

Выводы

Новые горнотехнические и сейсмические данные за последние восемь лет показали изменения в параметрах прогностической модели. Были выявлены новые зависимости сухой закладки от ее возраста для пластов АБ, Вк и Вс. Модернизированные параметры поспособствуют дальнейшему более точному и своевременному прогнозу сейсмической активности, а также позволят выделить наиболее опасные участки отработки на изучаемом руднике на ближайшие один-два года.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000401-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белкин В.В., Коноплев А.В., Ковин О.Н., Наумова О.Б. Мониторинг и оценка состояния геологической среды Верхнекамского соленосного бассейна // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 663.
2. Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Гравиметрический мониторинг территории разработки Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 22-25.
3. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А. Гравиметрический мониторинг потенциально-опасных участков Верхнекамского месторождения калийных солей // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2019. – № 2 (39). – С. 187-194.
4. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах: Т. 1 / отв. ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. – 549 с.
5. Гришко С.В. Результаты спутникового мониторинга территории Верхнекамского месторождения калийных солей // Master's Journal. – 2015. – № 1. – С. 231-237.
6. Злобина Т.В., Дягилев Р.А. Применение модели влияния горнотехнических параметров отработки при прогнозе сейсмической активности в калийных рудниках // Геофизика. – 2018. – № 5. – С. 12-17.
7. Злобина Т.В., Дягилев Р.А. Совершенствование модели влияния техногенных факторов для прогноза сейсмической активности на руднике СКРУ-2 // Геофизика. – 2019. – № 5. – С. 37-42.
8. Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А. Сейсмологический мониторинг на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 25-29.
9. Методические рекомендации к «Указаниям по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей»: введ. в действие с 30.03.2017 г., в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. –
10. Шулаков Д.Ю., Бутырин П.Г., Верхоланцев А.В. Сейсмологический мониторинг Верхнекамского месторождения: задачи, проблемы, решения // Горн. журн. – 2018. – № 6. – С. 25-29. – DOI: 10.17580/gzh.2018.06.05.

УДК 550.831.017

DOI:10.7242/echo.2022.1.17

РАЗВИТИЕ ВЕКТОРНОГО МЕТОДА ТРАНСФОРМАЦИИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В ПРИЛОЖЕНИИ К РЕГИОНАЛЬНЫМ ПРОФИЛЯМ

Г.В. Простолупов
Горный институт УрО РАН, г.Пермь

Аннотация: Рассмотрено программное и математическое развитие метода «Полюс», приведены примеры применения метода на сейсмическом профиле в области интенсивной солянокупольной тектоники и на профиле глубинного сейсмического зондирования «Кварц», в результате по локализации полюсов сделан прогноз вероятного местоположения соляного купола, предположительно выявлена закономер-

ность распределения полюсов, позволяющая проводить уточнение границы «Мохо». Приведены аспекты развития метода, такие как выявление наиболее эффективных для решения обратной задачи типов полюсов, свойства взаимного дополнения полюсов и принцип локализации глубокорасположенных источников при ограниченной площади гравиметрической съемки.

Ключевые слова: гравиметрия, аномалия, вектор, градиент, полюс, трансформация, разуплотнение.

В лаборатории геопотенциальных полей (ГП) с начала ее основания ведется развитие векторных методов гравиметрии, заложенных В.М. Новоселицким, основанных на вычислении и трансформации векторов потенциала поля. Система «Вектор» основана на высокой чувствительности горизонтальных градиентов V_{zx} , V_{zy} к плотностным неоднородностям. Как продолжение развиваемого в лаборатории ГП направления векторной гравиметрии, разрабатывается метод «Полюс», который задействует геометрические свойства векторов полного градиента потенциала ∇V в трехмерном пространстве быть направленными в сторону возмущающей массы. В «Векторе» используется вертикальная производная потенциала V_z , а также вторые производные потенциала – горизонтальные градиенты V_{zx} , V_{zy} , первые можно измерить гравиметром, вторые вычислить. При определении полного градиента потенциала ∇V необходимо знать его составляющие по осям координат, т.е. V_x , V_y и V_z . Значение V_z измеряется непосредственно гравиметром на пунктах съемки, горизонтальные градиенты потенциала V_x , V_y определяются с помощью алгоритма истокообразных аппроксимаций поля [1].

