

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ В ТЕПЛОМ ПОЛЕ ИНТРУЗИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЛИСКИНСКОЙ ГРАНИТНОЙ ИНТРУЗИИ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА)

Ю.Н.Стрик, М.Е.Шульга

Воронежский государственный университет

Обоснована ведущая роль аномального теплового поля интрузивных массивов в процессах формирования, миграции, гидродинамического сосредоточения и замыкания образующихся геохимических потоков. Пространственное положение и морфология границ геохимических зон обусловлены топологией соответствующих интегральных критических изотерм аномального теплового поля интрузии. Тепловое поле интрузий управляет формированием и движением миграционных потоков вещества во всех направлениях далеко за пределами зон контактового метаморфизма. На основе реконструкции и анализа топологии аномальных тепловых полей, создаваемых магматическими телами, предлагается метод прогнозного металлогенического районирования и прогноза структуры геохимического поля рудных объектов, функционально связанных с магматическими системами.

Среди основных проблем петрологии магматизма и метаморфизма особое место занимает вопрос о закономерностях строения и формирования геологических объектов в околоинтрузивном пространстве. Актуальность исследования вмещающего пространства интрузий предопределяется также размещением в их пределах значительного числа месторождений полезных ископаемых.

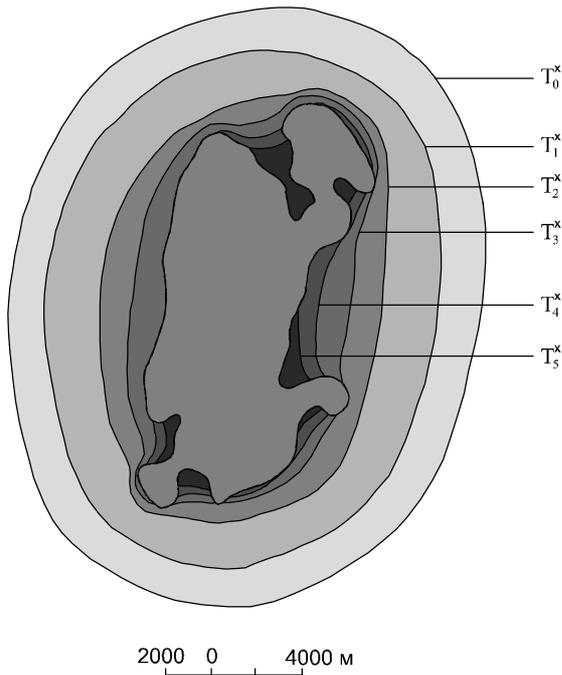
Поскольку важнейшей характеристикой любой эндогенной динамической системы является ее энергетический потенциал, то все геологические и рудообразующие процессы, функционально связанные с магматизмом и протекающие за счет энергии аномального теплового поля, могли иметь место только внутри некоторой части геологического пространства, ограниченной максимальным удалением фронта теплового воздействия интрузивного массива. В этом отношении несомненный интерес представляет метод расчета и анализа нестационарных тепловых полей, создаваемых интрузивным массивом во вмещающих породах.

Анализ структуры аномального теплового поля интрузий показал, что на фоне непрерывной изменчивости температуры в каждой точке околоинтрузивного пространства, существуют особые топологические поверхности, инвариантные в пространственных координатах и индивидуальные для каждого интрузивного тела, которые были названы интегральными изотермами [1,2]. Интегральная изотерма  $T_i^x$  представляет собой поверхность, разделяющую околоинтрузивное пространство на две части: внутреннюю, где температура аномального теплового поля превышала величину  $T_i$ ; и внешнюю, где температура аномального теплового поля ни в какой момент времени не достигала значения  $T_i$ . Выделение серии интегральных изотерм через определенный шаг, позволяет разделить всю область аномального теплового поля на систему тем-

пературных зон. Интегральная температурная зональность – это важнейшая структурная характеристика аномальных тепловых полей, создаваемых интрузивными телами. На рис. 1 в качестве примера приведена интегральная температурная зональность аномального теплового поля Лискинского гранитного массива [2].

Воздействие аномального теплового поля интрузии на вмещающие породы сопровождается целым рядом процессов, вызывающих изменения в этих породах и формирование новых геологических тел. В общем случае при условии хорошего соответствия расчетной модели реальной ситуации пространственное размещение всех новообразований должно коррелироваться со структурой интегральной температурной зональности.

