



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 3. С. 208–218

Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2022, vol. 22, iss. 3, pp. 208–218

<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-3-208-218>

Научная статья

УДК 550.83

Многопризнаковая петрофизическая классификация горных пород как основа интерпретации геофизических данных



Н. П. Сенчина[✉], Т. А. Мингалева

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2

Сенчина Наталия Петровна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, senchina_np@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5458-648X>

Мингалева Татьяна Андреевна, аспирант, tatiana.mingaleva@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6867-1981>

Аннотация. В статье проведена апробация способа комплексной интерпретации геофизических данных с использованием алгоритма классификации без эталона. Получена дифференциация площади участка по классам в зависимости от величины параметров, вычисленных в результате инверсии на уровне поверхности фундамента. Далее классы сопоставлены с петрофизическими материалами из литературных источников. Путем сопоставления инвертированных параметров и значений свойств пород получена схема вещественного состава для изучаемой площади. Показана применимость данного подхода для комплексной интерпретации геофизических данных, в частности, в пределах малоизученных территорий со сложным геологическим строением.

Ключевые слова: петрофизика, комплексная интерпретация, классификация, несейсмические методы

Для цитирования: Сенчина Н. П., Мингалева Т. А. Многопризнаковая петрофизическая классификация горных пород как основа интерпретации геофизических данных // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 3. С. 208–218. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-3-208-218>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Multi-feature petrophysical classification of rocks as a basis for interpretation of geophysical data

N. P. Senchina[✉], T. A. Mingaleva

Saint-Petersburg Mining University, 21st Lina, Saint Petersburg 199106, Russia

Nataliya P. Senchina, senchina_np@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5458-648X>

Tatyana A. Mingaleva, tatiana.mingaleva@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6867-1981>

Abstract. The work is carried out approbation of the algorithm for the complex interpretation of geophysical data using data classification algorithm. Distributions by class are obtained and compared with petrophysical materials from published sources. This data is compared and geological composition of the studied area is obtained. The applicability of this approach for the integrated interpretation of geophysical data is shown, including low-level studied areas with a complex geological structure.

Keywords: petrophysics, complex interpretation, classification, non-seismic methods

For citation: Senchina N. P., Mingaleva T. A. Multi-feature petrophysical classification of rocks as a basis for interpretation of geophysical data. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2022, vol. 22, iss. 3, pp. 208–218 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-3-208-218>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Внедрение новых технологических решений по оптимизации процессов разных отраслей становится неотъемлемой частью жизни, это коснулось и геологоразведочной отрасли, в том числе геофизики. В недавнем прошлом для поиска и разведки полезных ископаемых зачастую использовались относительно простые поисковые признаки. В настоящее время фонд крупных, дающих контрастные аномалии, легкооткрываемых месторождений обедняется и актуализируются

задачи, связанные с поиском и разведкой полезных ископаемых в сложных геологических условиях. Это требует развития новых методических подходов, включающих разработку интегрирующих разные данные методических решений [1–3], оптимальных алгоритмов интерпретации [4–6], наиболее полно учитывающих уже имеющуюся априорную информацию.

Так как многие задачи геологоразведки предусматривают моделирование вплоть до значительных глубин по минимальному набору



информации и часто без верификации, в некоторых случаях геофизические данные будут характеризоваться [7]:

- недостаточной разрешающей способностью или плотностью распределения по территории и по глубине;
- проблемами множественности решения обратной задачи;
- сложностями идентификации геологического состава изучаемой среды, так как одно и то же свойство может соответствовать разным типам пород;
- невозможностью полного охвата большого массива информации априорных данных при экспертной оценке и инверсии геофизических полей.

Частично борьба с такими сложностями может проводиться путем комплексирования с использованием современных алгоритмов обработки обширных цифровых массивов [4, 8].

Данные наземных геофизических исследований, как правило, представляются в виде дискретного распределения значений физического поля по профилю или площади исследования. Результаты, полученные в ходе геофизических работ разными методами, позволяют получить разнородную информацию – одни методы лучше решают задачи восстановления структурных границ, другие позволяют выделять разрывные нарушения, субвертикальные неоднородности, некоторые дают возможность выполнить качественную и количественную оценку эффективных свойств среды [9, 10]. Идентификация вещественного состава горных пород по этим материалам является практически нерешаемой задачей при анализе результатов одного отдельного метода геофизики. В ходе интерпретации параметров физического поля интерпретатор может получить распределение эффективных свойств в недрах, причем для каждого метода необходимо применять специальный обоснованный подход, благодаря которому удается получить наиболее адекватный вариант апостериорной геолого-геофизической модели. Результаты инверсии данных в рамках одного метода освещают модель только с одной стороны. Для преобразования физической модели в геологическую интерпретатору зачастую приходится самостоятельно проводить визуальное сопоставление всех изученных путем инверсии параметров с физическими свойствами конкретных пород и данными геологического картирования, что является трудоемким процессом.

Кроме того, обширные территории уже являются достаточно хорошо изученными, материалы грави- и магниторазведки в мелком масштабе имеются на всей территории России, крупномасштабная съемка разными методами проведена на наиболее перспективных участках. Электро-разведка мелкого и среднего масштаба реализуется реже, тем не менее для многих площадей

геоэлектрические параметры разреза доступны. Несейсмические методы довольно часто применяются при поисках и разведке разных полезных ископаемых. Их преимущество заключается в дешевизне и простоте исполнения. Соответственно на изучаемых территориях могут иметься данные по магниторазведке, гравиразведке и электроразведке, которые можно использовать для мультипризнаковой классификации. Указанные методы позволяют изучать плотность, магнитную восприимчивость (эффективную намагниченность), удельное электрическое сопротивление пород. Стоит отметить, что чем больше физических параметров горных пород рассматривается в ходе комплексной интерпретации геофизических данных, тем выше шанс достоверно классифицировать горные породы, слагающие изучаемый геологический разрез. Накопленный обширный банк геофизических данных требует развития подходов к их сводной интерпретации и геологическому истолкованию.

Решение задачи многопризнаковой классификации облегчается с использованием алгоритмов, основанных на применении данных петрофизических исследований образцов (каменный материал, керн и т. д.). Как известно, *петрофизика является связующим звеном между минералогическим «взглядом» геолога и физическим «взглядом» геофизика* [11]. Объединение данных геофизических исследований и петрофизики в совокупности представляет достаточный материал для геологического картирования изучаемых районов при возможности хотя бы точечной верификации данных.

