

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОСНОВНЫХ ГРАНИЦ В РАЗРЕЗЕ ЛИТОСФЕРЫ ПРИСВОДОВОЙ ЧАСТИ ВОРОНЕЖСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ

А. И. Трегуб, Л. И. Надежка, И. Т. Ежова

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 8 ноября 2017 г.

Аннотация: статистический анализ соотношений морфометрических данных с основными разделами литосферы проведен по сейсмическому профилю Губкин – Жердевка. По результатам корреляционного анализа оценены статистические зависимости между морфометрией земной поверхности и сейсмическими границами литосферы: границей Конрада, границей Мохоровичича и границей переходного слоя. Для мегаблока КМА линейная связь морфометрии земной поверхности определена только с границей Конрада. Для Хоперского мегаблока - только с границей Мохоровичича. Для Лосевской шовной зоны зависимость отмечается со всеми основными границами. Эти особенности, возможно, могут быть связаны с различной историей формирования блоков фундамента.

Ключевые слова: корреляционная модель, земная поверхность, литосфера, Воронежская антеклиза.

THE CORRELATION MODEL OF THE MAIN BONDARIES IN THE LITHOSPHERE SECTION OF THE ARCH PART OF THE VORONEZH ANTECLINE

Abstract: statistical analysis of the morphometric data relations with the main sections of the lithosphere was carried out according to the seismic profile Gubkin – Zherdevka. According to the results correlation analysis evaluated the statistical relationship between the morphometry of the earth's surface and seismic boundaries: the boundary of Conrad, Mohorovichich's boundary and the boundary of the transition layer. For megablock KMA linear relationship of the earth's surface morphometry is determined only with the Conrad boundary. For Khopersky megablock of the only border Mohorovichich's. For Ljsevskaya suture zone of dependence exists with major borders. These features are likely to be associated with different formation history of the basement blocks.

Key words: correlation model, Earth surface, lithosphere, Voronezh antecline.

Структура литосферы Воронежского кристаллического массива представлена моделью, базирующейся на анализе комплекса геофизических данных. В ней, помимо осадочного слоя, выделяются три основных слоя в консолидированной части земной коры: гранитоидный, «диоритовый», metabазитовый. Кроме того, может быть выделен слой в качестве переходного к мантии [1]. Границы между указанными подразделениями разреза литосферы выделены по геофизическим данным. Вместе с тем, существует еще одна граница – граница между литосферой и географической оболочкой. Она характеризуется рельефом земной поверхности. Тесная связь этой границы с особенностями геологического строения и тектоническими движениями отмечена в многочисленных публикациях, посвященных структурной геоморфологии, в том числе и для характеризуемой территории [2, 3]. В настоящей работе приведены результаты изучения

возможной связи количественных параметров рельефа земной поверхности с глубинными границами в разрезе литосферы сводовой части Воронежской антеклизы. В качестве морфометрического параметра использован коэффициент изрезанности земной поверхности [4].

Статистический анализ соотношений морфометрических данных с важнейшими разделами литосферы проведен по имеющемуся сейсмическому профилю Губкин – Жердевка в целом и по наиболее крупным структурным элементам докембрийского фундамента в его пределах: мегаблоку КМА, Лосевской шовной зоне, а также Хоперскому мегаблоку [5, 6] (рис.1).

Для гистограмм распределения параметров этих поверхностей характерен полимодальный тип, отражающий неоднородность выборки (рис.2). Наиболее отчетливо выделяются три моды, каждая из которых

