько водоносных горизонтов, что является наибольшей проблемой при строительстве и дальнейшей эксплуатации стволов. Для исключения возможности проникновения пресных вод в строящиеся стволы необходимо сформировать специальную гидроизоляционную защиту. Наиболее надежный способ — искусственное замораживание горных пород. В зависимости от литологии и физико-механических свойств конкретного интервала разреза требуется определенная толщина ледопородного ограждения. Контроль состояния и толщины ледопородного ограждения — обязательное условие для безопасной проходки шахтных стволов. Для этого применяются разные сейсмоакустические методы в комплексе с данными непрерывных термометрических измерений [1–4]. Наиболее востребованные — методы межскважинного сейсмоакустического просвечивания и ультразвукового каротажа, выполняемого в контуре замораживающих колонн. Наземные высокоразрешающие сейсморазведочные методики, базирующиеся на отраженных волнах, позволяют успешно решать задачи локализации ослабленных зон вокруг тоннелей, потерн, горных выработок различного назначения [5–8].

Использование каждого из методов отдельно имеет ряд недостатков: с помощью только наземных методик невозможно достоверно определить текущую мощность ледопородного ограждения. При рекомендуемом в нормативных документах ультразвуковым контроле ледопородного ограждения не предполагается получение знаний о свойствах окружающего породного массива. Не всегда возможно вывести из работы замораживающие колонны для выполнения измерений ледопородного ограждения на конкретном этапе заморозки.

В настоящей работе предложено комплексирование сейсморазведочных методик различных масштабных уровней, позволяющих установить геометрические параметры ледопородного ограждения и расширить представление о физико-геологических неоднородностях в околоствольном пространстве, влияющих на его формирование. Разработан новый способ контроля мощности ледопородного ограждения, основанный на применении отраженных волн по методике общей глубинной точки в скважинном варианте [9]. С помощью данного комплекса сейсмических исследований предлагается контролировать процесс формирования ледопородного ограждения в режиме мониторинга.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проходка вертикальных шахтных стволов с использованием заморозки велась еще в Советском Союзе с 30-х гг. XX в. Ледопородное ограждение образуется вокруг строящегося ствола в целях гидроизоляции при проходке ствола и сохраняется до завершения строительства тубинговой или бетонной крепи. Контроль создания ледопородного ограждения предполагает изучение свойств грунтов до заморозки и на разных стадиях замораживания. Основная опасность при строительстве — недоучет наличия в околоствольном пространстве трещиноватых ослабленных зон. Интенсификация потока подземных вод или присутствие рассолов в этих зонах не позволяют достаточно проморозить околоствольный массив, в результате чего аварийные водопритоки через крепь ствола появляются еще до окончания возведения водонепроницаемого укрепления [10]. Риск возникновения нештатных ситуаций повышается на этапе полного оттаивания ледопородного ограждения после нагружения крепи выработок напорным давлением со стороны водоносных пластов [11].

Для большинства горных пород при замораживании скорость упругих волн возрастает (на 100–300 %) за счет замерзания содержащейся в породе воды [4, 12]. Это зависит от природной влажности и литологического состава [13]. Увеличение скорости происходит скачкообразно на границе фазового перехода, т. е. в породе формируется контрастная сейсмическая граница, что способствует изучению ледопородного ограждения с помощью сейсмических методов.

В геометрическом отношении ледопородное ограждение — вертикальный цилиндр, в центре которого содержатся незамороженные породы. При заморозке в вертикальном сечении образуются четыре жесткие акустические границы, определив положение которых, можно судить о качестве замораживания. Отдельно можно рассматривать случай полной проморозки ствола, когда породы в его центре также заморожены, а внутренние границы замороженного массива отсутствуют.

КОМПЛЕКС МЕТОДОВ И СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Традиционно исследования проходят в несколько этапов: первый проводится до начала замораживания горных пород, второй — во время активной фазы замораживания и третий — после завершения заморозки. Временная граница между вторым и третьим этапами условна и зависит от выхода параметров ледопородного ограждения на проектные значения.

На первом этапе необходимо выполнить два исследования: малоглубинную наземную сейсморазведку отраженными волнами по методике общей глубинной точки и сейсмическое просвечивание между контрольными скважинами. Любой из последующих этапов требует их повторения, а также может дополняться скважинным сейсмоакустическим профилированием на отраженных волнах по методике общей глубинной точки. Результаты сейсморазведочных исследований сопоставляются с независимыми данными современных систем термометрического контроля [14].

Межскважинное просвечивание путем прямого измерения скоростей позволяет осуществить параметрическое обеспечение для методик, основанных на отраженных волнах. На первом этапе по анализу времен вступления продольных проходящих волн определяются скорости в незамороженном грунте. На этапе заморозки обязательно проводится просвечивание на короткой базе, т. е. между скважинами, расположенными максимально близко друг к другу и попадающими в сформированный (согласно проекту) ледопородный цилиндр. Таким образом получают скорости упругих волн в полностью замороженном массиве. Результаты таких “чистых” измерений могут использоваться в качестве параметрического обеспечения при определении толщины ледопородного ограждения. Для наземной сейсморазведки эти скорости можно принимать с допущениями, поскольку измерения происходят при разных частотах и в разных направлениях, а для скважинных методик эти параметры идентичны.

Инженерная сейсморазведка на поверхности. Основная задача наземной сейсморазведки общей глубинной точки — проследить “региональный” фон и предположить причины появления локальных аномалий мощности промерзания грунта вдоль ствола. Из методических особенностей полевой регистрации данных можно отметить следующее. Параметры системы наблюдений наземной сейсморазведки общей глубинной точки выбираются с таким условием, чтобы радиус первой зоны Френеля на максимальной глубине замораживающего контура R_F был сравним с диаметром замороженного цилиндра. Например, для целевой глубины 150 м при частоте сигнала 300–500 Гц и эффективной скорости 2000 м/с R_F равен 15–20 м. При внешнем диаметре ледопородного ограждения 20–25 м это достаточная разрешающая способность для отображения замороженного массива в волновом поле.

