

гностические признаки искомой сейсмофации: локальное нарушение регулярности волнового поля, снижение скоростей распространения упругих волн и частотной составляющей.

Выделенные таким образом участки представляются наиболее проблемными с точки зрения безопасности отработки шахтного поля (рис. 3).

Полученные результаты согласуются с известными особенностями геологического строения. На одном из участков рудника в процессе проходки подготовительных выработок по сильвинитовому пласту КрII вскрыта складка высотой более 30 м (рис. 1 – А), вероятно, сформировавшаяся на месте пересечения двух диагональных (северо-восточной и северо-западной) складчатых систем соляной толщи. Она представляет собой фрагмент крупной складчато-надвиговой структуры. Приуроченные к ней зоны вязких разрывов прослеживаются до кровли покровной каменной соли [3]. Складка Б (рис. 1, рис. 2), закартированная вне зоны, намеченной по результатам сейсмостратиграфической интерпретации данных малоуглубинной сейсморазведки, имеет высоту около 10 м. Она не сопровождается вязкими разрывами слоев, брекчиями, свидетельствующими о распространении дислокаций вверх по разрезу, а имеющиеся структурные признаки отражают внутрипластовый характер течения соляных пород, что не позволяет отнести ее к аномальным особенностям водозащитной толщи.

Поскольку ядра антиклинальных складок, образуемых слоями сильвинитов, дополнительно осложнены мелкой внутрипластовой складчатостью, повторы пластов, установленные при бурении скважин, подтверждают корректность выделения участков интенсивной складчатости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596030 р_НОЦ_Пермский край

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондарев В.И. Сейсморазведка: учебник для вузов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – 690 с.
2. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2001. – 429 с.: ил.
3. Чайковский И.И., Иванов О.В., Паньков И.Л., Чиркова Е.П. О природе крупной антиклинальной складки на Усольском руднике верхнекамского месторождения солей, ее геомеханической и газовой-геохимической зональности // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2021. – Т.163, кн. 3. – С. 490-499.

УДК 004.42, 550.34.01

DOI:10.7242/echo.2023.2.11

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАЛОУГЛУБИННОЙ СЕЙМОРАЗВЕДКИ

М.В. Тарантин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Исследовательские работы требуют гибкого обрабатывающего алгоритмического обеспечения. Наиболее крупные этапы процедуры работы с материалами реализованы в программных модулях, каждый из которых со временем подвергается модернизации в соответствии с наиболее результативными алгоритмами. Представлены некоторые современные модули, предназначенные для

решения ряда задач, возникающих в процессе обработки волновых материалов, указаны их основные отличия от прежних версий. Разработанные модули совместимы между собой по способам обработки материалов и форматам внешних файлов.

Ключевые слова: малоглубинная сейсморазведка, цифровая обработка, алгоритм.

Обработка и интерпретация сейсмических материалов проводится с применением специализированного программного обеспечения, представленного единым модулем либо некоторым их комплексом. Исследовательские работы, как правило, требуют второго варианта обработки, поскольку позволяют вносить небольшие изменения на отдельных этапах сообразно выбранной методике при сравнительно малых потерях времени. Отделом активной сейсмоакустики Горного института УрО РАН выполняется большой объем исследовательских работ, существенная часть которых предполагает поиск новых методик обработки либо модернизацию существующих. По этой причине для работы с сейсмическими материалами используется комплекс программных средств, большая часть которых создается сотрудниками отдела.

Многообразие источников волновых материалов и некоторые ограничения средств обработки привели к необходимости перевода их из одного формата файлов в другой. Для этого был разработан файл-конвертер, способный манипулировать файлами наиболее часто встречающихся сейсмических форматов. Впоследствии на этот же модуль были возложены некоторые функции анализа и коррекции сигналов, неверно зарегистрированных при полевых работах (рис. 1).

При обработке материалов используется определенный набор разобщенных программных модулей. Ввиду разных форматов внешних данных их комплексное использование крайне затруднено. Для обхода этого затруднения были разработаны преобразователи форматов данных, позволяющие приводить к понятному виду некоторые файлы SPS-PC [1] и Tesseral Engineering [2]. Иногда целесообразнее создать собственный модуль для решения аналогичной задачи, чем пользоваться имеющимся со специфическими входными и выходными данными; при этом имеется возможность приспособить алгоритм для решения чуть более широкого круга задач.

