

---

**ИНТРУЗИВНЫЙ КОМПЛЕКС СЕДБЕРИ, КАНАДА:  
ПРОИСХОЖДЕНИЕ ИЗ ОДНОГО ИЛИ ДВУХ СЛОЕВ МАГМЫ?**

**Лавренчук А.В. \*, Латыпов Р.М.\*\***

*\*Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия  
e-mail: alavr@uiggm.nsc.ru*

*\*\*Департамент наук о Земле, Университет г. Оулу, Финляндия  
e-mail: rais.latypov@oulu.fi*

**THE SUDBURY IGNEOUS COMPLEX, CANADA:  
AN ORIGIN FROM ONE OR TWO MELT SHEETS?**

**Lavrenchuk A.V.\*, Latypov R.M.\*\***

*\*Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia  
e-mail: alavr@uiggm.nsc.ru*

*\*\*Department of Geosciences, Oulu University, Oulu, Finland  
e-mail: rais.latypov@oulu.fi*

The origin of the world-known Sudbury Igneous Complex (SIC) has always been controversial despite numerous studies. Even the most essential aspects of the SIC still remain uncertain. One of such aspects is whether the SIC was produced from a single melt sheet of granodioritic composition [4, 8, 9] or from two independent intrusions of basaltic and granitic compositions [1, 2, 7, 10]. There are strong arguments on both sides of this controversy. We have undertaken a testing of these two contrasting hypotheses by computer modelling using a software program PLUTON that we have developed to simulate a variety of igneous processes operating in crustal magma chambers. Results of our modelling indicate that crystallization sequence, mineral compositional trends and geochemical variations of the SIC can be adequately reproduced by fractional crystallization of a single intrusion of granodioritic magma. This provides a strong support to an idea that the Sudbury Igneous Complex likely represents a simple intrusion produced from a single differentiated melt sheet [4, 8, 9].

Раннепротерозойский интрузивный комплекс Седбери (1.85 млрд. лет) является составной частью структуры Седбери, расположенной в юго-восточной части Канадского щита и рассматриваемой большинством исследователей как импактит – продукт плавления коровых пород при ударе о Землю крупного метеорита [3]. Комплекс залегает в основном на брекчированных породах архейского гранитного фундамента и частично протерозойских вулканогенно-осадочных пород и перекрывается протерозойскими обломочными породами, песчаниками и сланцами. С этим комплексом тесно связано крупнейшее в мире месторождение магматических сульфидов (> 1.5 млн. тонн), содержащих существенную долю мировых запасов Ni, Cu and элементов платиновой группы (ЭПГ) [6]. Последнее придает большое значение пониманию генезиса этого комплекса для успешного развития будущих поисковых, разведочных и эксплуатационных работ.

Интрузивный комплекс Седбери представляет собой овальное тело размером приблизительно 27 на 60 км и мощностью около 2.5 км, сложенное от подошвы к кровле пятью главными породными единицами: (1) субслоем (20-100 м), представленный в основном габброноритами, с признаками краевой реверсии; (2) мафические нориты (100 м), сложенные в основном кумулюсными ортопироксеном и хромитом с подчиненным количеством интеркумулюсных плагиоклаза и клинопироксена; (3) фельзические нориты (750 м), сложенные кумулюсными ортопироксеном и плагиоклазом с увеличивающейся вверх по разрезу долей интеркумулюсного клинопироксена; (4) кварцевые габбро (300 м), характеризующиеся исчезновением ортопироксена и последовательным появлением нескольких кумулюсных фаз – клинопироксена, амфибола, магнетита, апатита, и ильменита; (5) гранофиры (1250 м), которые обнаруживают появление кумулюсных кварца и калиевого полевого шпата. Наиболее характерными чертами, отличающими интрузивный комплекс Седбери от других расслоенных мафических интрузивов мира являются: (а) общий средний состав комплекса, отвечающий гранодиориту с содержанием SiO<sub>2</sub> около 65 мас. %, (б) вы-

сокое первоначальное содержание воды в исходном расплаве, обеспечившие появление магматического амфибола, (с) коровые изотопные характеристики (Os, Pb, Sr and Nd) и (д) необычайно высокая доля гранофиров, занимающих более половины общей мощности комплекса.