В общем случае полевую регистрацию рекомендуется выполнять по сети профилей, параметры которой определяются сейсмогеологическими особенностями площади исследований и требуемой разрешающей способностью сейсмического метода [15] (рис. 1). Для большинства случаев подходит система со следующими параметрами: шаг пунктов приема — 2 м, шаг пунктов возбуждения — 2 м, максимальное удаление между ними — 126 м.

Профильные линии должны выходить за пределы замороженного массива на расстояние, сравнимое с диаметром первой зоны Френеля D_F . На профильных линиях, расположенных в непосредственной близости от ствола, применяются продольные и непродольные системы наблюдений. Чтобы исключить пропуск значимых по размерам неоднородностей, расстояние между продольными профилями не должно быть больше оценок D_F . При реализации непродольного профилирования линии приема и возбуждения колебаний располагаются с разных сторон ствола. Для более объективной оценки скоростных характеристик разреза в районе площади исследований необходима отработка фонового профиля в условиях отсутствия влияния заморозки. Профиль следует располагать на большем расстоянии, чем D_F , отражение в волновом поле строящегося шахтного исключается.

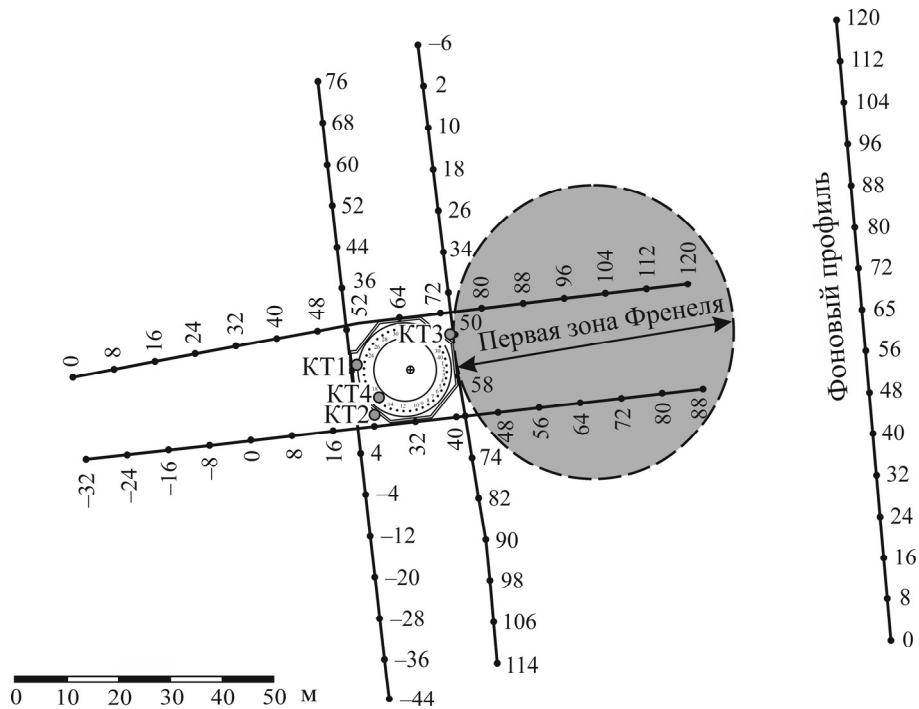


Рис. 1. Пример расположения сети наземных сейсморазведочных профилей для контроля околоствольного пространства (КТ — контрольно-термометрическая скважина)

Межскважинное просвечивание. В идеальном варианте схему расположения скважин для сейсмоакустического просвечивания следует формировать на этапе подготовки проекта строительства ствола. Скважины для просвечивания совмещаются с контрольно-термометрическими скважинами и имеют двойное назначение, поэтому необходимо учитывать требования, обеспечивающие нужды термометрии и сейсмоконтроля (рис. 2). Для термометрии скважины располагаются с равным угловым шагом вокруг центра ствола [16]. Для сейсмоакустики оптимальный вариант — возможность определения скорости в полностью замороженном массиве, для чего скважины должны находиться внутри контура ледопородного ограждения (КТ1–КТ4), а также возможность просвечивания через весь объем замораживаемого массива, когда линия просвечивания максимально близко лежит к центру ствола (КТ2–КТ3).

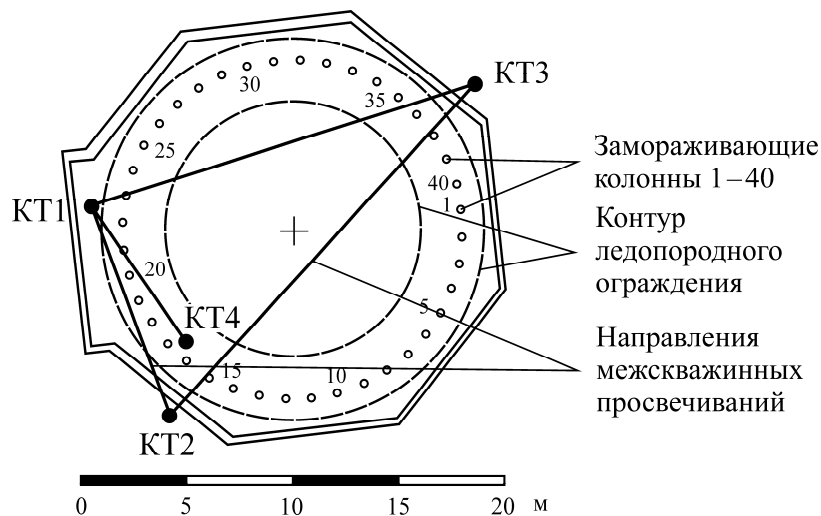


Рис. 2. Расположение контрольно-термометрических скважин относительно контура ледопородного ограждения и направления межскважинных просвечиваний

Параметры системы наблюдения межскважинного просвечивания выбираются с учетом параметров генерируемого сейсмического сигнала, имеющего энергию 600 Дж и частотный диапазон до 3 кГц (рис. 2). В [17] показано, что при этих параметрах и расстоянии между скважинами от 4 до 24 м максимальный диаметр сечения объема Френеля изменяется от 1 до 6 м. Шаг между пунктами возбуждения и приема равен 1 м, максимальное смещение по вертикали — 13 м.