Важно отметить, что классификация геофизических полей, а не свойств, менее достоверна, так как, например, на распределение магнитных аномалий влияют наклонение, склонение, в результате чего, аномалии и результаты классификации могут быть смещенными и искаженными. В данной статье предполагается классификация именно результатов инверсии, а не полей, чтобы избежать подобных проблем.

В настоящей статье рассматривается методический подход к трехпризнаковой петрофизической классификации горных пород по плотностным, магнитным свойствам и удельному электрическому сопротивлению. Результатом применения алгоритма является схема вещественного состава; в случае представленной статьи схема построена на уровень поверхности разнородного фундамента, скрытого от прямого изучения осадочным чехлом.

Мультипризнаковые петрофизические классификации

Одним из важных этапов интерпретации геофизических данных является определение принадлежности аномалий, зафиксированных в ходе



выполнения геологоразведочных работ, к определенным литотипам и отдельным геологическим объектам. При этом интерпретатору необходимо связать параметры «первого уровня», или физические свойства, с параметрами «второго уровня» (состав, литология, флюидонасыщенность и др.) [7]. Тем самым в ходе интерпретации физическая модель должна постепенно преобразоваться в геологическую, более применимую для работы геолога. Как было указано выше, определить вещественный состав по данным одного метода затруднительно, так как различные горные породы могут иметь одинаковые значения рассматриваемого физического параметра. По этой причине оптимальным подходом представляется использование комплексной интерпретации геофизических методов, когда в анализ включается несколько физических параметров, полученных по данным разных геофизических методов. Существует достаточно много способов для реализации комплексной интерпретации:

- одновременная совместная инверсия [12, 13],
- последовательная совместная инверсия [6, 14, 15],
- независимая инверсия и классификация [16–18], пример применения которой продемонстрирован в текущей работе.

Идея, положенная в основу многопризнаковой классификации результатов инверсии, заключается в том, что в такой многомерной (каждое новое свойство задает новую размерность – это ось в многомерном пространстве) среде горные породы имеют индивидуальные физические свойства, которые можно различить [19]. Такой подход имеет ряд особенностей в своей реализации. Сначала интерпретируются данные отдельно для каждого геофизического метода с получением эффективных или абсолютных свойств. Далее при помощи разных методов классификации выделяют интегральные образы, которые имеют контрастное петрофизическое проявление. На этой стадии определяются так называемые геофизические литотипы [20], различающиеся между собой по физическим свойствам, что обычно отражается на диаграммах – кроссплотах. Ряд исследователей – А. Abubakar и соавторы – называют в своей статье такие классы «петрофизическими доменами» или «доменами свойств горных пород» [12]. Далее по выделенным блокам, или «доменам свойств горных пород», проводится прогноз параметров «второго уровня» с учетом имеющейся априорной информации.

Классификация на основе анализа нескольких физических свойств может проводиться как с обучением (с учителем, эталоном), так и без него (к чему иногда применяется термин «кластеризация»). Основные методы дискриминантного анализа, применяющиеся для решения

таких задач, следующие: знаковая классификация, К-средних, по А. В. Петрову и др. [21] – методы весьма полно представлены в программном комплексе КОСКАД ЗД, а также могут быть реализованы самостоятельно средствами Surfer, Excel, Matlab.

Сопоставление горных пород по физическим свойствам

Петрофизическая информация извлекается обычно локально путем изучения геологических образцов или керн пробуренных на изучаемой площади скважин. Однако если на территории количество скважин минимально или территория совсем не изучена бурением, оценки физических свойств выполняются по справочным данным. В текущей статье результаты классификации анализируются с использованием представленных в литературных источниках обобщенных данных. Часто в литературе встречается табличное представление физических свойств разных типов горных пород. Для лучшего визуального восприятия распределения свойств использовано графическое представление в виде кросс-плотов.

В качестве опорной петрофизической информации использовалась база данных «Индикаторные петрофизикохимические параметры горных пород и минералов» (А. Н. Краснов, 2018 г., препринт) [1] со значениями разных свойств горных пород. На основе этой базы данных выполнено обобщение для магматических, метаморфических, метасоматических горных пород (рис. 1–3). Графики с петрофизическими характеристиками построены в системах координат «плотность», «логарифм магнитной восприимчивости», «логарифм удельного электрического сопротивления». При этом диаграммы увязаны между собой как трехмерная модель. В базе указаны средние значения свойств, а также диапазон их изменения. Средние нанесены на диаграммы в виде разнообразных значков, где цвет отвечает за состав, а символ – за условия образования пород. «Усы», отходящие от средних, показывают диапазон изменения свойств пород. Заливка областей – несколько грубое выделение областей, занимаемых породами разного состава на кросс-плотах. Представленные диаграммы обладают недостатками, но, с точки зрения авторов, применимы для обобщения информации и интерпретации.

При рассмотрении петрофизических данных в системе координат «плотность» – «магнитная восприимчивость» (см. рис. 1) выделяется общая закономерность по уменьшению значений этих параметров от ультраосновных пород к кислым. Уменьшение плотности горных пород по отрядам связано с увеличением содержания кремнезема. Магнитные свойства для разных отрядов имеют довольно сложное распределение в диапазоне $(-0,07-8000) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Породы основного

