

МЕТОД И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ИНТРУЗИЙ В ДОКЕМБРИЙСКОМ ФУНДАМЕНТЕ ХОПЕРСКОГО МЕГАБЛОКА ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

В. И. Дубянский, К. Ю. Силкин

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 20 сентября 2009 г.

Аннотация. В статье описывается оригинальный метод и предварительные результаты оптического моделирования тепловых полей, связанных с мафит-ультрамафитовыми интрузиями Хоперского мегаблока ВКМ. Полученные данные по эволюции теплового поля в пространстве позволяют применить новые подходы к классификации интрузивных объектов, их объединения в магматические системы, а также выявить локализацию источников наиболее интенсивной магматической деятельности.

Ключевые слова: интрузии, геологическая карта, оптическое моделирование, тепловые поля, магматические системы.

Abstract. In article the original method and preliminary results of optical modeling of the thermal fields connected to mafite intrusions of Kholer megablock (VKM) is described. The received data on evolution of a thermal field in spatial dimensions allow to apply new approaches to classification of intrusive objects, their associations in magmatic systems, and also to reveal localization of sources of the most intensive magmatic activity.

Key words: intrusions, geological map, optical modeling, thermal fields, magmatic systems

Кристаллический фундамент Хоперского мегаблока ВКМ содержит многочисленные интрузии мафит-ультрамафитового состава. Многолетние научно-исследовательские и комплексные производственные работы на указанной территории позволили установить принадлежность интрузий к различным комплексам пород, различающихся по петрографическому составу, минералогической специализации и металлогении. С рядом из них связаны месторождения сульфидного никеля и платиноносные формации [1].

Распределение интрузий на площади Хоперского мегаблока представляет собой пеструю картину, состоящую из цепочек и скоплений интрузивных тел, имеющих в основном изометрическую форму в срезе докембрийского фундамента. Традиционно предполагается приуроченность интрузий к систе-

ме разломов и узлам их пересечения. Связь разрывной тектоники и интрузивного магматизма является наиболее очевидной и понятной с физической точки зрения, когда разломы в земной коре рассматриваются в качестве ослабленных зон, проводящих магматические расплавы из глубинных источников к поверхности. На этом основании распределение интрузивных тел на плоскости геологической карты вписывается в сетку многочисленных разрывных нарушений, установленных в рассматриваемом регионе по геофизическим данным.

По нашему мнению, распределение на площади близких по возрасту и генетически однотипных интрузий (мафит-ультрамафитового состава) содержит информацию о пространственном положении глубинных магматических очагов, проводящих каналов, областях последовательной во времени магматической активизации, структурной этажности земной коры и др.

Считается твердо установленным фактом, что активные магматические процессы, в том числе интрузивная деятельность, являются результатом возникновения мантийных плюмов, происходят в зоне контактов литосферных плит активных континентальных окраин, связаны с «горячими точками» и зонами восходящих конвекционных потоков. В результате действия каждого из перечисленных источников магматических расплавов, в общем случае, возникают специфические формы и особенности распределения магматических образований в плане, в верхней части земной коры. К двум главным особенностям относятся: линейность цепочек вулканов, островных дуг и подводных гор океанических бассейнов и практически одинаковые интервалы между магматическими объектами. Линии связи магматических объектов (ЛСМО) могут быть как прямыми, так и элементами дуг и спиралей, а также составлять эллиптические или сотовые структуры [2–4].

В случае прямолинейных ЛСМО причина их образования явным образом связывается с линейными разломами и ослабленными зонами земной коры. Криволинейные ЛРМО предположительно связаны с вихревыми процессами [4] конвекционным и волновым механизмами структурирования земной коры [2, 3]. Как бы там ни было, становится очевидной актуальность классификации наблюдаемого пространственного расположения интрузий на площади Хоперского мегаблока ВКМ по принадлежности к однотипным ЛРМО для дальнейших суждений об особенностях их генезиса и, возможно, металлогении.

С целью установления объективных закономерностей распределения интрузий на площади Хоперского мегаблока ВКМ, выявления зон магматической активности (ЗМА) на поверхности фундамента, палеомагматических очагов внутри земной коры и, возможно, мантийных плюмов применялась методика моделирования теплового поля, излучаемого интрузиями, и его распределение на поверхности и в объеме вмещающей среды. При этом предполагалось, что тепловое поле или, в общем случае, любое потенциальное поле, излучаемое каждым интрузивным телом, суммируется в окружающем пространстве. Суммарные потенциальные (тепловые) поля образуют естественные объединения излучателей (интрузий), которые объективно отображают геометрию и интенсивность реальных энергетических связей между ними.