Одной из первых процедур обработки волновых материалов является частотная фильтрация, призванная удалить помехи в некоторых частотных диапазонах. На протяженных профилях или при существенных изменениях внешних условий эти диапазоны могут изменяться вдоль профиля либо со временем (регистрации). Для оперативности обработки программа фильтрации была изменена; для обработки одного профиля используется список фильтров, чье действие ограничено в пространстве и времени (рис. 2). Фильтрация предполагает удаление части мощности сигнала, поэтому предусмотрена процедура восстановления уровня результирующей амплитуды до первоначального. Обработка сигнала возможна как через пространство спектров Фурье, так и путем свертки в пространстве времен.

Наибольшие изменения претерпел модуль просмотра (рис. 3), получив возможность проведения практически любой операции (из предполагаемого графа обработки) над загруженными в данный момент сигналами, начиная от пересортировки трасс «на лету» и заканчивая миграцией. Это делает его не просто визуализатором, а средством исследования, позволяя оперативно подбирать необходимые параметры дальнейшей обработки.

Изменения способа передачи из него параметров при создании скриптов, совместимых с GS Surfer, привели к возможности редактирования полученных изображений. Все компоненты разделены и предполагают изменение некоторых графических свойств.

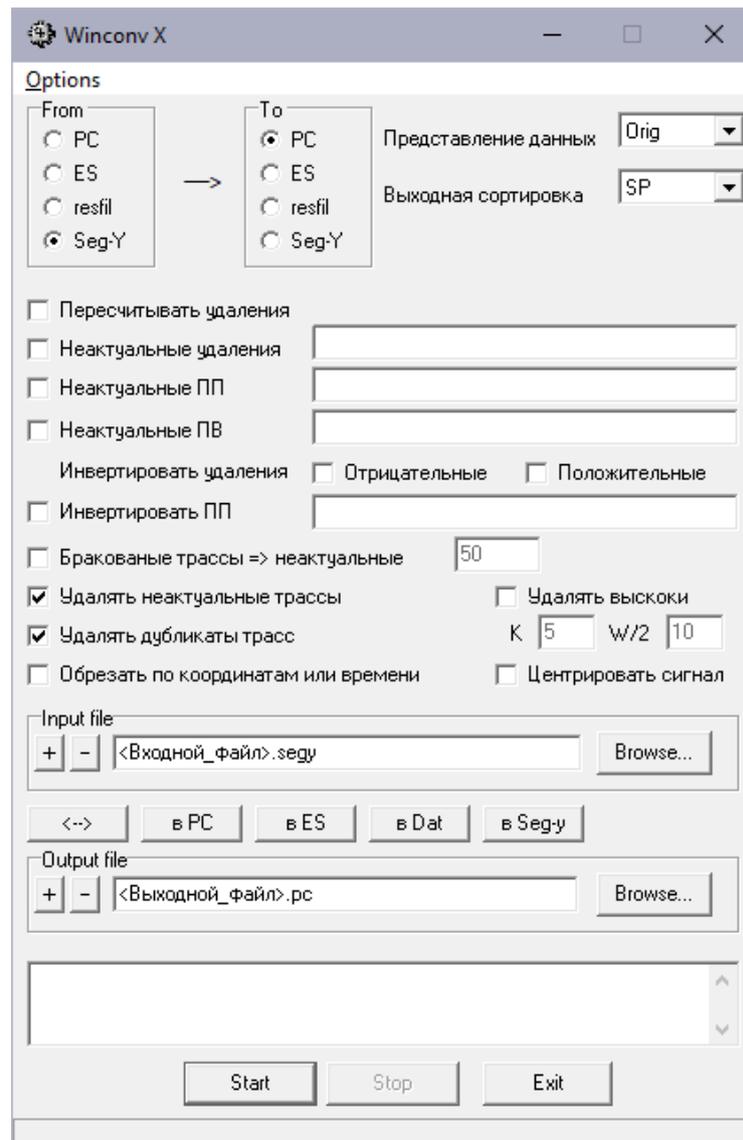


Рис. 1. Внешний вид модуля конвертации

Необходимость поддержки работ с регистрацией многокомпонентных сейсмических сигналов [3] реализовалась в их комплексном отображении и спектральном анализе. Для этих же целей был реализован экспорт свойств отраженных сигналов в пределах одной сейсмограммы.

Комплексирование пакетов программ разных разработчиков выразилось в возможности добавления к волновой картине априорных моделей строения среды в нескольких форматах внешних файлов: STR, HOR, BLN, G, D.

