

УДК 550.34.012

## АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ТИПОВ ПОРОД, СЛАГАЮЩИХ ГЛУБОКИЕ ГОРИЗОНТЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ (НА ПРИМЕРЕ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА)

© 2010 г. П.А. Леляев<sup>1</sup>, А.Я. Салтыковский<sup>1</sup>,  
Л.И. Надежка<sup>2</sup>, М.Е. Семенов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия*

Построение вещественных моделей земной коры и верхней мантии связано с прогнозом, основанным, как правило, на вероятностных знаниях о химическом составе и физических свойствах горных пород. Эти данные, в свою очередь, базируются на результатах геофизических исследований, главным образом на изучении скоростей сейсмических волн ( $V_P$ ,  $V_S$ ) и анализе гравиметрических данных.

Для петрографических комплексов, входящих в эрозионный срез докембрия Воронежского кристаллического массива, была предпринята попытка создания алгоритма распознавания (с определенной вероятностью) типов глубокозалегающих пород по значениям скорости продольных волн и плотности при нормальных  $PT$ -условиях.

**Ключевые слова:** алгоритм, прогноз, порода, модель, кора, скорость, плотность.

### Введение и постановка задачи

Построение петрологических (вещественных) моделей земной коры и верхней мантии является чрезвычайно важной и достаточно сложной задачей. Она связана с прогнозом, основанным, как правило, на вероятностных знаниях о вещественном составе и состоянии глубоких недр Земли. Состав горизонтов кристаллической земной коры прогнозируется по данным о физических свойствах отдельных петрографических типов пород, доступных для непосредственного изучения [Лебедев, Буртный, Корчин, 2001]. Поскольку в настоящее время основным источником информации о строении земной коры и верхней мантии являются преимущественно сейсмические методы (ГСЗ и др.), то главным геофизическим параметром, характеризующим глубинные горизонты, являются скорости продольных ( $V_P$ ) и поперечных ( $V_S$ ) сейсмических волн.

Как правило, на сейсмических разрезах кристаллической земной коры (особенно на древних платформах и щитах) выделяются три основных слоя, имеющих существенно различные скорости сейсмических волн. На Воронежском кристаллическом массиве это гранито-гнейсовый, диоритовый и метабазитовый слои [Афанасьев, 2001; Афанасьев, Кривцов, 2002]. Плотность ( $\rho$ ) пород, слагающих горизонты, выделенные по сейсмическим данным, может быть оценена путем моделирования гравитационного поля [Красовский, 1981]. Таким образом, каждый из трех выделяемых слоев кристаллической коры характеризуется двумя (или тремя) параметрами – скоростью продольных и, возможно, поперечных сейсмических волн и плотностью, которые часто значительно варьируют по латерали [Глубинное ..., 1991].

Известно, что с глубиной в магматических и метаморфических породах уменьшается содержание  $\text{SiO}_2$  и возрастает содержание тяжелых элементов (Fe, Mg, Ti), что отражается в увеличении с глубиной плотности пород и скорости распространения сейсмических волн в них. Вариации скоростей сейсмических волн, как правило, не анали-

зировались с позиций изменения вещественного состава пород. Это, в первую очередь, связано с чрезвычайной сложностью задачи и неоднозначностью ее решения. Как свидетельствуют результаты многочисленных лабораторных исследований на образцах при нормальных температуре и давлении, один и тот же петрографический тип пород может характеризоваться значительным разбросом значений скорости и плотности. Это обусловлено как некоторым изменением химического состава пород в пределах одного и того же комплекса, так и условиями его формирования [Афанасьев, 2001]. Кроме того, разные серии пород характеризуются перекрывающимися областями значений плотности и скорости. Тем не менее, распознавание состава магматических горных пород по значениям  $V_p$  и  $\rho$  дает возможность построения наиболее детальных вещественных (петрологических) моделей земной коры для изучения геологических структур. Эта возможность особенно важна для районов, где коренные отложения перекрыты мощным слоем осадков, а основные сведения о составе глубинных пород могут быть получены по кернам из буровых скважин.