Методика моделирования теплового поля от интрузивных массивов

Изображение каждого интрузивного тела на геологической карте (геосигнал) рассматривается как источник потенциального физического поля, который необходимо «включить» и заставить излучать в пространство тепловое поле или его модель. Описанный процесс по своей физической сути соответствует голографии, где роль голограммы выполняет геологическая карта с изображениями геосигналов, а референтным (включающим геосигналы) полем является модель теплового поля [5, 6].

Восстановление теплового поля базит-гипербазитовых интрузий Хоперского мегаблока ВКМ проводилось методом оптико-цифрового моделирования [7].

Для этой цели на плоский экран монитора ЭВМ выводилась геологическая карта интрузий (М 1 : 200 000), на которой отображались только интрузивные объекты в виде светящихся геосигналов на черном фоне. Для удобства отображения результатов на рис. 1 (и последующих иллюстрациях) демонстрируется обратное изображение этой карты (негатив).

Каждая светящаяся точка геосигнала на экране монитора представляет собой элементарный диффузионный излучатель площадью ΔS , который создает в пространстве перед экраном световое поле интенсивностью

$$\Delta J(\beta) = \frac{E^2 \Delta S}{R^2} \cos \beta, \quad (1)$$

где $R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2}$ – расстояние от произвольной точки наблюдения $A(x_0, y_0, z)$ в плоскости перед экраном до светящейся точки на экране; $\cos \beta = z / R$; E – напряженность освещающего поля.

Интенсивность суммарного светового поля от всех элементарных излучателей экрана площадью ΔS , заполняющих изображения интрузий в плоскости экрана, равна

$$J(x_0, y_0, z) = \frac{E}{2\pi} \int_S \frac{\cos \beta}{R^2} ds. \quad (2)$$

Вычисление интеграла для площади тела определенной формы (прямоугольника, полосы, круга) приводит к выражениям, совпадающим с точностью до постоянной, со стационарными тепловыми полями от плоских тел аналогичной формы. Например, для светящегося квадрата со

стороной $2a$ получим распределение интенсивности света вдоль вертикальной оси Z :

$$J(z) = \frac{\alpha E^2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{a^2}{z\sqrt{2a^2 + z^2}}. \quad (3)$$

В то же время уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \nabla^2 T = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad (4)$$

для стационарных тепловых полей (не зависящих от времени) сводится к уравнению Лапласа $\nabla^2 T = 0$, решение которого для аналогичного плоского квадратного тела с поверхностным тепловыделением Q_0 приводит к выражению вида

$$T(z) = \frac{Q_0}{4\pi\lambda} \operatorname{arctg} \frac{a^2}{z\sqrt{2a^2 + z^2}}, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды.

Сравнение уравнений (3) и (5) показывает, что световое поле (3), рассеянное изображением интрузии, является аналогом теплового поля с точностью до постоянных $C_1 = \frac{2E^2}{\pi}$ и $C_2 = \frac{Q}{4\pi\lambda}$. Интенсивность освещения J_0 диффузора (экрана дисплея) эквивалентна тепловыделению тела Q .

При условии безразмерности коэффициентов C_1 и C_2 полное подобие температурного и светового полей устанавливается при равенстве абсолютных значений коэффициентов $C_1 = C_2$. Откуда интенсивность освещающего светового поля J_0 пропорциональна исходной температуре нагретого тела T_0 :

$$J_0 = (G/\lambda) = (T_0). \quad (6)$$

При практической реализации метода соблюдение условий подобия (6) достигается экспериментальным подбором.

Предварительные результаты восстановления теплового поля интрузий

Как было отмечено выше, описанная методика моделирует процесс восстановления трехмерного потенциального поля по двумерному изображению геосигналов интрузий на карте М 1 : 200 000 (рис. 1).

В результате была получена объемная картина распределения восстановленного теплового поля (ТП) интрузий в пространстве за плоскостью геосигналов. Регистрация ТП проводилась в последовательных сечениях $Z_i = \text{const}$ в плоскостях, параллельных геограмме. Можно утверждать, что при удалении плоскости регистрации

ТП от геограммы в каждом сечении отображается картина распределения ТП интрузий с ростом времени остывания на поверхности кристаллического фундамента. С другой стороны, предполагая ограниченную по глубине изометрическую форму интрузивных тел (за исключением даек, которые в масштабе изучаемой площади не играют существенной роли), восстановленное тепловое поле в этих же сечениях моделирует суммарное ТП в объеме земной коры.

