

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВОЙ ОСНОВЫ ПЕТРОПЛОТНОСТНОЙ КАРТЫ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

О. М. Муравина, В. И. Жаворонкин

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 25.12.2014 г.

Аннотация: приводится методика создания петроплотностной карты региона на основе группирования и статистического анализа выборок различного уровня. Выполнен статистический анализ первичных значений плотности кристаллических пород Воронежского кристаллического массива и цифровой основы карты изоденс. Получена качественно новая информация о распределении плотности пород, необходимая для решения локальных и региональных задач комплексного моделирования.

Ключевые слова: плотность, база данных, статистический анализ, цифровая карта.

STATISTICAL ANALYSIS OF THE DIGITAL BASE DENSITY MAP OF THE VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF

Abstract: the technique of creating density map of the region on the basis of clustering and statistical analysis of samples of different levels. A statistical analysis of the primary values of the density of crystalline rocks of the Voronezh crystalline massif and the basics of digital maps isodens. Received qualitatively new information about the distribution of the density of the rocks needed to solve local and regional problems of complex modeling.

Key words: density, database, statistical analysis, digital map.

Введение

Статистический анализ данных о плотности горных пород выполнен на базе созданной цифровой петроплотностной карты Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Петроплотностная карта, сформированная как ГИС-проект в системе ARC-VIEW 3.2, аккумулирует и обобщает результаты лабораторных определений плотности керна скважин, выполненных на территории ВКМ в течение последних десятилетий. Все данные получили единую пространственную привязку в географической системе координат. Это означает, что каждое значение плотности сопровождается атрибутами (долгота, широта, абсолютная высота), определяющими его положение в пространстве. Такая организация базы данных позволяет эффективно использовать информацию для решения широкого круга региональных и локальных задач, в первую очередь, связанных с интерпретацией поля силы тяжести. Особо отметим, что база данных продолжает постоянно пополняться за счет новых определений физических параметров. Статистический анализ первичных и усредненных значений плотности кристаллических пород Воронежского кристаллического массива выполнен в рамках решения задачи комплексного моделирования с целью построения трехмерной модели литосферы [1].

Исходные данные

Исходными данными для исследований послужила петрофизическая модель пород кристаллического фундамента, содержащая объемную и разнородную

геологическую и петрофизическую информацию, относящуюся к территории исследований [2 – 6 и др.].

Обработка данных

Цифровой основой карты изоденс стала атрибутивная часть петрофизической модели, сформированная как ГИС-проект. Сложность объекта исследования потребовала выполнения различных способов группирования и анализа первичных данных [6, 7]. На начальной стадии были сформированы выборки первого уровня – петрофизические характеристики, соответствующие различным структурно-фациальным комплексам безотносительно их пространственного положения. Подавляющее большинство структурно-вещественных комплексов было представлено репрезентативными выборками значительного объема (от 100 до 4000 значений). Это позволило выполнить достоверный статистический анализ данных, рассчитать статистические моменты, в том числе модальные, медианные и средние значения, построить гистограммы распределения и определить наиболее вероятные диапазоны изменения петрофизических параметров пород по значениям квантилей распределения 0,05 и 0,95 порядка. Полученные данные были согласованы с опубликованными результатами предшествующих исследований [3–5 и др.]. На следующем этапе данные были сгруппированы в соответствии с пространственным положением вещественных комплексов (выборки второго уровня), а затем в пределах выделенных групп сформированы выборки третьего уровня, отнесенные к локальным

геологическим объектам (полигонам в терминах ГИС). Часть выборок третьего уровня имела небольшую размерность, поэтому для получения достоверных статистических оценок были применены робастные подходы к обработке данных. Основная идея робастного оценивания заключалась в выявлении и исключении аномальных значений, учет которых мог привести к существенным искажениям статистических характеристик. В результате статистического анализа выборок третьего уровня часть полигонов получила уточненные значения плотности: среднее (или медианное) значение петрофизической характеристики в наиболее вероятном диапазоне изменения. Для представительных выборок (свыше 50 значений) наиболее вероятный диапазон определялся по значениям квантилей порядка 0,05 и 0,95. Для

выборок малого объема наиболее вероятные диапазоны определялись минимальным и максимальным значениями. При этом проверялось условие их пересечения с соответствующими интервалами, полученными для выборок первой категории. Объектам (полигонам) не вскрытых скважинами были присвоены осредненные значения параметров для данного структурно-фациального комплекса, с учетом пространственного тренда.