Как видно из рис. 3, анализ отдельной сейсмограммы позволяет вычислить скоростной спектр и вручную определить наиболее подходящий априорный закон для последующего скоростного анализа. Кроме того, можно визуальнo проконтролировать результат.

Манипуляции с сейсмограммами в пределах одного файла (профиля) предполагают единообразие их последующей обработки, поэтому основные корректирующие процедуры образуют список, применяемый к каждой сейсмограмме перед ее визуализацией. В настоящее время в этот список можно внести процедуры выравнивания уровня нуля сигнала и очистки от единичных выбросов, автоматического или простого усиления амплитуд, инверсии, частотной фильтрации и деконволюции. Порядок применения процедур имеет значение, поскольку не все из них коммутативны.

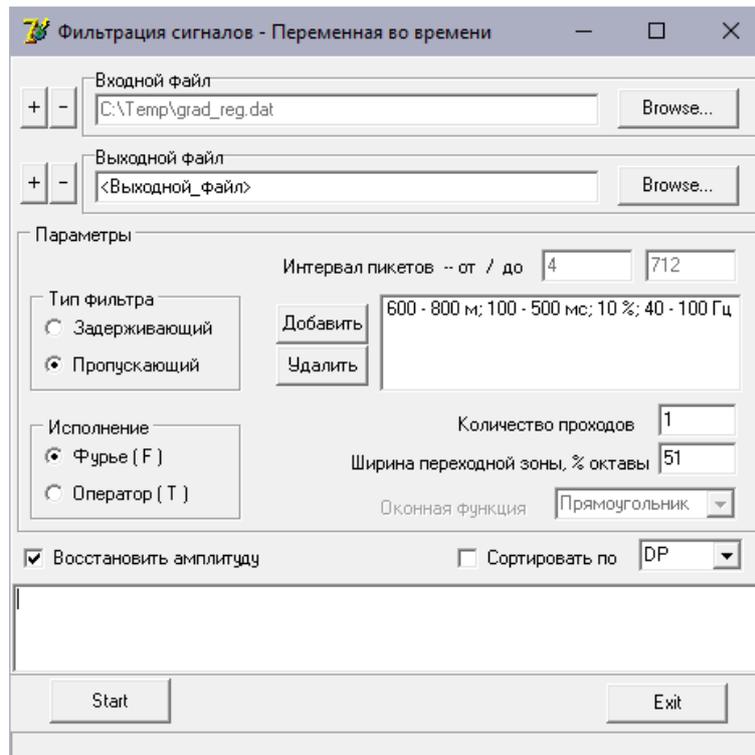


Рис. 2. Внешний вид модуля фильтрации. Можно видеть все параметры фильтра

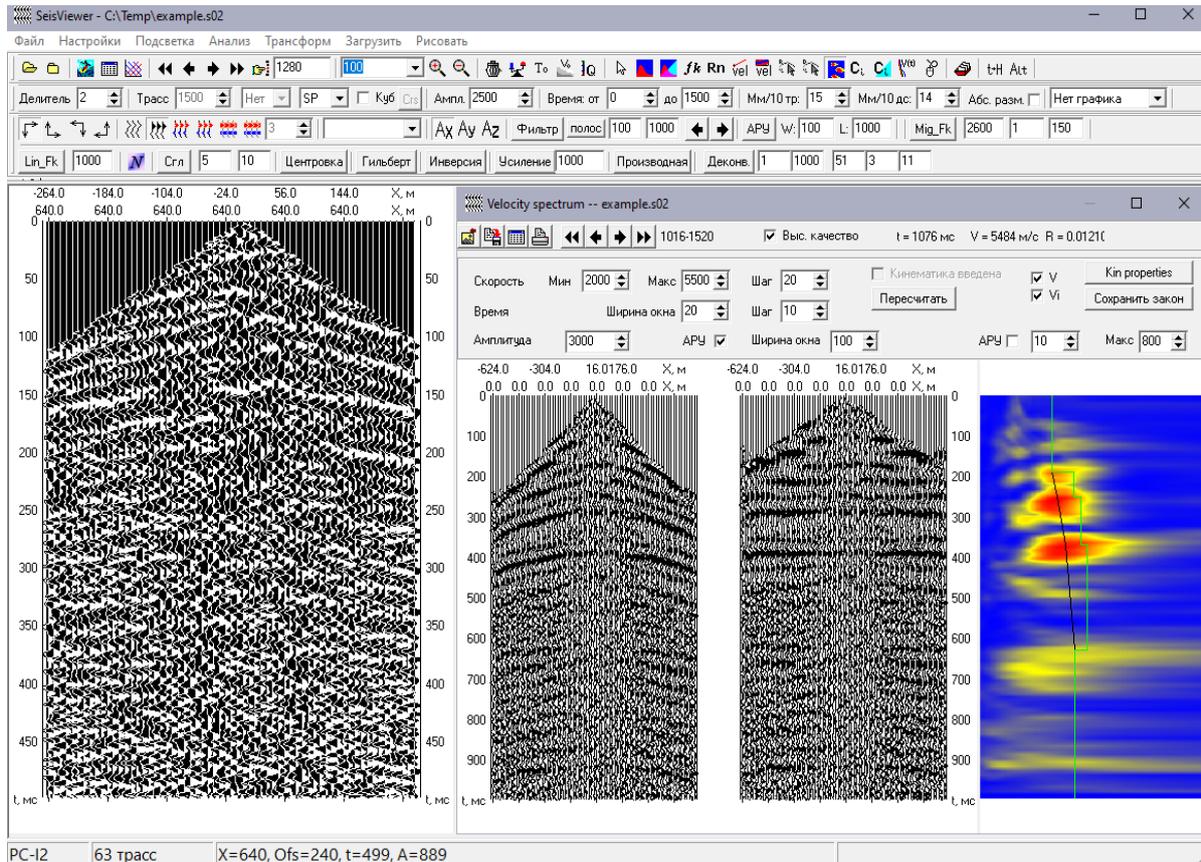


Рис. 3. Внешний вид модуля просмотра в режиме анализа скоростных спектров. Показана сейсмограмма до и после введения кинематических поправок на основании выбранного скоростного закона (правая панель)

Модуль ScanVel (рис. 4) скоростного анализа получил возможность работать не только с различными типами волновых материалов, но и разными исходными скоростными данными. Кроме поддержки «файла-паспорта» появилась возможность загрузки выходных данных этого же модуля, табличных файлов, ручного задания скоростных законов. Сам модуль в настоящее время пригоден для обработки данных 3D-сейсморазведки, а алгоритм получил несколько вариаций [4, 5, 6] как способа получения анализируемых данных, так и метода обработки непосредственных (промежуточных) результатов, что в конечном итоге призвано повысить достоверность получаемых зависимостей.

Сообразно общим представлениям о модели исследуемой среды как горизонтально-слоистой, значимые отражения волн и соответствующие скорости ожидаются лишь в некоторые моменты времени регистрации сигнала. На основании таких представлений дальнейшее преобразование получаемых данных в требуемую непрерывную кривую носит аппроксимационный характер и может включать фильтрацию. Кроме собственно скоростных зависимостей, результатом работы алгоритма являются коэффициенты корреляции волновых форм, определяющие с одной стороны качество исходного материала, с другой – надежность вычислений. Они могут быть использованы при статистическом анализе скоростей.