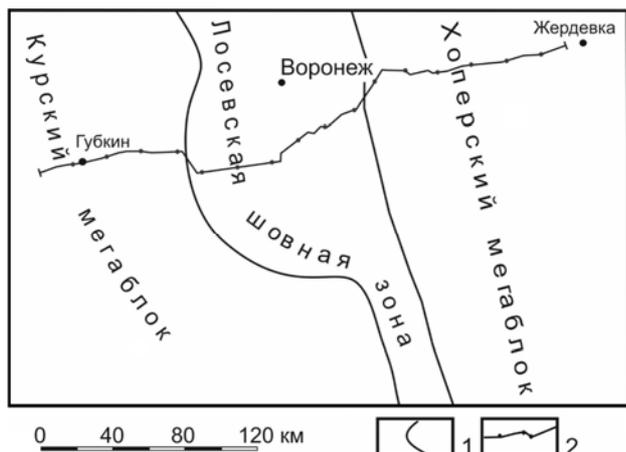


Рис. 1. Схема расположения сейсмического профиля: 1 – границы мегаблоков, 2 – линия профиля.

близка к соответствующим среднеарифметическим значениям коэффициента изрезанности земной поверхности; глубины залегания сейсмических границ в разрезе литосферы для трех названных выше элементов блоковой структуры фундамента (табл.1).

Так, для коэффициента изрезанности рельефа модалные значения составляют: 0,50–0,525, что с учетом стандартного отклонения соответствует среднему значению для мегаблока КМА (0,48); 0,325–0,35 (соответствует среднему значению для Лосевской шовной зоны); 0,225–0,25, что близко к среднему значению для Хоперского мегаблока (0,28). Для подошвы гранитогнейсового слоя модалные значения выделяются весьма отчетливо для глубин 5 км, 11 км, 15 км. Они весьма близки к средним значениям 5,19 км (для Хоперского мегаблока); 12,20 км (для мегаблока КМА) и 13,72 км (для Лосевской шовной