На заключительном этапе выполнена гармоническая интерполяция полигональных данных в узлы регулярной сетки размером 0,01° по широте и 0,01° по долготе, что соответствует примерно 1×1 км. Итогом этой работы стала детальная петроплотностная карта изоденс территории ВКМ на геологической основе масштаба 1:500 000, представленная на рис. 1.

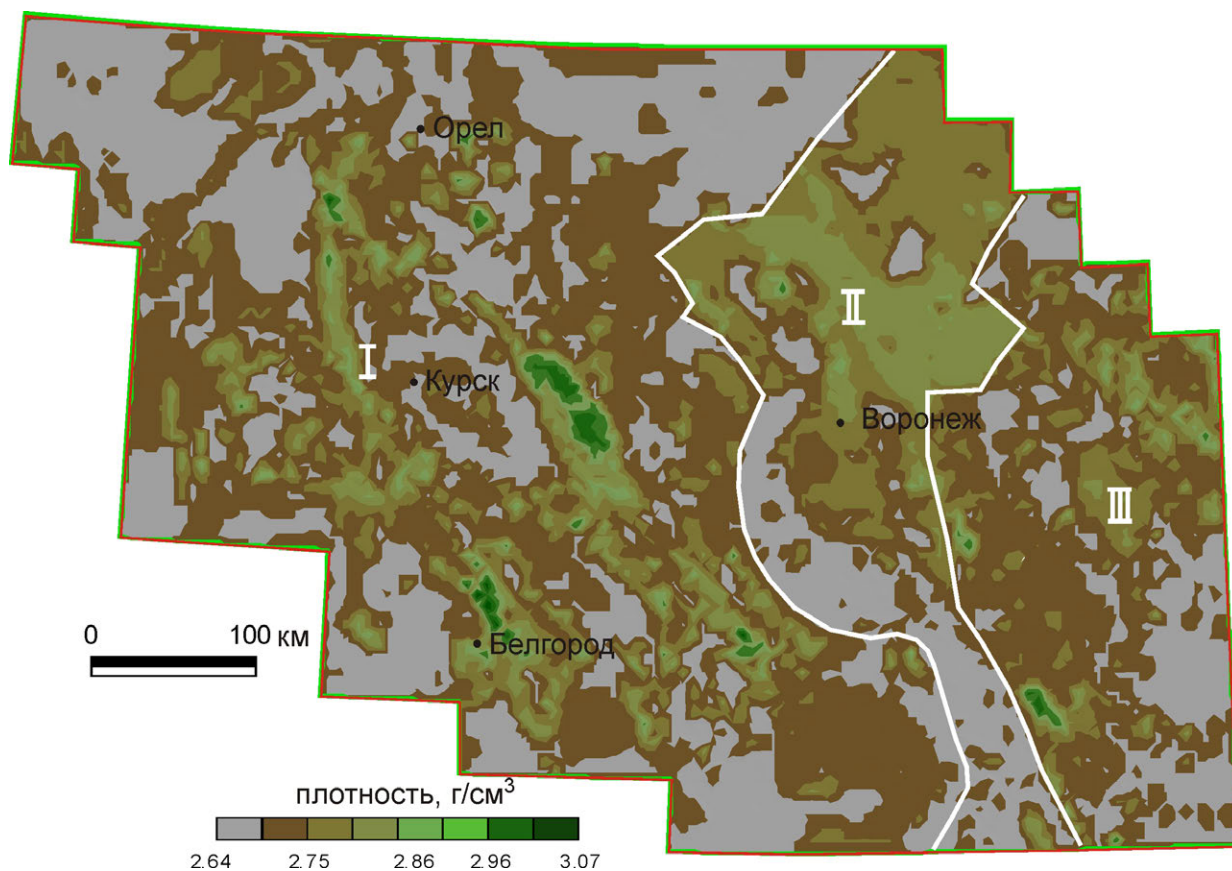


Рис. 1. Карта изоденс территории ВКМ: I – мегаблок КМА; II - Лосевская шовная зона; III – западная часть Хоперского мегаблока.

Ниже приведены результаты статистического и пространственного анализа данных, выполненного как по всей атрибутивной части база данных (первичные данные), так и по цифровой основе разработанной петроплотностной карты изоденс (усредненные данные).

Анализ результатов

Данные о плотности кристаллических пород ВКМ неоднократно публиковались [3 – 5 и др.]. Тем не менее, созданная пространственная база данных, аккумулирующая сведения самых разных источников, а также возможности ГИС-технологий позволили получить качественно новую информацию о распределении плотности пород территории ВКМ.