Скважинный метод общей глубинной точки. Методическое обоснование данной технологии базируется на опыте шахтных сейсмоакустических исследований. За счет особенностей конфигурации выработанного пространства возможны исследования с различной пространственной ориентацией, комплексование 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. В отличие от сейсмоакустического просвечивания между двумя разнесенными выработками, линия приема и линия возбуждения совмещены в пределах одной горной выработки.

В случае аналогичного подхода при контроле ледопородного ограждения избежать неопределенности азимутальной локализации позволяет наличие высококонтрастной акустической границы, образующейся при фазовом переходе в процессе заморозки грунта, т. е. в большинстве геологических условий при реализации методики общей глубинной точки вдоль контрольной скважины будут зафиксированы контрастные отражения, однозначно ассоциируемые с вертикальными границами ледопородного ограждения. В методическом плане основным фактором, определяющим параметры системы наблюдений, является расстояние от скважины до ближайшей проектной границы ледопородного ограждения, которое может составлять менее 1 м, шаг между пунктами приема не должен превышать 0.5 м, шаг пунктов возбуждения — 1 м, а максимальное удаление — 12–24 м (рис. 3). Возбуждение и регистрация колебаний осуществляется теми же аппаратными средствами, что и при межскважинном просвечивании: гирляндой гидрофонов и электроискровым спаркером.

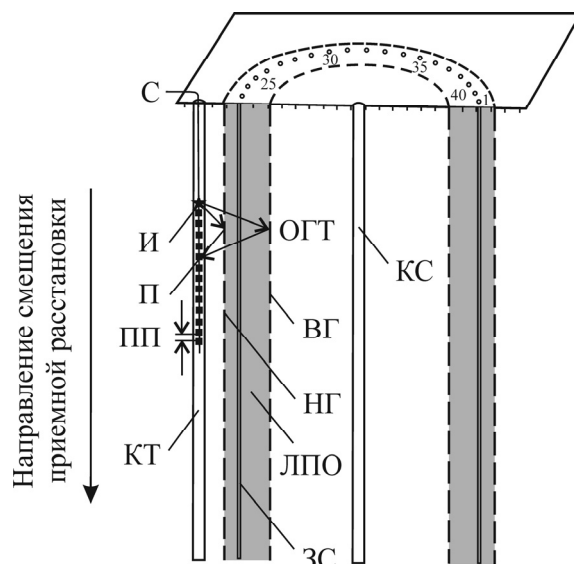


Рис. 3. Схема наблюдений при использовании скважинной методики общей глубинной точки (ОГТ): ЛПО — ледопородное ограждение; КТ — контрольно-термометрическая скважина; КС — контрольно-стволовая скважина; ЗС — замораживающие скважины; НГ — наружная граница ледопородного ограждения; ВГ — внутренняя граница ледопородного ограждения; С — сеймостанция; И — источник колебаний (спаркер); П — пьезоэлектрические сеймоприемники; ПП — шаг пунктов приема

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные интерпретационные заключения межскважинного просвечивания базируются на анализе первых вступлений волн для различных пространственных выборок сейсотрасс (рис. 4). Определение скоростей упругих волн выполняется для разных вариаций расположения излучающих и приемных линий. Расстояние между линиями варьирует от 4 до 24 м, на короткой базе регистрируется более высокочастотный сигнал с максимумом спектра $f_{\max} = 3500$ Гц, на длинной — $f_{\max} = 1000 - 1500$ Гц.

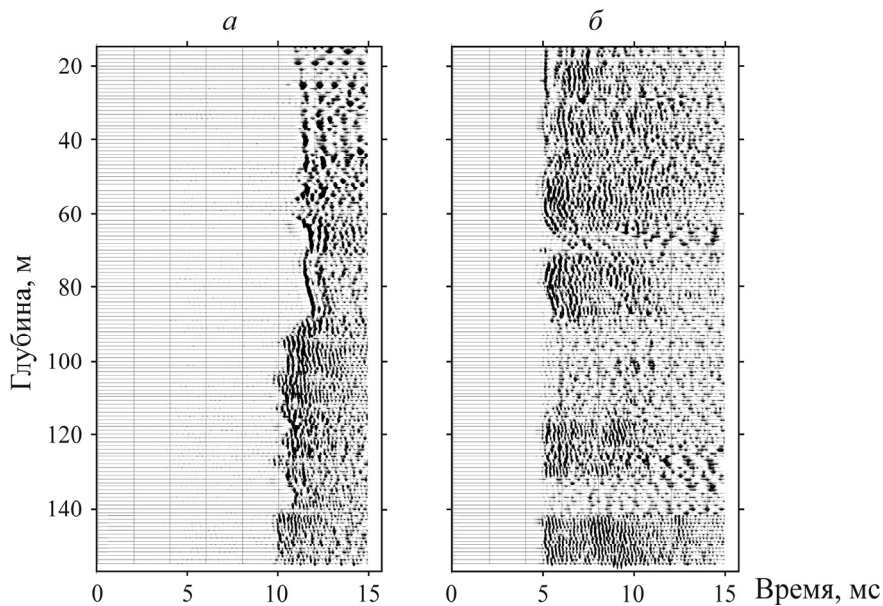


Рис. 4. Выборка трасс равных удалений при межскважинном просвечивании (КТ1 – КТ3) до начала заморозки (а) и через 3 мес. после (б)

По данным межскважинного просвечивания отчетливо прослеживается вертикальная дифференциация разреза по упругим свойствам (рис. 5). До заморозки кривые скоростей по различным направлениям близки друг к другу (рис. 5а), среднеквадратическое отклонение скорости по четырем наблюдениям не превышает 4 %, среднее отклонение — 1.6 %.

