

*Добрецов Н. Л., Симонов В. А., Котляров А. В., Кулаков Р. Ю., Карманов Н. С.* Физико-химические параметры кристаллизации расплавов в промежуточных надсубдукционных камерах (на примере вулканов Толбачинский и Ичинский, Камчатка) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 7. С. 1265–1291.

*Добрецов Н. Л., Симонов В. А., Кулаков И. Ю., Котляров А. В.* Проблемы фильтрации флюидов и расплавов в зонах субдукции и общие вопросы теплофизического моделирования в геологии // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 5. С. 701–722.

*Перчук Л. Л.* Пироксеновый барометр и пироксеновые геотермы // Доклады АН СССР. 1980. Т. 233. № 6. С. 1196–2000.

*Симонов В. А., Масленников В. В.* Геодинамика магматических систем на Валенторском медно-цинково-колчеданном месторождении (Северный Урал) // Металлогения древних и современных океанов-2018. Вулканизм и рудообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2018. С. 22–26.

*Терлеев А. А., Симонов В. А., Каныгин А. В., Токарев Д. А., Ступаков С. И., Котляров А. В.* Уникальное месторождение пригидротермальной биоты в нижнекембрийских осадочно-вулканогенных комплексах Кызыл-Таштыгского рудного поля (Восточная Тува) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 1. С. 66–74.

*Ashchepkov I. V.* Clinopyroxene Jd barometer for mantle peridotites and eclogites and thermal conditions of the lithospheric keels of cratons and their surroundings. A Geo Odyssey // GSA Annual Meeting. Boston, 2001. P. ID 11658.

*Danyushevsky L. V., Plechov P. Yu.* Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011. Vol. 12. N 7. Q07021.

*Kotlyarov A. V., Simonov V. A., Safonova I. Yu.* Boninites as a criterion for the geodynamic development of magmatic systems in paleosubduction zones in Gorny Altai // Geodynamics and Tectonophysics. 2018. Vol. 9. Is. 1. P. 39–58.

*Maryama S., Sawaki Y., Ebisuzaki T., Ikoma M., Omori S., Komabayashi T.* Initiation of leaking Earth: An ultimate trigger of the Cambrian explosion // Gondwana Research. 2014. Vol. 25. Is. 3. P. 910–944.

*Yavuz F., Yildirim D. K.* A Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry // Periodico di Mineralogia. 2018. Vol. 87. P. 149–172.

***А. Ю. Кисин***

*Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург  
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург  
kissin@igg.uran.ru*

### **Блоковая складчатость коры как инструмент прогнозирования месторождений полезных ископаемых**

*Месторождение полезных ископаемых (МПИ) – это скопление минерального вещества на поверхности или в недрах Земли, по количеству, качеству и условиям залегания пригодное для промышленного использования (Горная энциклопедия).*

Минерально-сырьевые ресурсы – ключевая позиция в экономической безопасности любого государства. К ним можно отнести только ресурсы, которые залегают на глубинах, доступных для рентабельной отработки, т. е. вблизи дневной поверхности. Иначе говоря, в земной коре сосредоточены почти все минеральные ресурсы, используемые человечеством на протяжении всей истории. Земная кора – самая тон-

кая, внешняя оболочка твердой Земли. Она же и самая анизотропная, благодаря чему в ней возникают промышленные скопления тех или иных полезных ископаемых (месторождения). К настоящему времени крупные и особо крупные месторождения, залегающие вблизи дневной поверхности континентов, уже выявлены и, в большинстве случаев, отработаны. Прогнозирование и поиски крупных и суперкрупных МПИ практически невозможны. Перед геологами стоит крайне сложная задача поисков скрытых и более мелких месторождений, залегающих еще на глубинах, доступных для рентабельной отработки. Затраты на поиски и разведку таких месторождений велики, что требует совершенствования прогнозно-поисковых методов с привлечением фундаментальных научных исследований. Поэтому настоящая работа посвящена структурно-вещественным преобразованиям земной коры и рудообразованию посредством деформаций по модели блоковой складчатости, возникающей в условиях ориентированного горизонтального сжатия.