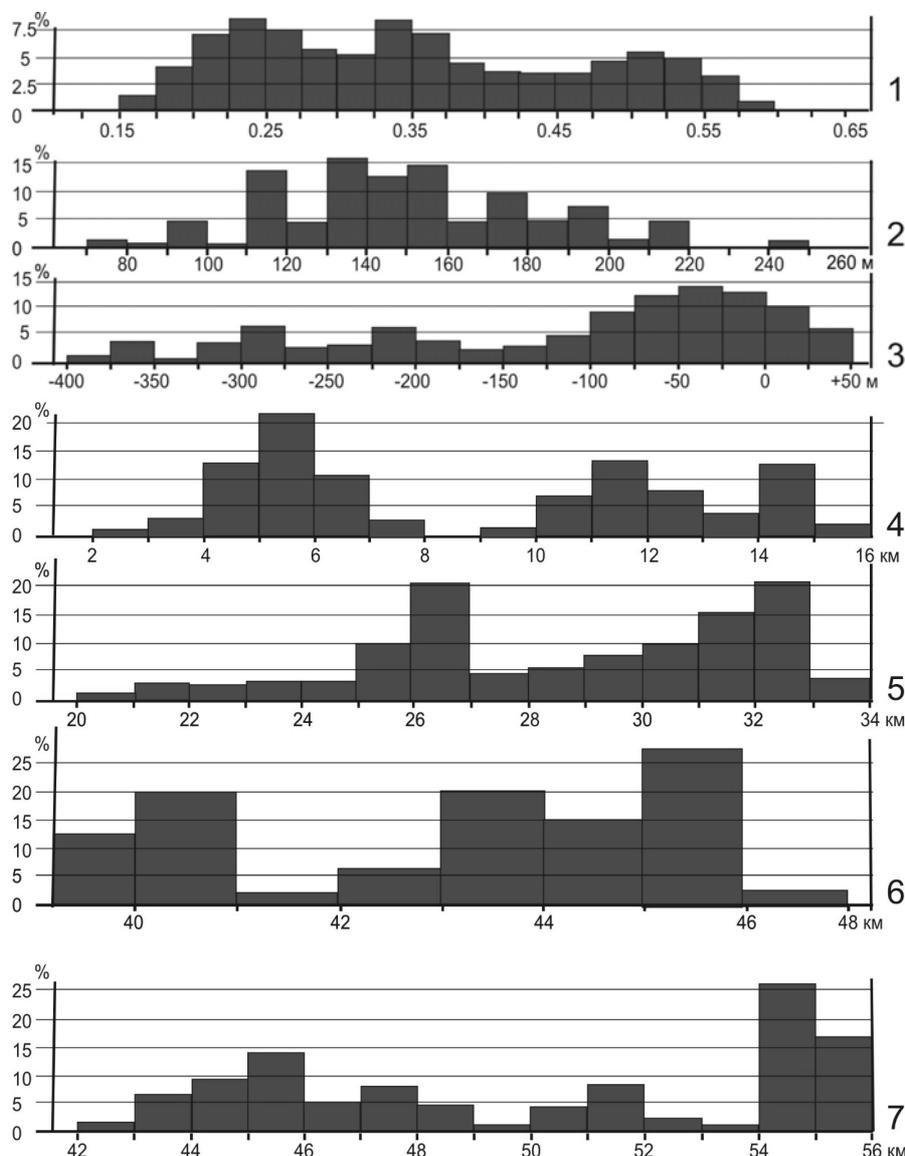


Рис. 2. Гистограммы распределения для: 1 – коэффициента изрезанности земной поверхности; 2 – гипсометрии земной поверхности; 3 – гипсометрии поверхности докембрийского фундамента; 4 – глубины подошвы гранитогнейсового слоя; 5 – глубины подошвы «диоритового» слоя; 6 – глубины раздела Мохоровичича; 7 – глубины подошвы переходного слоя.

Таблица 1

Параметры границ в разрезе литосферы в блоках фундамента

Блоки фундамента	Мегаблок КМА	Лосевская шовная зона	Хоперский мегаблок	Профиль в целом
<i>Коэффициент изрезанности земной поверхности</i>				
<i>Среднее значение</i>	0,48	0,35	0,28	0,34
<i>Стандартное отклонение</i>	0,04	0,30	0,06	0,18
<i>Гипсометрия земной поверхности, м</i>				
<i>Среднее значение</i>	182,46	158,88	140,85	153,81
<i>Стандартное отклонение</i>	38,36	40,10	13,66	35,23
<i>Гипсометрия поверхности фундамента, м</i>				
<i>Среднее значение</i>	-106,15	+10,6	-117,6	-87,30
<i>Стандартное отклонение</i>	224,9	5,1	101,5	157,11
<i>Глубина подошвы гранитогнейсового слоя, км</i>				
<i>Среднее значение</i>	12,20	13,72	5,19	9,28
<i>Стандартное отклонение</i>	1,58	1,19	0,86	4,06
<i>Глубина подошвы диоритового слоя, км</i>				
<i>Среднее значение</i>	30,52	25,86	28,56	28,6
<i>Стандартное отклонение</i>	1,4	0,49	3,96	3,27
<i>Глубина границы Мохоровичича, км</i>				
<i>Среднее значение</i>	40,45	42,83	43,27	43,00
<i>Стандартное отклонение</i>	1,62	2,47	1,77	2,60
<i>Глубина подошвы переходного слоя, км</i>				
<i>Среднее значение</i>	45,76	54,09	50,27	50,95
<i>Стандартное отклонение</i>	1,92	1,59	3,06	4,30

зоны). На графике для подошвы «диоритового» слоя выделяются две моды – 26–27 км и 32–33 км. Они могут быть сопоставлены со средними значениями глубины 25,86 км (Лосевская шовная зона), а также с мегаблоком КМА (30,52 км), в совокупности с Хоперским мегаблоком (28,56 км с учетом стандартного отклонения – 3,96 км). Для границы Мохоровичича установлены три преобладающие значения глубины: 40–41, 43–44, и 45–46 км, что может соответствовать средним значениям 40,45 км (мегаблок КМА), 42,83 км (Лосевская шовная зона) и 43,27 км (Хоперский мегаблок). Средние значения глубин для подошвы переходного слоя составляют: 45,76 км (мегаблок КМА), 54,09 км (Лосевская шовная зона), 50,27 км (Хоперский мегаблок). На графике функции плотности распределения им соответствуют: две сближенные моды (45 км и 48 км), а также 54–55 км и 51–52 км.

