

## **Направленная кристаллизация не является механизмом магматической эволюции**

Е. В. Коптев-Дворников, А. А. Ярошевский, В. А. Вейс  
Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Москва  
[ekoptev@geol.msu.ru](mailto:ekoptev@geol.msu.ru)

*Ключевые слова:* магматизм, дифференциация, моделирование

**Ссылка:** Коптев-Дворников, Е. В., А. А. Ярошевский, В. А. Вейс (2011), Направленная кристаллизация не является механизмом магматической эволюции, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6040, doi:10.2205/2011NZ000170.

Обсуждаемые сегодня гипотетические механизмы магматической эволюции сводятся к альтернативе – либо направленная кристаллизация, либо фазовая конвекция. Главные отличия между этими механизмами состоят в следующем. В гипотезах направленной кристаллизации отрицается гомогенное зарождение твёрдой фазы, кристаллизация идёт на поверхности кумулуса в результате потери тепла через кровлю, теплоперенос осуществляется за счёт тепловой конвекции гомогенного расплава в пространстве от верхнего фронта затвердевания до поверхности кумулуса. Конвекционно-кумуляционный вариант фазовой конвекции реализован в численной системной модели КОМАГМАТ [Френкель и др., 1988]. Гомогенная нуклеация имеет место в прикровельной градиентной зоне, образовавшиеся здесь кристаллы оседают через конвектирующую магму и накапливаются в кумулусе. Конвекция носит хаотический струйный характер, её причиной является инверсия плотности, возникающая за счёт более высокой концентрации твёрдой фазы в прикровельных суспензионных слоях.

Традиционно концепции магматической эволюции тестируются на материале ультрамафит-мафитовых расслоенных комплексов – последних по глубинности объектов, доступных для непосредственного наблюдения. КОМАГМАТ позволяет количественно воспроизвести распределения макро- и микрокомпонентов в разрезах как дифференцированных долеритовых силлов, так и мафит-ультрамафитовых расслоенных интрузивов (рис.1).

Ещё в 1988 году М. Я. Френкель [Френкель и др., 1988] пришёл к выводу, что «все варианты модели направленной кристаллизации, игнорирующие гомогенное зарождение минералов и транспорт компонентов по механизму фазовой конвекции, приходят в противоречие с качественными признаками строения трапповых интрузивов и долеритовых силлов».

Этот вывод основан на анализе до сих пор весьма дискуссионных процессов тепломассопереноса при направленной кристаллизации. Анализ этот был выполнен М.Я.Френкелем на физико-математическом уровне трудном для большинства практикующих петрологов. К тому же он относился к долеритовым силлам, т.е. к дифференцированным интрузивам, так сказать, «второго» сорта. Так или иначе, но этот результат был практически проигнорирован большинством специалистов по расслоенным интрузивам. С тех пор мы изучили строение целого ряда ультрамафит-мафитовых расслоенных интрузивов, и на их материале верифицировали конвекционно-кумуляционную модель.

А в анализе направленной кристаллизации мы решили пойти другим путём, так сказать, от противного. Допустим, что направленная кристаллизация действительно реализуется. Каковы должны быть закономерности строения сформировавшихся таким образом интрузивов, вытекающие из не подвергаемых сомнениям законов кристаллизации силикатных систем? Но как это сделать? Ведь, несмотря на большую популярность гипотезы направленной кристаллизации, её количественная системная модель до сих пор не разработана. Однако мы сообразили, что вариант КОМАГМАТ'а с практически мгновенным помещением кристаллизующейся твёрдой фазы на поверхность кумулуса и почти стерильным в отношении кристаллов конвектирующим расплавом, позволяет количественно эмулировать результаты формирования интрузивов по механизму направленной кристаллизации. И действительно, расплав в магматической камере в каждый момент времени оказывается гомогенным и однородным по составу, а твёрдая фаза, эквивалентная потерянной через кровлю теплу, выделяется на поверхности растущего кумулуса.