Вторые и третьи производные потенциала вычисляются в следующем порядке. Сначала по имеющейся аппроксимационной конструкции определяется потенциал V . Затем вычисляются первые горизонтальные V_x , V_y , вертикальная V_z и вторые производные V_{zx} , V_{zy} . Все эти расчеты можно провести аналитически ввиду относительно слабого их расхождения вблизи нуля аргумента. Вторая вертикальная производная V_{zz} вычисляется через потенциал V по формуле Гендерсона и Зитца, которая может быть получена путем преобразований уравнения Лапласа в конечно-разностном виде. Третья смешанная производная V_{zxx} , V_{zzy} вычисляется по второй вертикальной V_{zz} , а третья вертикальная производная V_{zzz} рассчитывается по упомянутым формулам через вертикальную производную V_z .

В процессе разработки метода описаны 7 видов полюсов. Согласно классификации [2] существуют определенные полюсы по прямым пересечениям векторов: первого порядка P_I^{++} , P_I^{--} по производными V_x , V_y , V_z , второго P_{II}^{++} , P_{II}^{--} по производным V_{zx} , V_{zy} , V_{zz} и третьего P_{III}^{++} , P_{III}^{--} по производным V_{zxx} , V_{zzy} , V_{zzz} , а также полюсы, неопределенные по обратным пересечениям векторов первого P_I^+ , P_I^- , второго P_{II}^+ , P_{II}^- , третьего P_{III}^+ , P_{III}^- порядков и нейтральные P_I^0 , P_{II}^0 , P_{III}^0 . Полюсы порядка выше третьего не применяются в связи с их повышенной чувствительностью к случайным отклонениям, неизбежным при обработке наблюдаемого гравитационного поля.

По итогам исследований составлена таблица полезности полюсов. Для интерпретации аномального гравитационного поля могут быть рекомендованы в первую очередь определенные основные полюсы второго P_{II}^{++} , P_{II}^{--} и третьего P_{III}^{++} , P_{III}^{--} порядков, во вторую очередь – определенные основные полюсы первого порядка P_I^{++} , P_I^{--} , определенные сопряженные второго порядка P_{II}^{++} , P_{II}^{--} и неопределенные первого порядка P_I^+ , P_I^- .

Причина преимущества первых заключается в том, что, как выяснилось, локализация полюсов P_{II}^{--} , P_{II}^{++} , P_{III}^{--} , P_{III}^{++} относительно источников является нечувствительной к фоновым колебаниям поля в связи с достаточно узким диапазоном допустимых к расчету векторов с незначительным отклонением от вертикали (не более 15° , что также приводит к уменьшению линейной базы S угловой засечки для каж-

дой пары векторов), т.о. область перегиба графика является определяющей. Как показали расчеты на моделях, этой части вполне достаточно, чтобы получить вектора для надежного расчета пространственных параметров источника, что является положительным моментом, т.к. при суперпозиции источников, именно пиковые значения поля, расположенные над источниками, оказываются наименее искаженным и более «приметными» в поле.