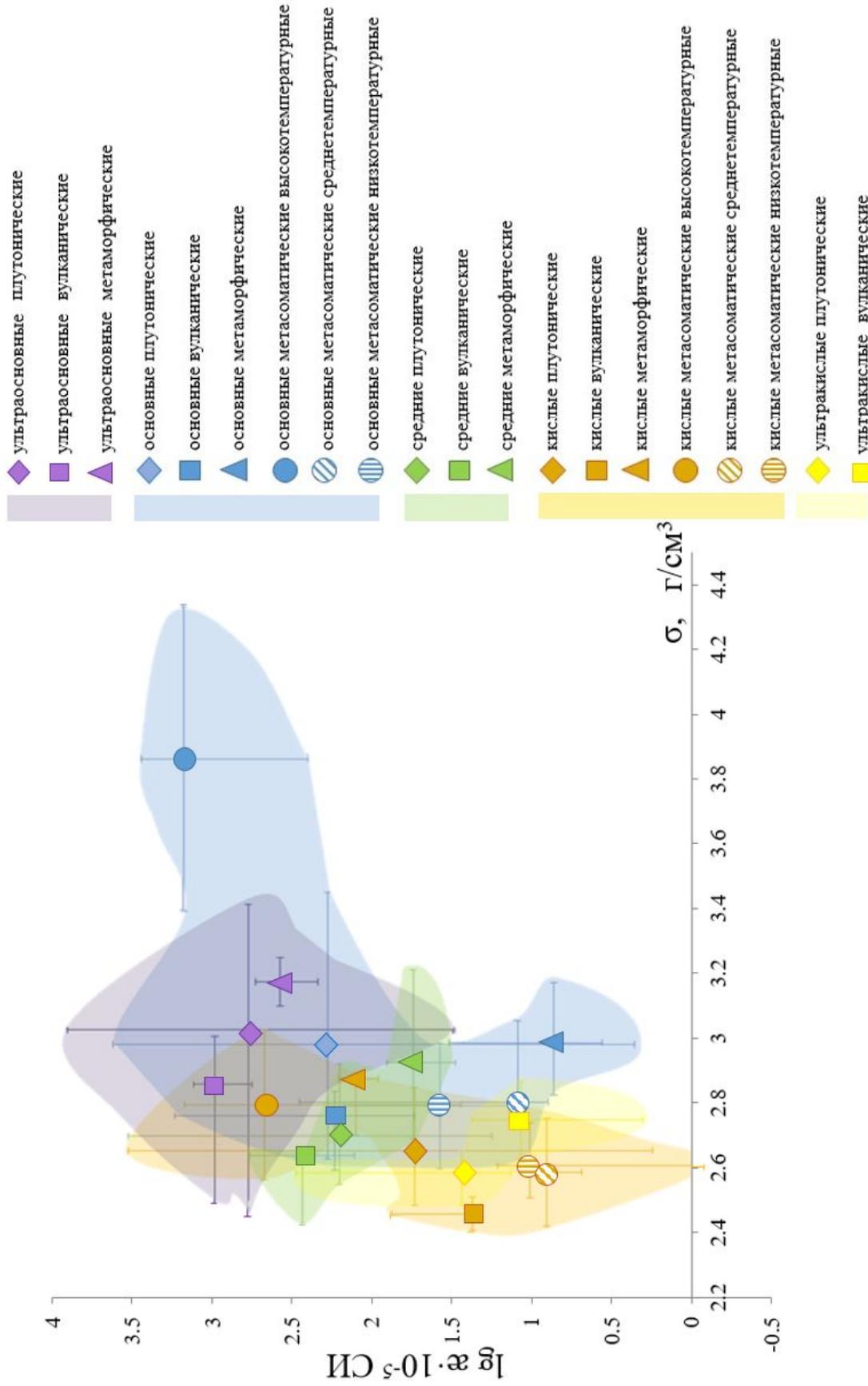


Рис. 1. Основные магматические горные породы в системе координат «плотность» – «логарифм магнитной восприимчивости» (цвет online)

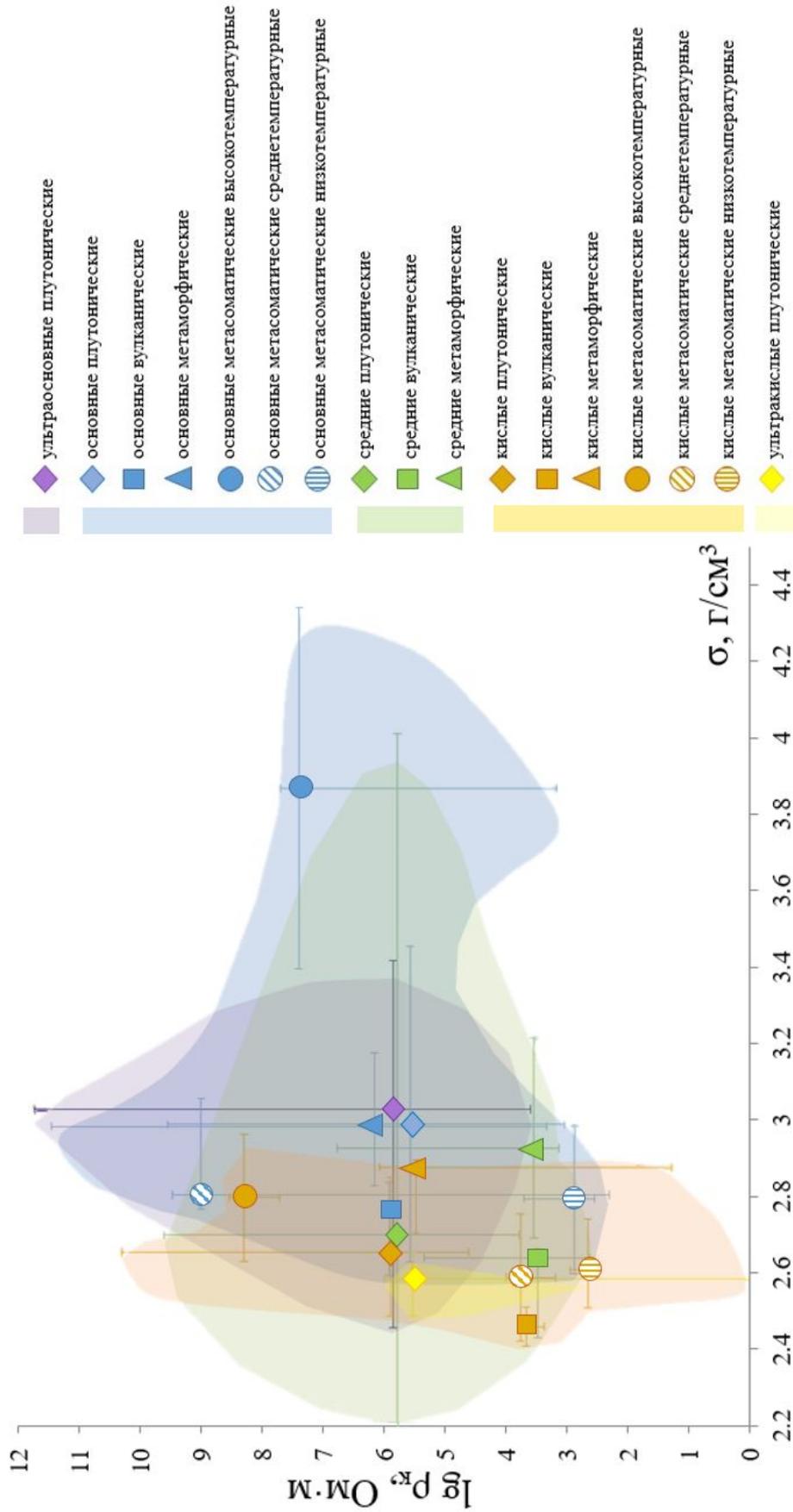


Рис. 2. Основные магматические горные породы в системе координат «плотность» – «логарифм удельного электрического сопротивления» (цвет online)