Проверим данное положение на примере Лискинского гранитного массива нижнепротерозойского возраста, находящегося в юго-восточной части Воронежского кристаллического массива и выделенного в самостоятельный магматический комплекс. Интрузия имеет в целом куполовидную форму, в краевых частях поверхность контакта круто (до  $85^\circ$ ) погружается под вмещающие породы, что обеспечивает хорошую достоверность расчетов.

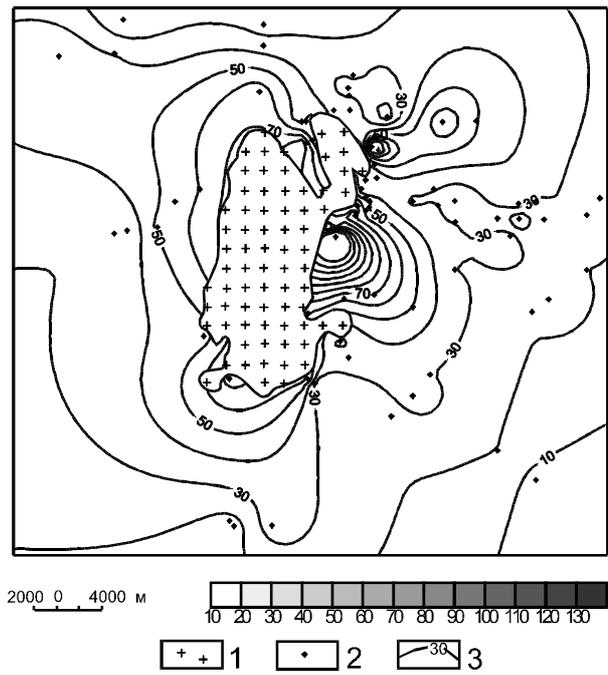


**Рис. 1. Интегральная температурная зональность аномального теплового поля гранитного массива.**

Минеральные парагенезисы вмещающих пород, образованные до внедрения Лискинской интрузии, устойчивы в довольно широком диапазоне температур и давлений. Температура образования наиболее распространенного амфибол-биотитового парагенезиса оценивается в 650-690 °С [3]. В связи с этим отчетливые признаки контактового метаморфизма проявлены только непосредственно у контакта с гранитами. На расстоянии до 5-6 м от интрузии во вмещающих гнейсах наблюдаются мелкие обособления гранофироподобного агрегата; в узкой 1-1,5 см зоне непосредственно у контакта отмечено отсутствие в гнейсах микроклина, что указывает на неустойчивость кварц-двуполевошпатовой ассоциации. Установленная область устойчивости новообразованных минеральных ассоциаций отвечает фации пироксеновых роговиков ( $T=890-750$  °С,  $P=0.2-0.05$  ГПа).

Как показали расчеты, появление непосредственно у контакта интрузии зоны контактовых изменений мощностью не более 10 м и температурой образования порядка 750 °С и выше возможно при условии, что температура вмещающих пород на момент внедрения была приблизительно равна 300 °С. За пределами этой зоны вокруг Лискинского массива установлена обширная геохимическая аномалия редких щелочных металлов, наличие аномалии подтверждено статистически. Предполагается, что аномалия связана с гидротермами, сопровождающими магматический процесс. Внутренняя структура аномалии ранее не анализировалась.

Вмещающие породы Лискинского гранитного массива опробованы в 73 буровых скважинах. Содержания в них щелочных металлов определены



**Рис. 2. Геохимическое поле лития в околоинтрузивном пространстве Лискинского гранитного массива: 1 - Лискинский массив; 2 - местоположение скважин; 3 - линии равных содержаний лития в г/т.**

методом пламенной фотометрии в лаборатории ИМГРЭ. Всего выполнено 116 анализов.

Наиболее отчетливо аномалия геохимического поля проявляется в содержаниях лития. Для выявления структуры геохимической аномалии первичный фактический материал был обработан на ЭВМ. Тремя различными методами (крайгинг-анализ, минимальной кривизны и инверсии) были построены карты с проведением изолиний равных содержаний лития (шаг 10 г/т). На рисунке 2 показана структура литиевой аномалии, полученные методом минимальной кривизны.