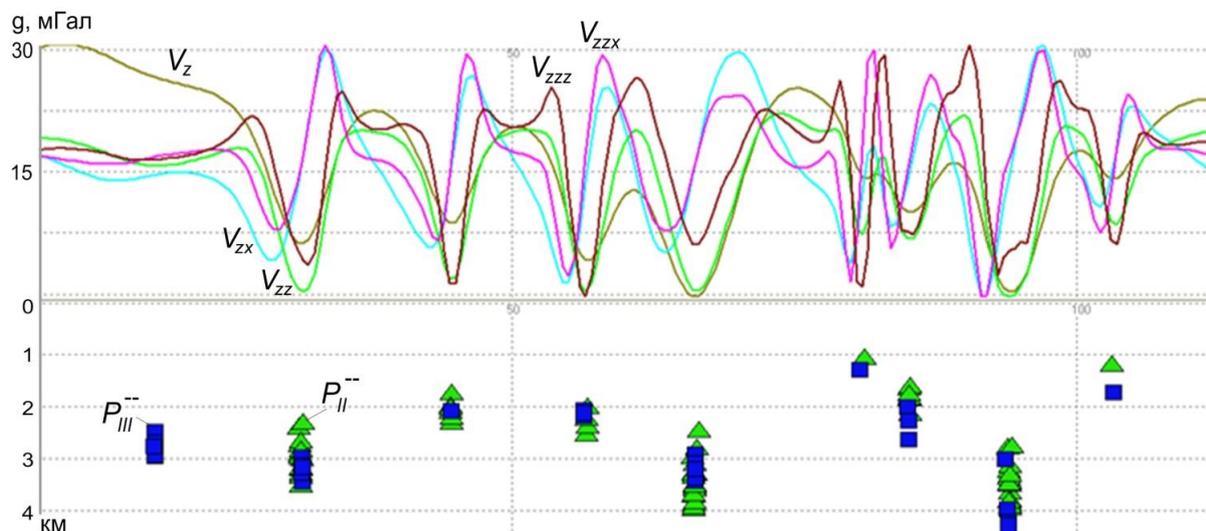


Рис. 1. Распределение полюсов $P_{II}^{\ddot{}}$ и $P_{III}^{\ddot{}}$ регионального гравиметрического профиля в районе интенсивной соляно-купольной тектоники по заданному полю V_z

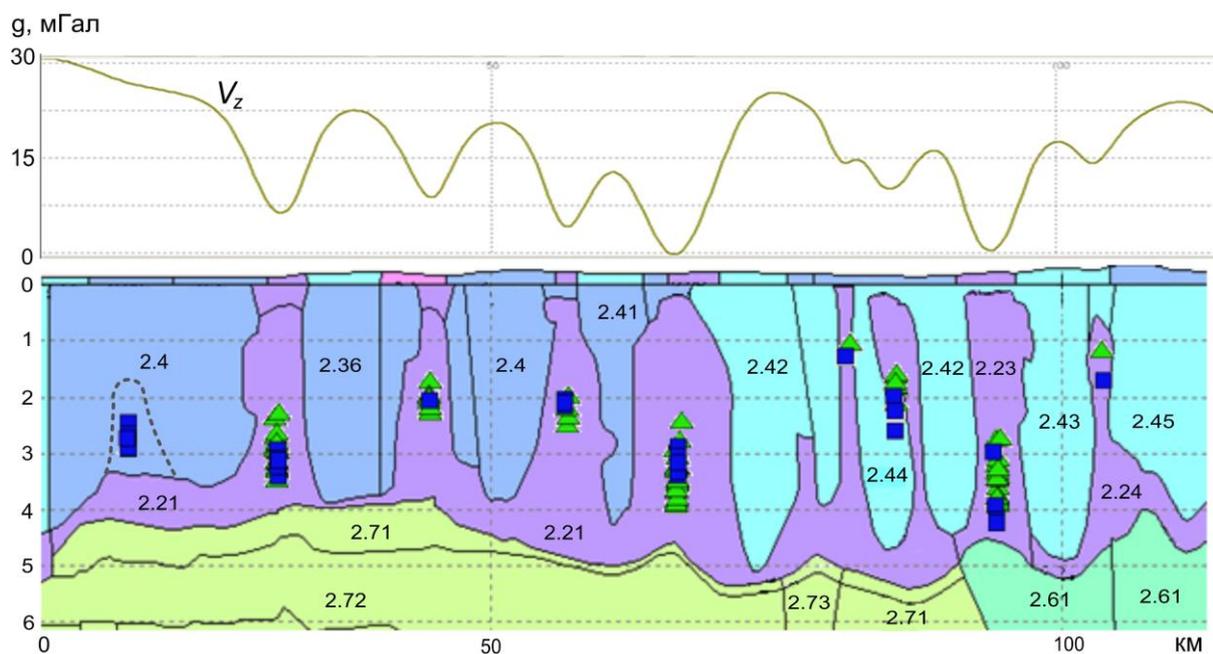


Рис. 2. Распределение полюсов $P_{II}^{\ddot{}}$ и $P_{III}^{\ddot{}}$ по заданному на графике полю V_z на фоне подобранной сейсмо-плотностной модели в районе интенсивной соляно-купольной тектоники

Возможность в программе Polus одновременного вывода всех трех видов полюсов на экран, позволило сравнивать локализационные возможности полюсов и особенности их распределения относительно источника. После объединения всех полюсов на одной

диаграмме подтвердилось, что свойства локализации полюсов имеют взаимодополняющий эффект, в совокупности способствуя более точному определению координат источника поля [3] (см. рис. 1).