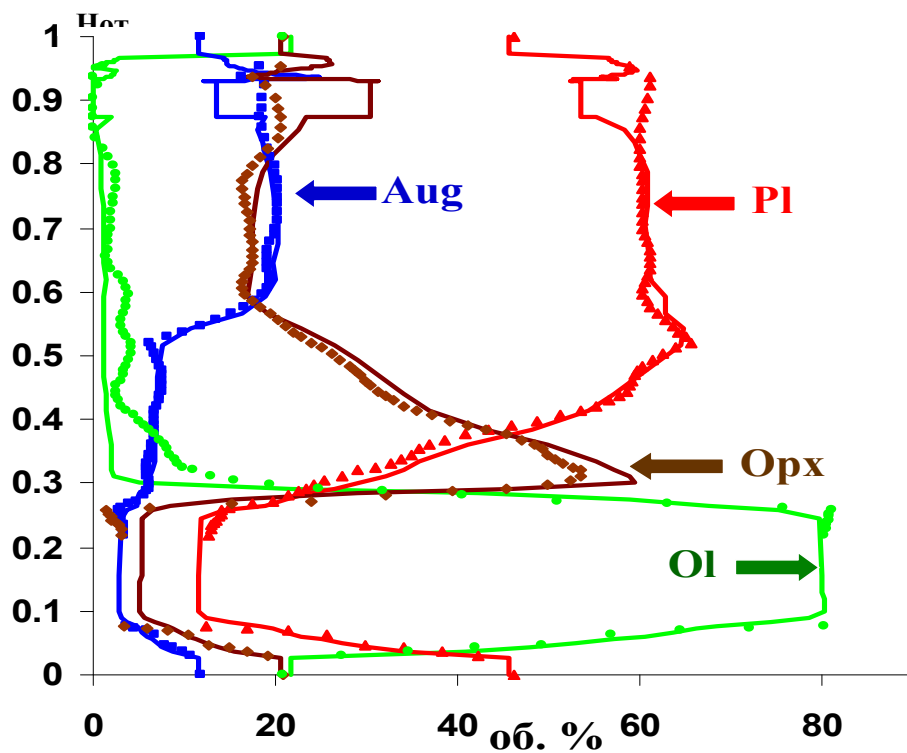


Рис. 1. Распределение минералов в разрезах Кивакского интрузива (точки) и модельного тела – результата конвекционно-кумуляционного процесса (линии).