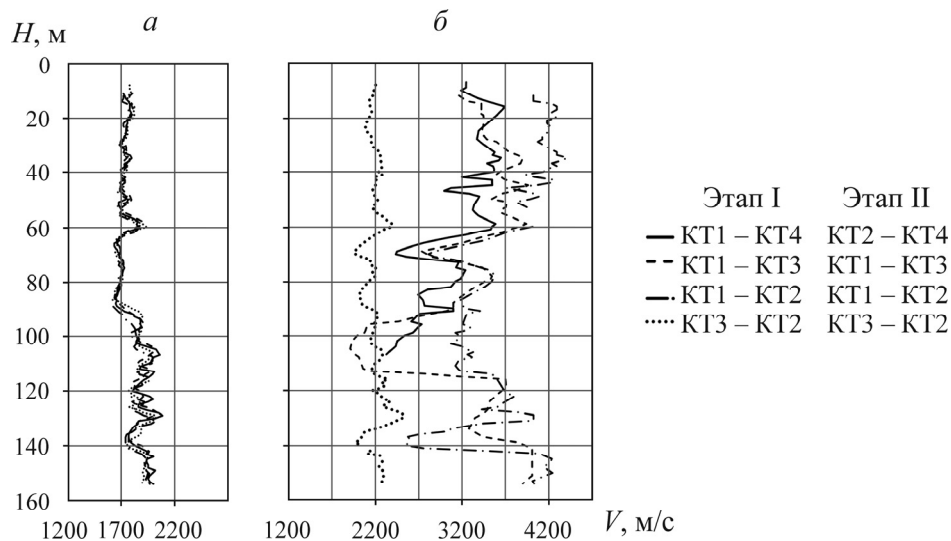


Рис. 5. Скорость по данным межскважинного просвечивания, измеренная по разным направлениям: а — на первом этапе до заморозки; б — на втором этапе во время замораживания

На втором этапе проявляется неравномерность заморозки массива. На короткой базе измерения волны распространяются через полностью замороженный массив, что позволяет получить чистые значения скоростей в замороженном массиве, а на длинной базе волна проходит через смешанный массив: кольцо заморозки и внутреннюю незамороженную часть (рис. 5б). В случае пластовой литологической модели изменение скоростей по латерали будет обусловлено только замораживанием массива.

Зная скорости в замороженном и нетронутым массиве, через формулу пластовой скорости можно определить эффективную мощность ледопородного ограждения между двумя скважинами, расположенными по разные стороны от центра ствола [17] (рис. 6):

$$M(h) = V_1(h) \frac{L - t(h)V_2(h)}{V_1(h) - V_2(h)}, \quad (1)$$

где M — суммарная мощность замороженного массива; L — расстояние между скважинами; V_1 , V_2 — скорости в замороженном и незамороженном массиве; $t(h)$ — время первых вступлений на глубине h при нулевом удалении “источник–приемник”.

Данный способ расчета не учитывает неравномерность распределения заморозки по разные стороны от центра ствола. С помощью проведения межскважинного просвечивания в многоканальном варианте можно выполнить томографический расчет, предусматривающий нелинейность распространения волн при наличии резких сейсмических границ и позволяющий получать более дифференцированный и точный разрез скорости (рис. 6). Этот скоростной разрез является входной информацией при обработке данных общей глубинной точки.

Основная задача для наземной инженерной сейсморазведки при комплексном контроле состояния ледопородного ограждения — локализация в околоствольном пространстве физико-геологических неоднородностей, которые могут осложнять строительство ствола.

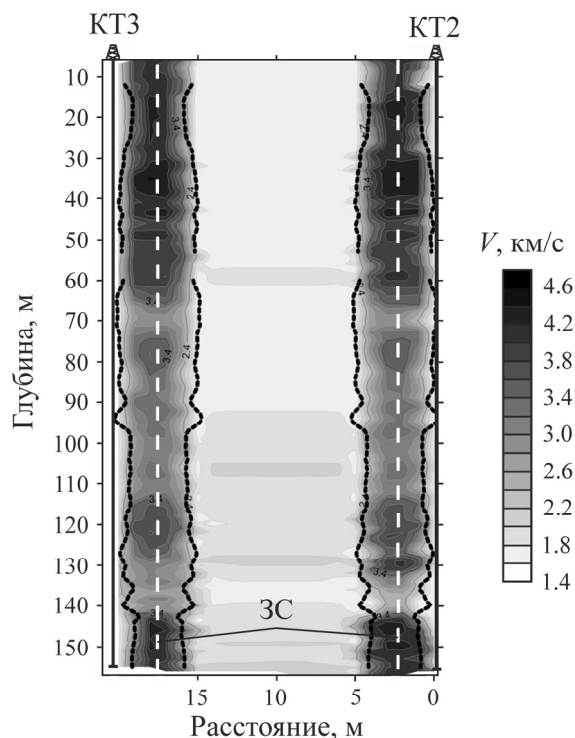


Рис. 6. Распределение скоростей волн на основе томографического расчета: КТ — контрольно-термометрическая скважина; ЗС — замораживающая скважина; черная пунктирная линия — расчетные границы ледопородного ограждения по формуле (1)