Исключение составляют гистограммы распределения абсолютных отметок современного рельефа, а также абсолютных отметок поверхности докембрийского фундамента. В первом случае график отражает весьма неоднородное распределение, которое, по-видимому, может быть объяснено существенным влиянием на формирование рельефа экзогенной составляющей, вуализующей его связь с тектоническими движениями. Для поверхности фундамента, несмотря на наличие слабо выраженных модальных значений, они существенно отличаются от средних значений по блоковой структуре. Однако если учесть большие стандартные отклонения, то эти величины будут сопоставимы: $-106 + (-224) = -330$ м (мегаблок КМА); $+10,6 = 5,1 = 15,7$ м (Лосевская шовная зона); $-101 + (-$

117) = 218 м (Хоперский мегаблок). Таким образом, сравнение статистических данных позволяет предположить наличие связи морфометрии земной поверхности (коэффициента изрезанности) с основными блоками докембрийского фундамента. Важно отметить также, что наиболее крупные структурные элементы докембрийского фундамента (мегаблок КМА, Лосевская шовная зона, Хоперский мегаблок) находят свое отражение в особенностях топографии главных сейсмических границ в разрезе литосферы.

Для оценки связи средних значений коэффициента изрезанности со средним положением границ в разрезе литосферы вычислены коэффициенты корреляции для основных блоков фундамента и для профиля в целом. Значимость коэффициентов определена в соответствии с критерием Стьюдента (табл.2).

По полученным данным составлены уравнения линейной регрессии разделов литосферы по коэффициенту изрезанности земной поверхности. При этом учтены только значимые по критерию Стьюдента коэффициенты корреляции (табл.3).

Для профиля в целом линейные связи коэффициента изрезанности устанавливаются с абсолютными отметками рельефа и всеми сейсмическими границами в разрезе литосферы. Отсутствует она с гипсометрией поверхности фундамента. При этом минимальные погрешности уравнения регрессии (4,57 %) отмечены для подошвы переходного слоя. Иные соотношения отмечаются для основных структурных элементов фундамента.

Для мегаблока КМА линейная зависимость с ошибкой 9,51 % в уравнении регрессии устанавливается только для подошвы верхней коры (гранитогней-

Таблица 2

*Коэффициенты корреляции изрезанности земной поверхности и параметров основных границ в разрезе литосферы**

Мегаблоки фундамента	Коэффициент корреляции	t (расчетное значение)	t (табличное значение)
<i>Коэффициент изрезанности и гипсометрия земной поверхности</i>			
Мегаблок КМА	+0,16	-	-
Лосевская шовная зона	+0,58	1,754	2,447
Хоперский мегаблок	+0,10	-	-
Профиль в целом	+0,55	4,086	2,021
<i>Коэффициент изрезанности и гипсометрия поверхности фундамента</i>			
Мегаблок КМА	- 0,55	2,094	2,228
Лосевская шовная зона	- 0,42	1,130	2,447
Хоперский мегаблок	- 0,18	-	-
Профиль в целом	- 0,09	-	-
<i>Коэффициент изрезанности и глубина подошвы гранитогнейсового слоя</i>			
Мегаблок КМА	+0,68	2,944	2,228
Лосевская шовная зона	- 0,95	7,508	2,447
Хоперский мегаблок	- 0,08	-	-
Профиль в целом	+0,59	4,545	2,021
<i>Коэффициент изрезанности и глубина подошвы «диоритового» слоя</i>			
Мегаблок КМА	+0,33	-	-
Лосевская шовная зона	+0,41	1,103	2,447
Хоперский мегаблок	+0,30	-	-
Профиль в целом	+0,33	2,190	2,021
<i>Коэффициент изрезанности и глубина границы Мохоровичича</i>			
Мегаблок КМА	+0,42	1,475	2,228
Лосевская шовная зона	- 0,77	2,994	2,447
Хоперский мегаблок	+0,60	3,270	2,093
Профиль в целом	-0,59	4,545	2,021
<i>Коэффициент изрезанности и глубина подошвы переходного слоя</i>			
Мегаблок КМА	0,40	-	-
Лосевская шовная зона	- 0,84	3,811	2,447
Хоперский мегаблок	- 0,32	-	-
Профиль в целом	-0,52	3,817	2,021

*Жирным шрифтом выделены значимые по критерию Стьюдента (t) коэффициенты корреляции.