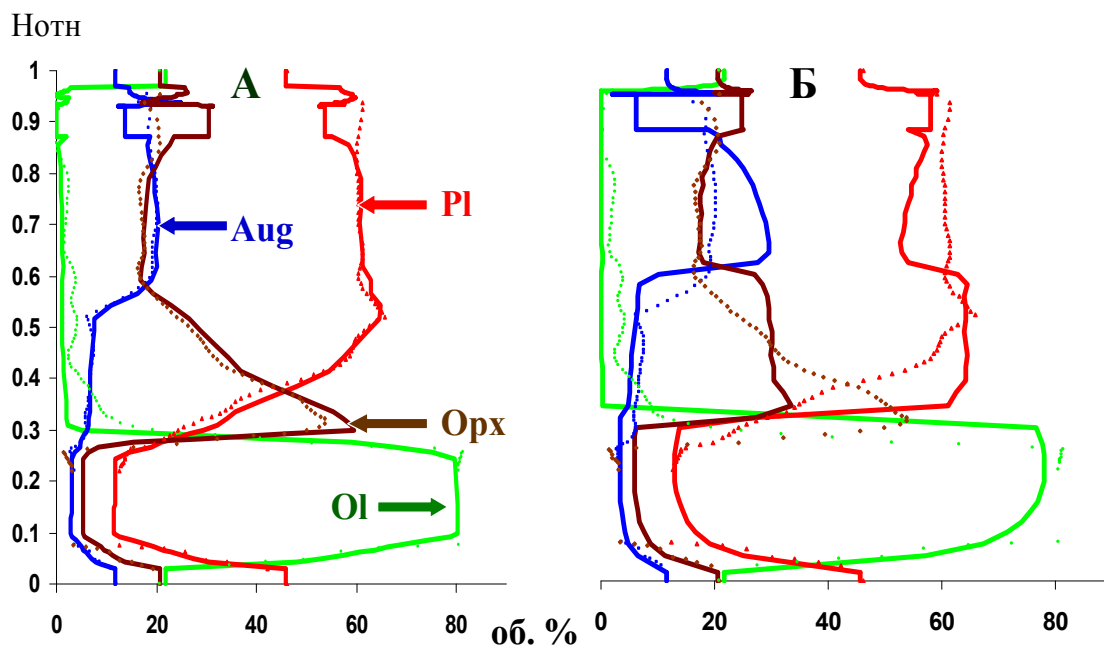


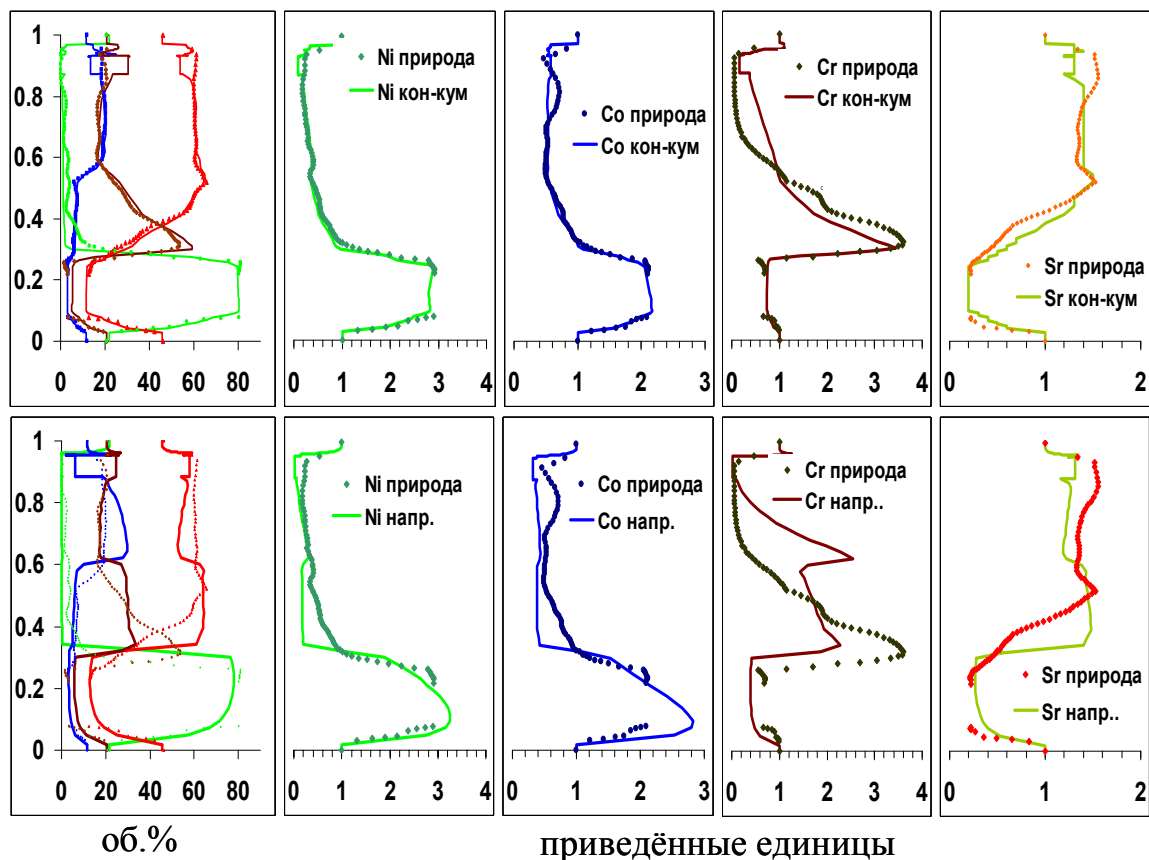
Рис. 2. Распределение минералов в разрезах модельных интрузивов результатов процессов: А – конвекционно-кумуляционного; Б – направленной кристаллизации. Точки – природные распределения.