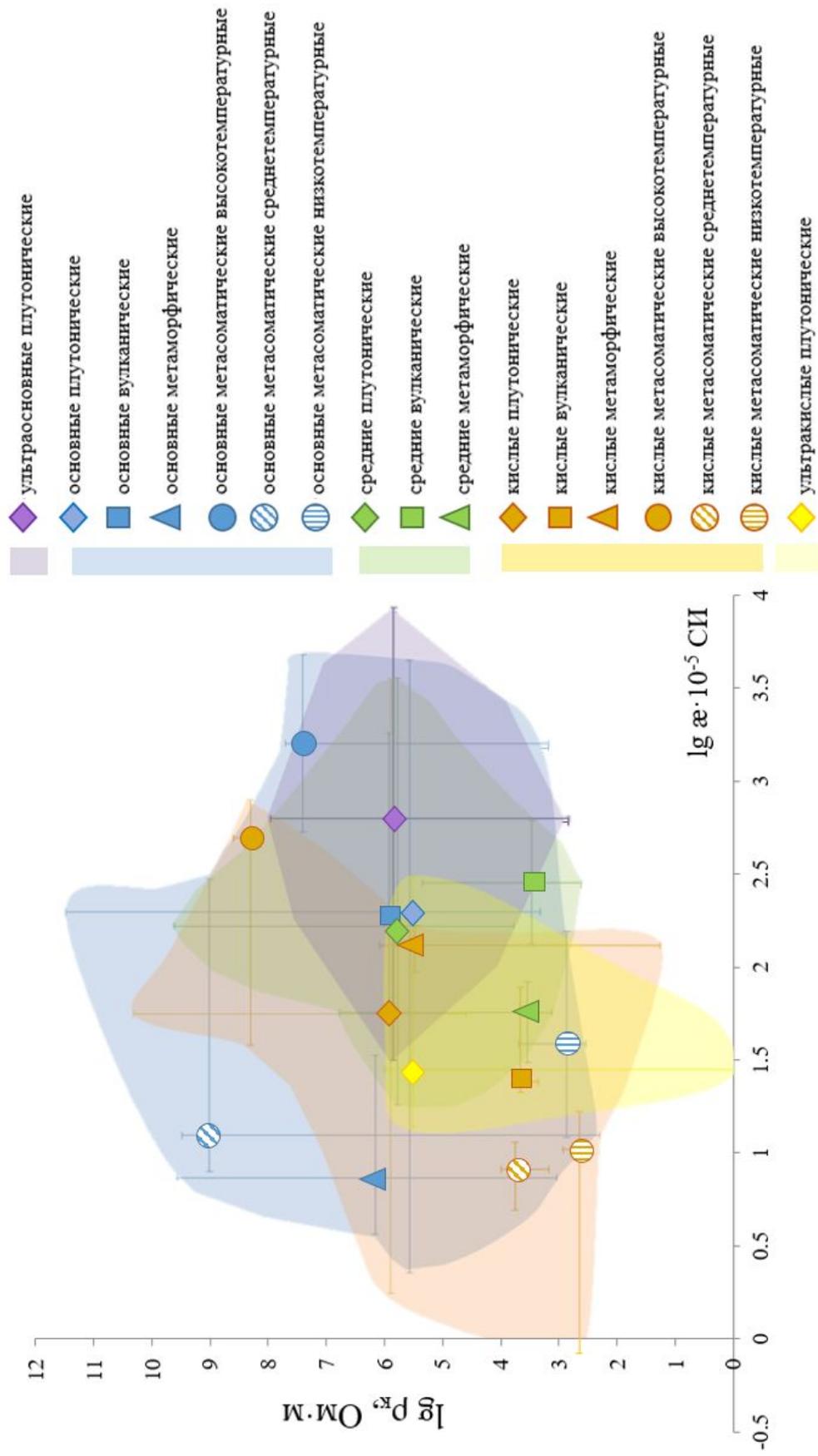


Рис. 3. Основные магматические горные породы в системе координат «логарифм магнитной восприимчивости» – «логарифм удельного электрического сопротивления» (цвет online)



состава имеют достаточно большой разброс значений магнитной восприимчивости в пределах примерно $(1,8-4000) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Скорее всего, это связано с разным содержанием ферромагнитных минералов в горных породах. Кислые и ультракислые горные породы также имеют большой разброс магнитной восприимчивости в пределах примерно от $0,1-1500 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Сильный или слабый магнетизм данных отрядов горных пород определяется в процессе их образования. Если это происходит во время завершения складчатости, то породы будут слабомагнитными, если во время автономной тектонической активности, то высокомагнитные [19]. Ультраосновные и средние горные породы на представленных графиках не имеют больших «разбросов» по плотности и магнитной восприимчивости. Метасоматические горные породы имеют достаточно сложное распределение в указанных выше координатах, что, вероятно, связано с их полигенным генезисом.

По электрическим свойствам классы пород разного состава имеют высокие значения удельного электрического сопротивления (УЭС) в пределах от 10^2 до 10^4 Ом·м. Если рассматривать моды для каждого класса, то горные породы можно подразделить на три группы:

- 1) в пределах 10^8-10^9 Ом·м горные породы из класса метасоматических высокотемпературных;
- 2) в пределах 10^5-10^6 Ом·м расположились ультраосновные, основные и кислые классы горных пород (не попавшие в первую и третью группы);
- 3) от 10^2 до 10^4 Ом·м кислые и средние вулканические, средние метаморфические и метасоматические низкотемпературные горные породы.