В первую очередь, для статистических оценок в полном объеме была использована первичная база данных, представленная 55 347 значениям плотности образцов керна. Значения были сгруппированы в зависимости от типа породы (интрузивные, метаморфические и метасоматические породы) и рассчитаны статистические характеристики всех пород, представленных в общей базе данных репрезентативными выборками. Некоторые результаты выполненного статистического анализа, необходимые для формирования различных вариантов стартовых плотностных моделей среды разной степени детальности, приведены в таблицах 1–3. В них указаны объемы выборок (N), средние значения и рассчитанные значения 5 % и 95 % квантилей (0,05q и 0,95q). Квантильный анализ по-

зволил оценить наиболее вероятные границы вариаций плотности той или иной породы. Для выборок больших объемов такие оценки более достоверны, чем минимальные и максимальные значения, которые в таких случаях скорее отражают выбросы данных.

Достоверные границы диапазона изменения плотности вместе со средними значениями являются важными априорными параметрами, необходимыми при разработке стартовых моделей при решении задачи инверсии гравитационного поля.

Таблица 1

Плотностные характеристики интрузивных пород Воронежского кристаллического массива

Породы	Плотность, г/см ³	0,05q, г/см ³	0,95q, г/см ³	N, обр.
Пикриты и коматииты	3,13	3,03	3,22	134
Перидотиты (менее 50% вторичных)	2,8	2,59	3,02	371
Базальты	2,86	2,85	2,86	29
Пироксениты	3,18	2,87	3,48	141
Горнблендиты	3,06	3,04	3,07	33
Пироксениты амфиболитизированные	3,04	2,83	3,25	243
Габброиды	2,94	2,92	2,96	1288
Габбро-долериты, габбро-диабазы	2,97	2,96	2,98	351
Габброиды роговообманковые	2,94	2,79	3,08	141
Габбронориты	2,98	2,93	3,02	343
Нориты	2,93	2,69	3,16	116
Габброиды оливиновые	2,98	2,90	3,06	252
Габброиды амфиболитизированные	2,92	2,74	3,10	625
Анортозиты	2,73	2,57	2,89	16
Монцогаббро	2,83	2,77	2,90	35
Пироксениты щелочные	3,18	2,98	3,39	212
Лампрофиры	2,83	2,67	2,98	75
Габбродиориты	2,84	2,83	2,84	171
Диориты	2,81	2,67	2,96	259
Диориты кварцевые	2,78	2,67	2,88	218
Монцодиориты	2,74	2,61	2,87	44
Монцониты	2,77	2,67	2,86	38
Монцониты кварцевые	2,76	2,64	2,89	60
Сиениты и кварцевые сиениты	2,69	2,57	2,81	256
Сиениты щелочные	2,80	2,59	3,00	140
Гранодиориты и тоналиты	2,73	2,65	2,80	581
Плагиограниты	2,68	2,60	2,76	668
Граниты	2,65	2,58	2,72	872
Гнейсо-граниты	2,65	2,65	2,66	573
Лейкограниты	2,63	2,57	2,68	370
Гранит-аплиты	2,63	2,63	2,64	38
Граниты метасоматические и гранит-пегматиты	2,63	2,57	2,69	277
Граносиениты	2,68	2,59	2,77	235
Граниты умеренно-щелочные и щелочные	2,68	2,58	2,77	59
Лейкограниты умеренно щелочные и щелочные	2,64	2,59	2,69	18

Таблица 2

Плотностные характеристики метаморфических пород Воронежского кристаллического массива

Породы	Плотность, г/см ³	0,05q, г/см ³	0,95q, г/см ³	N, обр.
1	2	3	4	5
Сланцы биотитовые биотит-хлоритовые и двуслюдяные	2,76	2,60	2,92	3359
Сланцы глиноземистые	2,88	2,64	3,11	259
Сланцы гранат-биотитовые	2,92	2,62	3,22	302
Сланцы гранатсодержащие биотитовые и двуслюдяные	2,84	2,61	3,07	104
Сланцы двуслюдисто-карбонатные	2,78	2,60	2,96	479