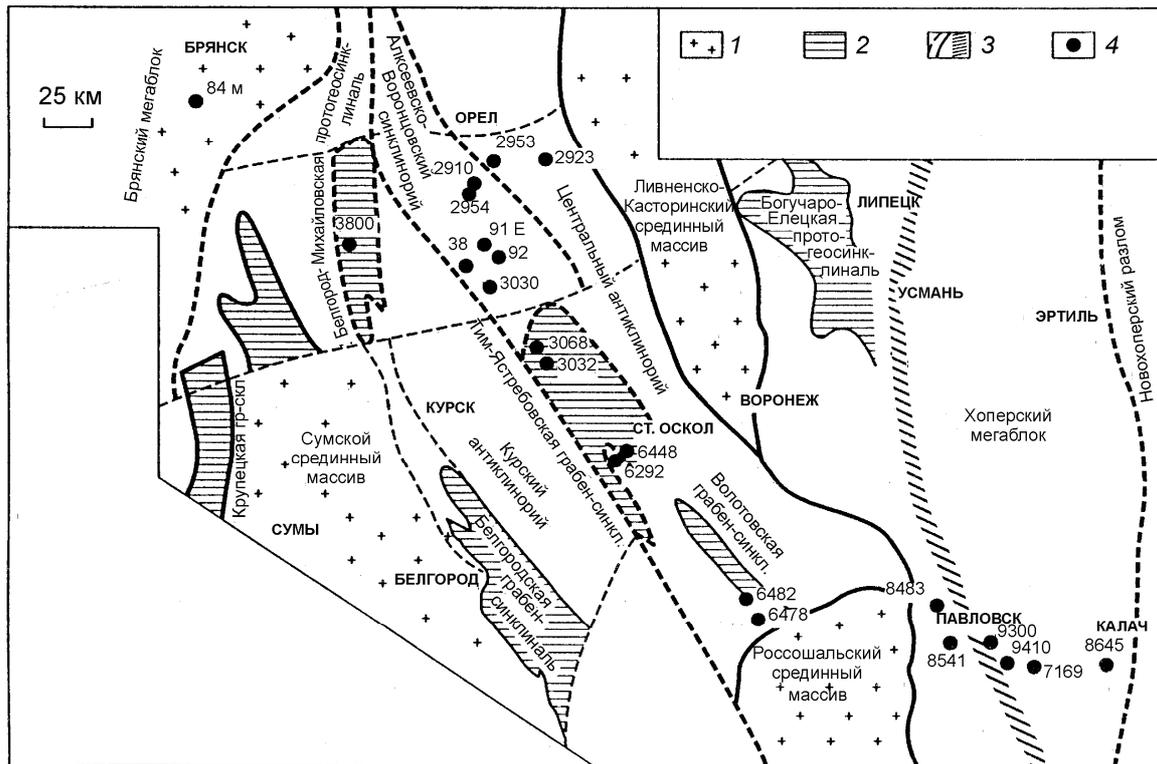
В качестве объекта исследований авторами был выбран хорошо изученный геологическими и геофизическими методами Воронежский кристаллический массив (ВКМ). На базе экспериментальных данных для отдельных петрографических серий пород, входящих в эрозионный срез докембрия ВКМ, была предпринята попытка создания алгоритма распознавания (с определенной вероятностью) петрографического состава пород по значениям скорости распространения продольных сейсмических волн  $V_p$  и плотности  $\rho$  при нормальных  $PT$ -условиях.

Степень структурно-вещественной изученности кристаллической коры ВКМ, которая отражена в различных по времени составлению геолого-геофизических схемах и картах, определяется синхронным развитием и применением геолого-геофизических и петрофизических методов исследований, способствующих установлению взаимосвязей между физическими свойствами, составом, строением, генезисом различных геологических объектов. На этой основе становится возможным выделение петрофизических образов объектов и установление критериев их распознавания в соответствующих спектрах геофизических полей.

### **Краткая характеристика геолого-геофизических особенностей района исследований и состава пород**

Воронежский кристаллический массив (ВКМ) расположен в центре древней Восточно-Европейской платформы и представляет собой сравнительно неглубоко опущенный (от 0 до 600 м) выступ докембрийского кристаллического фундамента, в состав которого входят сложно дислоцированные метаморфические и магматические породы архея и протерозоя. Основные сведения о геологическом строении, структуре, составе горных пород и характере тектонических движений дают данные бурения и результаты геофизических исследований. На схеме тектонического строения ВКМ (рис. 1) выделены наиболее жесткие архейские срединные массивы – Россошанский, Ливненско-Касторинский, Сумской, которые разделены линейными грабен-синклиналями, заложенными в позднем архее и раннем протерозое и претерпевшими активизацию в более позднее время. Отмеченные структурные элементы ВКМ достаточно четко выделяются в геофизических полях, прежде всего, в гравитационном и магнитном [Надежка и др., 2008].