Несмотря на то, что комплекс интенсивно изучался в течении всего прошлого века, целый ряд ключевых вопросов его происхождения все еще остается дискуссионным. Одним из таких вопросов является механизм внутрикамерного дифференциации этого интрузивного комплекса. Одна группа исследователей отстаивает точку зрения о том, что вся совокупность пород комплекса была сформирована путем фракционной кристаллизации единого слоя магмы гранодиоритового состава [4, 8, 9]. Другая группа исследователей утверждает, что в его образовании принимали участие две совершенно самостоятельные магмы. По их мнению, нижняя мафитовая часть, сложенная норитами и кварцевыми габбро, образована из магмы базальтового состава предположительно мантийного происхождения, тогда как верхняя гранофировая часть сформирована из гранитного расплава предположительно корового происхождения [1, 2, 7, 10]. Следует отметить, что одним из весомых аргументов в пользу последней точки зрения рассматриваются результаты недавнего численного моделирования, показавшие невозможность получения мощного гранофирового слоя при внутрикамерной кристаллизации исходного расплава гранодиоритового состава [1].

Для поиска аргументов в пользу той или иной гипотезы мы провели численное моделирование динамики внутрикамерной дифференциации интрузивного комплекса Седбери в закрытых условиях в рамках конвекционно-кумуляционной гипотезы. Одним из основных параметров, требуемых для численного эксперимента, является состав исходной магмы. В качестве такового нами принят интегральный состав сводного разреза, построенного по двум скважинам [3, 4, 8], который соответствует составу гранодиорита (мас. %):  $\text{SiO}_2$  – 65.44,  $\text{TiO}_2$  – 0.84,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 13.9,  $\text{FeO}^*$  – 6.49,  $\text{MgO}$  – 2.61,  $\text{CaO}$  – 3.71,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 3.57,  $\text{K}_2\text{O}$  – 2.75,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0.19,  $\text{H}_2\text{O}$  – 0.49. Ликвидусная температура такого расплава, при которой в качестве первой кристаллизующейся фазы появляется ортопироксен, соответствует  $1095^\circ\text{C}$ . Скорости осаждения минералов были приняты

