

Охарактеризованы группы пакетов, связанных с вычислительными задачами, базами данных, графикой и картографией, а также предназначенных для конкретных наук. Наиболее полно рассмотрены пакеты, предназначенные для математических вычислений, анализа пространственных данных, цифровой обработки сигналов, геологии и геофизики.

Таким образом, язык программирования R, наряду с Python, является современным средством решения широкого круга задач в различных науках, включая науки о Земле, в том числе геология и геофизика.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Библиотека алгоритмов. Вып. 1. 1б-50б: справ. пособие. – М.: Совет. радио, 1975. – (Б-ка технич. кибернетики).
2. Геник И.В. Свободное программное обеспечение для задач гравиразведки и магниторазведки // Горное эхо. – 2020. – № 3 (80). – С. 60-66. – DOI: 10.7242/echo.2020.3.12.
3. Уилкинсон Дж.Х. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ: Линейная алгебра. – М.: Машиностроение, 1976. – 390 с.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2022.4.12

СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫЙ МОНИТОРИНГ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО УЗЛА

А.А. Жикин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Представлены результаты сейсморазведочного мониторинга объекта транспортной инфраструктуры, расположенного на подработанной территории калийного месторождения. Рассмотрены особенности наблюдения и обработки малоглубинных сейсмических данных. Показаны результаты режимных исследований динамики изменения упругих параметров массива горных пород.

Ключевые слова: сейсморазведочный мониторинг, малоглубинная сейсморазведка, цифровая обработка сейсмических данных.

Риски возникновения аварийных ситуаций при разработке водорастворимых месторождений, как правило, связаны с нарушением устойчивости грунтов, что в свою очередь приводит к частичному или полному разрушению инфраструктурных объектов, попадающих в зону влияния максимальных негативных изменений прочностных свойств подработанного массива.

Серия аварийных событий на Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС), в результате которых произошли обрушения грунта, повреждения конструкций промышленного, транспортного и гражданского строительства, обусловила создание современных регламентов комплексного обеспечения безопасности ведения горных работ и контроля подработанных территорий. Особое внимание уделяется объектам жилой застройки и транспортной системе, на которых ведутся режимные исследования, включающие широкий набор геофизических, гидрогеологических, сейсмологических и газогеохимических наблюдений.

Территория железнодорожной станции г. Березники представляет развитый транспортно-технологический узел, обеспечивающий логистические потребности предприятий химической промышленности города. Находясь в непосредственной близости к провалам земной поверхности, образованным в результате аварии на Первом березниковском калийном руднике, данный стратегически важный объект транспортной инфраструктуры требует акцентированного внимания со стороны ответственных служб. Ситуация осложняется тем, что подобные сооружения подвержены повышенным динамическим нагрузкам, образующимся в результате движения железнодорожных составов. Нагрузки могут привести к значительным изменениям в грунтах, находящихся под воздействием процессов выщелачивания солей, существенно увеличив скорость и объемы негативных процессов, что способствует потенциальному ухудшению условий эксплуатации ж/д узла и, как следствие, к образованию катастрофических последствий.

С целью локализации зон с пониженными прочностными свойствами выполняется анализ упругих параметров, полученных по данным наземной сейсморазведки высокого разрешения [Санфиоров, 1996; Санфиоров и др., 2011]. Наблюдения в режиме мониторинга позволяет отслеживать динамику изменения этих параметров со временем, выявлять наиболее критические участки, требующие детальных, комплексных исследований.

Сейсмические данные на объекте регистрируются с использованием интерференционной системы наблюдения по общей глубинной точке (ОГТ). Профилирование выполняется в продольном и неперодольном варианте (широкий профиль), с разнесенными линиями приёма и возбуждения для оптимального покрытия площади исследования общими глубинными точками, особенно на участках размещения строительных конструкций грузового двора и прилегающих территорий (Рис. 1).