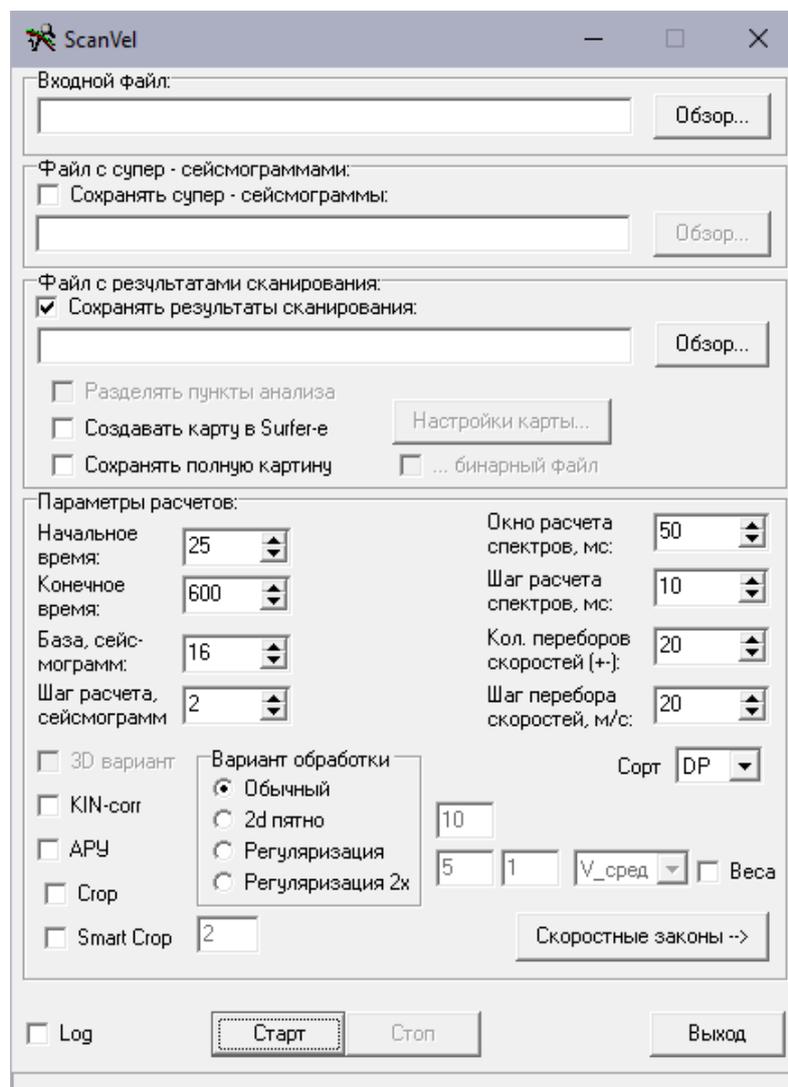


Рис. 4. Внешний вид модуля скоростного анализа

На базе этого модуля разработан алгоритм построения суммарного временного разреза без учета априорной скоростной информации [7], который может быть использован, например, для оперативного контроля полевых работ (рис. 5).