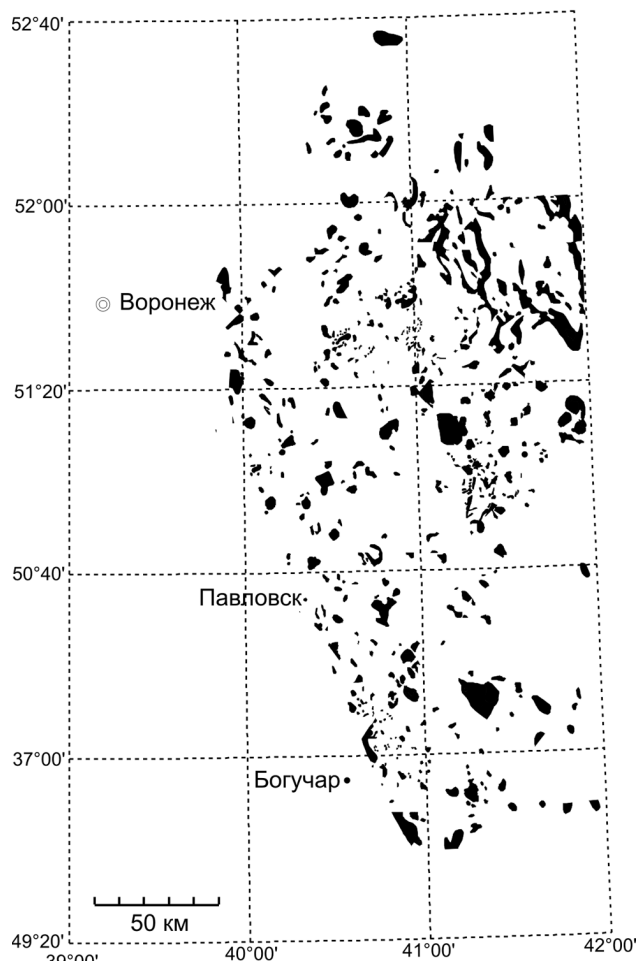


Рис. 1. Геосигналы мафит-ультрамафитовых интрузий Хоперского мегаблока ВКМ. Копия с геологической карты М 1 : 200 000 под редакцией Кононова. Геосигналы включают: ультрамафиты и мафиты Мамонского комплекса, диориты и нориты Еланского комплекса, траппы, силлы, долериты Новогольского комплекса и сиениты Смородненского комплекса

На рис. 2, 3, 4 показаны последовательные в сечении по глубине изменения теплового поля остывающих интрузий на изучаемой территории.

На геограмме геологической карты, представленной на рис. 1, показаны геосигналы всех интрузий (за исключением гранитоидов Бобровского

комплекса) в виде контуров интрузивных тел, залитых черной краской. Таким образом, всем геосигналам присвоена одинаковая исходная температура магматического расплава. Для наших целей моделирования реальные абсолютные значения этой температуры не играют роли, потому что для решения поставленной задачи достаточно восстановить некоторое потенциальное энергетическое поле, связывающее разрозненные в пространстве интрузивные тела. Это могут быть любые условные единицы, характеризующие потенциал геосигнала: температура, площадь, плотность и т. д.

На рис. 2 демонстрируется начальная стадия ТП базит-гипербазитовых интрузий. Температурное поле от быстро остывающих малых интрузивных тел создает слабый фон на изображении. Разрозненные геосигналы интрузий интегрировались потенциальным температурным полем в локальные магматические системы (ЛМС), в виде интенсивных изометрических пятен, которые в свою очередь объединяются в зоны магматической активности (ЗМА). Последние в плане могут быть аппроксимированы дугообразными, вихревыми и кольцевыми формами. Явно выраженные прямолинейные ЗМА и ЛСМО практически не просматриваются.