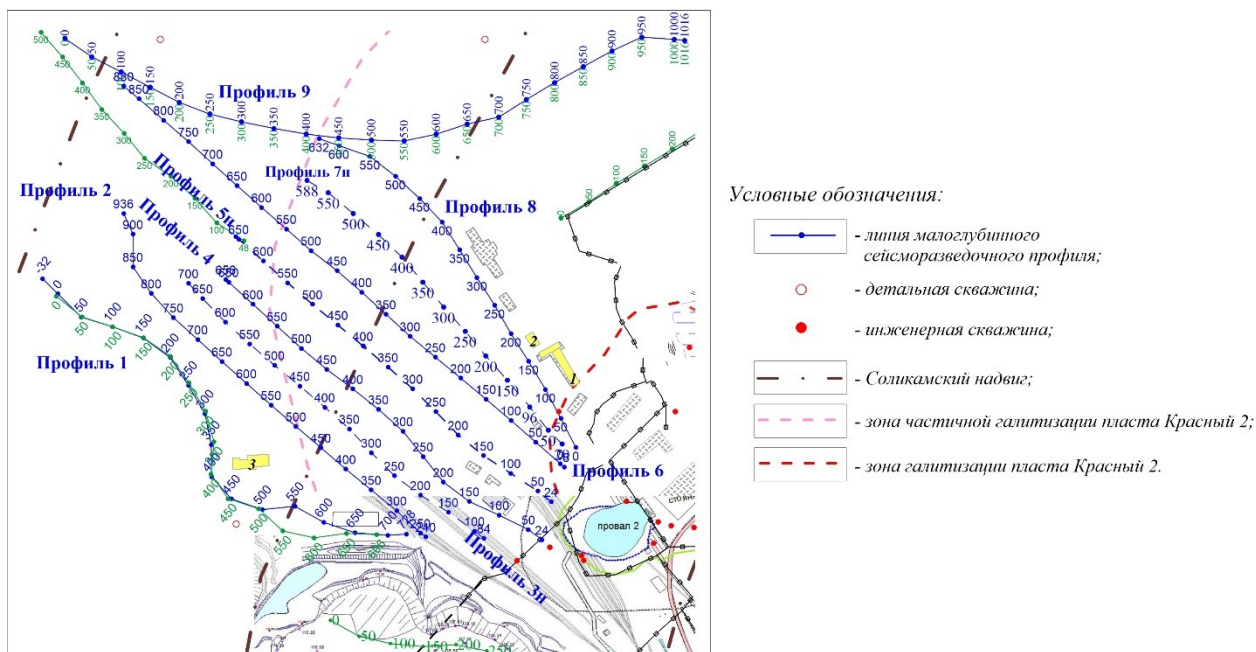


Рис. 1. Обзорная схема расположения сети сейсморазведочных профилей на участке железнодорожного узла

Параметры систем наблюдения обеспечивают регистрацию сейсмических сигналов в интервале залегания продуктивных пластов калийной залежи и водозащитной толщи (до 500 метров) [Санфиоров, 1996]. В качестве источника упругих колебаний

используется ударная установка. Возбуждения осуществляются в режиме накопления 6 воздействий для усиления результирующего сигнала. С целью подавления интенсивных поверхностных волн регистрация сигнала выполняется с использованием геофонов, собранных в группы по 5 штук на базе 16 метров, шаг между каналами 8 метров. Сбор высокочастотных сигналов обеспечивает телеметрическая система на базе сейсмоакустического регистратора «IS-128», количество активных каналов – 64, шаг дискретизации – 0.5 мс, длина записи 1500 дискрет, среднее значение достигаемой кратности – 32.

Специфика обработки исходных сейсморазведочных данных состоит из нескольких основных этапов [Ярославцев и др., 2012]. На первом, предварительном этапе полевые сейсмограммы преобразуются в формат обрабатывающей системы, присваиваются корректные заголовки трасс, описывается геометрия профиля, производятся различного рода сортировки и редактирование трасс.

Основная задача второго этапа заключается в фильтрации сигналов от интенсивных помех, вызванных развитой электросетью и высоким уровнем техногенных шумов, что достигается итеративным применением процедур частотной полосовой, обратной, верной и пространственно-временной F-K (частота – волновое число) фильтрации для удаления низко и среднескоростных регулярных и нерегулярных волн-помех. Также на данном этапе производится расчёт и коррекция статических поправок, позволяющих учесть искажения во временах прихода отраженных волн, вносимые за счёт изменения рельефа поверхности наблюдения, а также мощностей и скоростей распространения упругих волн в верхней части разреза.

Целью третьего этапа является кинематическая обработка, в ходе которой максимальный акцент делается на увеличение значений отношения сигнал/помеха целевых отраженных волн, определение геометрии и конфигурации сейсмических границ, что позволяет улучшить прослеживание осей синфазности и повысить корректность скоростного анализа. Это достигается применением процедур подбора и коррекции кинематических поправок, когерентной фильтрацией различных выборок сейсмических трасс и миграционных преобразований, учитывающих искажения за счёт сейсмического сноса, особенно на участках примыкания неизмененных пород с дезинтегрированным массивом [Ярославцев и др., 2013].

На завершающем этапе процессинга выполняется переменная по времени фильтрация мигрированных данных совместно с процедурами спектрального выравнивания [Öz Yılmaz, 2001], что позволяет расширить и выровнять частотный диапазон итоговых суммарных временных разрезов и устранить эффект регуляризации, вызванный применением пространственно-временной (f-k) и обратной фильтрации.