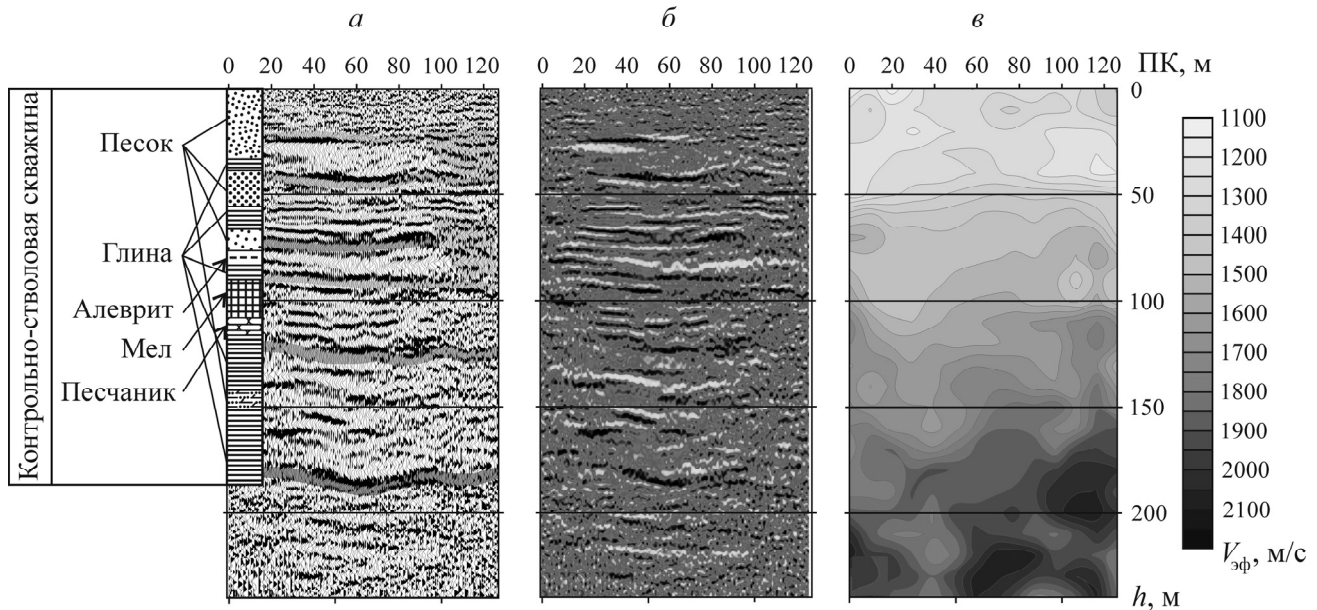


Рис. 7. Результат наземной сейсморазведки по фоновому профилю: сейсмический разрез (а), его динамическая (б) и скоростная (в) характеристики. ПК — пикеты

Итоговые интерпретационные заключения о геологических особенностях околоствольного массива базируются на анализе суммарных временных (или глубинных) разрезов общей глубинной точки (рис. 7). Дополнительно привлекаются динамические и кинематические характеристики. При обработке особое внимание уделяется обратной и веерной фильтрациям как основным средствам борьбы с поверхностными и преломленными волнами. При интерпретации такого набора данных выполняется стратиграфическая увязка данных контрольно-стволовой скважины и выделенных на временных разрезах отражающих горизонтов. Далее проводится качественный анализ волновой картины, заключающийся в изучении рисунка суммарных сейсмозаписей и пространственно-временного распределения динамической и кинематической составляющих. Количественная оценка аномальных зон основывается на определении скоростей распространения упругих волн и степени согласованности изменений всех рассматриваемых характеристик волнового поля. В пределах фонового профиля четко проявляется вертикальная неоднородность разреза (рис. 7). Аномальные участки разреза, характеризующиеся снижением скоростей и интенсивности колебаний, приурочены к интервалу 20–80 м в конечной части профиля. В пределах подобных участков можно ожидать относительное снижение прочностных свойств пород и интенсификацию водных потоков.

При профилировании через участок заморозки влияние ледопородного ограждения видно уже на первичных записях (рис. 8а). В результате в спектре скоростей (рис. 8б) прослеживаются две отдельные зависимости, соответствующие скоростным законам в замороженной и нетронутой частях массива. Это обстоятельство необходимо учитывать при подборе кинематических поправок и итоговых параметров регулируемого направленного анализа скоростей.

Сравнение результатов обработки по одноименным профилям показывает ухудшение качества сейсмических данных, полученных после заморозки (рис. 9). Можно наблюдать четкое проявление ледопородного ограждения в оценках эффективных скоростей.

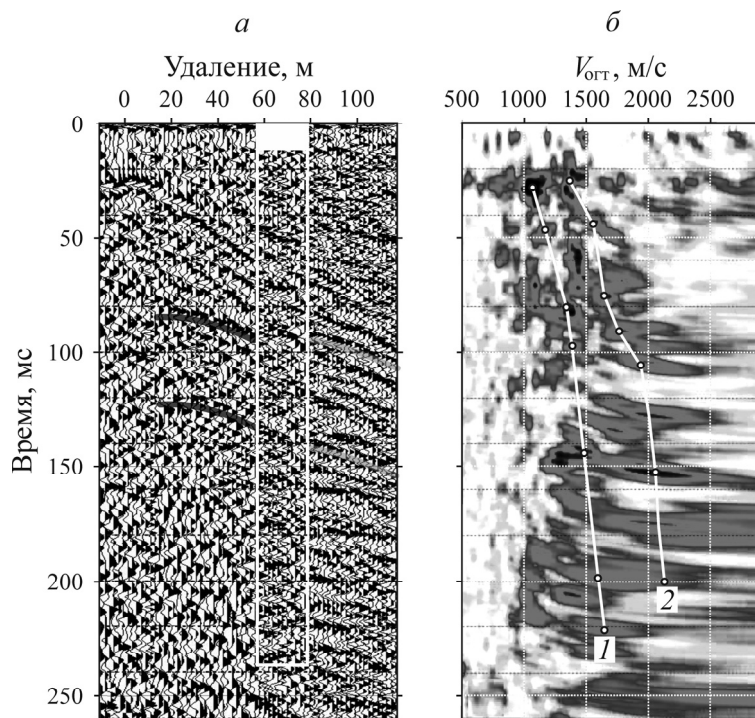


Рис. 8. Проявление ледопородного ограждения в сейсмической записи: *a* — сейсмограмма общего пункта возбуждения ОПВ; *б* — спектр скоростей и скоростные законы во вмещающем (1) и замороженном (2) массиве