Эрозионный срез докембрия Брянского и Курского мегаблоков представлен в основном гнейсами обоянской серии протерозоя, Хоперского – сланцами воронцовской серии протерозоя. В эрозионном срезе докембрия Лосевско-Мамонской зоны разломов выделяются вулканогенно-осадочные породы лосевской серии протерозоя и значительные по площади поля мигматитов.



**Рис. 1.** Схема тектонического строения Воронежского кристаллического массива

1 – крупные архейские срединные массивы; 2 – линейные грабен-синклинали; 3 – зоны крупных разломов; 4 – глубокие скважины

Изучались отобранные из буровых скважин с глубин не менее 25 м образцы семи основных типов пород, наиболее полно представляющих эрозионный срез ВКМ, – гнейсы, сланцы, мигматиты, амфиболиты, граниты, диориты, габбро. Из выборки исключались образцы со следами выветривания, вторичных изменений и гидротермальной переработки.

#### Алгоритм распознавания типов горных пород по комплексу петрофизических данных

Исследованы 1589 образцов пород разного состава, среди которых были образцы метаморфических (328 образцов гнейсов, 536 сланцев, 381 амфиболитов, 68 мигматитов) и магматических (112 образцов габбро, 109 гранитов, 55 диоритов) пород. Значения скорости продольных сейсмических волн в выборке изменялись от 2.6 до 9.0 км/с. Такой широкий диапазон значений  $V_p$  обусловлен разным химическим составом исследуемых пород. Основные статистические характеристики образцов пород приведены в таблице.

В пределах ВКМ представлен широкий спектр *гнейсов* различного состава – биотитовые, гранат-биотитовые, биотит-амфиболовые, биотит-силлиманит-графитовые, амфибол-биотитовые и др. Среднее значение плотности для исследованных образцов составило  $2.75 \text{ г/см}^3$ , дисперсия – 0.0112, среднеквадратическое отклонение –  $0.1 \text{ г/см}^3$ . Среднее значение скорости продольных волн равно 5.62 км/с, дисперсия – 0.46, среднеквадратическое отклонение – 0.68 км/с.

*Сланцы* представлены филлитовыми, карбонатными, углеродистыми разновидностями, метаалевролитами и метапесчаниками.

## Основные статистические характеристики исследованных образцов

Тип породы (кол-во образцов)	Среднее		Медиана		Мода		Минимум		Максимум		Дисперсия		Среднеквадратическое отклонение	
	$\rho$	$V_P$	$\rho$	$V_P$	$\rho$	$V_P$	$\rho$	$V_P$	$\rho$	$V_P$	$\rho$	$V_P$	$\rho$	$V_P$
метаморфические														
<i>гнейсы</i> (328)	2.75	5.62	2.73	5.75	2.71	5.80	2.12	2.60	3.21	9.00	0.015	0.459	0.121	0.678
<i>сланцы</i> (536)	2.8	5.64	2.79	5.70	2.80	5.65	2.45	3.05	3.24	7.20	0.013	0.345	0.113	0.587
<i>амфиболиты</i> (381)	2.92	6.14	2.95	6.25	3.02	6.35	2.45	3.15	3.23	7.40	0.010	0.263	0.106	0.514
<i>мигматиты</i> (68)	2.67	5.63	2.67	5.65	2.65	5.75	2.62	4.75	2.74	6.25	0.001	0.149	0.031	0.386
магматические														
<i>габбро</i> (112)	2.89	6.18	2.89	6.15	2.89	6.40	2.65	4.95	3.41	7.11	0.011	0.185	0.105	0.430
<i>граниты</i> (109)	2.67	5.57	2.65	5.75	2.64	5.95	2.40	3.60	3.03	6.55	0.007	0.333	0.081	0.577
<i>диориты</i> (55)	2.74	5.89	2.72	5.80	2.71	5.80	2.65	4.90	3.00	6.65	0.003	0.108	0.053	0.328

Примечание.  $\rho$ , г/см<sup>3</sup> – плотность пород;  $V_P$ , км/с – скорость распространения продольных волн.

Для *амфиболитов* среднее значение плотности равно 2.93 г/см<sup>3</sup>, среднеквадратическое отклонение составляет 0.1 г/см<sup>3</sup>. Среднее значение скорости продольных волн равно 6.14 км/с, а среднеквадратическое отклонение имеет высокое значение 0.51 км/с.