Анализ конечных суммарных временных разрезов (Рис. 2а) и идентификация границ целевых интервалов по всем профильным линиям составляют основу интерпретации при картировании ослабленных зон. Согласно априорной геологической информации по скважинам выполнена привязка наиболее динамически выраженных осей синфазности к конкретным литологическим границам, представленным кровлями соляно-мергельной толщи (СМТ), первых соляных пластов в нижней части СМТ (ВС), карналитового пласта Е (Ек), сильвинитовой зоны (Сил) и интервалу маркирующей глины (МГ) (Рис. 2а).

Осложнения на итоговых волновых картинах выделяются по наличию совокупности признаков (Рис. 2). К ним относятся нарушения корреляции отражающих горизонтов, их интенсивности и падения значений скоростной характеристики разреза (Рис. 2б). Участки потенциального ослабления прочностных характеристик породного массива позиционируются с учётом согласованности негативных изменений анализируемых

сейсмических параметров. Основываясь на описанных представлениях, на временном разрезе по профилю 6 выделены две зоны в пределах пикетов 0-250 м и 600-800 м, характеризующиеся нарушениями структуры волнового поля, падением амплитуд отражённого сигнала (Рис. 2а) и локальным снижением значений эффективных скоростей (Рис. 2б).

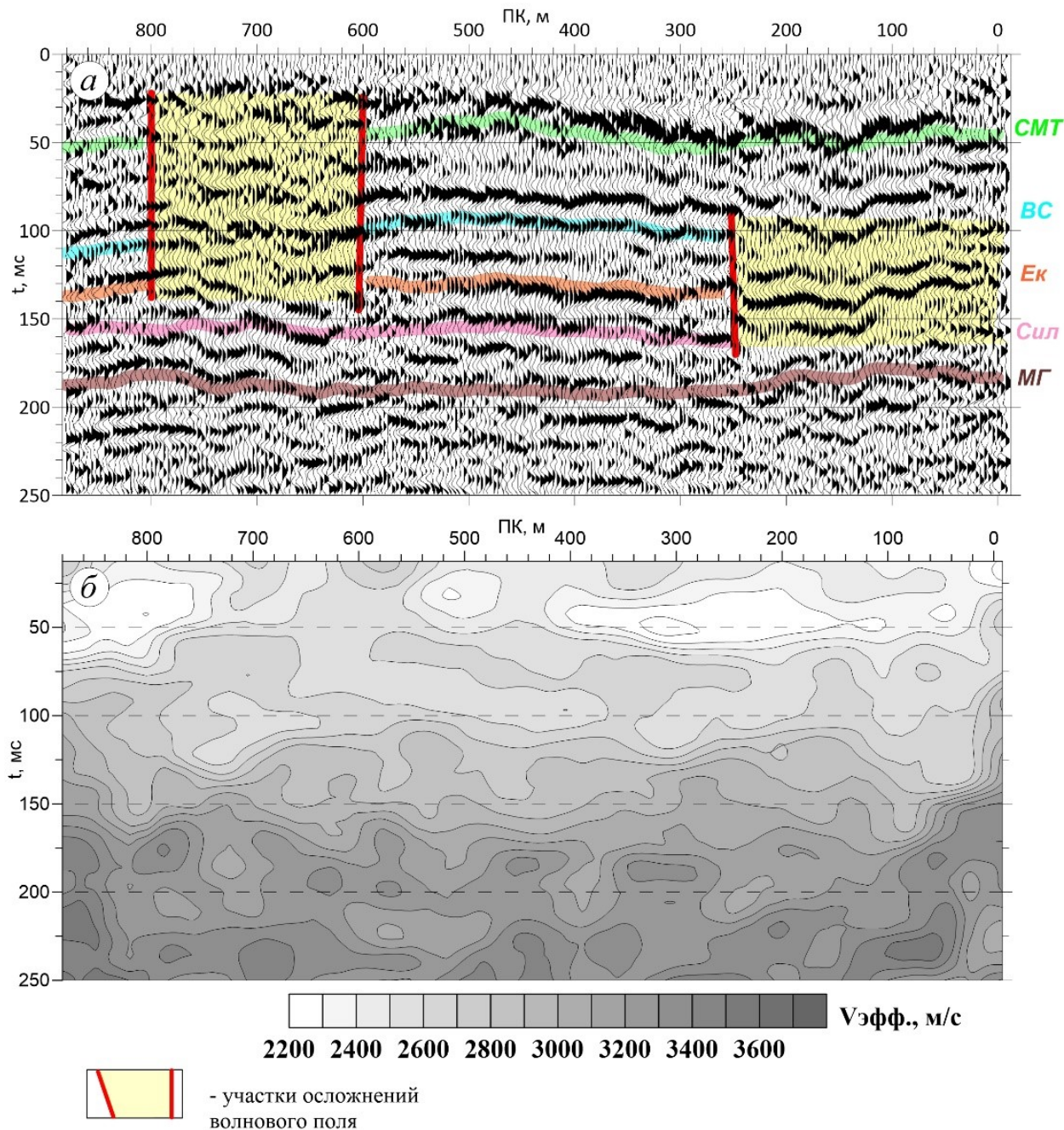


Рис. 2. Конечный суммарный временной разрез ОГТ (а) по профилю 6 и его скоростная характеристика (б)