Интерпретационные возможности метода «Полюс» рассмотрим на примере регионального сейсмо-гравиметрического профиля в пределах оренбургской части восточного борта Предуральяского прогиба и зоны передовых складок Урала [4]. Здесь помимо сейсмической была проведена гравиметрическая съемка точностью ± 0.020 мГал. Длина профиля 120 км, геологический разрез характеризуется интенсивными процессами солянокупольной тектоники. Высота куполов достигает 4-5 км. При этом подобное неслоистое строение является осложняющим фактором для сейсморазведки, поэтому с целью выявления подсолевого строения дополнительно к сейсморазведке была привлечена профильная гравиметрия.

На основе каркаса, построенного по итогам интерпретации сейсмических материалов, методом подбора в программе «Гравиметрическое моделирование разреза» создана сейсмо-плотностная модель.

Согласно принятому алгоритму, методом истокообразных аппроксимаций по рассчитанным значениям V_z получены величины производных потенциала V_z , V_x , V_y , а также высшие производные V_{zx} , V_{zy} , V_{zz} , V_{zxx} , V_{zzy} , V_{zzz} (графики на рис. 1). По ним построены градиенты ∇V , ∇V_z , ∇V_{zz} и рассчитаны координаты пересечений полных векторов в пространстве, в результате чего построены определенные основные отрицательные полюсы, P_{II}^- , и P_{III}^- (рис. 1). Полюсы первого порядка P_I^- показали недопустимый разброс, в отличие от точек P_{II}^- , и P_{III}^- .

Полученное распределение полюсов P_{II}^- , и P_{III}^- наложено на модель сейсмо-плотностного разреза (рис. 2). Наблюдается закономерное совпадение скопления полюсов с соляными куполами. В начале разреза произошла локализация полюсов P_{III}^- на глубине 2.5-3 км в толще, относящейся к межкупольному пространству. Анализ разреза и наличие скопления источников типа P_{III}^- говорит о вероятном наличии в этом месте еще одного соляного купола (показано пунктиром на рис. 2).

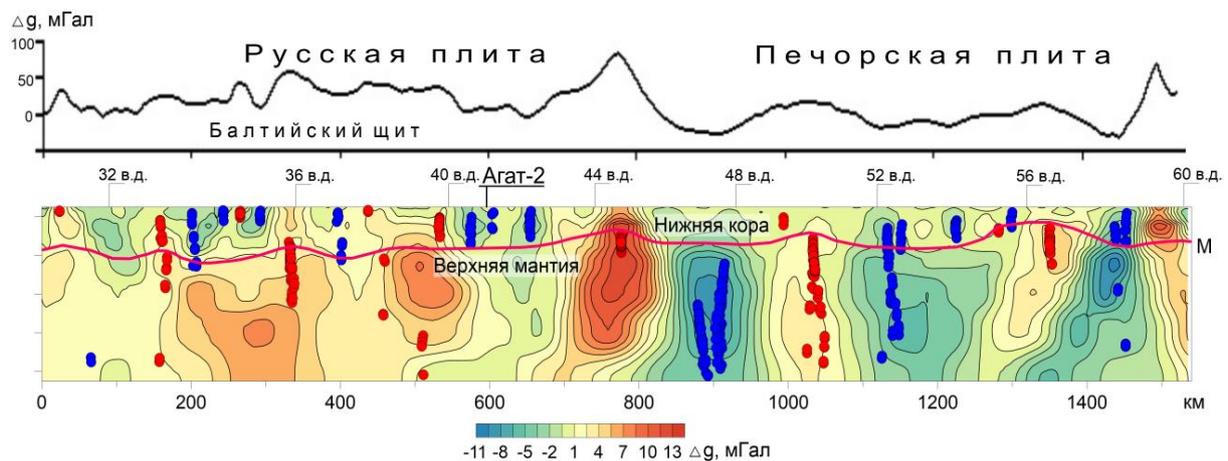


Рис. 3. Вертикальный срез гравитационной диаграммы 3D в системе «Вектор» по линии профиля «Кварц»: источники P_I^{++} , P_I^- (определены по программе Polus) красного цвета соответствуют положительным избыточным массам, синего – отрицательным