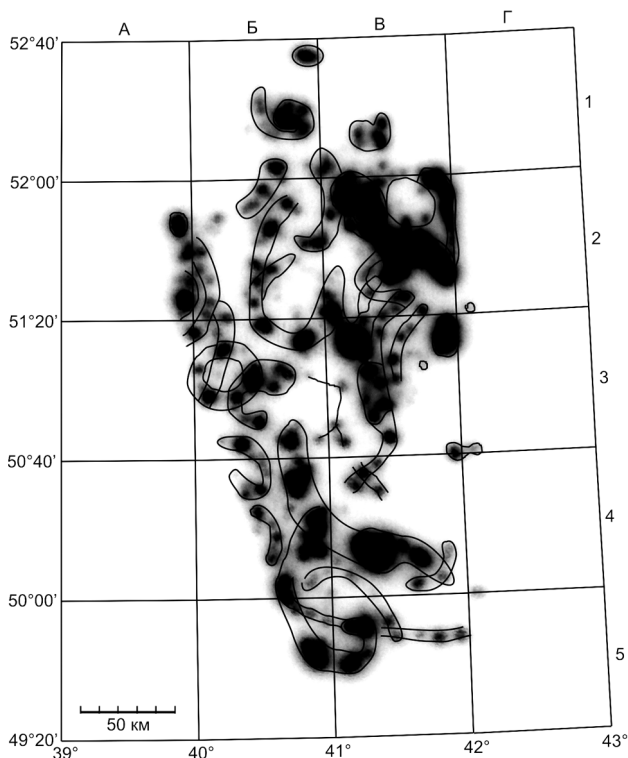


Рис. 2. Модель теплового поля интрузий в ближней зоне излучения. Затемненные области и пятна изображают тепловое поле, излучаемое интрузиями. Выделены различные формы зон магматической активности, объединяющие локальные магматические системы

Принципы объединения ЛМС в зоны магматической активности включают:

- 1 – близкие по размеру и интенсивности ЛМС;
- 2 – близкие к одинаковым расстояния между ЛМС;
- 3 – наличие объединяющего ЛМС теплового (потенциального) поля;
- 4 – наличие зон магматической пассивности (ЗМП), где нет интрузий.

В модели теплового поля на рис. 2 допустимы несколько другие варианты объединения ЛМС в ЗМА, основанные на перечисленных признаках. Однако в предложенном варианте убедительно демонстрируется возможность «автоматического» и, следовательно, достаточно объективного объединения интрузий в ЗМА способом, отличным от распределения вдоль прямолинейных разломов и узлов их пересечения.

Глубина проникновения ТП в начальной стадии распространения оценивается по ширине ореолов и составляет в среднем величины от 2–3 до 3–6 км в зависимости от размеров конкретных интрузивных тел, объединенных в ЗМА. Этой глубиной маркируется верхний этаж кристаллического фундамента, разбитый многочисленными разломами и локальными зонами проникания, создающими в совокупности своеобразный узор распределения магматических объектов на исследуемой территории. Этот вывод подтверждается измерениями скорости продольных и поперечных волн, а также результатами определения коэффициентов всестороннего сжатия и анизотропии фундамента восточной части ВКМ в эксперименте «АСТРА» [8]. В этой работе показано, что перечисленные параметры наиболее изменчивы в указанном диапазоне глубин.

На средних глубинах объединенное ТП интрузий демонстрирует развитие процесса интеграции локальных ЗМА в пределах однозначно выделяемых субмеридиональных полос повышенного энергетического фона (рис. 3, квадраты Б-1, Б-2, Б-3, Б-4). Наблюдается общее ослабление интенсивности ЗМА. В квадрате Б-3 обнаруживается сложный узел стыковки квазилинейных и спиральных магматических систем, разделенных спиралевидными областями магматической пассивности (пунктирные линии). Протяженность линейных систем в плане составляет от 50 до 300 км. На изображении ясно выделяются интенсивные пятна магматических очагов в северо-восточной и юго-восточных областях исследуемой площади.