Выделяемые неоднородности на объекте исследований могут быть причиной как природных геологических особенностей, так и техногенного воздействия на недра в результате затопления рудника. По сочетанию выделенных признаков на представленном профиле аномальное поведение волнового поля в пределах пикетов 0-250 м скорее всего вызвано комплексным взаимодействием литолого-

структурного и техногенного факторов. В тоже время на пикетах 600-800 м вероятнее проявление природных особенностей строения массива, вызванных влиянием Соликамского надвига.

Повышение информативности интерпретационных выводов достигается на основе анализа результатов спектральной декомпозиции, визуализированных в различных цветовых гаммах (Рис. 3) [Ярославцев, 2017; Fronter, 2013]. Подобные разночастотные представления временного разреза позволяют при исследовании тонкослоистых осадочных пород выделить как низкочастотную составляющую волнового поля с целью прослеживания сейсмостратиграфических границ, так и высокочастотную для выявления сейсмолитологических разностей [Ярославцев и др., 2013]. В первом, упрощённом случае декомпозированный разрез позволяет оценить условия залегания и тектонику (Рис. 3а). Во втором, высокочастотном представлении проявляется тонкая структура массива и локальные особенности волнового поля, повышается содержательность детального скоростного анализа (Рис. 3б).

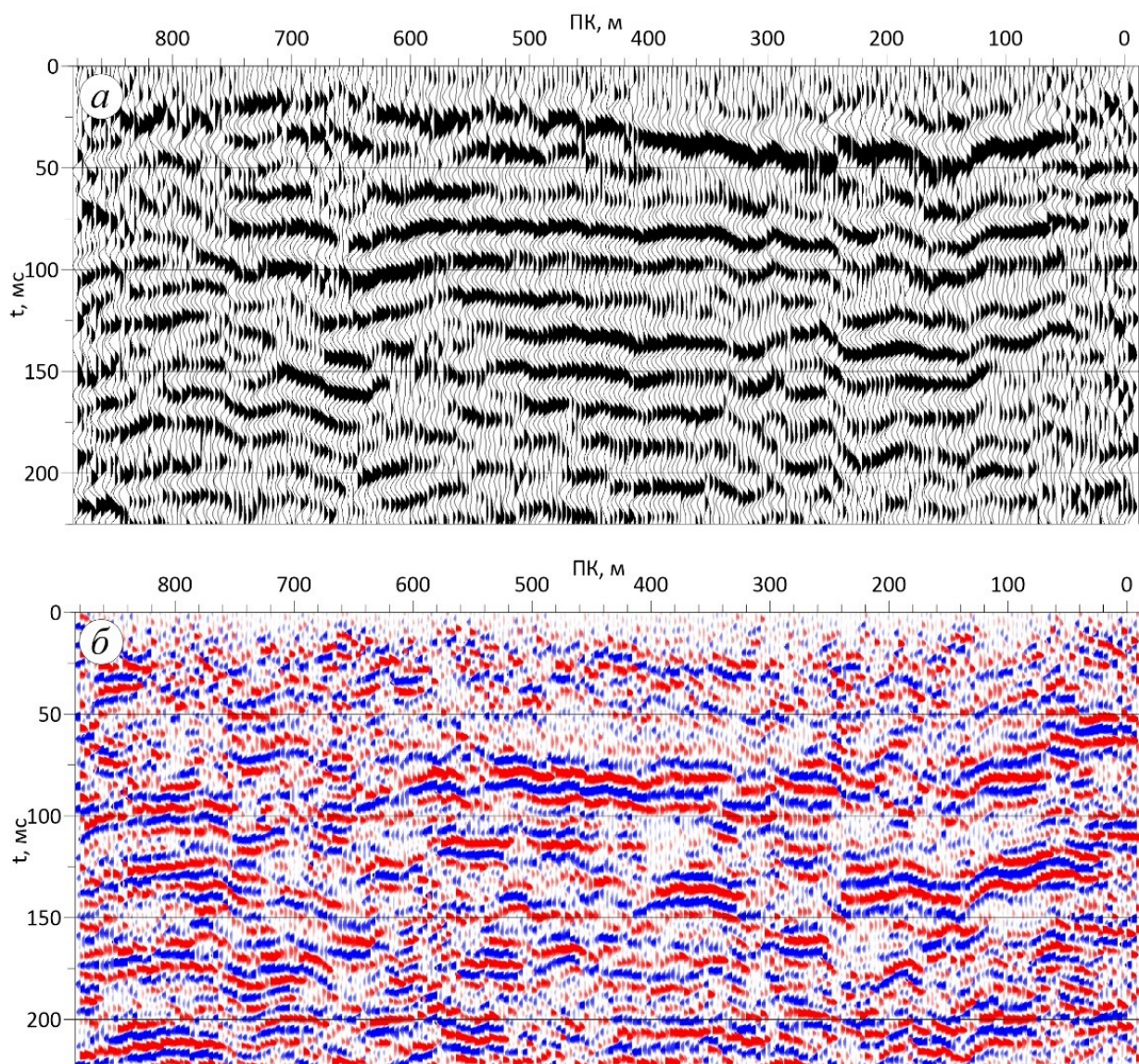


Рис. 3. Разночастотные представления временного разреза по профилю 6 в диапазонах частот 20-60 Гц (а) и 60-140 Гц (б)

С целью выявления негативных изменений упругих свойств пород с течением времени при реализации мониторинговых исследований сформированы графики интервальных скоростей разделяемых интервалов сейсмогеологического разреза (Рис. 4). Графики интервальных скоростей представлены в координатах профильной линии. Каждый цвет отображает поведение скорости на конкретном этапе исследования (2018-2021 гг.).

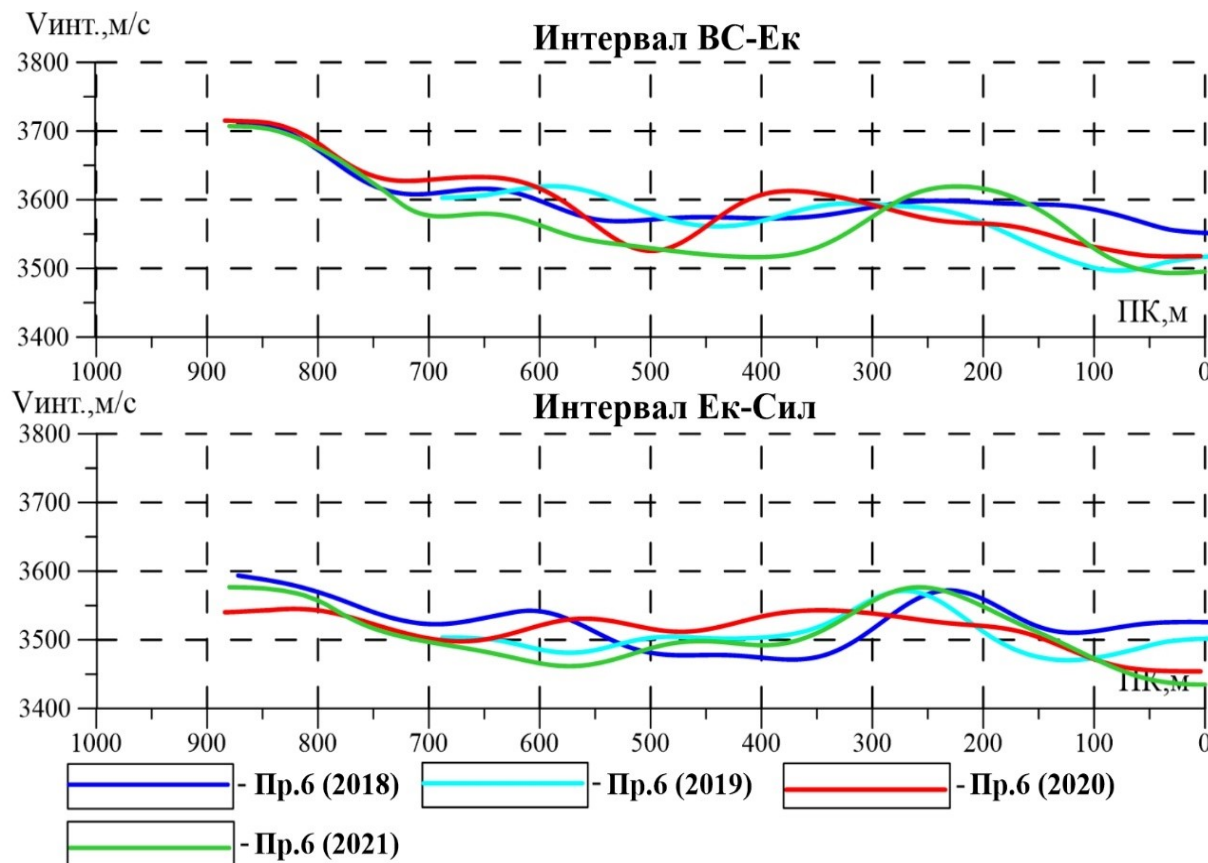


Рис. 4. Результаты скоростного анализа для интервалов ВС-Ек и Ек-Сил в период с 2018 по 2021 г.