Таблица 3

Уравнения линейной регрессии поверхностей литосферы (y) по коэффициенту изрезанности (x)

Разделы литосферы	Уравнение регрессии	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
<i>Для профиля в целом</i>			
Земная поверхность	$y = 117,24 + 107,65 x$	29,42 м	19,13 %
Подошва гранитогнейсового слоя	$y = 4,76 + 13,31 x$	3,28 км	35,32 %
Подошва «диоритового» слоя	$y = 26,56 + 5,99 x$	3,08 км	10,79 %
Граница Мохоровичича	$y = 45,89 - 8,52 x$	4,84 км	11,27 %
Подошва переходного слоя	$y = 44,12 - 20,10 x$	2,33 км	4,57 %
<i>Для мегаблока КМА</i>			
Разделы литосферы	Уравнение регрессии	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
Подошва гранитогнейсового слоя	$y = 26,86 x - 0,69$	1,16 км	9,51 %
<i>Для Лосевской шовной зоны</i>			
Разделы литосферы	Уравнение регрессии	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
Подошва гранитогнейсового слоя	$y = 14,54 - 1,70 x$	2,68 км	1,96 %
Граница Мохоровичича	$y = 65,65 - 47,55 x$	1,58 км	3,68 %
Подошва переходного слоя	$y = 70,12 - 33,39 x$	0,86 км	1,59 %
<i>Для Хоперского мегаблока</i>			
Разделы литосферы	Уравнение регрессии	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
Граница Мохоровичича	$y = 38,31 + 17,7 x$	1,42 км	3,27 %

сового слоя). Для Хоперского мегаблока – только для подошвы земной коры в целом (погрешность в уравнении регрессии 3,27 %). На этом фоне резко выделяется Лосевская шовная зона, в пределах которой линейная связь коэффициента изрезанности с небольшими погрешностями в уравнениях регрессии проявляется для всех сейсмических границ, за исключением «диоритового» слоя.

Отмеченные особенности, по-видимому, могут быть обусловлены двумя причинами – геологической историей формирования основных структурных элементов и их современной геодинамической активностью, проявленной в степени изрезанности земной поверхности. Мегаблок КМА обладает наиболее древней и «легкой» (по А. П. Таркову) литосферой [7]. Это в целом подтверждено и существенно дополнено более поздними исследованиями [8–10]. В пределах мегаблока в области сейсмического профиля распространены гранитоидный тип коры со средней плотностью пород на уровне эрозионного среза 2,74–2,76 г/см³ [1]. Земная поверхность здесь обладает наиболее высокими средними абсолютными отметками. Среднее значение коэффициента изрезанности также большое с незначительной величиной среднеквадратического отклонения. Коэффициент корреляции изрезанности земной поверхности и глубины подошвы слоя верхней коры (+0,68) свидетельствует о заметной (по К. Пирсону) тесноте связи между этими параметрами [11].

Хоперский мегаблок характеризуется «тяжелой» литосферой [7–10]. В области сейсмического профиля он представлен метабазитовым типом коры со средней плотностью пород 2,82–2,86 г/см³ [1]. В сравнении с мегаблоком КМА Хоперский мегаблок является более молодым, он сформировался в раннем протерозое в результате субдукционных процессов [9]. Средняя абсолютная отметка земной поверхности имеет минимальное значение с минимальным разбросом. Степень изрезанности также имеет устойчиво минимальную величину. Оценка связи по коэффициенту корреляции (+0,60) между изрезанностью и глубиной подошвы коры относится к заметной.