Любое эндогенное месторождение уникально и формируется в результате сложного сочетания различных геологических процессов, для реализации которых необходима энергия. Это отмечал В. И. Смирнов с соавторами [1981, с. 5]: «для образования любого месторождения... требуется вклад крупной дозы энергии». Заметим, что этой «крупной дозы энергии» должно быть достаточно для: 1) дестабилизации системы (геологической среды, охватывающей земную кору и верхнюю мантию); 2) мобилизации (извлечения) тех или иных рудных компонентов (химических элементов) из крупных объемов горных пород; 3) обеспечения их миграции на верхние горизонты коры (доступные для геологоразведочных и горных работ). Этим процессам должны сопутствовать некоторые дополнительные факторы, способствующие: 4) компактному отложению рудного вещества (в промышленных концентрациях и технологически извлекаемом виде); 5) сохранности месторождения при последующих геологических процессах.

Источники энергии для геологических процессов могут отличаться в зависимости от существующих геодинамических режимов. В условиях горизонтального растяжения привнос тепловой энергии в систему обычно объясняется глубинными, мантийными источниками (справедливо и обратное утверждение: привнос глубинной тепловой энергии в систему вызывает горизонтальное растяжение). В условиях горизонтального сжатия логично связать поступление энергии с тектоническими силами. В работе объектами для исследований приняты только внутриплитные коллизионно-складчатые пояса, например, Урал, известный своим огромным рудным потенциалом. Геологическая предыстория этой территории длительная и сложная, включающая авлакогенез и рифтогенез. Как коллизионно-складчатый пояс Урал сформировался в позднем палеозое:  $D_3-C_2$  (прогрессивный, собственно коллизионный) этап и  $P_1$  – ранний Mz (регрессивный постколлизионный) этап. Именно к этому периоду относится время структурно-вещественных преобразований (деформация, региональный метаморфизм, магматизм, гидротермально-метасоматические процессы) и формирование большинства рудных и нерудных месторождений Урала.

Судя по масштабам ряда коллизионно-складчатых областей, здесь могут быть задействованы колоссальные запасы энергии, достаточной для того, чтобы в условиях одноосного горизонтального сжатия радикально преобразовать земную кору и сформировать месторождения многих полезных ископаемых. Для реализации этого еще необходим эффективный механизм, поскольку простое расплющивание коры при одноосном горизонтальном сжатии желаемого результата не даст.

Анализируя любую горно-складчатую область (Урал, Аппалачи, Альпийско-Гималайский пояс и др.), видно, что реальные геологические структуры (антиклинории и синклинории) имеют ширину 20–40 км, редко более. Эти масштабы не сопоставимы с толщиной континентальной литосферы (около 200 км) и могут быть обеспечены только деформациями коры относительно небольшой мощности. Все эти геологические структуры – линейные, подчиняющиеся общему простиранию горной системы, что указывает на одноосное горизонтальное сжатие. Большинство горно-складчатых систем асимметричны: предгорный (краевой) прогиб, горы, плато, прогиб. И, как показывают геофизические исследования, земная кора испытывает утолщение (имеется «корень гор»). Асимметрия горно-складчатых областей лучше всего объясняется горизонтальными движениями деформируемой коры, относительно верхней мантии. Это хорошо укладывается в концепцию реологически и тектонически расслоенной литосферы, разработанной в ГИН РАН. Согласно этой концепции, земная кора способна проскальзывать по границе Мохо и другим внутрикоровым границам. Асимметрия горно-складчатых областей, масштаб и простирание геологических структур указывают на ведущую роль тектонических сил, локализованных в самой коре.

В качестве эффективного механизма деформации земной коры при одноосном горизонтальном сжатии, вызывающей ее глубокие структурно-вещественные преобразования, предлагается модель блоковой складчатости и обсуждается ее роль в структурно-вещественных преобразованиях, включая формирование месторождений [Кисин, Коротеев, 2017].