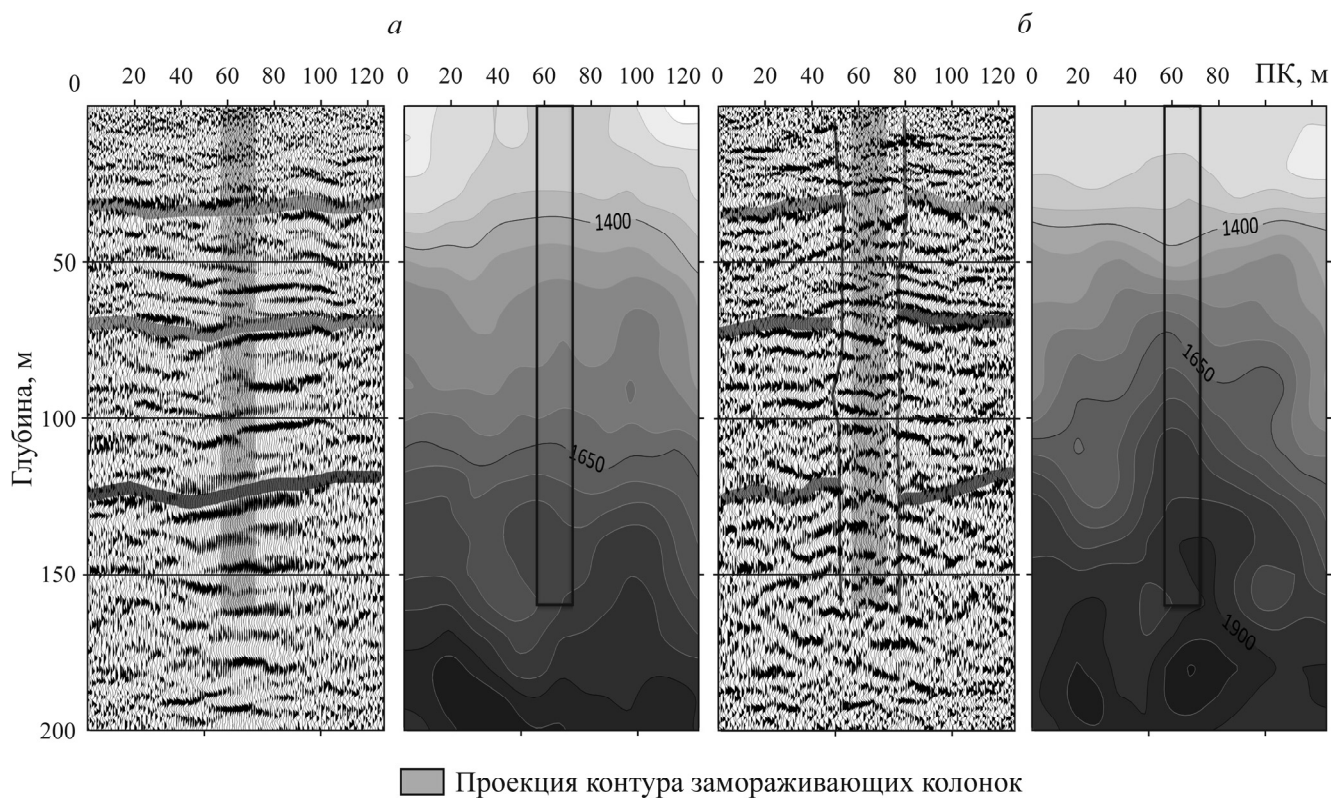


Рис. 9. Сравнение результатов цифровой обработки по одноименному профилю: *a* — временной разрез и его скоростная характеристика до начала заморозки; *б* — те же результаты через 3 мес. после начала заморозки. ПК — пикеты

Дальнейшие интерпретационные заключения по данным наземной сейсморазведки основываются на площадном распределении анализируемых сейсмических параметров, в том числе учитываются их изменения в различных интервалах разреза, регистрируемые на разных этапах замораживания массива. Они представляют интегральные оценки, по которым прогнозируются участки массива, где можно ожидать непроектные параметры ледопородного ограждения на конкретном этапе заморозки. Например, на одном из стволов в интервале меловых пород не зафиксировано повышение скоростей упругих колебаний в контуре заморозки, а в северо-западной части отмечается снижение (рис. 10). При последующем контроле формирования гидроизоляционной защиты этому участку требуется уделять более пристальное внимание.

