

Рис. 8. Схема результатов сейсморазведочных исследований

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596032

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барях А.А., Санфиоров И.А., Федосеев А.К., Бабкин А.И., Цаюков А.А. Сейсмогеомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 10-22. – DOI: 10.15372/FTPRPI20170602.
2. Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Недра, 1982. – 344 с.: ил.
3. Санфиоров И.А., Чугаев А.В., Бабкин А.И., Лисин В.П., Бобров В.Ю. Горнотехнические приложения малоглубинной скважинной сейсморазведки // Геофизика. – 2018. – № 5. – С. 24-30.
4. VSP_7 Программа обработки записей вертикального сейсмоакустического профилирования / Виктор Лисин. – Рига, 2017.

УДК 550.834, 550.837, 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2022.2.14

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СОВМЕСТНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ШАХТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М.В. Тарантин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: О наличии определенной связи между упругими и электрическими свойствами горных пород свидетельствуют некоторые теоретические и экспериментальные работы. Это соотношение может характеризовать некоторые другие свойства подземного пространства, поэтому его исследование и обнаружение в уже имеющихся результатах измерений представляется целесообразным для обеспечения безопасности ведения горных работ. Результаты электроразведочных работ представляются в виде разрезов кажущихся сопротивлений вглубь среды, результаты сейсмических работ – в виде распределения эффективных скоростей упругих продольных или попе-

речных волн также в плоскости профиля. Настоящая работа отражает попытки обнаружения на картах этих характеристик пространственно совпадающих особенностей, экстремумов, способных охарактеризовать неоднородность геологической среды с точки зрения ее устойчивости к внешним воздействиям.

Ключевые слова: шахтные геофизические исследования, сейсморазведка, электроразведка, комплексирование.

Введение

Среди геофизических работ, проводимых на месторождениях полезных ископаемых шахтного типа, широкое распространение получили сейсмические и электрические исследования. Их совместное применение позволяет выявить дополнительные особенности строения породного массива. Каждый из методов устраняет возможные неопределенности интерпретации результатов обработки другого, и такой комплекс успешно применяется не только в шахтном исполнении, но и в наземном и морском.

Согласование упругих и электрических свойств сред возможно с помощью составления уравнений с параметрами, и выбор этих уравнений, их основополагающих гипотез, влечет за собой особенности результирующих выражений. В работе [1] для согласования результатов разных методов исследования успешно использовалось уравнение Фауста, хотя другими авторами [2] показана ограниченность возможности его применения в случае высокой глинистости или сильной нарушенности пород. Для устранения таких ограничений ими же предложен новый вычислительный подход. В результате обобщений [3] материалов исследования территории, сложенной преимущественно гранодиоритами, обнаружено два основных тренда корреляции электрических и упругих свойств слагающих толщ – их одно- и разнонаправленные изменения, которые можно объяснить степенью консолидации пород приповерхностного и глубинного слоя. Лабораторные исследования собственно гранитов [4] обнаружили единство тренда поля корреляции их параметров. Теоретические исследования [5] способны объяснить оба варианта соотношения электрической проводимости и скоростей упругих волн, достаточно выбрать подходящую для среды модель. В пределах Верхнекамского месторождения солей по наблюдениям [6] имеют место два варианта соотношения обсуждаемых величин. Учитывая результаты [3], это может отражать различные особенности строения породного массива. В этой связи представляется актуальным поиск и выделение участков прямой и обратной корреляции откартированных параметров для более достоверной характеристики физических, в том числе прочностных, свойств горных пород.

Методы анализа

Учитывая локальность проявления особенностей на разрезах используемых параметров, целесообразно выбрать их обработку в скользящем окне. Это дает квазинепрерывный результат, отражающий локальные изменения свойств среды. Однако в случае существенной контрастности параметров может быть применен метод прямого сопоставления полей, когда окно охватывает весь анализируемый массив.

Сообразно наблюдаемым соотношениям [6] в выбранном окне рассматривается поле корреляции двух свойств горного массива – электрического сопротивления и скорости распространения упругих волн. В качестве численной характеристики выбирается коэффициент их корреляции, принимающий значения от -1 , когда при уменьшении одной величины другая увеличивается, до $+1$, когда обе величины изменяются однотипно. Нулевое значение соответствует отсутствию связей. По-

скольку в данном случае интерес представляет направление изменения параметров в окне, дополнительно вычисляется «базовый» уровень и локальная составляющая; значение последней ищется в центральной части окна, базовый уровень – на периферии.