Реализация этого замысла для Кивакского интрузива продемонстрировала радикальные количественные отличия модельного тела, сформировавшегося путём направленной кристаллизации (рис. 2Б) от конвекционно-кумуляционного модельного интрузива (рис. 2А) и,

следовательно, от реального прототипа. Для первого из них характерны резкие границы между зонами с различными кумулятивными парагенезисами, а составы пород в этих зонах существенно отличаются от природных и конвекционно-кумуляционных.

Фундаментальной причиной этих отличий является то, что направленная кристаллизация является механизмом фракционирования кристаллов от расплава, но не механизмом разделения минералов. Иными словами, на растущей снизу вверх поверхности кристаллизации соотношение минералов должно отвечать пропорциям кристаллизации на котектиках, чего в природе в общем случае не наблюдается. Именно пропорциям кристаллизации на ортопироксен-плаггиоклазовой и ортопироксен-плаггиоклаз-авгитовой котектиках отвечают соотношения минералов на соответствующих участках разреза на рис. 2Б.

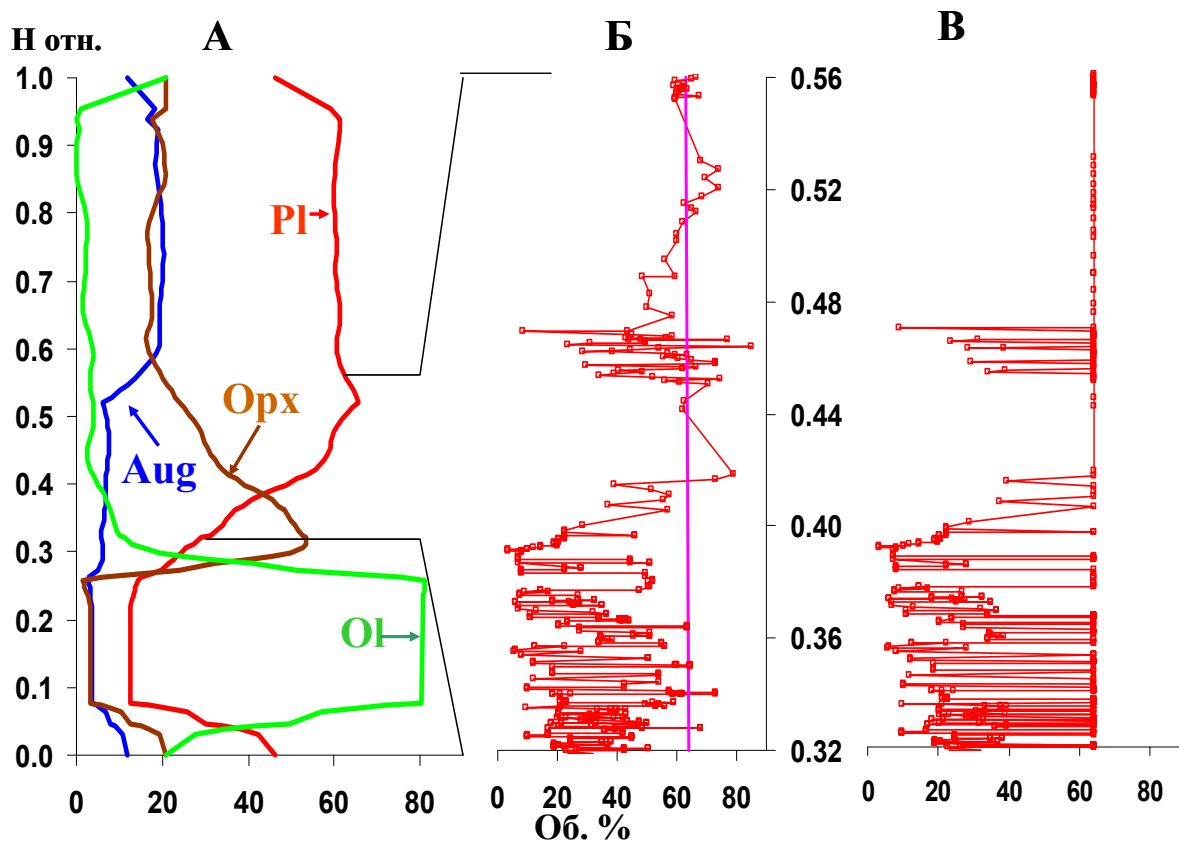
Не менее, если не более ярко проявляются различия итогов работы этих механизмов в распределениях когерентных элементов, таких как Ni, Co, Cr и Sr (рис 3).