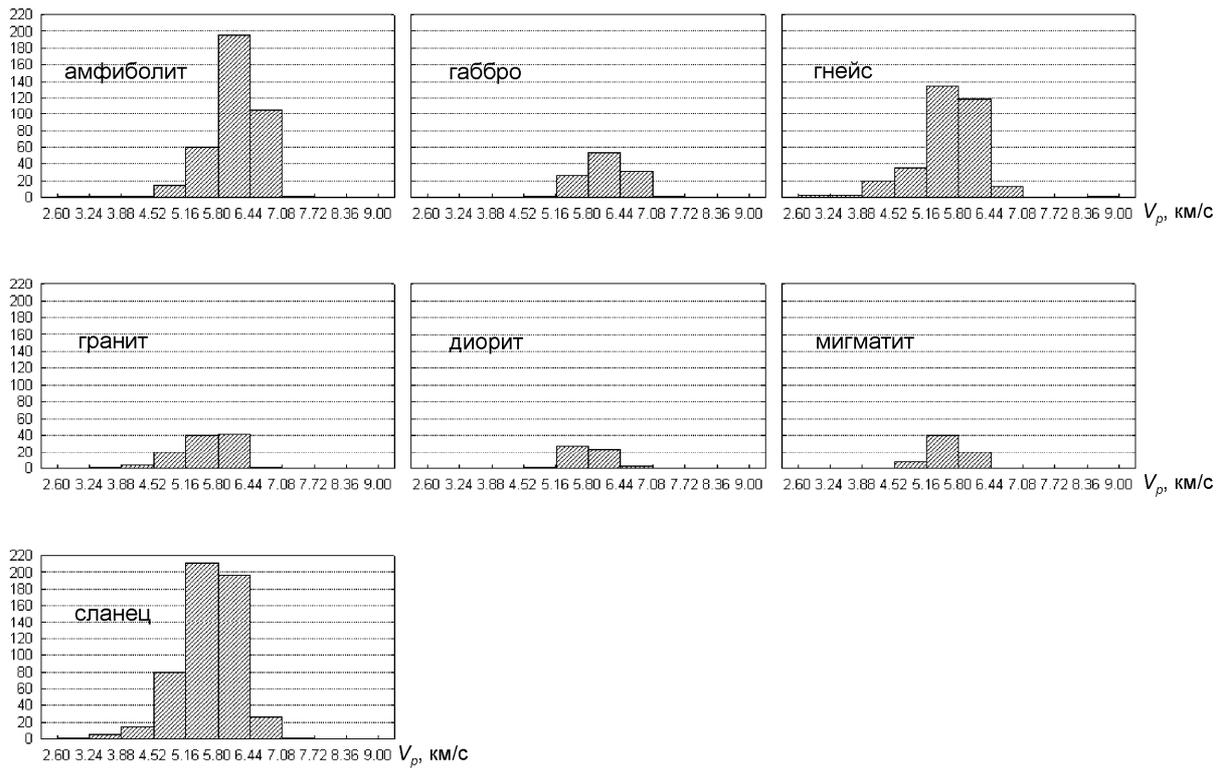
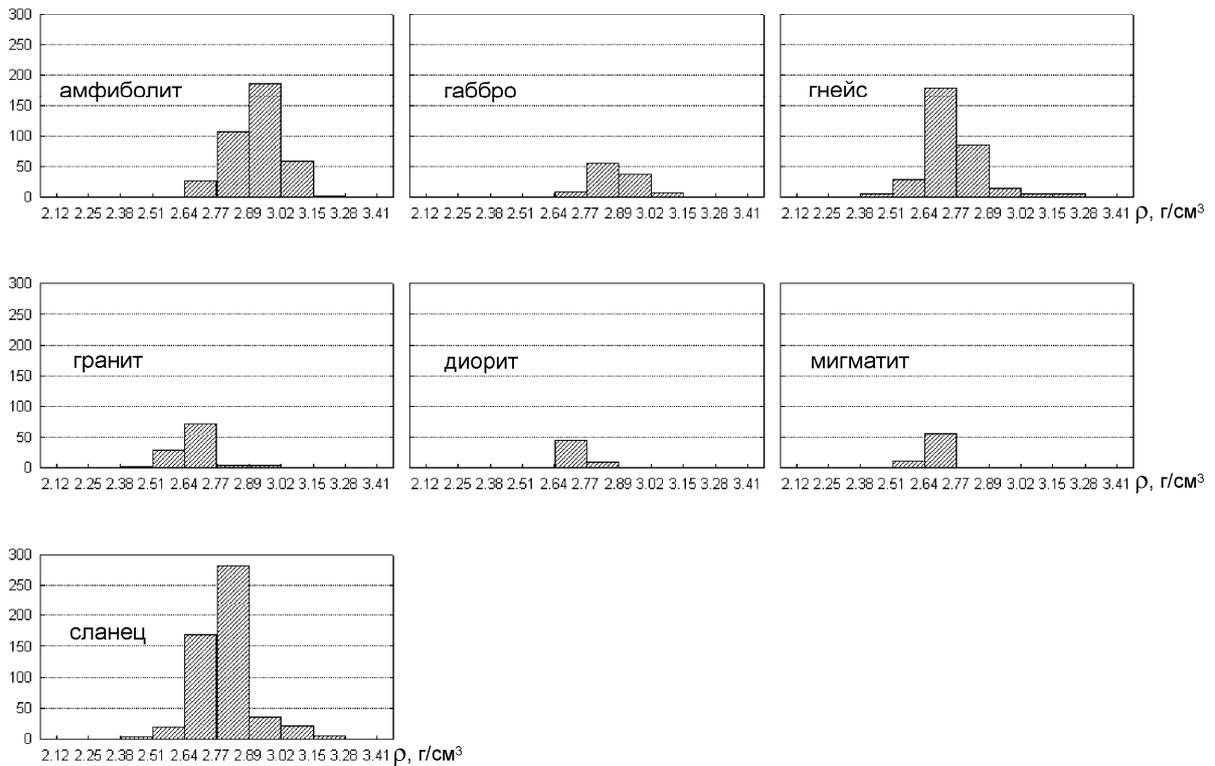
Наименьший разброс значений скорости и плотности отмечается для выборки *мигматитов*.