Ввиду очевидно возможных колебаний вычисляемого «базового» уровня в пределах исследуемого пространства представляется логичным использование единого «среднего» отклонения, от которого и рассматриваются в качестве признака. В таком варианте анализа определяется среднее значение каждого параметра на всем заданном интервале и вычисления проводятся в каждой единичной точке. При этом отсутствует пространственная неопределенность из-за эффекта сглаживания или осреднения результата, что дает большую дифференцированность результата по сравнению с обычными оконными вычислениями, поскольку каждая анализируемая точка массива никак не зависит от соседних, а определяется только входными данными. В этом случае определяется только согласованность «направлений изменения» величин, так как корреляция предполагает использование нескольких значений.

На начальном этапе исследований алгоритм и его параметры выбираются пользователем, исходя из визуального анализа имеющихся полей – задаются размеры окон (раздельно по латерали и глубине). Градация результатов осуществляется путем задания палитры по нескольким реперным точкам – это упрощает восприятие общей картины.

В предположении слоистости изучаемой среды, присутствующей на разрабатываемом шахтным способом месторождении, вероятно наличие некоторого тренда скоростей, повышающего значения с глубиной исследования. Это затрудняет определение направления изменения скоростей в выбранном окне. Для устранения неопределенности можно снимать общий тренд с поля скоростей, либо уменьшать размеры окна по глубине, определяя ее изменения преимущественно вдоль предполагаемого слоя. Второй подход представляется более предпочтительным ввиду неопределенности типа общего тренда.

Очевидно на результат работы алгоритма влияет размер окна вычислений. Учитывая различный пространственный масштаб вариаций электрического сопротивления и скоростей распространения волн, следует выбирать окно чуть меньшего размера, чем максимальный характерный размер вариаций параметров. На начальном этапе размер задается пользователем.

Сравниваемые параметры характеризуют реальные среды, поэтому они имеют определенную погрешность и допустимые колебания, никак не влияющие на основные свойства пород. По этой причине разделение среды на области по четырем выбранным критериям следует проводить с учетом коэффициента корреляции – в случае его малости доверие к выводу о типе среды будет так же мало. Поэтому к четырем определенным типам среды добавляется один неопределенный, а порог значимости коэффициента корреляции определяется в процессе исследований экспериментально, с учетом дополнительной информации.

Некоторые результаты

В качестве демонстрации рассмотрим первый из примеров, приведенных в [6], демонстрирующий синфазное изменение обоих геофизических параметров (рис. 1). Как видно, выделенная ранее область (синий контур) не полностью распознается алгоритмом как разуплотненная (тип штриховки 4). При отнесении части рассматриваемой карты к увлажненным породам (тип 2) следует учитывать вероятно малую достоверность такого вывода из-за низкой корреляции скоростей и сопротивлений ($R^2 < 0,4$).

Малые значения коэффициента корреляции свидетельствуют о «фоновых» значениях геофизических параметров, присущих как правило плотным породам. Поэтому результаты работы алгоритма в области пикетов 45-55 можно также отнести к плотным породам, что хорошо согласуется со сделанными ранее выводами об однородности в этой части профиля.