Сформулируем задачу следующим образом: имеется ли связь между зафиксированной геохимической аномалией и аномальным тепловым полем массива и как структура аномального геохимического поля согласуется со структурой теплового поля?

Под воздействием аномального теплового поля в околоинтрузивном пространстве возникает направленное перемещение вещества, ведущее в конечном итоге к образованию новых геологических тел, включая геохимические аномалии. Такое перемещение вещества в динамическом плане представляет собой миграционный геохимический поток. Это позволяет расчленить совокупность процессов рудогенеза на процессы мобилизации, переноса (миграции) и замыкания (рудоотложения) и выделить в пространстве соответственно области мобилизации, переноса и рудоотложения.

Область мобилизации представляет ту часть геологического пространства, в которой часть определенных компонентов переводится в потенциально мобильное состояние, формируется массив потока.

Если источником рудного вещества является магматический расплав, то границы области мобилизации в каждый момент времени определяются фазовой границей расплав - кристаллические породы. По данным В.Ю.Скрябина [3] источником редких щелочей являлся магматический расплав. В процессе кристаллизации редкие щелочи переходили преимущественно в состав флюидной фазы и выводились за пределы интрузии. В этом случае границы области мобилизации определяются фазовой границей расплав - кристаллические породы. Приближенно можно считать, что она совпадает с границей самого интрузива и не изменяются в течение времени.

Роль области переноса заключается в выносе легкоподвижных форм компонентов из области мобилизации и собирательной концентрации рассеянного рудного вещества, извлеченного из большого объема пород или магматического расплава, в локальных участках. Направление переноса вещества и его гидродинамическое сосредоточение контролируется топологией теплового поля, а нагревание и тепловое расширение растворов обуславливает их обязательную миграцию в направлении переноса тепла (по нормали к поверхности изотерм). Расчеты показали, что при сложной морфологии и большом количестве источников тепла морфология границ зоны мобилизации очень сложная и векторы теплопереноса ориентированы в разных направлениях.

Общее замыкание миграционного потока происходит на термальном геохимическом барьере, пространственное положение которого контролируется интегральной границей критической изотермы кристаллизации соответствующего компонента. Аномальное тепловое поле, в общем, контролирует пространственное положение области замыкания (рудотложения), так как для каждого типа полезных ископаемых существует определенная критическая температура или узкий температурный диапазон, при котором из раствора осаждаются основная масса рудных компонентов. Поскольку температура в пределах аномального теплового поля постоянно меняется, то критическая изотерма, играющая роль подвижного геохимического барьера, постоянно мигрирует в пространственных координатах.

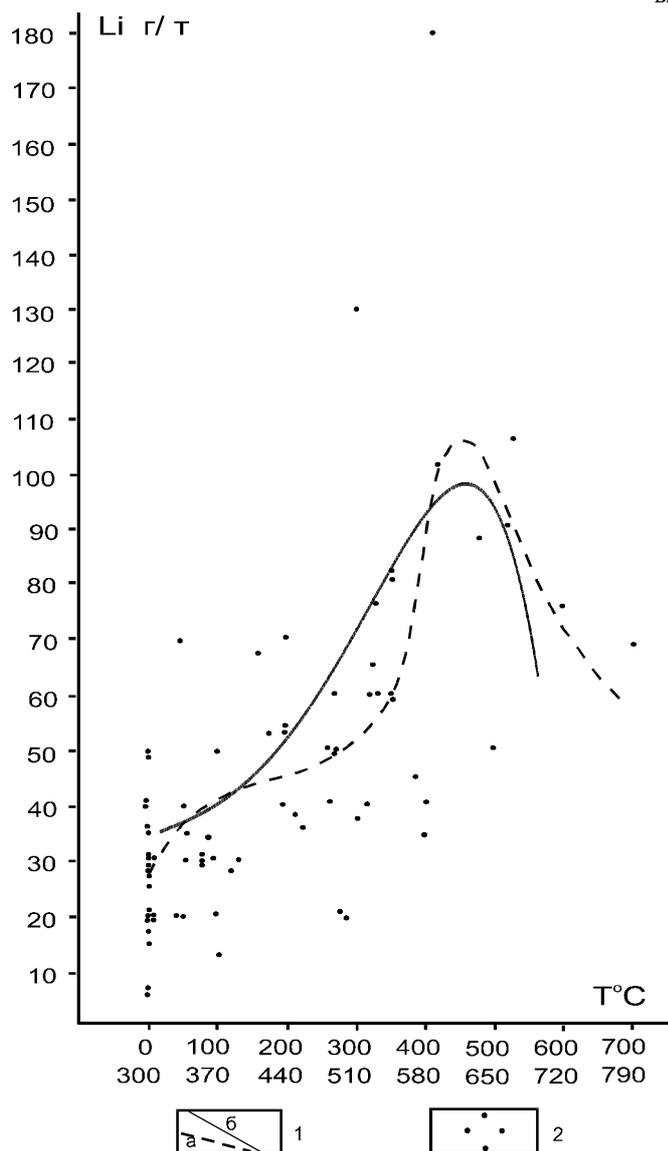
Для исследования гипотезы о зависимости структуры геохимической аномалии от структуры аномального теплового поля интрузии карта геохимического поля лития была совмещена со схемой интегральной температурной зональности теплового поля Лискинского массива (см. рис. 1,2). Такая операция позволяет для любой точки окружающего массив пространства получить две характеристики: содержание компонента и интегральную температуру (максимальное значение аномальной температуры в этой точке). Выбор точек и формирование массивов исходных данных осуществлялось двумя способами с целью повышения достоверности результатов. В первом случае в качестве точек использо-