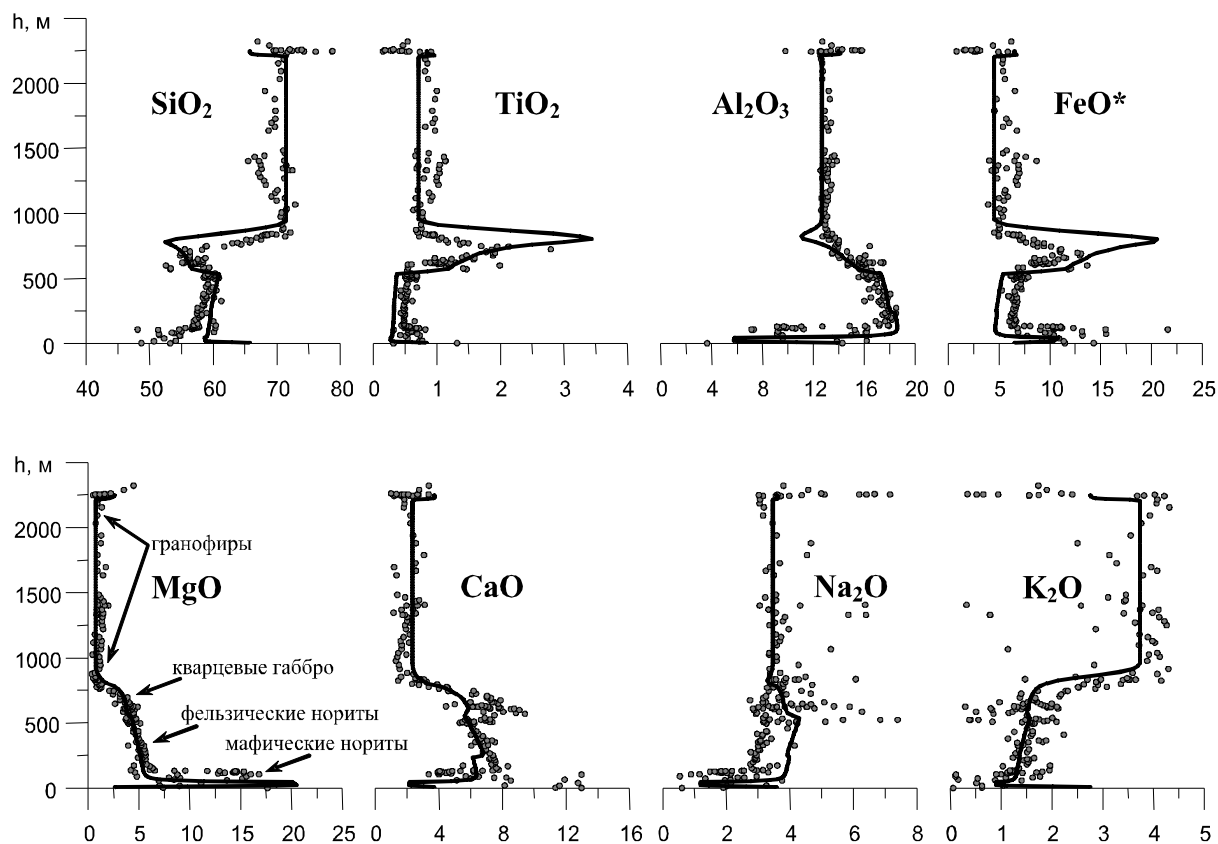


Рис. 1. Вариации состава реальных (точки) и модельных (линии) пород по разрезу интрузивного комплекса Седбери.

Составы приведены в мас. %.

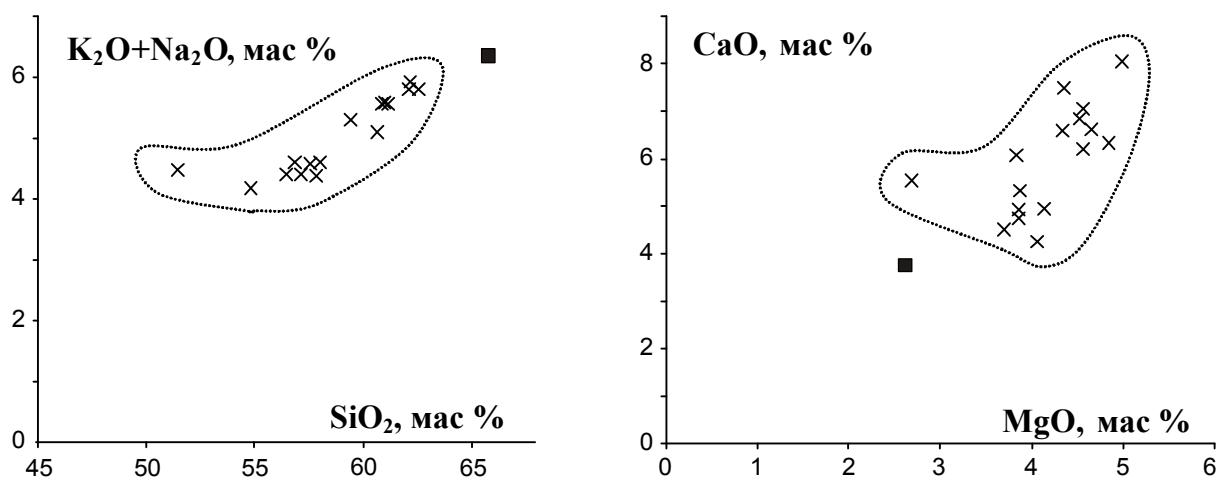


Рис. 2. Вариационные диаграммы, иллюстрирующие интегральный состав пород интрузивного комплекса Седбери (квадрат) и кварцевых диоритов офсетных даек (крестики).