Следует отметить, что хотя средние значения скорости и плотности пород представленных метаморфических комплексов различны, диапазоны их значений частично перекрываются.

Магматический комплекс пород также неоднороден по минералогическому составу. Так, выборка *гранитов* включает биотит-амфиболовые, субщелочные, лейкократовые, биотитовые, двуполевошпатовые граниты. В выборку *габбро* включены габбро-долериты, роговообманковые, габбро-нориты, габбро-амфиболиты, габбро-диориты. Эти различия минералогического и химического составов нашли отражение в статистических характеристиках плотности и скорости анализируемых типов пород (см. таблицу).

На рис. 2 представлены гистограммы распределения скорости продольных волн (*a*) и плотности (*b*) для всех исследуемых типов пород. Можно видеть, что распределение близко к нормальному. С учетом этого для дальнейших исследований использовались выборки тех типов пород, которые характеризовались значениями скоростей продольных волн и плотностью, попадающими в интервал «среднее значение  $\pm$  утроенное среднеквадратическое отклонение». Выбор такого интервала объясняется тем, что названные значения плотности и скорости наиболее полно отражают свойства каждого анализируемого типа пород.

Скорректированное поле значений плотности и скорости для всех изученных типов пород приведено на рис. 3.

**а****б**

**Рис. 2.** Гистограмма распределения скорости (а) и плотности (б) для всех исследованных типов пород

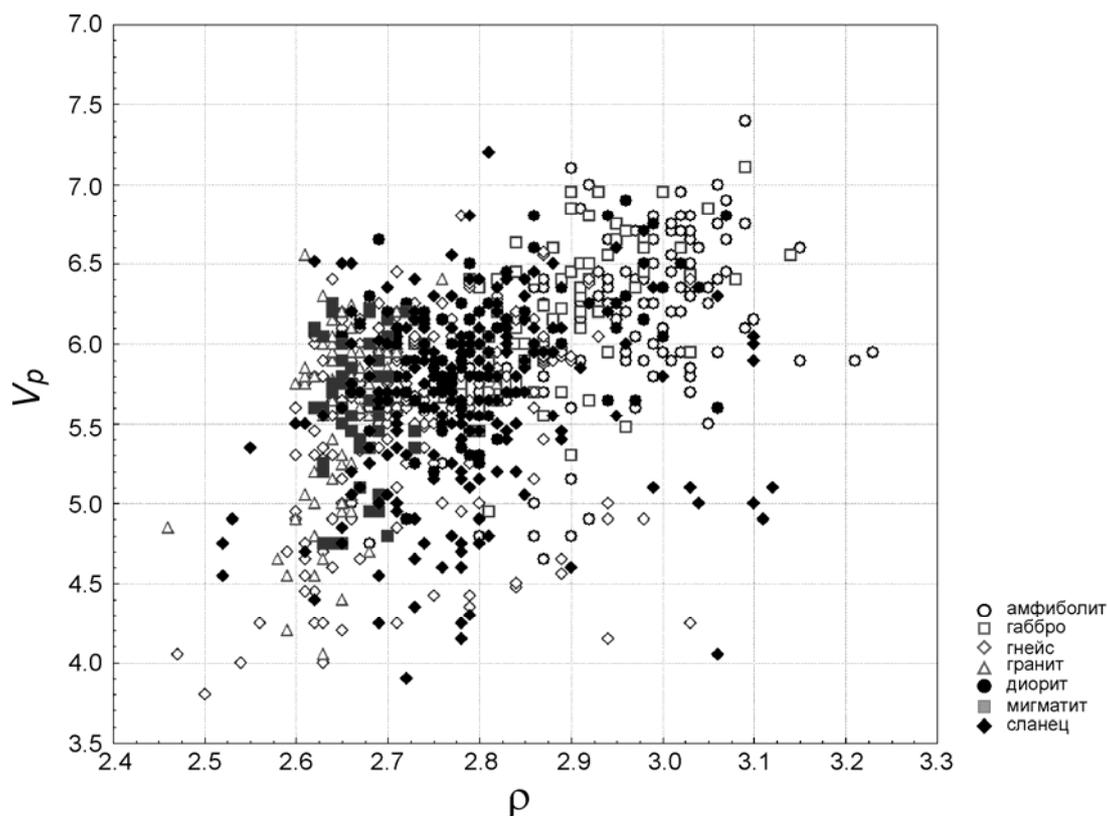


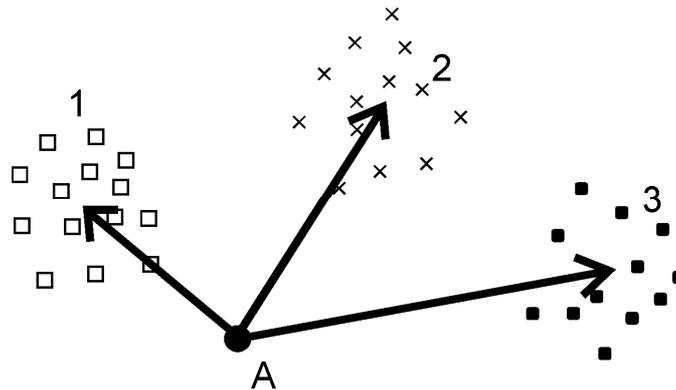
Рис. 3. Двумерная диаграмма рассеяния для всех исследованных образцов

Практическая реализация алгоритма распознавания типа породы по комплексу ее петрофизических свойств фактически предполагает выделение на плоскости ( $V_p$ – $\rho$ ) областей, соответствующих одному из исследуемых типов пород (это выделение может быть задано различными цветами, степенью интенсивности заливки одним цветом, крапом либо разными символами). Заметим, что невозможно построить универсальную систему правил, пригодную для распознавания горных пород для любого тектонического района (структуры), поскольку физические свойства изучаемых объектов могут существенно различаться. Однако и для одного региона такую систему можно построить множеством способов. Распространенные алгоритмы *OLAP* и *Data Mining* (кластерный анализ, метод линейной регрессии, нейросети, ассоциативная карта Кохонена), реализованные в уже существующем программном обеспечении (*Deductor Studio*, *STATISTICA* и т.д.), демонстрируют на практике крайне низкий уровень достоверности получаемых результатов. Эти алгоритмы работают по принципу разбиения исходных данных на два множества – обучающее, на основе данных которого строятся правила, и тестовое для проверки правил.