Лосевская шовная зона – результат коллизии конца палеопротерозоя [9]. Она характеризуется резким преобладанием коры гранитоидного типа [1]. Средняя абсолютная отметка поверхности Земли занимает промежуточное значение между разделяемыми шовной зоной мегаблоками, но отличается большой величиной стандартного отклонения. Подобными соотношениями обладает и степень изрезанности. В рельефе фундамента зона выражена выступом с положительными абсолютными отметками. Лосевская шовная зона характеризуется большими значениями коэффициента корреляции, отмечающими высокую тесноту отрицательной связи между изрезанностью земной поверхности и подошвой коры (-0,77), изрезанностью и подошвой переходного слоя (-0,84), а для подошвы верхней коры теснота связи оценивается как весьма высокая (-0,95). Таким образом, в сравнении с разделяемыми ею мегаблоками Лосевская шовная зона об-

ладает большой изменчивостью всех рассматриваемых параметров, свидетельствующих о возможной повышенной ее геодинамической активности.

Выявленные закономерности, с одной стороны, можно попытаться объяснить резкой перестройкой структурного плана территории на неотектоническом этапе ее развития в условиях меридионального сжатия [3]. При этом реактивное растяжение в широтном направлении могло привести к ослаблению связей между блоками литосферы и к активизации изостатических движений, унаследовано и с разной интенсивностью продолжающихся в настоящее время. Наиболее отчетливо эти процессы проявлены в пределах неустойчивой Лосевской шовной зоны, которая характеризуется и повышенной концентрацией эпицентров землетрясений [4]. Для соседних с ней мегаблоков положительные значения коэффициентов корреляции могут свидетельствовать о том, что на современном этапе наблюдаются лишь остаточные явления. Основные изостатические движения происходили в среднем миоцене, когда наиболее отчетливо обозначилась граница между Среднерусским поднятием, охватывающим мегаблок КМА, а также Лосевскую шовную зону, и Окско-Донской депрессией, сформировавшейся над Хоперским мегаблоком [2, 3, 12].

С другой стороны, положительная связь изрезанности земной поверхности только с границей Конрада в пределах мегаблока КМА и только с границей Мохоровичича в пределах Хоперского мегаблока, по-видимому, может быть обусловлена различным возрастом и условиями их формирования. Мегаблок КМА, как структура, испытавшая более длительное поднятие, проявляется на всех этапах формирования осадочного чехла [3, 13].

Уравнения регрессии, полученные в результате проведенных исследований, с определенной осторожностью могли бы быть использованы для предварительного определения глубин залегания сейсмических разделов: подошвы верхней коры в пределах мегаблока КМА, поверхности Мохоровичича в пределах Хоперского мегаблока. Особое место в этом отношении занимает Лосевская шовная зона, где данные по морфометрии могли бы быть использованы для определения глубин залегания разделов Конрада, Мохоровичича, а также подошвы переходного слоя. Однако при этом необходимо учитывать то обстоятельство, что проведенные расчеты выполнены по средним значениям гипсометрии поверхностей, а эта гипсометрия характеризуется достаточно большими стандартными отклонениями от средних значений. Это в значительной степени понижает достоверность регрессионных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литосфера Воронежского кристаллического массива по геофизическим и петрофизическим данным / Н. С. Афанасьев [и др.]. Главн. ред. член-корр. РАН Н. М. Чернышов. – Воронеж: «Научная книга», 2012. – 330 с.
2. Раскатов, Г. И. Геоморфология и неотектоника территории Воронежской антеклизы / Г. И. Раскатов. – Воронеж: изд-во ВГУ, 1969. – 164 с.