в 100 раз выше стоксовских, что обеспечивает содержание взвешенных минеральных фаз в конвектирующем расплаве не более 0.05 об. % вплоть до выхода на ликвидус кварца. Фактически, такая модель соответствует модели *in situ* кристаллизации. С учетом близкповерхностного положения интрузии давление было принято 0.5 кбар, активность кислорода в 100 раз выше буфера QFM. Пористость всех кумулятивных пород по моделируемому разрезу принята равным 40 об. %.

Полученная модель качественно воспроизводит фазовый и химический состав пород разреза, последовательность кристаллизации минералов и мощности слоев разного парагенезиса (рис. 1). Начинается модельный разрез кумулятивными ортопироксенитами, которые при посткумуляционной докристаллизации интеркумуляционной жидкости переходят в мафические нориты. Появление кумулятивного плагиоклаза (An 55%) (фельзитические нориты) выражено резким снижением концентрации MgO и увеличением  $Al_2O_3$ , CaO и  $Na_2O$ , как основных компонентов плагиоклаза. При появлении кумулятивного клинопироксена в модельных породах (кварцевые габбро) наблюдается увеличение содержания CaO (до 6 мас. %), однако его содержание не достигает 9-10 мас. %, наблюдаемых в породах реального разреза. Это может объясняться тем, что близодновременно с клинопироксеном в реальных породах появляется кумулятивный амфибол, который пока еще не моделируется имеющимся алгоритмом. Выход на ликвидус магнетита отмечен резкими положительными пиками в содержании общего FeO и  $TiO_2$  в породах. Последующее же появление кварца и калишпата отмечается увеличением концентраций  $K_2O$  и  $SiO_2$  в модельных породах (гранофиры).

Таким образом, в отличие от предыдущих попыток моделирования [1] нам удалось воспроизвести соотношение объемов гранофириров и мафитов. Следует отметить один любопытный факт: рассчитанный интегральный состав разреза не соответствует составу кварцевых диоритов офсетных даек, отличаясь от них повышенным содержанием  $SiO_2$  и щелочей, а также низкой концентрацией MgO и CaO (рис. 2). Полевые геологические наблюдения, указывающие на непосредственную связь офсетных даек с породами нижнего субслоя комплекса, а также близость состава даек и субслоя позволили сделать вывод о том, что дайки являются апофизами интрузии, сформированными в момент внедрения расплава или плавления пород при ударе метеорита [5]. В этом случае состав пород даек должен отвечать составу исходной магмы. Значительные различия в составе кварцевых диоритов даек и интегрального состава разреза требуют поэтому объяснения. С нашей точки зрения, наиболее логичным является предположение о том, что интегральный состав не отвечает составу исходной магмы, так как разрез, построенный по имеющимся скважинам, не является представительным.

В пользу данного предположения свидетельствует тот факт, что пробуренные скважины расположены по периферии интрузивного комплекса. Данные же о составе пород по разрезу центральной части комплекса в литературе отсутствуют. При лополитообразной форме интрузии, которая предполагается для Седбери, максимальная мощность нижних горизонтов будет именно в центральной части. По этой причине периферийные скважины недооценивают нижние горизон-

ты массива, что приводит к более кислому средневзвешенному составу разрезов, построенных по этим скважинам относительно среднего состава всей интрузии. В этом случае возникает вопрос – можно ли получить весь набор пород комплекса при кристаллизации магмы, отвечающей составу кварцевых диоритов офсетных даек? Для проверки данной гипотезы была построена численная модель динамики становления магмы, отвечающей составу кварцевых диоритов. Модель воспроизводит весь набор пород и последовательность кристаллизации минералов комплекса Седбери, однако мощность гранофирового слоя модели резко сокращена по сравнению с мощностью этого слоя, наблюдаемой в скважинах. Такая модель не противоречит гипотезе о переоценке мощности гранофирового слоя и подтверждает возможность формирования всего разреза интрузии из одной порции магмы диоритового состава.