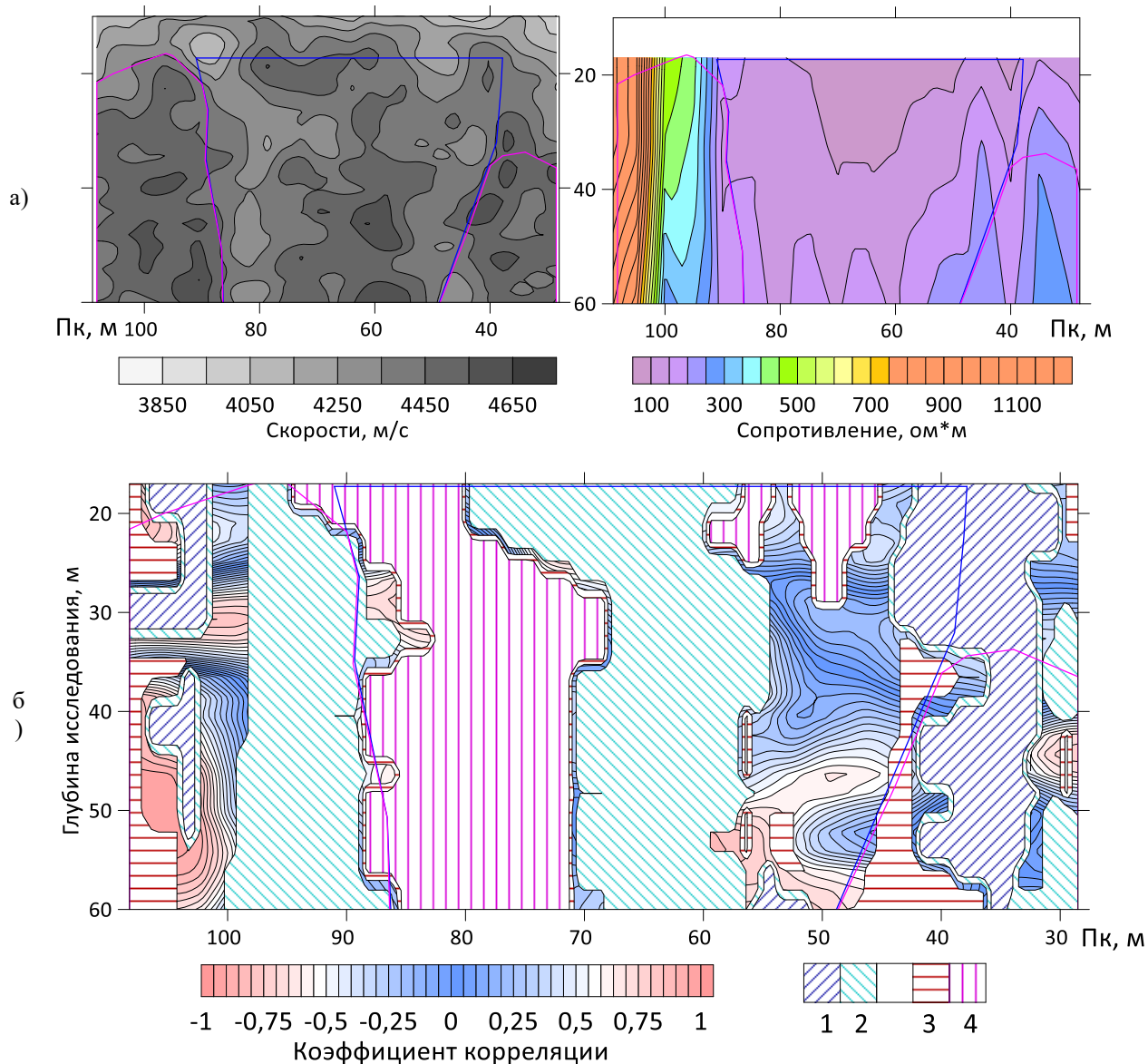


Рис. 1. Карты исходных геофизических параметров (а) и их соотношение (б). Штриховкой обозначены области, выделенные алгоритмом как плотные породы (1), увлажненные (2), газонасыщенные (3), разуплотненные (4)

В качестве примера профиля с областью разнонаправленного изменения рассматриваемых геофизических параметров можно привести шахтный профиль с наблюдаемыми водопроявлениями (рис. 2). В координатах профиля эта область тяготеет к пикету 10 м. По результатам работы алгоритма можно выделить еще одну подобную область в районе пикетов 80-90 м. В обоих случаях корреляция скорости продольных волн и сопротивлений достигает значений 0,95, но во втором случае по имеющимся результатам область не выходит на поверхность наблюдений (глубина 0).