По результатам количественной оценки упругих параметров строятся схемы интервальных скоростей в различных интервалах исследуемого геологического разреза (Рис. 5а, б). Сравнительный анализ выполнен на основе схем временной изменчивости, позволяющий для каждого выделенного интервала оценить на площади степень негативных изменений относительно выполненных ранее наблюдений.

Безопасность эксплуатации сооружений и путевого комплекса железнодорожного узла зависит от устойчивости пород верхней части разреза (ВЧР). Оценка упругих свойств пород ВЧР производится в рамках единой методики многократных перекрытий [Мешбей, 1985] с применением обработки данных методом преломленных волн. По результатам процессинга строятся схемы распределения средних и граничных скоростей в интервалах глубин до 30 м (Рис. 6а, б) [Бобров, 2020]. Сравнительный анализ мониторинговых наблюдений позволяет выявлять зоны локальной изменчивости скоростных свойств пород. На представленной схеме временной изменчивости граничных скоростей в интервале 4-18 м (Рис.6в) в южной и западной части отмечается зоны потенциально негативного развития

физико-механических процессов в результате воздействия естественных и техногенных факторов.

Данные интерпретации режимных сейсморазведочных исследований совместно с результатами инструментальных наблюдений за оседаниями земной поверхности в пределах территории ж/д станции используются для геомеханических расчётов методами математического моделирования [Санфиоров, 2005]. На основе модели производится оценка напряженно-деформированного состояния целевых интервалов породного массива, рассчитываются прогнозные графики деформации земной поверхности и выдаётся заключение о вероятном развитии горно-геологической ситуации с рекомендациями по дальнейшим мероприятиям минимизации риска превышения допустимых уклонов стационарных железнодорожных путей.