3. Трегуб, А. И. Неотектоника территории Воронежского кристаллического массива // Труды НИИ геологии Воронежского государственного университета. – Вып. 9. – Воронеж: изд-во Воронеж. ун-та, 2002. – 220 с.
4. Ежова, И. Т. Степень изрезанности рельефа земной поверхности ВКМ и её соотношение с новейшей структурой и сейсмичностью / И. Т. Ежова, Л. И. Надежка, А. И. Трегуб // Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы. Мат-лы XVI международной конференции. Т. 1. – Воронеж, 2010. – С. 255 – 258.
5. Структурно-тектоническое районирование Воронежского кристаллического массива (по геологическим и геофизическим данным) / Н. М. Чернышов [и др.] // Мат-лы юбилейной научной сессии геологического факультета ВГУ. – Воронеж: изд-во Воронеж. ун-та, 1998. – С. 5–7.
6. Надежка, Л. И. Блоки земной коры Воронежского кристаллического массива и их отражение в особенностях рельефа дневной поверхности / Л. И. Надежка, И. Т. Ежова, А. И. Дубянский // Активные разломы и их значение для оценки сейсмической опасности: современное состояние проблемы: материалы 19 научно-практической конференции с международным участием. — Воронеж, 2014. — С. 257–261.
7. Тарков, А. П. Глубинное строение Воронежского массива по геофизическим данным / А. П. Тарков. – М.: Недра, 1974. – 172 с.
8. Муравина, О. М. Плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива / О. М. Муравина // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер.: Геология. – 2016. – № 1. – С. 108–114.
9. Глазнев, В. Н. Плотностное моделирование земной коры центральной части Восточно-Европейской платформы / В. Н. Глазнев, М. В. Минц, О. М. Муравина // Вестник КРАУНЦ, Сер. Науки о Земле. – 2016. – № 1. – С. 53–63.
10. Минц, М. В. Глубинное строение коры юго-востока Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным: геодинамическая эволюция в палеопротерозое и современном состоянии коры / М. В. Минц, В. Н. Глазнев, О. М. Муравина // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер.: Геология. – 2017. – № 4. – С. 5–23.
11. Кремер, Н. М. Теория вероятностей и математическая статистика / Н. М. Кремер. – М.: ЮНИТИ, 2002. – 543 с.
12. Минерагенические исследования территорий с двухъярусным строением (на примере Воронежского кристаллического массива) / В. М. Ненахов [и др.] // Главный ред. Н. В. Межеловский. – М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2007. – 284 с.
13. Трегуб, А. И. Литологические особенности разрезов палеозоя как отражение структурного каркаса Воронежского кристаллического массива / А. И. Трегуб // Вестник Воронеж. ун-та. Серия: Геология. – 2014. – № 3. – С. 74–78.

Воронежский государственный университет

Трегуб Александр Иванович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры общей геологии и геодинамики

E-mail: tregubai@yandex.ru

Тел.: 8-905-657-82-33

Надежка Людмила Ивановна, заведующая лабораторией глубинного строения, геодинамики и сейсмического мониторинга Воронежского кристаллического массива ФИЦ ЕГС РАН им. проф. А. П. Таркова

E-mail: nadezhka@geophys.vsu.ru; Тел.: 8(473) 255-78-44

Ежова Ирина Трофимовна, ведущий инженер лаборатории глубинного строения, геодинамики и сейсмического мониторинга им. проф. А. П. Таркова

E-mail: iritroe@mail.ru

Тел.: 8-951-850-61-58

Voronezh State University

Tregub A. I., Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of the General Geology and Geodynamics Department

E-mail: tregubai@yandex.ru

Tel.: 8-905-657-82-33

Nadezhka L. I., Head of the Tarkov Laboratory of deep Structure, Geodynamik and Seismic monitoring Voronezh Crystalline Massif FITS EGS RAS

E-mail: nadezhka@geophys.vsu.ru

Tel.: 8(473) 255-78-44

Ezhova I. T., Senior Researcher of a Tarkov Laboratory of deep structure, geodynamik and seismic monitoring Voronezh Crystalline Massif FITS EGS RAS

E-mail: iritroe@mail.ru

Tel.: 8-951-850-61-58