В пределах классов более широкий разброс значений УЭС у метасоматических горных пород. Метасоматические низкотемпературные горные породы (лиственит, хлоритолит, березит) на диаграмме (см. рис. 2, 3) имеют низкие значения УЭС в районе 10^3 Ом·м, высокотемпературные – повышенные значения в пределах 10^8 Ом·м. В пределах отрядов достаточно большой разброс значений по оси логарифма УЭС у основных горных пород.

Большинство классов пересекаются на представленных проекциях – кросс-плотах и в трехмерном пространстве. Попытка их использования может быть реализована с опорой на средние значения параметров или на взаимное расположение сгущений точек относительно друг друга и ареалов свойств пород по рис. 1–3.

Комплексная классификация данных для тестового участка

Для апробации методики комплексной классификации петрофизических данных был выбран

участок, расположенный в пределах Непского свода (Восточная Сибирь). Для данной территории характерно сложное геологическое строение. Фундамент составлен метаморфическими и интрузивными образованиями архей-протерозойского возраста, в верхней части образующими кору выветривания. Осадочный чехол состоит из терригенных, карбонатных и солевых отложений мезозойского и кайнозойского возраста. Осадочный чехол также осложнен дизъюнктивами и трапповыми интрузиями. Интерес к территории обусловлен наличием залежей нефти и газа, а также перспективами на нахождение алмазных кимберлитов.

О геологическом строении фундамента известно немного. Из фактического материала по геофизике имеются данные грави- и магниторазведки в аэроварианте, также результаты наземных электроразведочных работ методом ЗСБ (зондирования становлением поля в ближней зоне), представленные в виде кривых (рис. 4). В качестве дополнительной информации имеются немногочисленные данные по скважинам, распределенным по неравномерной сети, и данные сейсморазведки, которые позволяют сформировать структурный каркас для более достоверной интерпретации материалов несейсмических методов – магниторазведки, гравиразведки и электроразведки.

Далее по каждому методу были выполнены трехмерная инверсия со структурными ограничениями (послойная) и расчет петрофизических неоднородностей на уровне поверхности фундамента с учетом заданных возможных диапазонов измерения свойств. Известно, что инверсия неоднозначна и дает один из возможных вариантов распределения эффективных свойств. Но в данной статье вопрос неоднозначности решения обратной задачи не рассматривается, так как использован максимум априорной информации и результат мы считаем наиболее достоверным из возможных. В итоге были получены схемы распределения плотности, эффективной намагниченности и логарифма сопротивления (рис. 5). Для магнитного поля получено распределение эффективной намагниченности – это не свойство, а более комплексный параметр, учитывающий и магнитную восприимчивость, и намагничивающее поле. Далее проводится качественное сопоставление указанных магнитных параметров.

После получения распределения трех параметров по изучаемой площади проведена комплексная безэталонная классификация данных в программном комплексе КОСКАД ЗД. Наиболее удачный алгоритм классификации, по мнению авторов, в рассматриваемых условиях, – классификации «по Петрову» (рис. 6). Полученная схема распределения физических свойств по классам (№ 1–7) была дополнена удобным для анализа форматом кросс-плотов в координатах