Рассмотрим приложение метода «Полюс» к исследованиям поверхности «Мохо» и верхней мантии на профиле глубинного сейсмического зондирования «Кварц» [5]. Глубины зондирования на диаграмме распределения аномалий в системе «Вектор» в пределах профиля достигают 80 км. Профиль построен на территории Се-

верной Европы, имеет начало на северо-западе Кольского полуострова, пересекает Мезенскую синеклизу, Тимано-Печорскую платформу, Уральскую складчатую область (рис. 3).

В целом можно отметить преобладание положительных глубинных (ниже поверхности «Мохо») аномалий Δg в пределах Русской плиты, и отрицательных – в пределах Печорской плиты. Построенное множество определенных полюсов P_I^{++} , P_I^- в основном подчиняется этой закономерности.

Обработка данных в программе Polus позволила в плоскости профиля построить скопления точек в виде вертикальных рядов, образованных аномальными источниками на соответствующей глубинах. Ряды отчётливо классифицируются на две группы: одни находятся в пределах земной коры (выше границы «Мохо»), другие глубинные – в верхней мантии.

Наблюдаются характерные особенности расположения полюсов P_I^{++} , P_I^- и привязка вертикальных скоплений к границе «Мохо». Верхние границы рядов положительных скоплений совпадают с приподнятыми участками границы. Нижние окончания вертикальных рядов отрицательных полюсов совпадают со впадинами границы «Мохо», что является интересной закономерностью, позволяющей, вероятно, проводить уточнение границ «Мохо», в местах отсутствия сейсмических профилей.