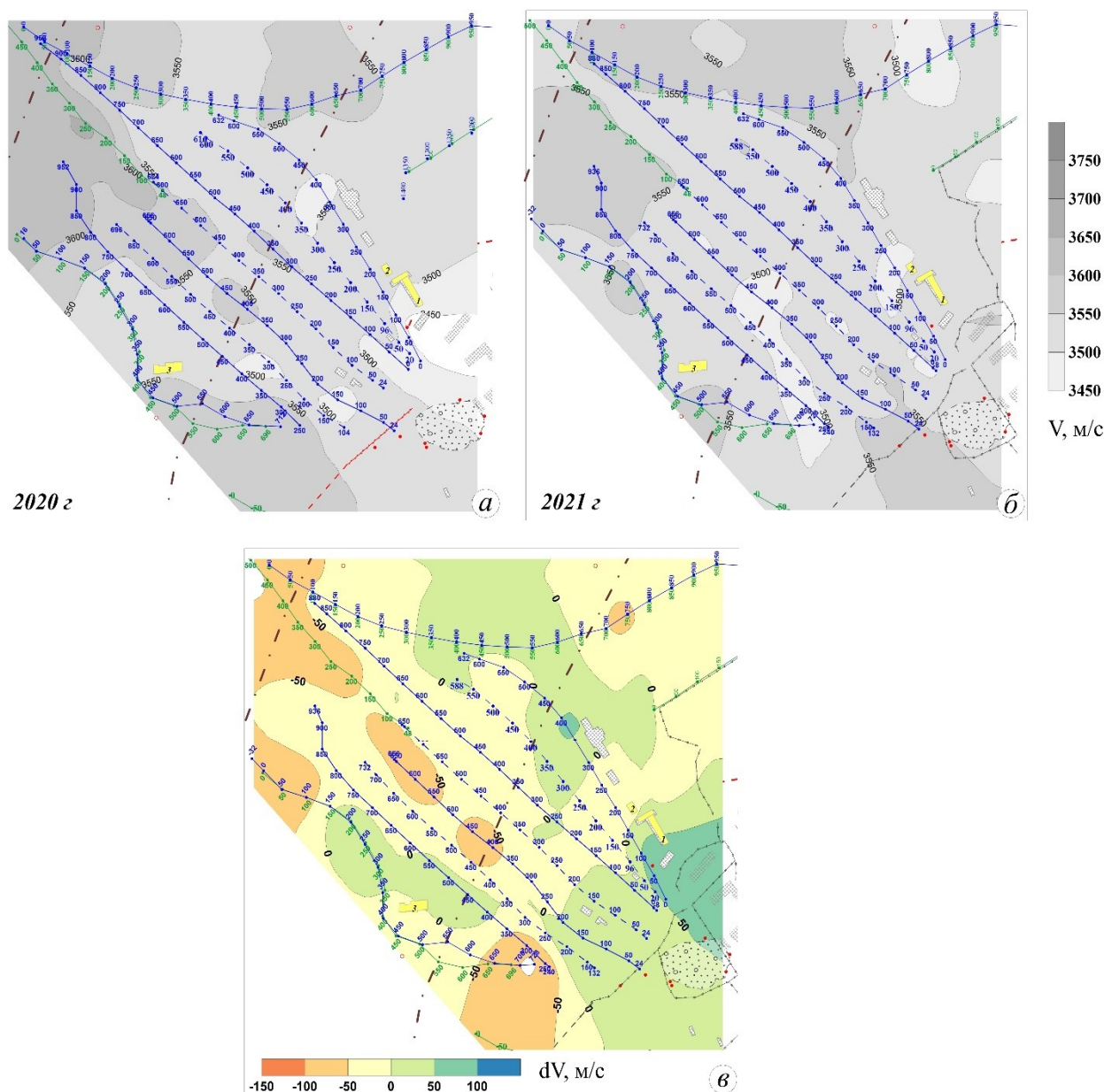


Рис. 5. Схемы интервальных скоростей (а, б) и их временной изменчивости (2020-2021 гг.) (в)