валось местоположение буровых скважин, где содержание компонентов определены аналитически, а значения температуры определялись методом интерполяции по рисунку 1 (кривая а, рис.3). Во втором случае были использованы местоположения узлов расчетной сетки аномального теплового поля, в которых значения температур получены непосредственно расчетным путем, а соответствующие содержания лития определялись методом интерполяции на основе рисунка 2. Кривая зависимости (кривая б, рис.3) представляет уравнение регрессии 6-го порядка, полученное методом наименьших квадратов. Для удобства шкала температур сделана в двух вариантах, отвечающих значениям аномального теплового поля и абсолютным значениям температур при стационарной составляющей 300 °С.

Формы кривых достаточно сходны. Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

1. Содержания лития во вмещающих породах Лискинского массива в целом зависят от интегральной температурной структуры аномального теплового поля.

В строении литиевой аномалии статистически отчетливо выделяются три области. Внутренняя, примыкающая непосредственно к интрузии, расположена в температурной зоне 720-790 °С мощностью первые сотни метров максимум; содержания лития в среднем по зоне порядка 45-60 г/т, что в 1,5-2 раза превышает средние фоновые. Средняя область расположена в температурной зоне 510-720 °С, характеризуется отчетливо выраженным максимумом содержания лития до 90-100 г/т; мощность зоны достигает 1,5 км. Краевая область расположена на периферии в температурной зоне 370-510 °С; мощность зоны до 4-5 км, содержание лития постепенно снижается по мере удаления от интрузии от 45-50 г/т до фоновых значений (30 г/т).



**Рис. 3. Графики зависимости содержания лития во вмещающих породах Лискинского гранитного массива от температуры аномального теплового поля: 1 - линии тренда, отображающие зависимость содержания лития от температуры: а) получена методом групповых средних по значениям параметров, определенных в точках местоположения буровых скважин, б) получена методом наименьших квадратов (уравнение регрессии 6-го порядка) по регулярной сети проинтерполированных данных; 2 - значения параметров по регулярной сети проинтерполированных данных.**

Как указывалось выше, граница интрузивного массива условно считается границей области мобилизации. В этом случае внутренняя область литиевой аномалии по своим характеристикам соответствует зоне миграции, а средняя - зоне замыкания литиевого миграционного потока. Краевая область аномалии, по всей вероятности, является также обязательным компонентом структуры геохимического поля, если в области замыкания отсутствуют тектонические элементы и геохимические барьеры, препятствующие дальнейшей миграции растворов. В этом случае под действием многих факторов,

влияющих на предел растворимости химических соединений в гидротермальных растворах, и флуктуации аномального теплового поля формируется своеобразный шлейф зоны осаждения. Характер внешней границы области замыкания свидетельствует о том, что температура аномального теплового поля является ведущим фактором осаждения лития. Пространственное положение этой границы достаточно жестко контролируется линией критической изотермы  $\sim 510^{\circ}\text{C}$ . Внутренняя граница этой зоны фиксируется лишь несколькими опорными точками, поэтому достоверность ее выделения невысокая. Дополнительным аргументом, указывающим на существование зоны миграции, являются данные по скважине К-915, в которой вмещающие породы опробованы, начиная от контакта с интрузией и на удаление до 250 м; содержание лития систематически увеличивается по мере удаления от контакта.

