

СТАТЬИ

УДК 552.086

DOI 10.17513/use.38056

**ГЕОЛОГО-ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ
ЧЕРТЫ ДЕВОНСКОГО ВУЛКАНИЗМА
РАСТАЙСКОГО ГРАБЕН-РИФТА (КУЗНЕЦКИЙ АЛАТАУ)****Гринёв О.М., Адылбаев Р.Р., Семиряков А.С., Морозова Е.Н.***ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,
Томск, e-mail: tomskgrom@yandex.ru, ruslan_ggf@mail.ru*

Изучение Растайского грабена показало, что он приурочен к унаследованной зоне глубинного разлома и формировался в осевой зоне растяжения девонского палеосвода, в пределах которого размещается Кузнецко-Алатауская щелочная провинция. В пределах грабена установлено два типа морфо-структур: вулканические, сложенные ритмичным переслаиванием базальтов, и вулcano-плутонические купольные, в которых вулканические купола интродуцированы телами щелочных габброидов провинции. Стратиграфическое и петрографическое изучение вулкаников грабена послужило основанием к корреляции нижней, средней и верхней его толщ со свитами Горячегогорского вулканического плато северо-восточной части провинции. Петрографический и вещественный состав вулкаников показал, что нижняя толща грабена коррелируется с трахибазальт-базальтовой базырской свитой плато, средняя – с базанит-тефрит-фонолитовой берешской свитой плато. Анализ петро-геохимических данных установил в составе вулкаников три (серии) тренда: субщелочной (базырский), щелочно-базальтоидный (берешский) и фойдитовый, соответствующий нижней части берешской свиты плато. В качестве исходных расплавов магмогенерирующего очага рассматриваются трахипикробазальты и пикробазальты, которые формировались под воздействием тепла девонского плюма и его флюидной составляющей, обусловивших взаимодействие вылавок с литосферной гетерогенной мантией и низами земной консолидированной коры. Кроме вещества плюма, шпинелевого и гранат-шпинелевого лерцолита (протолита) геохимически в составе вулкаников установлено участие вещества PM, EM2, E-MORB, OIB, IAB и земной коры (BCC и ACC). По составу вулкаников грабена специализированы на Al, Ti, P, Fe, Ca, Na, K, Sr, Ba, U, Th, Nb, Ta, Zr, R3Э и сопоставимы с щелочными базальтами рифтовых зон. С вулканиками грабенов связана барит-полиметаллическая, редкоземельно-редкометалльно-радиоактивная минерализация и золото-серебро-висмутовая аномалия. Одна из купольных вулcano-плутонических морфо-структур перспективна на обнаружение уртитов Кия-Шалтырского типа.

Ключевые слова: Растайский грабен, Кузнецкий Алатау, Алтай-Саянская складчатая область, морфо-структура*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 20–35–90032, а также ООО «НПО ГРИМС».***PETROGRAPHY, PETROLOGY AND VOLCANO-PLUTONIC MAGMATISM
OF THE RASTAY GRABEN-RIFT (KUZNETSK ALATAU)****Grinev O.M., Adylbaev R.R., Semiryakov A.S., Morozova E.N.***National Research Tomsk State University, Tomsk, e-mail: tomskgrom@yandex.ru, ruslan_ggf@mail.ru*

The study of the Rastay graben showed that it is confined to the inherited deep fault zone and was formed in the axial extension zone of the devonian palaeosphere, within which the Kuznetsk-Alatau alkaline province is located. Two types of morphostructures have been established within the graben: volcanic, composed of rhythmically interbedded basalts, and volcano-plutonic domes, in which volcanic domes are intruded by bodies of alkaline gabbroids of the province. Stratigraphic and petrographic studies of the graben volcanics have led to the correlation of the lower, middle and upper strata with the Goryachegorskiy volcanic plateau formations in the northeastern part of the province. Petrographic and material composition of volcanics showed that the lower sequence of the graben correlates with the trachybasalt-basaltic bazarskaya formation of the plateau, the middle sequence with the basaltic-tephritic-phonolitic Bersh Formation of the plateau. The analysis of petro-geochemical data revealed three (series) trends in the composition of volcanics: subalkaline (Bazarskiy), alkaline-basaltic (Bereshkiy) and foiditic, corresponding to the lower part of the bereshskaya plateau formation. Trachypicrobasalts and picobasalts are considered as initial melts of the magma generating chamber, which were formed under the influence of heat of devonian plume and its fluid component, which caused interaction of melts with lithospheric heterogeneous mantle and lower earth consolidated crust. In addition to the substance of the spinel plume and garnet-spinel lherzolite (protolith), participation of the substance of PM, EM2, E-MORB, OIB, IAB, and crust (BCC and ACC) is established geochemically in composition of volcanics. By composition, the graben volcanics are specialized in Al, Ti, P, Fe, Ca, Na, K, Sr, Ba, U, Th, Nb, Ta, Zr, REE and are comparable to the alkaline basalts of the rift zones. Barite-polymetallic, rare-earth-rare-metal-radioactive and gold-silver-bismuth anomalies are associated with the graben volcanics. One of the domed volcano-plutonic morphostructures is promising for the discovery of Kiya-Shaltyrskiy type urtites.