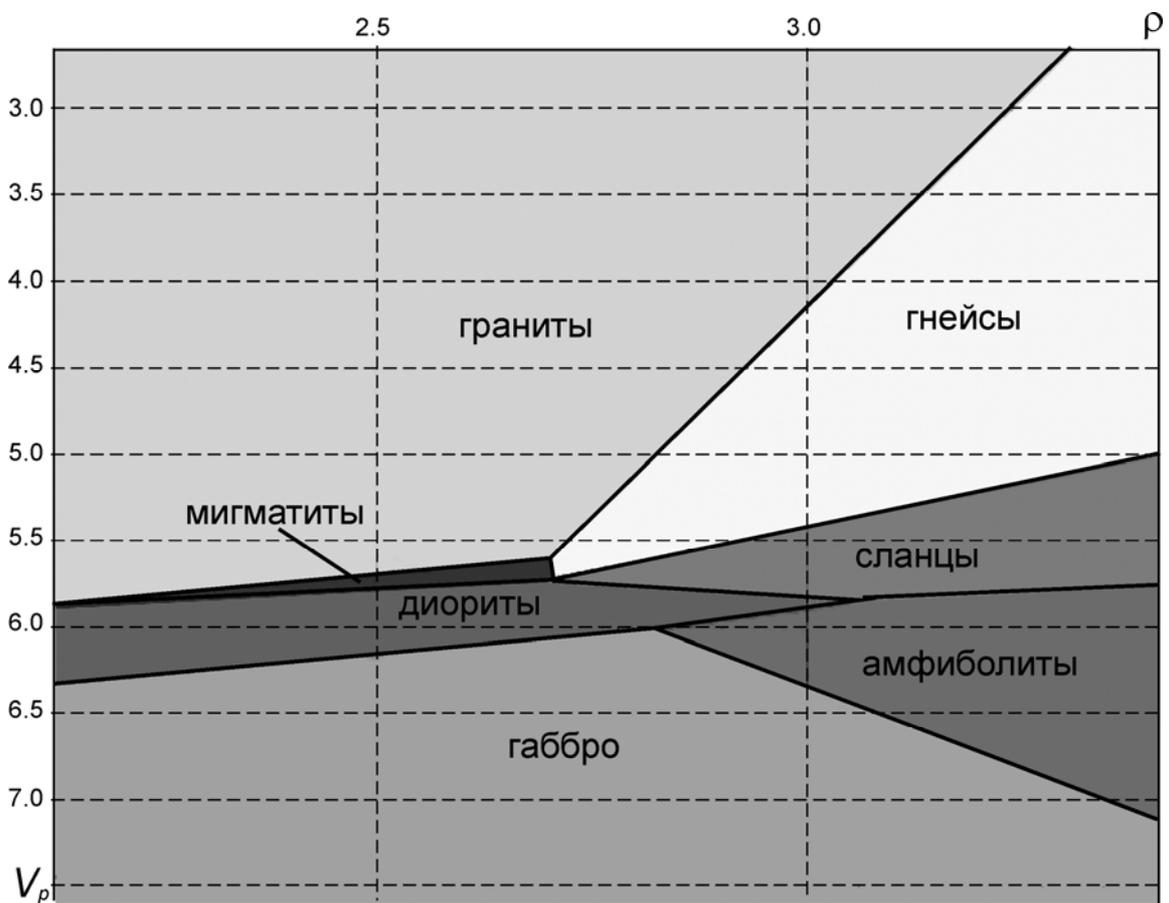
Для тестового множества при работе названных алгоритмов достоверность результатов не превышает 60%. Несколько более приемлемый результат получается при построении алгоритма дерева решений. В нашем случае этот алгоритм заключался в выделении на плоскости ( $V_p$ – $\rho$ ) множества прямоугольных областей, содержащих вошедшие в выборку образцы, что при большом количестве таких областей решением задачи не является. При попытке уменьшить количество выделяемых областей неизменно происходило снижение достоверности получаемых результатов. Поэтому возникла необходимость разработки другого алгоритма, позволяющего по двум информативным признакам реализовать распознавание объекта.

Фактически задача сводится к нахождению наименьшего расстояния от точки до множества. Однако это расстояние, которое можно определить различными способами, определяется неоднозначно.

Авторы предлагают рассматривать в качестве искомого расстояния длину суммарного вектора от исследуемой точки до всех точек соответствующего множества, деленную на их количество (длина среднего вектора). Например, в случае, аналогичном приведенному на рис. 4, исследуемая точка А должна быть отнесена к множеству 1, так как длина среднего вектора от точки А до всех точек этого множества меньше, чем до точек множеств 2, 3.