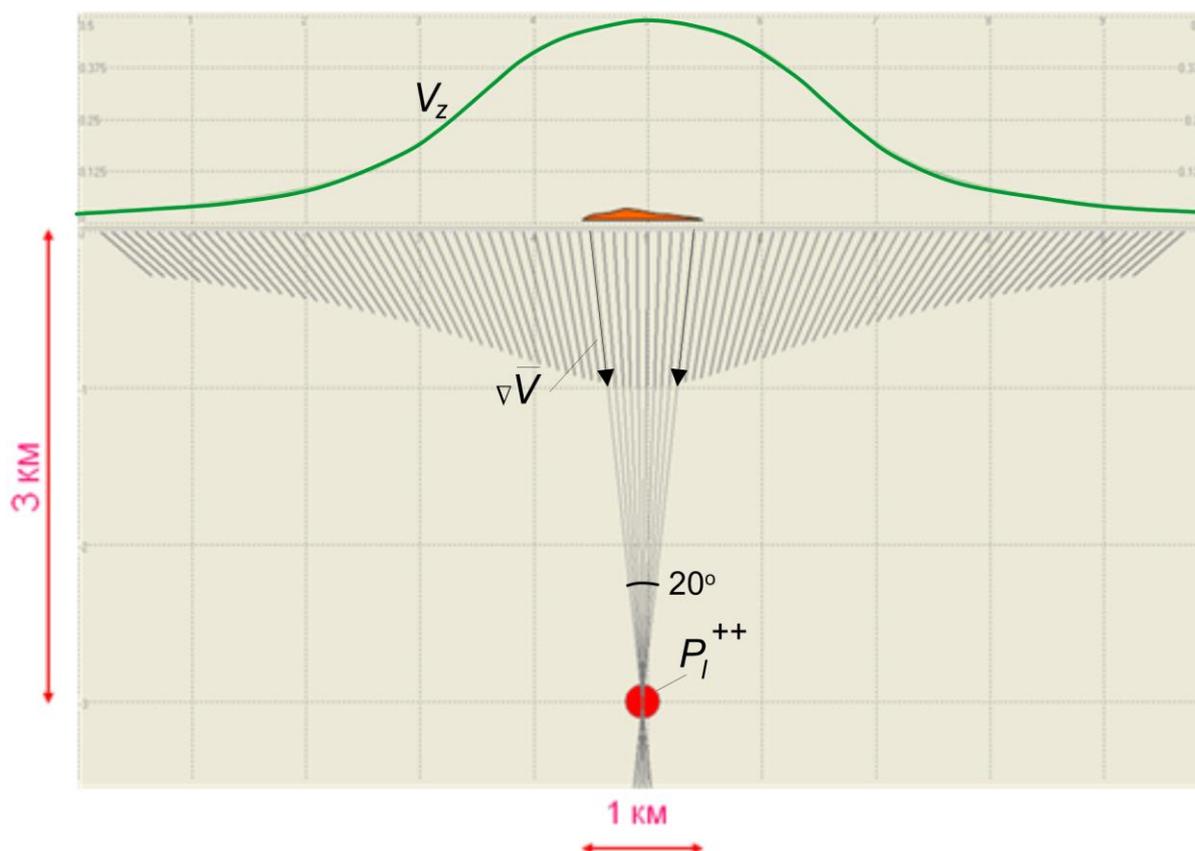


Рис. 4. Схема локализации источников гравитационного поля V_z на ограниченном пространстве методом «Полюс»

В свете применения полярного метода для глубоких горизонтов исследования земной коры в некоторых случаях может возникнуть необходимость исследовать глубокозалегающие источники при ограниченной площади съемки. Как известно, линейные размеры участка гравиметрической съемки должны не менее чем в три

раза превышать глубину залегания изучаемых геологических объектов – 3:1. Векторный метод «Полюс», что подтверждается теоретическими примерами, снимает это ограничение. Действительно, для надежной засечки точки пересечения пары векторов для локализации полюса достаточно угла в $15-25^\circ$ между продолжениями векторов в точке полюса. Наиболее же точную засечку точки пересечения полюсов обеспечивает угол 90° . Даже при таком варианте соотношения размеров участка к изучаемой глубине составляет уже 2:1. Схема локализации полюсов P_I^{++} , когда размер участка составляет всего треть от глубины, показана на рис. 4, т.е. соотношение размера участка к глубине составляет всего 0.3:1, что в 10 раз меньше привычной рекомендованной пропорции. На модельном примере такого малого угла достаточно для локализации, но это можно считать предельным случаем применимости метода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000398-0).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долгаль А.С. Аппроксимация геопотенциальных полей эквивалентными источниками при решении практических задач // Геофизический журнал. – 1999. – Т. 21, № 4. – С. 71-80.
2. Простолупов Г.В. Сравнение двух векторных методов трансформации гравитационного поля // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 48-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова / ВСЕГЕИ, Санкт-Петербургский горн. ун-т. – СПб., 2022. – С. 213-217.
3. Простолупов Г.В. Определение основных параметров источников гравитационного поля методом «Полюс» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 44-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского / ИФЗ РАН. – М., 2017. – С. 319-324.
4. Проведение региональных сейсморазведочных работ в комплексе с гравиметрией в пределах Оренбургской части восточного борта Предуральяского прогиба и зоны передовых складок Урала: отчет по договору № 094/22-07 от 10. 04 2007 г. с ОАО «Оренбургская геофизическая экспедиция». в 3-х кн. и 2-х папках / отв. исполн. В.М. Новоселицкий. – Пермь, 2008. – (Фонды ГИ УрО РАН)
5. Чадаев М.С., Костицын В.И., Гершанок В.А., Ибламин Р.Г., Тарантин М.В., Простолупов Г.В. Геолого-геофизические методы изучения земной коры: Монография / под общ. ред. М.С. Чадаева; ПГНИУ, ГИ УрО РАН. – Пермь, 2019. – 148 с.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2022.1.16

КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ШАХТНЫХ СЕЙСМО- И ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И.А. Санфи́ров, Ю.И. Степа́нов
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье рассматриваются примеры интерпретации данных шахтных сейсмо- и электроразведочных наблюдений. Показана пространственно согласованная изменчивость эффективных скоростей распространения упругих волн продольного типа и кажущегося сопротивления в заданных направлениях исследований породного массива. Предложена схема формирования интерпретационных заключений в зависимости от характера изменчивости анализируемых параметров. В качестве дополнительной информации возможно привлечение результатов многоволновой сейсморазведочной технологии.