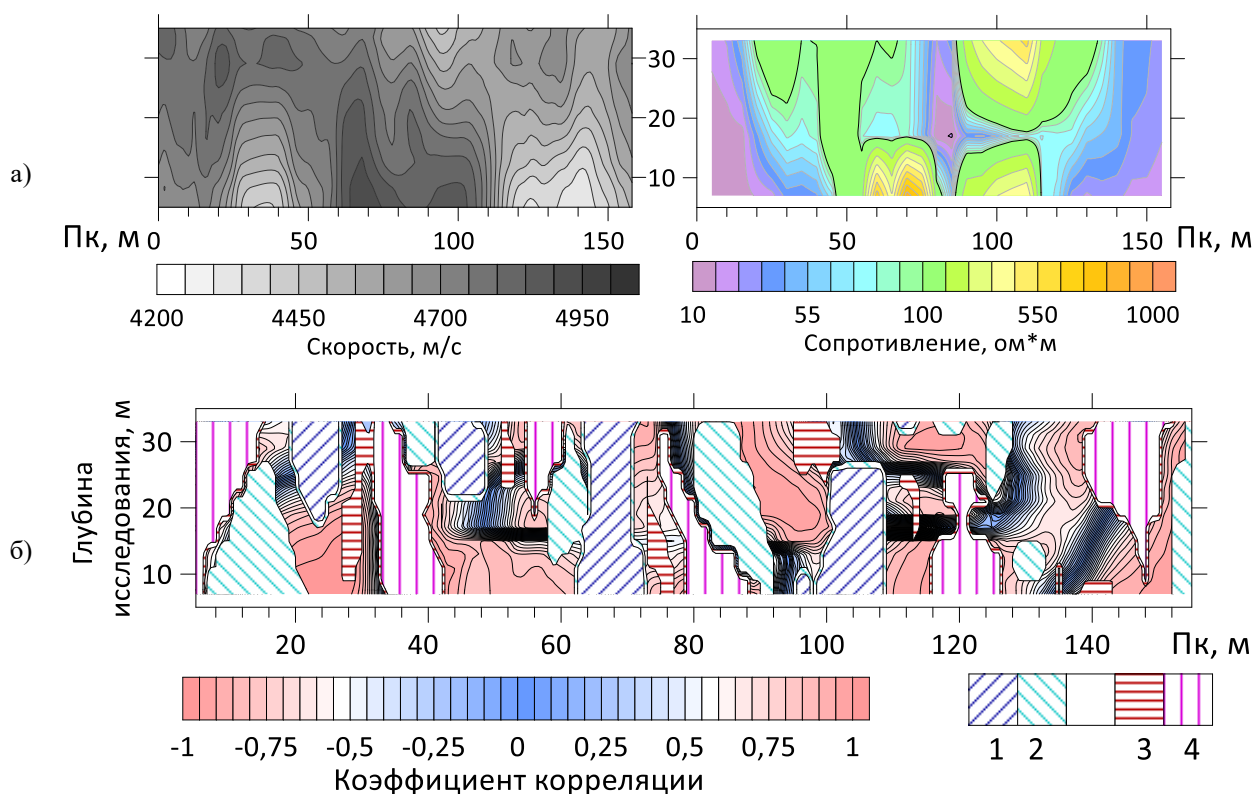


Рис. 2. Карты исходных геофизических параметров (а) и их соотношение (б) для профиля вблизи зоны водопроявления. Штриховка как на рис. 1

На следующем профиле масштаб латеральных колебаний скорости заметно больше, чем для кажущихся сопротивлений пород (рис. 3а), что обусловило выбор окна в 20 м. По соотношению сопротивления и скоростей здесь предполагалась область газонасыщения в интервале пикетов 40-100 м. По результатам работы алгоритма эта зона уменьшилась до пикетов 50-60 м, но обнаружилась подобная в районе пикета 120 м. Оба раза коэффициент корреляции оказался достаточно высок ($R^2 > 0,7$), хотя не распространяется на всю глубину исследования. В окрестности пикета 120 при производстве шахтных работ было зафиксировано газодинамическое явление.

Значительная доля результирующих карт (рис. 2 и 3) отражает высокую степень корреляции исходных параметров, но остается без штриховки. Это обусловлено слабой выраженностью направленности изменения величины в пределах одного рассматриваемого окна, как на рис. 2, либо чрезвычайной плавностью изменения скоростей на исходной карте, как на рис. 3. Кроме этого определенные ограничения накладывает количество точек электрического сопротивления на один пикет, задающее возможное количество выделяемых слоев. Возможно, алгоритм требует дополнения исходных данных за счет предполагаемой модели (например, слоистой) среды. В таком случае оконные вычисления следовало бы проводить в пределах одного слоя, без пересечения его «кровли» и «подшвы».