Распределение тектонической энергии в земной коре контролируется крупными структурами. Признаками блоковой складчатости являются: 1) линейность, ориентированная согласно общему структурному плану коллизивно-складчатого пояса; 2) близкие размеры блоков одного знака изгиба; 3) повторяемость в пространстве; 4) синхронность формирования; 5) единый стиль деформаций для блоков одного знака изгиба; 6) метаморфизм; 7) магматизм; 8) металлогеническая специализация и др. Упругая верхняя кора передает напряжения сжатия на расстояния, а изгибы фокусируют ее на ядра складок: в блоках положительного изгиба – на нижнюю часть коры, а в блоках отрицательного изгиба – на верхнюю ее часть. Релаксация напряжений полная и осуществляется всеми возможными способами: тектоническими потоками (пластическими, квазипластическими, катакластическими), метаморфическими реакциями, перекристаллизацией, фазовыми переходами, растворением под давлением и т. п., что характеризует систему как максимально энергоемкую. Все деформации остаточные. В этом принципиальное отличие блоковой складчатости от всесторонне исследованной складчатости продольного изгиба упругого слоя. Тектоническая энергия трансформируется в другие виды энергии, в т. ч. и тепловую, вызывая быстрый разогрев крупных объемов коры. Возникает резко метастабильная по энергонасыщенности и РТ условиям система, релаксация которой сопровождается глубокими вещественно-структурными преобразованиями земной коры и ремобилизацией рудных компонентов. Движение флюидов на коллизивном этапе контролируется градиентами стрессовых напряжений, вызванных изгибами.

Таким образом, модель блоковой складчатости может быть использована для объяснения происхождения структурно-вещественных комплексов некоторых горно-складчатых поясов, типа Урала. Она структурирует анизотропную верхнюю кору, что является хорошей основой для совершенствования прогнозно-поискового комплекса

на различные рудные и нерудные эндогенные МПИ коллизионно-складчатых поясов и зон их динамического влияния на активизированные участки платформ. Модель блоковой складчатости не имеет аналогов в мире и принципиально отличается от всех имеющихся в этой области разработок. Впервые складчатость показана не в виде синусоидальных изгибов, а в виде блоков, подвергнутых изгибной тектонике. Кора сохраняет форму плиты, что позволяет ей передавать напряжения сжатия на расстояния.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (№ АААА-А18-118052590028-9).*

### Литература

*Кисин А. Ю., Коротеев В. А.* Блоковая складчатость и рудогенез. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. 356 с.

*Смирнов В. И., Гинзбург А. И., Григорьев В. М., Яковлев Г. Ф.* Курс рудных месторождений. Учебник для вузов. М.: Недра, 1981. 348 с.

***М. А. Юдовская***

*Институт геологии рудных месторождений, минералогии,  
петрографии и геохимии РАН, г. Москва  
Университет Витватерсранд, г. Йоханнесбург  
maiya@igem.ru*

### **Хромиты расслоенных интрузивов и проточных магматических каналов как ключ к пониманию процессов рудообразования**

Хромит устойчив в широком диапазоне температур и давлений, и его состав используется как индикатор природы материнских расплавов и геодинамических условий становления несущих его интрузивов [Roeder, Reynolds, 1991; Kamenetsky et al., 2001]. В магматических обстановках хромит кристаллизуется как один из первых ликвидусных минералов и/или в составе котектик, при этом часто захватывая комплексные включения сосуществующего расплава. Исходя из раннего зарождения хромита в расплавах, традиционно предполагается, что большинство таких включений были захвачены на ранних стадиях кристаллизации. Хорошо известно, однако, что составы минералов из включений могут значительно отличаться от составов соседствующих кумулюсных и интеркумулюсных минералов, но разнообразие микровключений в хромите принимается чаще как свидетельство изменчивых условий кристаллизации. Некоторые минеральные ассоциации во включениях в хромите, такие как алмаз + коэсит, кристаллизовались при высоком давлении [Yang et al., 2013]. Другие минералы, такие как оливин, Os-Ir-Ru сплавы и сульфиды, могли быть захвачены в промежуточной камере, подводящих каналах и резидентной камере. Водо- и галогенсодержащие силикаты повсеместно присутствуют в составе многофазных включений в хромите из различных геодинамических обстановок, включая океанические и островодужные базальты, офиолиты и расслоенные интрузии. Среди этих