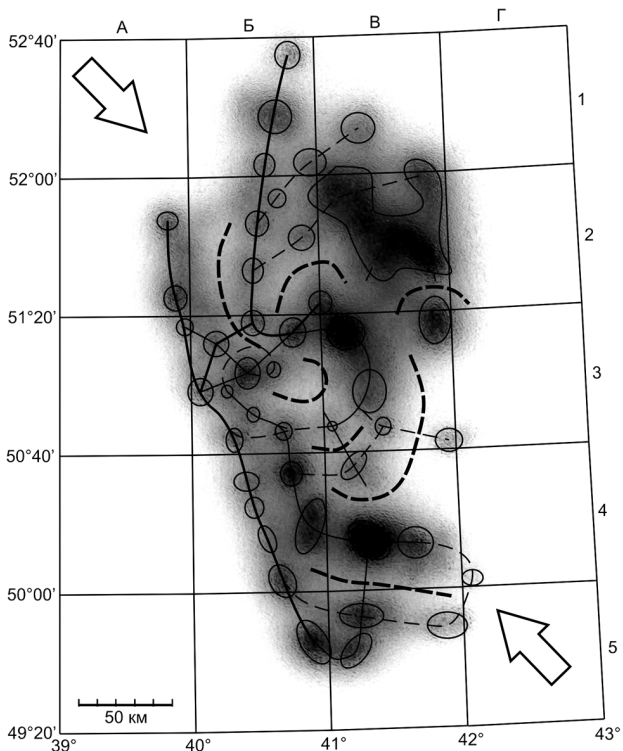


Рис. 3. Средняя зона излучения теплового поля интрузий. Выделены энергетические сгустки ЛМС и линии связи магматических объектов. Пунктиром обозначены осевые линии зон магматической пассивности (ЗМП). Стрелками указаны направления современных стрессовых напряжений (по Кашубину, 2002 г.)

Рассмотренное сечение энергетического поля отображает глубины порядка 25–35 км, т. е. находится в диапазоне залегания сейсмической «границы Конрада».

Выявленные особенности распределения модели теплового поля позволяют сделать предположение, что в указанном диапазоне глубин при активной интрузивной деятельности доставка интрузивного материала происходила по ослабленным зонам и каналам, имеющим соответствующую глубину заложения и распределение на площади, показанное на рис. 3 кружками и соединяющими их линиями. Прямолинейная форма разломов глубокого заложения подверглась искажению в пределах квадрата Б-3, где за счет разносторонних тангенциальных напряжений блоков земной коры возник крутящий момент в направлении движения часовой стрелки. В этом процессе, очевидно, принимали участие три консолидированных блока, проявленные в виде устойчивых во времени зон магматической пассивности серповидной формы. Современные напряжения сжатия имеют преобладающее направление СЗ–ЮВ с азимутом примерно 145–165° [8].

На рис. 4 показана модель дальней (глубокой) зоны объединенного ТП интрузий. Здесь наблюдается концентрация ТП в областях наибольшего прогрева, которые, возможно, маркируют положение основных магматических очагов (плюмов) Хоперского мегаблока (рис. 4). Глубина нахождения наиболее интенсивного очага в квадрате В-2, очевидно, относится к верхам мантии или подошве коры (40–45 км). Менее интенсивные плюмы в квадрате В-4 предположительно расположены выше границы М, в низах земной коры.

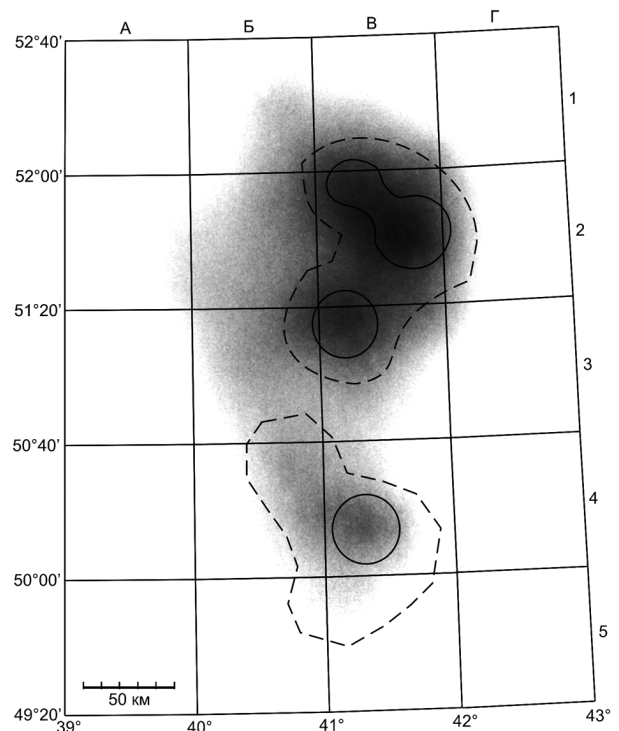


Рис. 4. Модель теплового поля интрузий в дальней зоне. Выделены области магматических очагов глубокого заложения (мантийные плюмы)

Отметим, что три основных магматических очага-плюма на рис. 4 территориально приурочены к областям распространения определенных комплексов интрузивных пород. Например, в квадрате В-2 с находящимся там интенсивным очагом связаны интрузии Новогольского комплекса, включающие рудопроявления Новогольское и Жердевское.