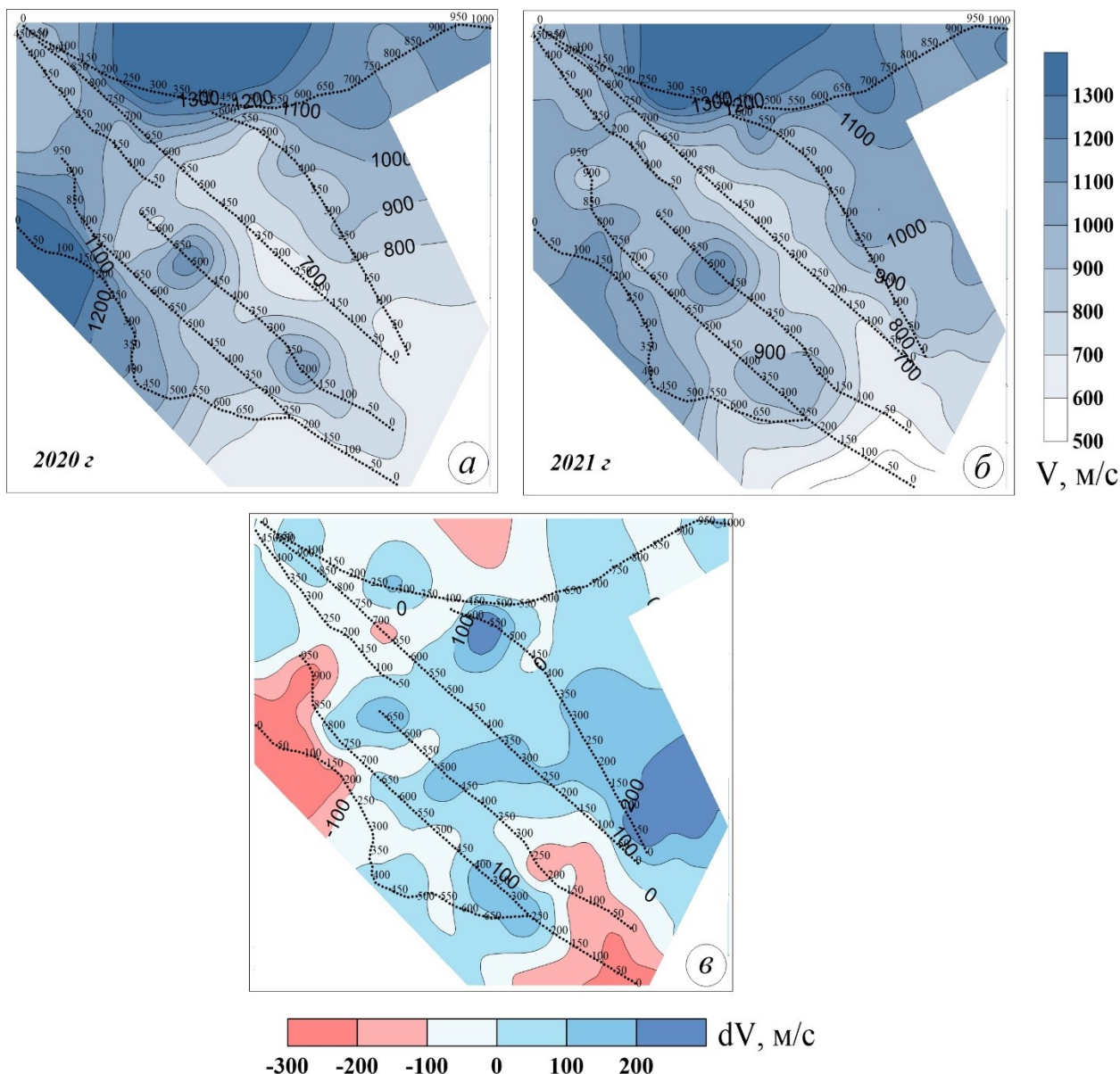


Рис. 6. Схемы граничных скоростей и их временной изменчивости в интервале глубин 4-18 м (2020-2021 гг.)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобров В.Ю., Герасимова И.Ю. Изучение верхней части разреза методами инженерной 2D и 3D сейсморазведки // Инженерная и рудная геофизика – 2020: 16-я науч.-практ. конф., 14-18 сент. 2020. – Пермь, 2020. – С. 13. – DOI: [10.3997/2214-4609.202051022](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051022).
2. Мешбей В.И. Методика многократных перекрытий в сейсморазведке. – М.: Недра, 1985. – 264 с.: ил.
3. Санфиоров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / ГИ УрО РАН. – Екатеринбург, 1996. – 168 с.
4. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г., Прийма Г.Ю., Фаткин К.Б. Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 53-58.
5. Барях А.А., Санфиоров И.А. Комплексное геомеханическое и геофизическое обеспечение безопасности подземных работ // Горный журн. – 2005. – № 12. – С. 79-83.
6. Ярославцев А.Г. Атрибутивный анализ данных пространственной малоглубинной сейсморазведки на потенциально-опасном участке // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 211-213.

7. Ярославцев А.Г., Жикин А.А. Особенности цифровой обработки сейсморазведочных данных при изучении малоглубинной калийной залежи // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012 – №5. – С. 188-193.
8. Ярославцев А.Г., Жикин А.А., Санфиоров И.А., Туманов В.В., Сухинина Е.В. Совершенствование графа цифровой обработки сейсморазведочных данных для территорий с повышенной природно-техногенной нагрузкой // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № S44. – С. 3-22.
9. Froner B., Purves S.J., Lowell J., Henderson J. Perception of visual information: the role of colour in seismic interpretation // First break. – 2013. – V. 31, № 4. – P. 29-34. – DOI: 10.3997/1365-2397.2013010.
10. Öz Yilmaz. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data: In two volumes / Society of Exploration Geophysicist. – 2nd ed. – Tulsa, 2001. – (Series: Investigations in Geophysics, №. 10).

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2022.4.13

КОНТРОЛЬ МЕЖШАХТНОГО ЦЕЛИКА КОМПЛЕКСОМ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М.М. Калашникова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В последние годы активно осуществляется контроль важных горно-технических элементов, к которым относится барьерный целик между СКРУ-1 и СКРУ-2 в районе аварийного участка СКРУ-2. Основная цель проведенных работ – оценка текущего состояния и прогноз возможных негативных изменений барьерного целика, который находится под влиянием зоны обрушения. Наблюдается устойчивая тенденция расширения негативных изменений породного массива в пределах контролируемой территории. Представленные результаты показывают дополнительные информационные возможности комплексирования наземных и шахтных сейсморазведочных исследований с целью локализации проблемных зон контролируемого породного массива.

Ключевые слова: барьерный целик, комплексирование наземных и шахтных сейсморазведочных исследований, интерпретация сейсморазведочных данных, осложнения волнового поля.

Наличие достоверной информации о строении и свойствах вмещающих пород и продуктивной соляной толщи в значительной степени обеспечивает безопасную эксплуатацию рудников Верхнекамского месторождения калийных солей. Особое внимание уделяется выявлению и оконтуриванию аномальных зон в строении горного массива. В последние годы активно осуществляется контроль важных горно-технических элементов, к которым относится барьерный целик между СКРУ-1 и СКРУ-2 в районе аварийного участка СКРУ-2. Основная цель проведенных работ – оценка текущего состояния и прогноз возможных негативных изменений барьерного целика, который находится под влиянием зоны обрушения.

Для оценки состояния ВЗТ в пределах барьерного целика с поверхности пройдено пять профилей (рис. 1). Один профиль широтного простирания и четыре профиля меридионального простирания.

Полевой этап сейсморазведочных исследований выполнен по методике невзрывной малоглубинной сейсморазведки высокого разрешения с использованием интерференционной системы наблюдений по общей глубинной точке (ОГТ) [1].

По результатам цифровой обработки на конечных временных разрезах выделяются опорные отражающие горизонты (ОГ), которые соответствуют кровле: СМТ – соляно-мергельной толщ, ВС – первые выдержанные пласты каменной соли, Е – пласта Е кар-