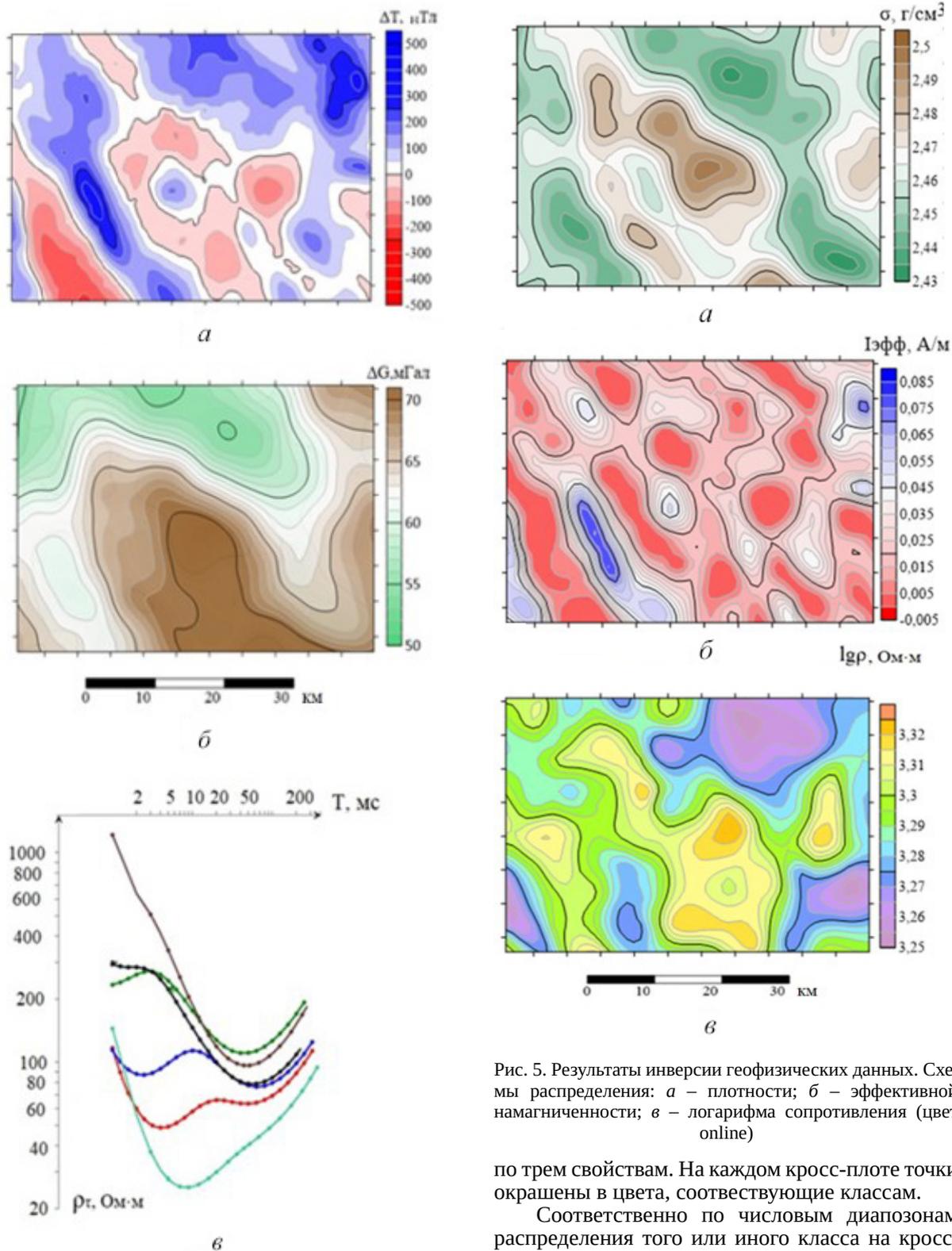


Рис. 4. Исходные данные по сейсмическим методам: а – карта аномального магнитного поля; б – карта аномального гравитационного поля в редукции Буге; в – кривые зондирования ЗСБ (цвет online)

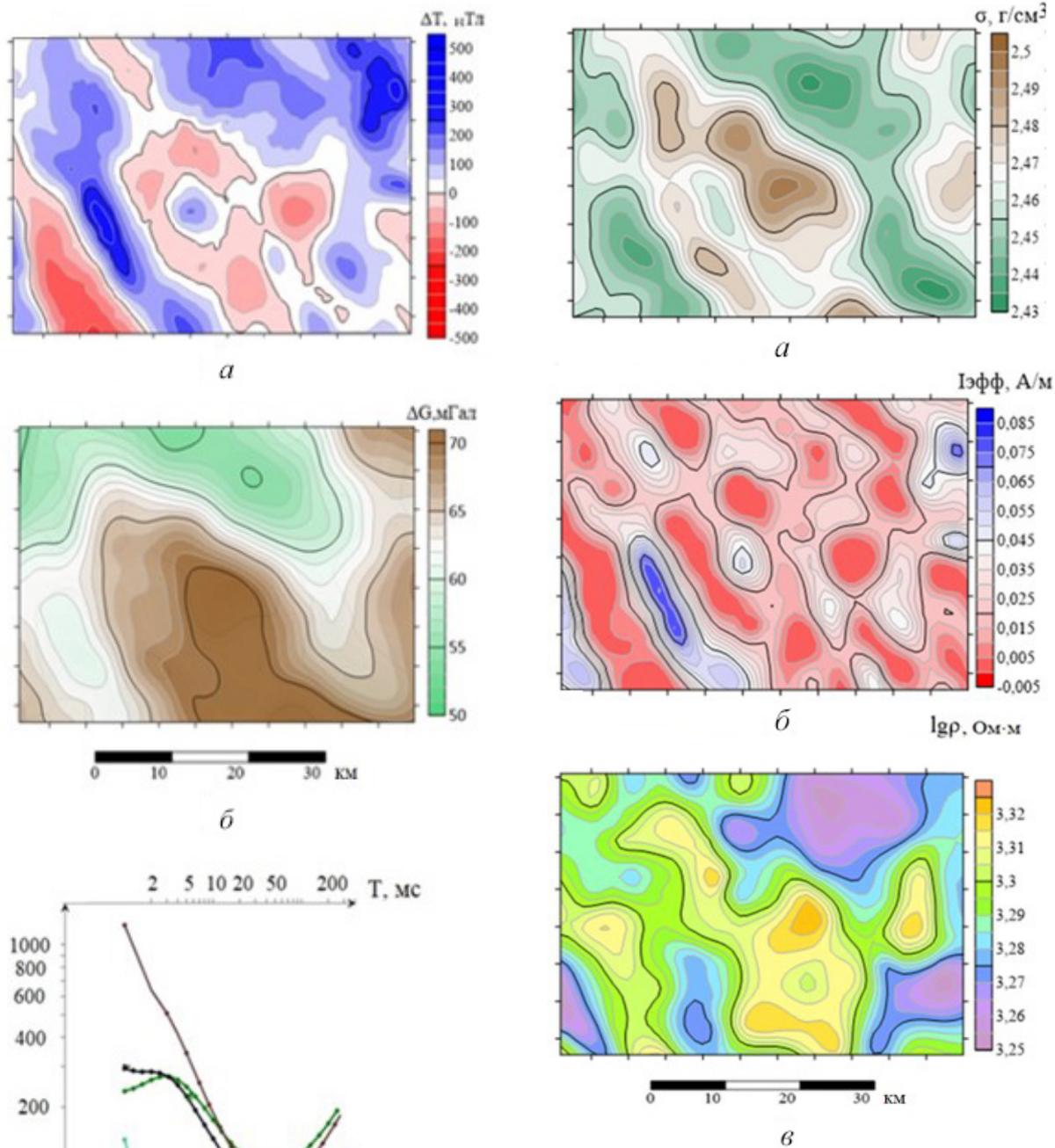


Рис. 5. Результаты инверсии геофизических данных. Схемы распределения: а – плотности; б – эффективной намагниченности; в – логарифма сопротивления (цвет online)

по трем свойствам. На каждом кросс-плоте точки окрашены в цвета, соответствующие классам.

Соответственно по числовым диапазонам распределения того или иного класса на кросс-плотах или по взаимному расположению точек можно предположить принадлежность к определенному отряду горных пород. Поэтому полученные кросс-плоты сравниваются с графиками распределения петрофизических свойств по данным обобщения имеющегося петрофизического материала (см. рис. 1–3). Таким образом, идей