Keywords: Rastayskiy graben, Kuznetsk Alatau, Altai-Sayan folded region, propilitization*The study was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20–35–90032, as well as by NPO GRIMS LLC.*

Щелочные породы во всем мире привлекают пристальное внимание специалистов по двум причинам. Во-первых, эти редкие образования являются индикаторами глубинных мантийных процессов, включая геодинамические режимы. Во-вторых, с комплексами щелочных пород связаны крупные и уникальные месторождения большинства стратегических металлов.

В северо-восточной части Кузнецкого Алатау расположена широко известная щелочно-габброидная провинция, в которой девонский магматизм проявился в виде грабен-рифтовых вулканитов, включая Растайский грабен-рифт, а также в совокупности щелочно-габброидных плутонов, нередко тесно ассоциирующих с грабенами. С массивами провинции связаны крупные месторождения нефелиновых руд с сопутствующим золото-платиноидным оруденением. С грабенами известны геохимические и геофизические редкоземельно-радиоактивные аномалии и россыпи золота, но их коренные источники пока не определены. На богатых нефелиновых рудах уртитах (фоидолитах) больше полувека работает крупнейший в мире Ачинский глиноземный комбинат (АГК). Однако руды разрабатываемого Кия-Шалтырского месторождения на исходе, и в связи с этим остро стоит проблема поиска новых подобных объектов.

Из истории следует отметить, что первые находки нефелиновых пород в регионе были сделаны в конце XIX и начале XX в. В 1971 г. был запущен АГК, однако первое системное описание щелочного магматизма провинции было выполнено только в 1990 г. одним из авторов настоящей статьи. В последующие 30 лет породы массивов изучались геохимически и изотопно-геохимически. А вот грабены провинции и их вулканиты оставались вне поля зрения исследователей, несмотря на то, что именно они соединялись с прямыми каналами в мантийные глубины, в которых зарождался щелочной магматизм, достигал земной поверхности или застывал на глубине в виде щелочно-габброидных плутонов. Положение дел не изменилось и после последней государственной геологической съемки масштаба 1:200000 (лист N-45-XI, Белогорск, 2019). По этой причине авторами была составлена программа специального изучения грабен-рифтов и их магматитов с целью оценки их петрологических, геодинамических и минерагенических особенностей. Растайский грабен расположен в центральной труднодоступной части провинции по соседству с действующим Кия-Шалтырским рудником.

Научная значимость. Для грабена впервые проведен морфотектонический анализ, позволивший определить его раздвиговую природу в пределах формировавшегося в девоне сводового поднятия Кузнецкого Алатау. Установленные в пределах грабена купольные вулcano-плутонические морфоструктуры свидетельствуют о вулcano-плутоническом характере магматизма грабена и щелочной Кузнецко-Алатаусской провинции в целом. В составе вулканитов грабена установлены три тренда дифференциации магм: субщелочной трахибазальтовый, щелочной – тефрит-фонотефритовый и высокощелочной – фоидитовый, максимально нефелиноносный для провинции. Породы трендов обладают геохимическим родством и характерной для щелочных образований минерагенической специализацией, имеющей минералогическое выражение. Источники магматизма имели плюмово-рифтогенную природу с источниками типа PM, EM2, OIB, IAB и E-MORB с участием вещества литосферной мантии и корового материала.

Практическая значимость. Изучена потенциально рудоносная морфоструктура, в пределах которой установлены частные морфоструктуры с прогнозируемым в одной из них фоидолитовым оруденением, подобным Кия-Шалтырскому. Это подтверждается установленными петрохимическими трендами дифференциации, характерными для грабена и провинции в целом. Для пород установлены геохимические и минералогические признаки редкометалльно-редкоземельно-радиоактивного оруденения, представленного минералами, характерными для промышленного оруденения подобного типа. Оруденение имеет барит-полиметаллическую, редкоземельно-радиоактивную и висмут-золото-серебряную специализацию.