Таким образом, гипотеза о связи структуры геохимического поля со структурой аномального теплового поля подтверждается фактическим материалом и обоснована. Пространственное положение и морфология границ геохимических зон обусловлены топологией соответствующих интегральных критических изотерм аномального теплового поля интрузии, то есть тепловое поле интрузий управляет формированием и движением миграционных потоков вещества во всех направлениях далеко за пределами зон контактового метаморфизма.

К сожалению, каких-либо данных о достаточно полном исследовании строения геохимических полей в околоинтрузивном пространстве и их связи с тепловым полем интрузий и строением вмещающей среды нет. Имеются только отдельные данные о существенном перераспределении содержаний элементов в экзоконтактовых ореолах гранитных интрузий. А.И.Забияка и соавт. [4] установили вынос примерно 70 % золота из зоны роговиков мощностью около 700 м и его концентрацию за пределами этой зоны в полосе мощностью свыше 4,5 км. К.В.Захаревич и соавт. [5] провели экспериментальное моделирование гидротермального минералообразования, а также миграции и осаждения Au, Ag, As, Pb и ряда других элементов в термоградиентных условиях (диапазон температур от 600 до  $200^{\circ}\text{C}$ ). Независимо от состава гидротермальной среды установлен вынос из высокотемпературной зоны ( $500-600^{\circ}\text{C}$ ) Au, Ag, As, Pb и их раздельное концентрирование в средне- и низкотемпературных зонах. Показано, что Au, осаждение которого начинается в интервале  $400-500^{\circ}\text{C}$ , не связано в этих условиях с Ag, As, Pb. В зоне  $300-400^{\circ}\text{C}$  характерны высокая положительная корреляция Au, Ag, As и Pb и их осаждение. В диапазоне  $200-300^{\circ}\text{C}$  фиксируется ослабление связей между всеми

этими компонентами при преимущественном концентрировании здесь Ag. Подобное поведение элементов отмечено в реальных условиях в зоне термального ореола гранитоидной интрузии в Кызылкумах [4] и гидротермальной системе Донбасса [6].

Приведенные данные подтверждают достоверность модели формирования геохимического поля в тепловом поле интрузий и позволяют использовать полученные результаты для прогнозирования структуры геохимического поля подобных объектов.

Авторы выражают свою благодарность В.Ю.Скрябину за предоставленные аналитические материалы по Лискинскому гранитному массиву.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Стрик Ю.Н., Ненахов В.М. К проблеме прогноза металлогенических объектов, связанных с гранитоидным магматизмом (на примере Туркестано-Алая) // Изв. вузов. Геол. и разведка. -1994. -№ 6. -С. 36 – 42.
2. Шульга М.Е. Исследование эволюции теплового поля интрузивного массива // Геология и геоэкология Фенноскандии, Северо-Запада и Центра России: Матер. XI конфер., посвященной памяти К.О.Кратца. –Петрозаводск, 2000. -С.193-196.
3. Скрябин В.Ю. Природа структурно-вещественной неоднородности гипабиссальных интрузий (на примере Лискинского массива): Дисс. ...канд геол.-мин. н. - Воронеж, 1988. -258с.
4. Геохимическая модель распределения золота в экзо-контактовом ореоле гранитоидного массива / А.И.Забяка, В.А.Верниковский, И.Д.Забяка и др. // Докл. АН СССР. - 1990. - Т. 133, №4. - С. 959-962.
5. Захаревич К.В., Захаревич А.А., Волченкова Т.Б. Магматогенно-гидротермальная система в Кызылкумах // Сов. геол. - 1991. - №4. - С. 22-29.
6. Клитченко М.А., Суярко В.Г. Построение геолого-генетических моделей рудных месторождений на примере Никитовского рудного поля (Донбасс) // Геол. рудн. месторожд. -1989. - № 5. - С. 57-67.