**Рис. 4.** Иллюстрация работы алгоритма распознавания. А – исследуемая точка; 1, 2, 3 – множества; стрелки – средние векторы



**Рис. 5.** Пример результата работы программы, реализующей алгоритм распознавания типов горных пород

Программа, реализующая предлагаемый алгоритм, была написана на языке C++ в программной среде *Microsoft Visual Studio*. Пример одного из результатов ее применения приведен на рис. 5. Это представление не позволяет делать однозначные утверждения об уровне достоверности работы данного алгоритма. Однако можно видеть, что, например, наименьшие значения скорости и плотности в совокупности соответствуют гранитам, наибольшие – амфиболитам и габбро и т.д., что вполне согласуется с уже имеющейся геологической информацией.

Еще раз отметим, что предлагаемый алгоритм практически применим только к изучаемому региону, в данном случае – к ВКМ. Полученные результаты позволяют предположить, что при использовании другой меры при вычислении расстояния от точки, характеризующей породу, до конечного множества можно рассчитывать на больший уровень достоверности. Фактически речь идет о функции принадлежности точки к одному из рассматриваемых множеств, которая должна обладать следующими свойствами: в точках, соответствующих имеющимся образцам, она должна равняться единице; в достаточно далеких от множества точках она должна равняться нулю; скорость убывания функции должна отрицательно коррелировать с дисперсией соответствующего множества.

На практике применение описанного в статье алгоритма позволило по двум геофизическим параметрам определить тип горных пород, залегающих в верхних слоях земной коры ВКМ.

Алгоритм может быть применен при проведении аналогичных работ и в других закрытых в геологическом отношении регионах.

### Литература

- Афанасьев Н.С.* К вопросу петрофизической классификации кристаллических горных пород (на примере ВКМ) // Вестник ВГУ. 2001. № 12. С.159–172.
- Афанасьев Н.С., Кривцов И.И.* Петрофизика, эволюция и металлогения земной коры и верхов мантии Воронежского кристаллического массива (ВКМ) // Вестник ВГУ. 2002. № 1. С.210–221.
- Глубинное строение территории СССР // ред. В.Белоусов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- Красовский С.С.* Отражение динамики земной коры континентального типа в гравитационном поле. Киев: Наук. думка, 1981. 176 с.
- Лебедев Т.С., Буртный П.А., Корчин В.А.* Петроскоростное моделирование глубинных зон земной коры северо-западной части Украинского щита // Геофиз. журн. 2001. Т. 23, № 6. С.40–54.
- Надежка Л.И., Гениафт Ю.С., Салтыковский А.Я., Семенов А.Е., Ипполитов О.М., Пивоваров С.П., Сафронич И.Н.* Некоторые глубинные неоднородности литосферы и современная сейсмичность Воронежского кристаллического массива // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: Материалы XIV Междунар. конф. Ч. 2. Петрозаводск, 2008. С.70–73.

#### Сведения об авторах

**ЛЕЛЯЕВ Петр Алексеевич** – аспирант очной аспирантуры, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: (495) 254-89-35. E-mail: norby76@yandex.ru

**САЛТЫКОВСКИЙ Артур Яковлевич** – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: (495) 254-89-35. E-mail: saltyk@ifz.ru

**НАДЕЖКА Людмила Ивановна** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Воронежский государственный университет, 394006, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1. Тел.: (4732)207-522. E-mail: nadegka@vgu.ru

**СЕМЕНОВ Михаил Евгеньевич** – доктор физико-математических наук, профессор, Воронежский государственный университет, 394006, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1. Тел.: (4732)207-522. E-mail: nadegka@vgu.ru

## THE ALGORITHM OF RECOGNITION OF STRUCTURE OF DEEP HORIZONS OF THE EARTH'S CRUST ON GEOPHYSICAL DATA (ON AN EXAMPLE OF THE VORONEZH CRYSTAL MASSIVE)

P.A. Lelyaev<sup>1</sup>, A.Ya. Saltykovskiy<sup>1</sup>, L.I. Nadezhka<sup>2</sup>, M.E. Semenov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Voronezh State University, Geological Faculty, Voronezh, Russia*

**Abstract.** Construction of material models of the earth's crust and the upper mantle is connected with the forecast based, as a rule, on likelihood knowledge of the chemical composition and physical properties of rocks. This data are results of geophysical studies, based mainly on studying of velocities of seismic waves ( $V_P$ ,  $V_S$ ) and gravimetric data.

On the basis of experimental data for the petrographic complexes outcropping in erosive section of the Voronezh crystalline massive, attempt to construct an algorithm to recognize, with certain probability, a petrographic type of deepseated rocks using values of longitudinal waves velocity and density under normal  $PT$ -conditions has been made.

**Keywords:** algorithm, forecast, rock, model, crust, velocity, density.