**Рис. 3.** Распределения Ni, Co, Cr и Sr в вертикальных разрезах Киваккского интрузива (точки) и модельных тел (линии). Верхний ряд графиков отвечает конвекционно-кумуляционной модели, нижний ряд – модели направленной кристаллизации.

Справедливости ради нужно заметить, что постепенность изменения состава пород в нижней части Норитовой Зоны достигнута за счёт сглаживания скользящим окном ритмически расслоенной пачки пород (рис. 4А). Гипотетически возможно, что формируемая при направленной кристаллизации ритмическая расслоенность за счёт прогрессивного изменения соотношения мощностей перемежающихся слоёв при сглаживании даст постепенное изменение состава пород. Нами с Яной Вячеславовной Бычковой была детально изучена ритмически расслоенная пачка пород в интрузиве Кивакка [Бычкова и Коптев-Дворников, 2004]. На рис. 4Б приведены содержания плаггиоклаза в переслаивающихся бронзититах и норитах в этом участке разреза. На рис. 4В показаны такие содержания плаггиоклаза в норитах, какие должны были бы быть, если бы эта пачка пород сформировалась путём направленной кристаллизации. Иными словами, норитам приписаны концентрации плаггиоклаза, отвечающие пропорции кристаллизации на плаггиоклаз-ортопироксеновой котектике. Очевидно, что между этими графиками мало общего. Это является аргументом не только против возможности

формирования ритмичности в рамках любой разновидности направленной кристаллизации, но и против направленной кристаллизации как таковой.



**Рис. 4.** Строение ритмически расслоенной серии Кивакского интрузива в реальности (Б) и в результате направленной кристаллизации (В)

Сегодня мы можем значительно усилить наш вывод 1988 года. Все варианты модели направленной кристаллизации, игнорирующие гомогенное зарождение минералов и транспорт компонентов по механизму фазовой конвекции, приходят в противоречие с **количественными** признаками строения ультрамафит-мафитовых расслоенных интрузивов.

**Таким образом, поскольку направленная кристаллизация не является механизмом формирования расслоенных интрузивов, то она и не является механизмом магматической эволюции.**

Будем надеяться, что этот результат игнорировать будет сложнее, поскольку он основан не на анализе дискуссионных механизмов тепломассопереноса, а на не вызывающих сомнений закономерностях кристаллизации базитовых силикатных систем.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (инициативный проект 11-05-01027-а).*

#### Литература

Френкель М. Я., А. А. Ярошевский, А. А. Арискин, Г. С. Бармина, Е. В. Коптев-Дворников, Б.С. Киреев (1988), Динамика внутрикамерной дифференциации базитовых магм, М.: Наука, с.212.

Бычкова Я. В., Е. В. Коптев-Дворников (2004), Ритмическая расслоенность кивакского типа: геология, петрография, петрохимия, гипотеза формирования, *Петрология*, т.12, №3. сс. 281-302.