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Сланцы двуслюдисто-карбонатные углеродистые	2,75	2,59	2,90	57
Сланцы карбонат-хлоритовые карбонат-амфибол-хлоритовые и биотит-амфибол-карбонатные	2,90	2,68	3,12	675
Сланцы кварц-карбонатные до карбонатных	2,81	2,57	3,06	146
Сланцы углеродисто-сланцевые	2,75	2,58	2,91	781
Сланцы углеродистые	2,74	2,55	2,92	453
Сланцы филлитовидные	2,74	2,52	2,96	1155
Сланцы хлоритовые серицит-хлоритовые серицитовые-мусковитовые	2,72	2,54	2,91	1592
Метабрекчии, метаконгломераты и метапесчаники нерасчлененные	2,76	2,56	2,95	948
Брекчии метавулкано-тектонические кислого состава	2,87	2,81	2,93	341
Брекчии метавулкано-тектонические ультраосновного и среднего состава	2,91	2,67	3,15	225
Тремолититы	2,98	2,78	3,19	172
Кварцитопесчаники	2,69	2,50	2,88	1680
Метапесчаники биотит-кварцевые и двуслюдисто-кварцевые	2,70	2,62	2,78	108
Метапесчаники двуслюдяные и биотит-плагиоклаз-кварцевые	2,72	2,62	2,83	169
Метапесчаники кварц-полевошпатовые и метааркозы	2,70	2,64	2,76	89
Метапесчаники полимиктовые и метатифы	2,77	2,60	2,95	188
Метапесчаники серицитовые	2,69	2,58	2,81	252
Метапесчаники слюдисто-карбонат-кварцевые	2,79	2,63	2,95	112
Метавулканиты кислого состава	2,69	2,55	2,84	334
Актинолититы	3,00	2,85	3,14	344
Амфиболиты апобазальтовые	2,97	2,83	3,11	288
Известняки мраморизованные и мраморы	2,80	2,64	2,96	732
Гранодиорито-гнейсы, диорито-гнейсы и тоналито-гнейсы	2,79	2,67	2,92	145
Железистые кварциты амфибол-гематит-магнетитовые	3,52	3,18	3,86	814
Железистые кварциты гематит-магнетит. щелочноамфибол.	3,52	3,16	3,88	344
Железистые кварциты карбонат-магнетитовые	3,47	3,07	3,87	350
Железистые кварциты магнетит-гематитовые	3,50	3,11	3,89	903
Железистые кварциты магнетитовые амфибол-магнетитовые	3,52	3,17	3,88	3738
Железистые кварциты магнетит-пироксеновые	3,56	3,22	3,89	229
Железистые кварциты нерасчлененные малорудные (рудных меньше 25%)	3,16	2,70	3,63	1367
Железистые кварциты окисленные	3,33	2,86	3,81	2143
Железистые кварциты слабо окисленные	3,41	3,03	3,79	851
Железистые кварциты выветрелые	3,39	2,64	4,15	1260
Гранодиорито-гнейсы, диорито-гнейсы и тоналито-гнейсы	2,79	2,67	2,92	145
Плагиогнейсы биотитовые двуслюдяные	2,71	2,61	2,80	2056
Плагиогнейсы биотит-роговообманковые	2,77	2,65	2,89	686
Плагиогнейсы биотит-роговообманковые с гранатом пироксеном	2,82	2,55	3,09	78
Плагиогнейсы гранат-кордиеритовые	2,85	2,58	3,12	104
Плагиогнейсы гранатсодержащие	2,77	2,65	2,90	120
Плагиогнейсы графитовые	2,77	2,48	3,06	62
Плагиогнейсы мусковитовые	2,72	2,59	2,85	54
Гранито-гнейсы биотитовые иногда графитовые	2,66	2,60	2,72	607
Гранито-гнейсы биотит-роговообманковые	2,71	2,62	2,79	110
Гранито-гнейсы мусковитовые двуслюдяные	2,67	2,61	2,73	74
Гнейсы биотит-полевошпат-пироксеновые и амфибол-полевошпат-пироксеновые	2,87	2,67	3,06	83
Гнейсы биотит-силлиманит-кордиеритовые	2,76	2,49	3,02	106
Гнейсы гранат-пироксеновые и биотит-пироксен-микроклиновые	3,08	2,50	3,65	22
Гнейсы нерасчлененные	2,72	2,53	2,90	1112
Гранулиты	3,33	2,68	3,98	52