В результате проведенных исследований можно сделать два основных вывода. Во-первых, для образования интрузивного комплекса Седбери нет необходимости привлекать модель многоактного внедрения, так как весь разрез комплекса можно вполне объяснить внутрикамерным фракционированием единой порции расплава среднего состава. Во-вторых, вопрос о химическом, а значит и фазовом, составе исходной магмы интрузивного комплекса Седбери на сегодняшний день остается открытым. Решение этого вопроса требует дополнительной информации о составе пород в разрезе центральной части интрузивного комплекса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ariskin A.A., Deutsch A., Ostermann M. Sudbury Igneous Complex: simulating phase equilibria and in situ differentiation for two proposed parental magmas // Geol. Society of America. Spec. Paper. 1999. V. 339. P. 373-387.
2. Chai G., Eckstrand O.R. Origin of the Sudbury Igneous Complex, Ontario – differentiated of two separate magma // Geological Survey of Canada Paper. 1993. V. 93-1E. P. 219-230.
3. Deutsch A., Grieve R.A.F., Avermann M., Bischoff L., Brockmeyer P., Buhl D., Lakomy R., Müller-Mohr V., Ostermann M., Stuffer D. The Sudbury Structure (Ontario, Canada): a tectonically deformed multi-ring impact basin // Geologische Rundschau. 1995. V. 84. P. 697-709.
4. Lightfoot P.C., Keays R.R., Doherty W. Chemical evolution and origin of nickel sulfide mineralization in the Sudbury igneous complex, Ontario, Canada // Economic Geology. 2001. V. 96. P. 1855-1875.
5. Lightfoot P.C., Keays R.R., Morrison G.G., Bite A., Farrell K.P. Geochemical Relationships in the Sudbury Igneous Complex: Origin of Main Mass and Offset Dikes // Economic Geology. 1997. V. 92. P. 289-307.
6. Naldrett A.J. Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration. Springer, 2004. 727 pp.
7. Premister T.C. A review of the problems of the Sudbury Irruptive // Journal of Geology. 1937. V. 45. P. 1-47.
8. Therriault A.M., Fowler A.D., Grieve A.F. The Sudbury Igneous Complex: a differentiated impact melt sheet // Economic Geology. 2002. V. 97. P. 1521-1540.
9. Thode H.G., Dunford H.B., Shima M. Sulfur isotope abundances in rocks of the Sudbury district and their geological significance // Economic Geology. 1962. V. 57. P. 565-578.
10. Thomson J.E. A discussion of Sudbury geology and sulphide deposits // Ontario Department of Mines Miscellaneous Paper. 1969. V. 30. 22 pp.

### **РОЛЬ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛЮМОВ В ОБРАЗОВАНИИ ПЛАТИНОМЕТАЛЬНЫХ МИНЕРАЛИЗАЦИЙ**

**Лазаренков В.Г., Таловина И.В., Воронцова Н.И.**

*Санкт-Петербургский государственный горный институт, Санкт-Петербург, Россия*

### **ROLE OF THERMOCHEMICAL PLUME IN GENESIS OF PGE-MINERALIZATION**

**Lazarenkov V.G., Talovina I.V., Vorontsova N.I.**

*Saint-Petersburg State Mining Institute, Saint-Petersburg, Russia*

Thermochemical plumes can play important role in formation of platinum metal mineralization. There are some geological and geochemical backgrounds for that, such as: a – first-rate platinum met-