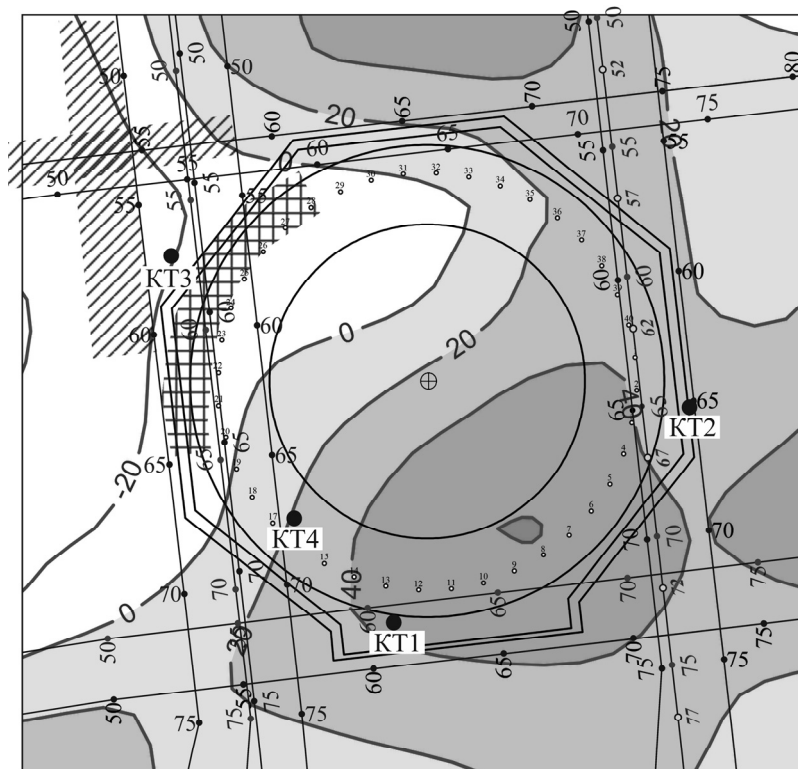




Рис. 10. Временная изменчивость скоростей упругих колебаний в интервале 88–158 м (3 мес с начала заморозки):  — участок потенциального уменьшения мощности ледопородного ограждения на промежуточном участке заморозки;  — участки негативных изменений сейсмических параметров по наземным профилям

Основные осложнения при проведении наземной инженерной сейсморазведки общей глубинной точки в пределах участков строительства шахтных стволов, которые могут снижать достоверность итоговых результатов, связаны с изменением поверхностных условий от одного этапа к другому. На промежуточном этапе и при полной заморозке происходит трансформация поверхности из-за бетонирования площадок, выемки грунта, строительства горнопроходческой инфраструктуры. Необходимо планировать наземные сейсморазведочные мониторинговые исследования еще на этапе разработки проекта ствола.

Дальнейшее уточнение геометрических параметров мощности ледопородного ограждения выполнено за счет применения сейсмоакустического профилирования по технологии общей глубинной точки — скважинного метода общей глубинной точки. Данная методика простая

с точки зрения полевой технологии, так как выполняется в рамках наблюдений по межскважинному просвечиванию и теми же аппаратными средствами, и с точки зрения цифровой обработки благодаря достоверным оценкам скоростей распространения волн в массиве, полученным по просвечиванию. Относительно контроля ледопородного ограждения данная скважинная методика использовалась впервые, ее оригинальность подтверждена Решением о выдаче патента на изобретение [9].

Скважинный метод общей глубинной точки предлагается проводить в специальной или заложённой в проект контрольно-измерительной скважине, пробуренной с внешней стороны контура заморозки. Это единственное обязательное условие реализации способа. Сейсмоотрассы, зарегистрированные в контрольной скважине, формируются в последовательности профилирования вниз по стволу в виде сейсмограмм ОПВ. Координаты сейсмограмм соответствуют глубине погружения.

Отличительная особенность при регистрации данных скважинной модификации общей глубинной точки — более низкое аппаратное усиление сигнала, что связано с высокой интенсивностью гидроволны, которая при высоких значениях аппаратного усиления приводит к выходу за пределы динамического диапазона станции. Зарегистрированные данные подвергаются цифровой обработке в рамках идеологии выделения отражающих горизонтов в вертикально слоистой среде. По результирующим волновым полям определяют времена вступления и скорости распространения продольных волн, отраженных от вертикальных границ, которые образуются при замораживании породного массива. На основании этого можно судить о толщине ледопородного ограждения, сформированного на текущем этапе замораживания (рис. 11).

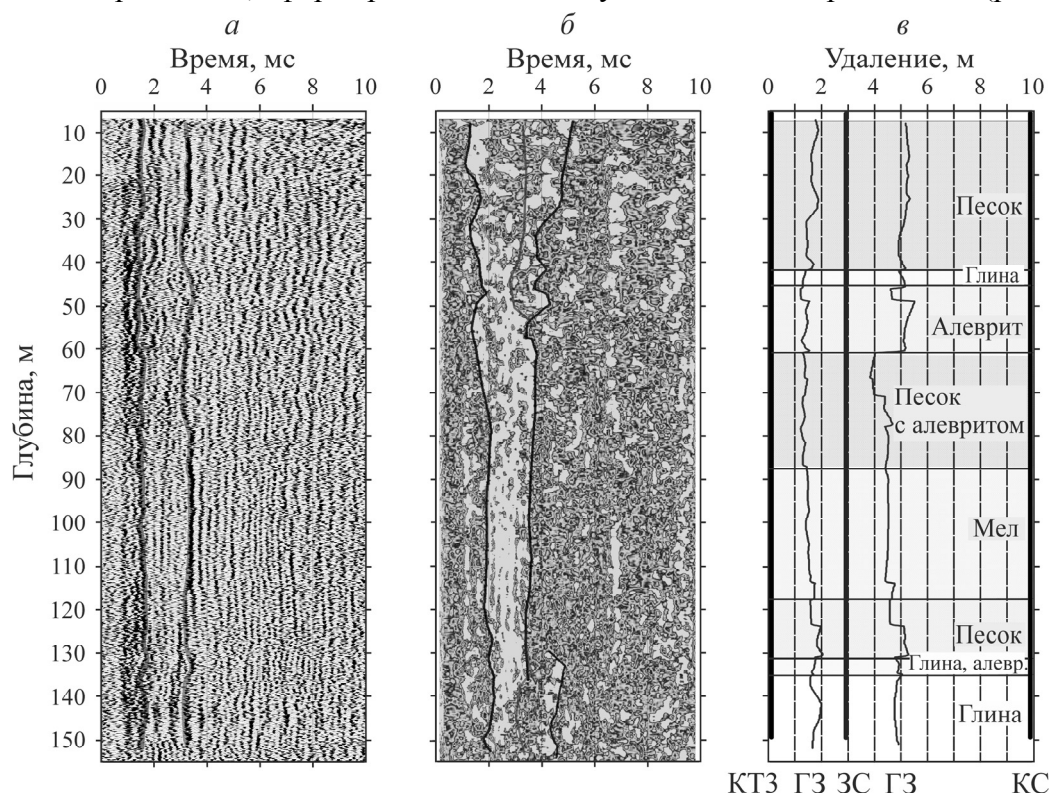


Рис. 11. Результат интерпретации скважинного метода общей глубинной точки: *a* — временной разрез общей глубинной точки вдоль ствола скважины; *б* — интегральная динамическая характеристика; *в* — сейсмогеологический разрез между скважинами КТЗ и КС (КТЗ — контрольно-термометрическая скважина для сейсмоакустических наблюдений, ЗС — замораживающая скважина, ГЗ — границы заморозки, КС — контрольно-стволовая скважина)

Сравнивая результаты интерпретации межскважинного просвечивания и скважинного метода общей глубинной точки, можно говорить о высокой степени сходимости, при этом межскважинное просвечивание обеспечивает скоростную характеристику массива.