1	2	3	4	5
Габбро-амфиболиты	2,99	2,98	3,01	1893
Плаггиомигматиты биотитовые	2,68	2,57	2,79	670
Плаггиомигматиты биотит-роговообманковые роговообманковые	2,71	2,59	2,83	198
Плаггиомигматиты двуслюдяные	2,67	2,60	2,74	81
Плаггиомигматиты мусковитовые	2,66	2,61	2,71	19
Мигматиты плагиоклаз-микроклиновые биотитовые	2,66	2,54	2,78	323
Мигматиты плагиоклаз-микроклиновые биотит-роговообманковые роговообманковые	2,70	2,58	2,82	24
Мигматиты плагиоклаз-микроклиновые двуслюдяные	2,67	2,61	2,73	65
Мигматиты нерасчлененные	2,68	2,58	2,78	1077

Таблица 3

Плотностные характеристики метасоматических пород Воронежского кристаллического массива

Породы	Плотность, г/см ³	0,05q, г/см ³	0,95q, г/см ³	N, обр.
Пропилиты	2,87	2,55	3,20	81
Грейзены	2,74	2,54	2,95	281
Серпентиниты нерасчлененные	2,55	2,24	2,87	565
Серпентиниты с реликтами первичных минералов	2,65	2,45	2,85	529
Серпентиниты рудные	2,65	2,28	3,02	333
Метасоматиты тальк-амфибол-серпентиновые	2,85	2,53	3,18	577
Амфиболиты апопироксенитовые	2,96	2,78	3,15	572
Карбонатиты	2,98	2,66	3,30	215
Метасоматиты сфен-биотит-эгириновые	3,13	2,95	3,31	346
Метасоматиты гранат-пироксен-карбонатные	3,06	2,70	3,41	193
Фениты	2,71	2,52	2,90	494
Фениты с магнетитом	2,77	2,50	3,04	180
Альбититы	2,72	2,69	2,75	83
Метасоматиты микроклин-альбит-биотитовые	2,88	2,61	3,15	523
Метасоматиты нерасчлененные	3,13	2,53	3,73	127
Роговики	2,84	2,51	3,16	91

В дальнейшем, для обобщения и пространственного анализа были использованы цифровые данные карты изоденс. Это позволило избежать искажений, связанных с неравномерным объемом выборок пород различных литологических типов и получить усредненные характеристики распределения плотности кристаллических пород как для территории ВКМ в целом, так и для основных его элементов.

Различие в характере распределения плотности мегаблоков ВКМ и Лосевской шовной зоны иллюстрирует рис. 2

В таблице 4 приведены значения основных статистических моментов и объемы соответствующих выборок данных.

Из таблицы 4 следует, что средняя плотность пород в целом для территории ВКМ составляет 2,72 г/см³. Характер распределения, средняя плотность и значения других статистических показателей пород мегаблока КМА практически совпадает с соответствующими данными для территории ВКМ в целом. Вид вариационной кривой пород Хоперского мегаблока также согласуется с вариационными кривыми всей территории ВКМ и мегаблока КМА. Средняя плотность пород Хоперского мегаблока несколько выше и составляет 2,73 г/см³, дисперсия же наоборот минимальная в ряду рассматриваемых выборок. Наиболее аномальными выглядят статистические характеристики плотности пород Лосевской шовной зоны.

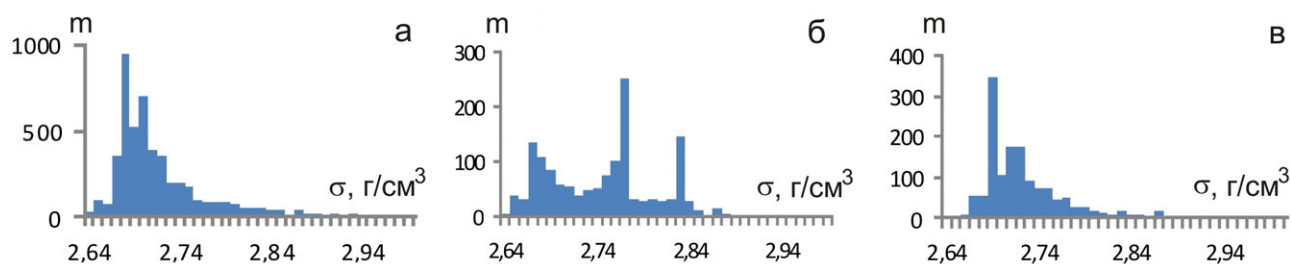


Рис. 2. Обобщенные гистограммы распределения плотности пород для ВКМ: а – мегаблок КМА; б – Лосевская шовная зона; в – западная часть Хоперского мегаблока.