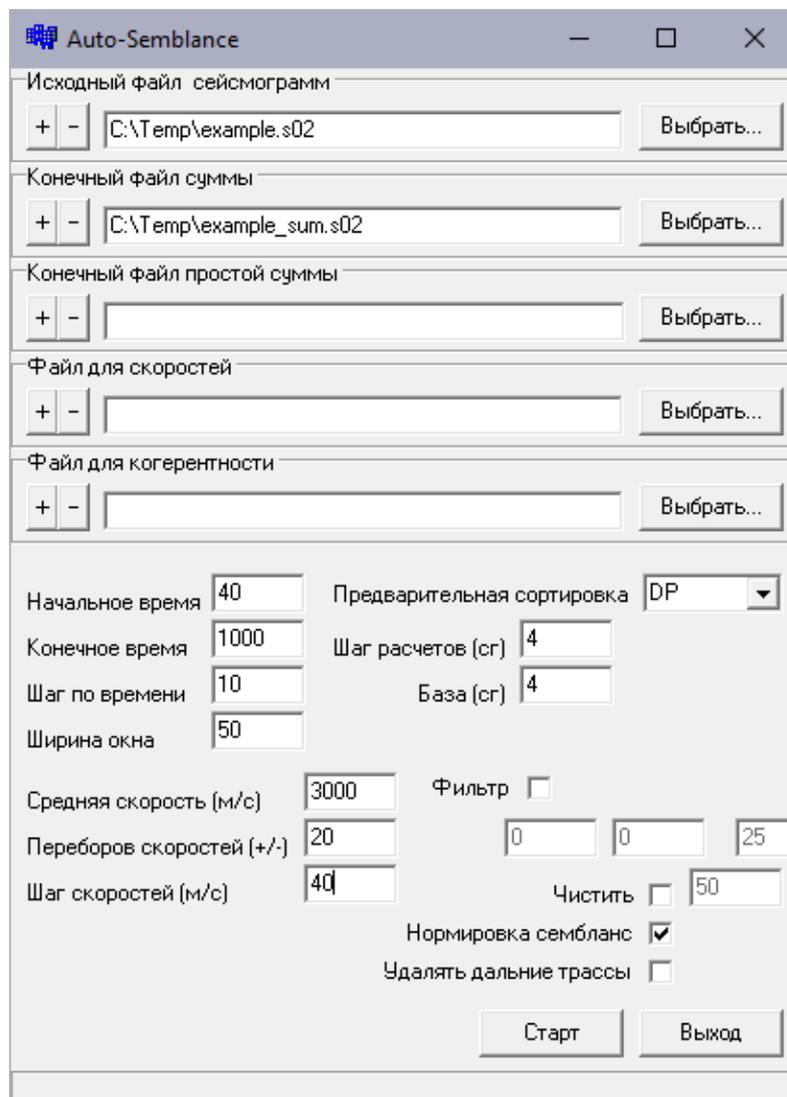


Рис. 5. Внешний вид модуля построения априорного суммарного разреза

Интерпретационный модуль Akin также подвергся изменениям. Кроме приведения его в соответствие с предыдущим модулем, изменены возможности построения моделей отражающих границ в пределах профиля – предусмотрена возможность окончания границы. Такое наблюдается при выклинивании слоя либо при наличии интервала деструкции волновой картины большого глубинного (и временного) простираения. Ранее «обрыв» границы приводил к невозможности вычисления скоростей упругих волн. Внесенные изменения напрямую позволяют вычислять скорости между любыми двумя границами без учета их соседства в модели. Для удобства интерпретатора добавлены некоторые сервисные функции: отображение априорной модели на волновом разрезе, просмотр всех использованных файлов проекта и отмена последней операции.

Кроме наземной и шахтной сейсморазведки, когда профили исследования располагаются преимущественно в горизонтальном направлении, следует упомянуть скважинную сейсморазведку. Для обработки данных межскважинного просвечива-

ния с целью поиска и картирования отражающих границ разработан отдельный модуль, реализующий лучевую миграцию [8]. В качестве исходных данных он принимает волновые данные, источник и приемник которых находятся в скважинах, и скоростную модель межскважинной среды. Модель среды представляется набором равновеликих прямоугольников, в которых и происходит распространение волн. В определенный момент имеет место отражение сигнала, конверсии типа волн в текущем варианте не предусмотрено. Преодоление границ происходит с учетом законов геометрической сейсмологии. Результатом работы алгоритма является волновая картина отражений от акустических границ, изображенная в масштабах глубин (и длин). Такой результат может служить промежуточным шагом в построении скоростной модели среды и повышает детальность расчленения геологического разреза.

В случае долговременной стабильной скважинной системы наблюдений возможно построение интерферометрического алгоритма обработки. Источником сигналов при этом могут быть как специальные источники, так и источники природно-техногенного характера, имеющие место независимо от проведения регистрации сигналов.

Таким образом развивается используемый комплекс программ, позволяющий решать определенные задачи обработки и интерпретации сейсмических данных, увеличивая полноту и достоверность получаемых заключений.

В заключение автор выражает благодарность сотрудникам отдела активной сейсмоакустики, принявшим участие в тестировании и отладке программ и алгоритмов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596030 р_НОЦ_Пермский_край.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. SPS-PC. Программный комплекс. – Текст электронный. – URL: <https://geo-cloud.ru/sps-pc-ru.html>. (дата обращения: 12. 04. 2023)
2. Программа моделирования сейсмических данных Tesserat Engineering. – Текст электронный. – <http://www.tesserat-geo.com/index.ru.php>. (дата обращения 12.04.2023).
3. Бабкин А.И. Изучение закономерностей формирования и распространения объемных сейсмических волн в породном массиве по данным трехкомпонентной записи в горных выработках // Горное эхо. – 2020. – № 4 (81). – С. 57-63. – DOI: 10.7242/echo.2020.4.12.
4. Тарантин М.В. Совершенствование алгоритма учета скоростных неоднородностей при цифровой обработке данных малоглубинной сейсморазведки // Горное эхо. – 2019. – № 3 (76). – С. 49-52. DOI: 10.7242/echo.2019.3.14.
5. Тарантин М.В. Алгоритмы обработки сейсморазведочных данных для повышения достоверности результатов скоростного анализа // Горное эхо. – 2021. – № 2 (83). – С. 60-64. – DOI: 10.7242/echo.2021.2.12.
6. Герасимова И.Ю. Применение данных метода первых волн для уточнения скоростного закона в верхнем интервале малых глубин // Горное эхо. – 2023. – № 1 (90). – С. 72-76. – DOI: 10.7242/echo.2023.1.10.
7. Тарантин М.В., Голярук Н.А. Квантовомеханический подход к построению временных разрезов при малоглубинных сейсмических исследованиях // Инженерная геофизика 2020: Материалы 16-й науч.-практ. конф. и выставки, сентябрь 2020. – Пермь, 2020. – С. 1-7. – DOI: 10.3997/2214-4609.202051030.
8. Чугаев А.В., Санфиоров И.А., Тарантин М.В. Сейсморазведка на отраженных волнах при межскважинных исследованиях на Верхнекамском месторождении калийных солей // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, № 2. – С. 293-307. – DOI:10.15372/GiG2022119.