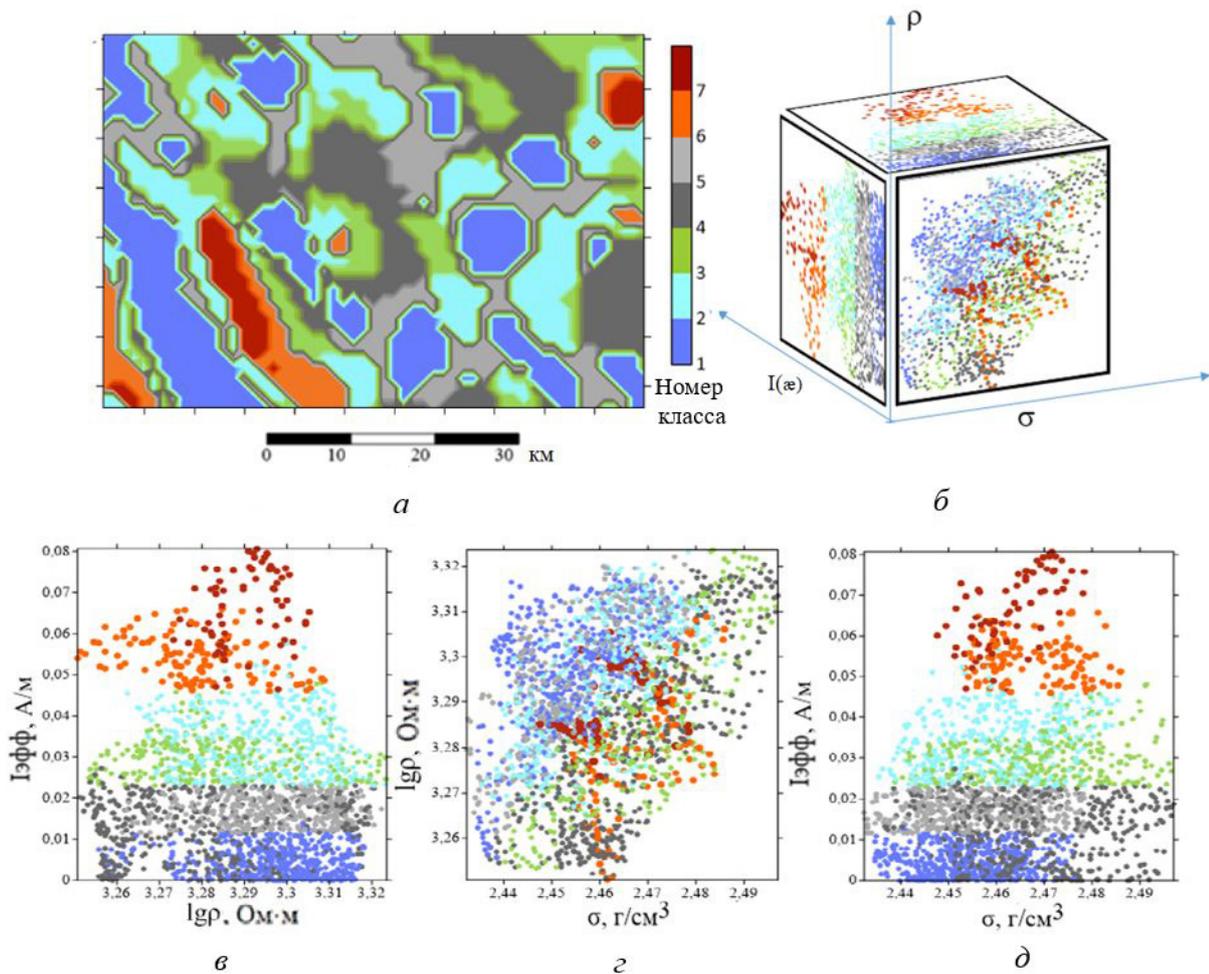


Рис. 6. Комплексная классификация геофизических данных (плотность, эффективная намагниченность и логарифм сопротивления): а – карта классов (по А. В. Петрову), б – объемная модель распределения свойств, в, г, д – попарные кросс-плоты по трем свойствам для изучаемой площади (цвет точек соответствует номеру выделенного на карте класса) (цвет online)

данного этапа работы является петрофизическая идентификация горных пород.

В итоге, сравнивая кросс-плоты с диаграммами петрофизических характеристик, удалось выделить следующие породы: кислые plutonic, вулканические, метасоматические, средние и основные вулканические. Для построения предварительной схемы вещественного строения фундамента использовались также скважинные данные. Результаты качественной интерпретации представлены на рис. 7.

Таким образом, каждому классу с учетом данных петрофизических материалов и изучения скважинных было присвоено имя определенного отряда пород. Более уверенно удалось осуществить данную процедуру с классами 1–4, где данные по фундаменту были получены из материалов по скважинам. Классы 1 и 4 характеризуются низким значением плотности и магнитных свойств; для классов 2 и 3 харак-

терны средние значения плотности и магнитных свойств, что соответствует кислым и ультракислым горным породам. По каждому типу имеется небольшая вариация свойств, связанная с комплексным изменением вещественного состава. В итоге на составленной классификационной схеме (см. рис. 6, 7) были выделены граниты разного состава (розовые, серые, лейкократовые) и коры выветривания разного состава (кора выветривания гранитов и хлоритизированная кора выветривания гранитов), их локализация точно известна по скважинам, вошедшим в фундамент. Для оставшихся классов были сделаны предположения по вещественному составу. Классы 5–7 могут соотноситься с породами предположительно основного и среднего состава.

Заключение

В ходе проведения работ по комплексной классификации данных трех геофизических съе-

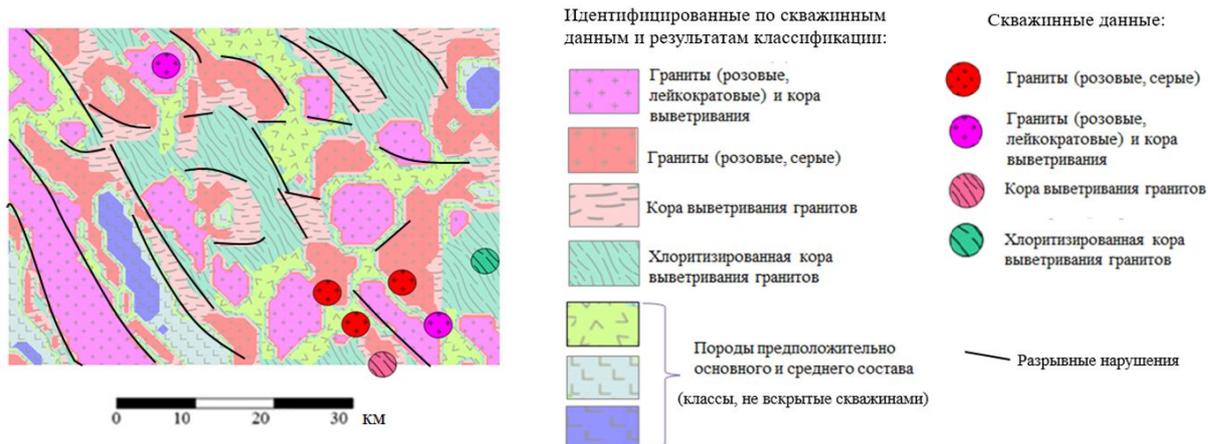


Рис. 7. Результаты предварительной геологической интерпретации геофизических материалов (цвет online)