Статистическая характеристика плотности горных пород ВКМ и его основных геотектонических элементов

Статистическая характеристика	ВКМ	Мегаблок КМА	Лосевская шовная зона	Хоперский мегаблок
Среднее, г/см ³	2,72	2,72	2,75	2,73
Медиана, г/см ³	2,71	2,70	2,75	2,71
Мода, г/см ³	2,68	2,68	2,77	2,69
Стандартное отклонение, г/см ³	0,06	0,06	0,06	0,05
Дисперсия выборки	0,003	0,003	0,003	0,002
Экссесс	3,1	5,1	-0,9	4,9
Асимметричность	1,6	2,0	0,2	1,9
Минимум, г/см ³	2,64	2,64	2,64	2,65
Максимум, г/см ³	3,07	3,07	2,96	3,01
Объем выборки, шт	7837	4924	1451	1441

Средняя плотность пород, медианные и модальные значения максимальны среди рассматриваемых групп пород и составляют 2,75 г/см³, 2,75 г/см³ и 2,77 г/см³ соответственно. Гистограмма распределения плотности пород Лосевской шовной зоны также существенно отличается, главным образом многомодальностью и меньшими значениями эксцесса.

Выводы

Разработана методика создания петроплотностной карты региона на основе группирования и статистического анализа выборок различного уровня.

Обеспечен доступ к первичной информации об измеренных значениях плотности зерна пород посредством использования атрибутивных таблиц петроплотностной базы данных. Рассчитаны статистические характеристики всех типов интрузивных, метаморфических и метасоматических пород, представленных в базе репрезентативными выборками. Определены границы наиболее вероятных диапазонов изменения плотности методом квантильного анализа.

Выполнен статистический и пространственный анализ цифровой основы карты изоденс с минимизацией искажений, связанных с неравномерным объемом выборок пород различных литологических типов.

Рассчитаны усредненные характеристики распределения плотности кристаллических пород как для территории ВКМ в целом, так и для основных геотектонических элементов. Выявлены характерные особенности распределений плотности в пределах основных структурных элементов региона.

Получена качественно новая информация о распределении плотности пород территории ВКМ, необходимая для решения локальных и региональных задач комплексного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазнев, В. Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии / В. Н. Глазнев. – Апатиты: «КаЭМ». – 2003. – 252 с.
2. Геологическая карта Восточно-Европейской платформы и её складчатого обрамления (в границах бывшего СССР). Масштаб 1 : 2500000 / Ред. Ю. Р. Беккер. – СПб.: Изд. ВСЕГЕИ, 1996.
3. Афанасьев, Н. С. Петрофизика земной коры ВКМ / Н. С. Афанасьев // Литосфера Воронежского кристаллического массива по геофизическим и петрофизическим данным. – Воронеж: Научная книга, 2012. – С. 21–88.
4. Афанасьев, Н. С. Физические параметры, химические составы, минеральные парагенезисы горных пород докембрия Воронежского кристаллического массива / Н. С. Афанасьев. – Воронеж: Дед. ВИНТИ. – № 2870-82. – 1982. – 248 с.
5. Жаворонкин, И. А. Петрофизическая характеристика пород докембрия ВКМ и использование ее при составлении геолого-геофизических схем / И. А. Жаворонкин, Р. С. Красовицкая, И. И. Кривцов и [др.] // Петрофизическая характеристика советской части Балтийского щита. – Апатиты: Изд-во АН СССР, 1976. – С.28–29.
6. Муравина, О. М. Петроплотностная модель кристаллического фундамента Воронежского кристаллического массива / О. М. Муравина, В. И. Жаворонкин, В. Н. Глазнев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 41-ой сессии Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2014. – С. 171–173.
7. Муравина, О. М. Пространственный анализ распределения плотности докембрийских образований Воронежского кристаллического массива / О. М. Муравина, В. И. Жаворонкин, В. Н. Глазнев // XV Международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле»: материалы конференции. – Москва : ИФЗ РАН, 2014. – С.170–173.

Воронежский государственный университет

Муравина О. М., доцент кафедры геофизики
E-mail: muravina@geol.vsu.ru; Тел.: 8(473)220-83-85

Жаворонкин В. И., доцент кафедры геофизики
E-mail: zhavoronkin@geol.vsu.ru
Тел.: 8(473)220-83-85

Voronezh State University

Muravina O. M., Professor assistant, Geophysical Department
E-mail: muravina@geol.vsu.ru; Tel. 8(473)220-83-85

Zhavoronkin V. I., Professor assistant, Geophysical Department
E-mail: zhavoronkin@geol.vsu.ru
Tel.: 8(473)220-83-85