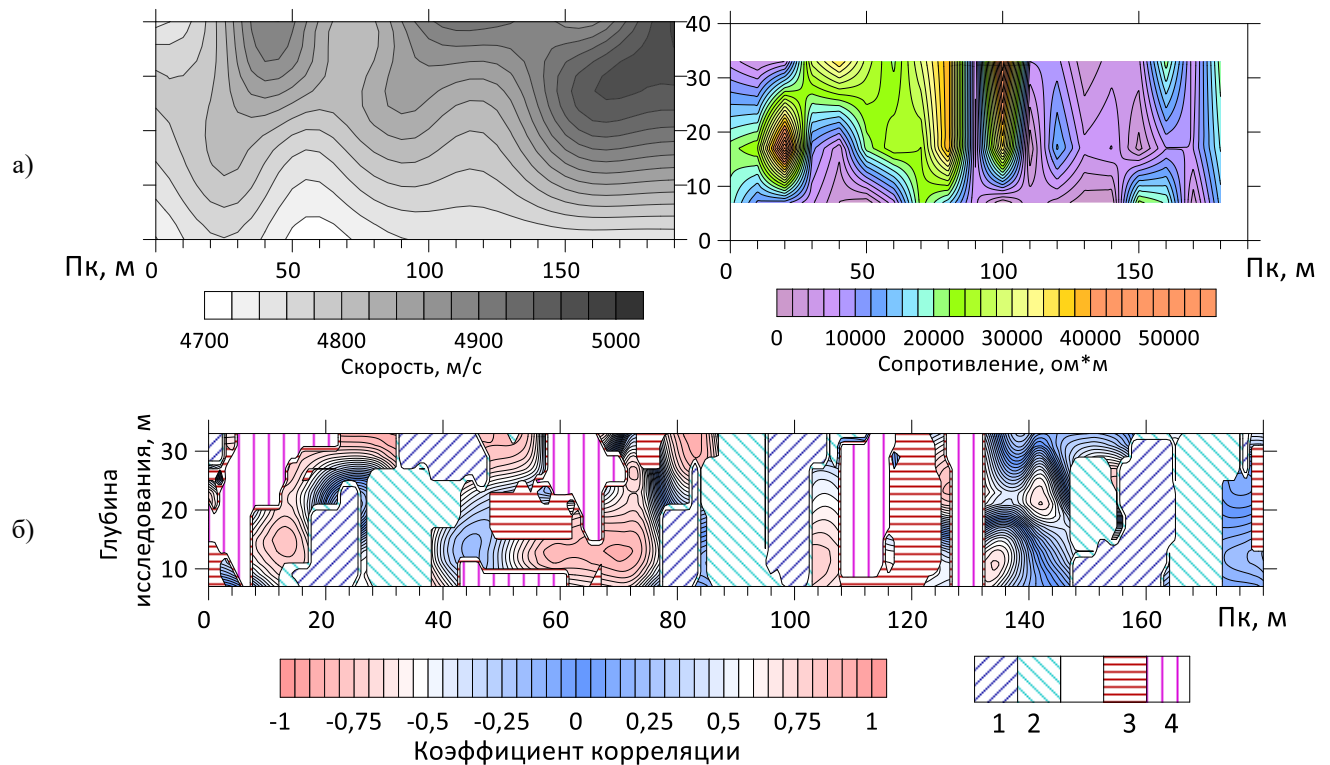


Рис. 3. Карты исходных геофизических параметров (а) и их соотношение (б) для профиля вблизи газодинамического явления. Штриховка как на рис. 1

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. McKay A., Rønholt G., Tshering T., Naumann S. Joint interpretation of high-resolution velocity and resistivity models from the Barents Sea // *First Break*. – 2016. – V. 34. – P. 73-77.
2. Hacikoylu P., Dvorkin J., Mavko G. Link between electrical resistivity and seismic velocity // *Society of petroleum engineers, 68th European Association of Geoscientists and engineers conference and exhibition, incorporating SPE Europees*. – 2006. – Код 69366. – DOI: 10.3997/2214-4609.201402262.
3. Meju M.A., Gallardo L.A., Mohamed A.K. Evidence for correlation of electrical resistivity and seismic velocity in heterogeneous near-surface materials // *Geophysical Research Letters*. – 2003. – V. 30, № 7. – P. 1373-1376. – DOI:10.1029/2002GL016048.
4. Watanabe T., Higuchi A. Simultaneous measurements of elastic wave velocities and electrical conductivity in a brine-saturated granitic rock under confining pressures and their implication for interpretation of geophysical observations // *Progress in Earth and Planetary Science*. – 2015. – V. 2, № 1. – номер статьи 37. – DOI: 10.1186/s40645-015-0067-0.
5. Carcione J.M., Ursin B., Nordskog J.I. Cross-property relations between electrical conductivity and the seismic velocity of rocks // *Geophysics*. – 2007. – V. 72, № 5. – P. E193-E204. – DOI: 10.1190/1.2762224.
6. Санфиров И.А., Степанов Ю.И. Комплексная интерпретация шахтных сейсмо- и электроразведочных исследований // *Горное Эхо*. – 2022. – № 1 (86). – С. 113-118. – DOI: 10.7242/echo.2022.1.16.