ВЫВОДЫ

Комплексирование скважинных и наземных сейсморазведочных исследований позволяет получить подробное представление о геологической модели среды до начала проходки ствола и оценить возможные риски, связанные с особенностями геологического строения. Скважинные сейсморазведочные исследования — высокоточный инструмент контроля формирования ледопородного ограждения. При помощи межскважинного просвечивания можно создать скоростную модель в плоскости контрольных скважин, а скважинная модификация общей глубинной точки фиксирует границы, образующиеся при переходе от талых к мерзлым породам.

В сравнении с известными акустическими методами, основной техникой результат предлагаемых технологий — снижение трудозатрат и повышение надежности определения толщины промерзания породного массива на конкретном этапе заморозки ствола. При этом не требуется остановки заморозки и вывода из работы замораживающих колонн.

Технология сейсмоакустических исследований во внутренних точках среды (скважинный метод общей глубинной точки) может использоваться при подземном строительстве тоннелей, потерн, горных выработок для контроля результатов специальных мероприятий по укреплению грунтов, подразумевающих изменение их физико-механических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Arkhipov A.** Check and monitoring of condition of concrete slurry wall, jet-grouting and frozen soil fences by crosshole sounding method in underground construction, *Procedia Eng.*, 2016, Vol. 165. — P. 11–18.
2. **Novikov E. A., Shkuratnik V. L., and Oshkin R. O.** Acoustic emission patterns as guides to unfrozen water in frozen soils, *Kriosfera Zemli*, 2016, Vol. 20, No. 1. — P. 91–94.
3. **Варганов А. З.** Физико-технический контроль и мониторинг при освоении подземного пространства городов. — М.: Горн. книга, 2013. — 548 с.
4. **Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии** / под ред. Н. Н. Горяинова. — М.: Недра, 1992. — 264 с.
5. **Санфи́ров И. А., Бабкин А. И., Ярославцев А. Г., Байбакова Т. В., Калашникова М. М.** Аппаратурно-методическое обеспечение сейсмоакустического мониторинга затюбингового пространства шахтных стволов // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. — С. 17–21.
6. **Lehmann B., Orlowsky D., and Misiak R.** Exploration of tunnel alignment using geophysical methods to increase safety for planning and minimizing risk, *J. Rock Mech. and Rock Eng.*, 2010, Vol. 43. — P. 105–116.
7. **Dehghannejad M., Malehmir A., Svensson M., Lindén M., and Möller H.** High-resolution reflection seismic imaging for the planning of a double-track tunnel in the city of varberg, southwest Sweden, *Near Surface Geoph.*, 2017, Vol. 15. — P. 226–240.
8. **Steeple D. and Miller R.** Seismic reflection methods applied to engineering, environmental, and groundwater problems, *Symp. on the Application of Geoph. to Eng. and Environmental Problems Proc.*, 1990. — P. 409–461.
9. **Пат. 2706910 РФ.** Способ контроля толщины ледопородного ограждения при строительстве шахтных стволов / И. А. Санфи́ров, А. Г. Я́рославцев, А. И. Бабкин, А. В. Чу́гаев // Опу́бл. в БИ. — 2019. — № 33.

10. **Тарасов В. В., Пестрикова В. С.** Обзор аварийных ситуаций, возникших на Верхнекамском калийном месторождении при проходке шахтных стволов // ГИАБ. — 2015. — № 5. — С. 23–29.
11. **Иудин М. М.** Обеспечение безопасности устойчивости ствола при оттаивании ледопородного ограждения // Вестн. СВФУ. — 2009. — № 1. — С. 46–50.
12. **Архипов А. Г.** Сейсмоакустическая диагностика состояния массивов естественных и искусственных грунтов // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в России. — 2015. — С. 162–166.
13. **Skvortsov A. G., Sadurtdinov M. R., and Tsarev A. M.** Seismic criteria for indentifying frozen soil, Kriosfera Zemli, 2014, Vol. XVIII, No. 2. — P. 75–80.
14. **Levin L. Y., Semin M. A., and Parshakov O. S.** Mathematical prediction of frozen wall thickness in shaft sinking, J. Min. Sci., 2017, Vol. 53, No. 5. — P. 938–944.
15. **Yaroslavtsev A. G. and Baybakova T. V.** Ultra-shallow seismic reflection survey in the construction and exploration of mine shafts in salt deposits, Paper presented at the 15th Conf. and Exhibition Eng. and Min. Geoph., 2019.
16. **Levin L. Y., Semin M. A., and Parshakov O. S.** Improving methods of frozen wall state prediction for mine shafts under construction using distributed temperature measurements in test wells, J. Min. Institute, 2019, Vol. 237. — P. 268–274.
17. **Chugaev A. V., Pugin A. V., Lisin V. P., and Tarakanov S. A.** Particular features of wave-field forming in the process of ice wall fencing study at the mine shaft by the borehole seismic methods, Paper presented at the 15th Conf. and Exhibition Eng. and Min. Geoph., 2019.

Поступила в редакцию 28/II 2020

После доработки 05/III 2020

Принята к публикации 29/V 2020