мок на первом этапе была подготовлена петрофизическая основа по базе данных «Индикаторные петрофизикохимические параметры горных пород и минералов» (А. Н. Краснов, 2018 г. препринт) [21] для магматических пород. Далее был разработан и апробирован алгоритм классификации результатов инверсии набора геофизических данных с разделением на классы для фундамента на изучаемой площади. В итоге в ходе качественной интерпретации всей априорной информации построена предварительная схема геологического строения фундамента для данной территории, получен внутренне непротиворечивый результат.

Разработанный алгоритм может быть использован для сопровождения задач геологического картирования погребенных пород фундамента. Недостатком автоматической классификации является отсутствие связи с кросс-плотами реальных физических свойств. Следующим этапом усовершенствования методики видится привлечение «ручной» или нейросетевой классификации с обучением на данных петрофизики.

Библиографический список

1. Голыздра Г. Я. О комплексировании гравитационного и сейсмического методов // Известия РАН. Серия «Физика Земли». 1978. № 6. С. 26–38.
2. Спичак В. В., Безрук И. А., Гойдина А. Г. Построение трехмерных кластерных петрофизических моделей геологической среды по совокупности геофизических данных, измеренных на опорных профилях // Разведка и охрана земных недр. 2015. № 4. С. 41–45.
3. Kotyrba B., Schmidt V. Combination of seismic and resistivity tomography for the detection of abandoned mine workings in Münster / Westfalen, Germany : Improved data interpretation by cluster analysis // Near Surface Geophysics. 2014. Vol. 12. P. 415–426.

4. Спичак В. В. Современные подходы к комплексной инверсии геофизических данных // Геофизика. 2009. № 5. С. 10–19.
5. Colombo D., Stefano M. De Geophysical modeling via simultaneous joint inversion of seismic, gravity, and electromagnetic data : Application to prestack depth imaging // The Leading Edge. Vol. 26. P. 326–331.
6. Glazunov V. V., Shtengel V. G., Nedyalkov V. S., Efimova N. N., Danilev S. M. Combined Investigation by Thermal Imaging and Georadar Scanning for Voids Detection under Reinforced Concrete Slabs of Fastening Soil Slopes of Hydraulic Structures // Engineering and Mining Geophysics 2018. Apr 2018. Vol. 20, Almaty, Kazakhstan : European Association of Geoscientists & Engineers. P. 1–11.
7. Нукитин А. А., Бульчев А. А. Комплексный анализ и комплексная интерпретация геофизических полей : учебное пособие. Москва : ВНИИгеосистем, 2015. 94 с.
8. Lelièvre P. G., Farquharson C. G. Integrated Imaging for Mineral Exploration. Integrated Imaging of the Earth : Theory and Applications, Geophysical Monograph 218, First Edition. Hoboken : American Geophysical Union, 2016. 215 p.
9. Molodtsov D. M., Troyan V. N.. Multi-physics joint inversion through joint sparsity regularization // SEG International Exposition and 87th Annual Meeting, Houston : Society of Exploration Geophysicists, 2017. P. 1262–1267.
10. Moorkamp M., Jones A. G., Fishwick S. Joint inversion of receiver functions, surface wave dispersion, and magnetotelluric data // Geophysical Research Letters. 2010. Vol. 115, P. 1–23.
11. Спичак В. В., Безрук И. А., Попова И. В. Построение глубинных кластерных петрофизических разрезов по геофизическим данным и прогноз нефтегазоносности территорий // Геофизика. 2008. № 5. С. 43–45.
12. Abubakar A., Gao G., Habashy T. M., Liu J. Joint inversion approaches for geophysical electromagnetic and elastic full-waveform data // Inverse Problems. 2012. Vol. 28. P. 055016.
13. Hu W., Abubakar A., Habashy T. M.. Joint electromagnetic and seismic inversion using structural constraints // Geophysics. 2009. Vol. 74, № 6. R99–R109.



14. Golizdra G. Y. Statement of the problem of comprehensive interpretation of gravity fields and seismic observations // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 1980. Vol. 16. P. 535–539.
15. Haber E., Oldenburg D. Joint inversion : A structural approach. UBC-Geophysical Inversion Facility, Department of Geophysics. Vancouver, Canada : University of British Columbia, 1997. Vol. 13. P. 63–77.
16. Giuseppe M. G. Di, Troiano A., Patella D., Piochi M., Carlino S. A geophysical k-means cluster analysis of the Solfatara-Pisciarelli volcano-geothermal system, Campi Flegrei (Naples, Italy) // *Journal of Applied Geophysics*. 2018. Vol. 156. P. 44–54.
17. Guliyev H., Aghayev Kh. B., Guliyev I. S. Application of cluster analysis in the study of the petrophysical properties of the medium // *International Conference on Geoinformatics. Theoretical and Applied Aspects*. Kiev : European Association of Geoscientists and Engineers, 2013. 315 p.
18. Klose C. D. Self-organizing maps for geoscientific data analysis : Geological interpretation of multidimensional geophysical data // *Computers and Geosciences*. 2006. Vol. 10. P. 265–277.
19. Дортман Н. Б. Петрофизика : справочник. В трех книгах. Кн. первая. Горные породы и полезные ископаемые. Москва : Недра, 1992. 391 с.
20. Bosch M. Lithologic tomography : From plural geophysical data to lithology estimation // *Journal of Geophysical Research*. 1999. Vol. 104 (B1). P. 749–766.
21. Никитин А. А., Петров А. В. Теоретические основы обработки геофизических данных. Москва : РГГУ, 2008. 112 с.

Поступила в редакцию 22.05.2022; одобрена после рецензирования 29.05.2022; принята к публикации 01.06.2022
The article was submitted 22.05.2022; approved after reviewing 29.05.2022; accepted for publication 01.06.2022