Глубинные магматические очаги в верхнем углу квадрата В-3 и В-4 являются первоисточниками многочисленных комплексов интрузивных пород, таких как трахибазальты панинской толщи, сиениты артюшковского, базит-гипербазиты еланского и мамонского комплексов. Причем все указанные комплексы пород распространены на всей рассматриваемой территории, к западу от указанных пер-

вичных очагов. Месторождения, рудопроявления и перспективные участки платиноидно-медно-никелевых сульфидов мамонского и еланского типов приурочены, в частности, к интрузивам в отмеченной нами «особой» зоне квадрата Б-3 и западной части квадрата Б-4 (см. рис. 3).

Заключение и выводы

Рассмотренный выше метод моделирования теплового поля интрузий позволил получить дополнительную важную информацию о тектономагматических особенностях строения территории Хоперского мегаблока ВКМ.

Оказалось возможным:

- автоматически и, следовательно, объективно выявить системные энергетические связи интрузивных образований между собой в пространстве;
- сделать вывод о наличии этажности в структурировании земной коры снизу вверх за счет резкого увеличения раздробленности от глубины границы Конрада, порядка 25–30 км;
- сделать вывод о возможном влиянии тектонических напряжений в земной коре на образование тектономагматических структур вихревого типа;
- выявить плановое положение глубинных магматических очагов-плюмов и сделать заключение об их местонахождении в разрезе земной коры;
- наметить пути исследований связей определенных комплексов интрузивных пород с конкретными глубинными источниками (плюмами) и приуроченности известных никеленосных месторождений и рудопоявлений к «аномальным» узлам концентрации зон магматической активности.

Сделанные выводы, касающиеся геологической интерпретации результатов моделирования теплового поля интрузий, во многом носят предварительный характер и требуют дальнейшего специального

рассмотрения, результаты которого планируется изложить в последующих публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышова М. Н. Дайки сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений ВКМ / М. Н. Чернышова. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 2005. – 365 с.
2. Горяинов П. М. Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований / П. М. Горяинов, Г. Ю. Иванов. – М. : ГЕОС, 2001. – 311 с.
3. Дубянский В. И. Стационарные волновые поля Земли как фактор формирования дискретных образований земной коры / В. И. Дубянский // Материалы XII Международной конференции «Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения». – Воронеж, 2006. – С. 192–194.
4. Мирлин Е. Г. Проблема вихревых движений в «твердых» оболочках Земли и их роль в геотектонике / Е. Г. Мирлин // Геотектоника, июль–август 2006 г. – 2006. – № 4. – С. 43–61.
5. Дубянский В. И. Применение принципов голографии в геологии / В. И. Дубянский // Проблемы геодинамики, сейсмичности и минерагения подвижных поясов и платформенных областей литосферы : сборник. – Екатеринбург, 1998.
6. Денисюк Ю. Н. Голография и ее перспективы / Ю. Н. Денисюк // Проблемы оптической голографии. – М. : Наука, 1981. – С. 5–12.
7. Дубянский В. И. Способ определения теплового поля от интрузивных массивов. А.С. СССР, № 1809055 А1. Описание изобретения. Бюлл. № 14. 15.04.1993 г.
8. Геотраверс «Гранит» / под ред. С. Н. Кашубина. – Екатеринбург, 2002. – 311 с.

*Воронежский государственный университет
В. И. Дубянский, кандидат физико-математических наук, доцент геологического факультета*

*Тел. 8 (4732) 208-682
E-mail: vdb20062@yandex.ru*

К. Ю. Силкин, кандидат физико-математических наук, доцент геологического факультета

*Тел. 8-909-210-05-52
E-mail: Const@geol.vsu.ru*

*Voronezh State University
V. I. Dubyanskiy, candidate of Physical and Mathematical Science, associate professor of geological department*

*Tel. 8 (4732) 208-682
E-mail: vdb20062@yandex.ru*

K. Yu. Silkin, candidate of Geological and Mineralogical Science, associate professor of geological department

*Tel. 8-909-210-05-52
E-mail: Const@geol.vsu.ru*