Цель исследования – на основе изучения морфотектоники, стратиграфии, вещественного состава вулканитов и структуры Растайского грабен-рифта, взаимоотношений, корреляции его с вулканитами Горячего плато и плутонами, охарактеризовать его как один из основных типов вулcano-плутонических структур исследуемой Кузнецко-Алатауской щелочно-базитовой провинции.

Материалы и методы исследования

Методика исследования имела комплексный характер, позволяющий получить данные как по геолого-тектоническим, так и по минералого-геохимическим, петро-

логическим и минерагеническим аспектам проявления субщелочного и щелочного магматизма грабена.

Геолого-тектоническая информация получалась непосредственно в районе в ходе маршрутных пересечений грабена, разрезов вулканитов, с параллельным отбором образцов пород, сопровождаемым привязкой по GPS. Впервые для грабена проведен морфоструктурный анализ на современной космической фотооснове и с использованием теневого рельефа. Метод позволяет оценить морфологические особенности структуры, ее внутреннее строение, взаимоотношение с вмещающими толщами. Каменный представительный материал основных фаций магматитов изучался под микроскопом в проходящем и отраженном свете с фотофиксацией структур, текстур, минерального состава пород. Далее породы изучались на растровом электронном микроскопе (РЭМ) методом построчного сканирования препаратов с целью не только определения порообразующих минералов, но и микровключений в них (не менее 3–5 мкм), определением их спектров и состава, формы выделений для установления минерагенической специфики оруденения магматизма. Изучение вещества пород, помимо исследований на РЭМе, проводилось определением их петрохимического состава, а также геохимического спектра микроэлементов. Интерпретация материалов выполнялась при помощи диаграмм, применяемых для уточнения классификации и номенклатуры пород, геохимической их специфики путем сравнения спектров с известными реперами геодинамических режимов (OIB, IAB, N-MORB, E-MORB и др.).

Приборная база проводимых анализов в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» НИ ТГУ ГГФ характеризуется следующим образом: а) определение концентраций микроэлементного состава горных пород проводилось методом индуктивно-связанной плазмы масс-спектрометрии (ICP-MS) (Agilent 7500cx); б) состав и содержание петрогенных элементов определялись методом ICP-AES (iCAP 7400 Duo); в) минералогические исследования и изучения внутренней структуры пород устанавливались на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU с использованием энерго-дисперсионного микроанализа Oxford INCA Energy 350, детекторов обратно-рассеянных электронов и детектора катодолюминесценции.

Для ряда представительных образцов проводились изотопно-геохимические ис-

следования Sm-Nd, Rb-Sr, а также определение их возраста U-Pb методом по цирконам.

Результаты исследования и их обсуждение

Протяженность субмеридионального Рас-тайского грабена составляет около 34–35 км, хотя останцы и тектонические клинья девонских вулканогенно-терригенных пород, присутствующие в ряде мест за пределами грабена, свидетельствуют, что первоначально он имел протяженность не менее 40 км при ширине в 3–7 км. Отчетливо проявлены вариации по ширине грабена, обуславливающие его четковидное строение в плане. В современной структуре видны три четковидные расширения и разделяющие их сужения (шейки) грабена, шириной до 1,5–2 км. В северной части к основному стволу грабена причленяется дополнительная грабенообразная структура – Вехнепетропавловская, имеющая восток-северо-восточное простирание и размеры 7x2,5x–1,5 км (рис. 1, б). Заложение грабена предопределялось растяжением совокупности продольных и поперечных разломов, первые из которых являются ответвлениями от Кузнецко-Алатауского линеамента. Растяжение и сдвиговые напряжения осуществлялись на фоне роста раннедевонского магматогенного куполообразного свода [1] в пределах провинции. В односторонних сегментах грабена наблюдается резко несогласное залегание девонских толщ на складчато-глыбовых сооружениях додевонского цоколя (R–V–C) (рис. 1, а, б).

Вулканы Растайского грабена представлены тремя дифференцированными сериями: короткой субщелочной трахибазальтовой; наиболее полной щелочных базальтоидов; и короткой основных фойдитов Na и в основном K-Na рядов. По составу и последовательности формирования они сопоставимы с вулканитами базырской и берешской свит Горячегогорского плато провинции. Размещение Растайского грабена в осевой зоне ареала щелочной провинции и петро-геохимическая идентичность с вулканитами Горячегогорского плато [2, 3] подтверждают их принадлежность к единой вулканоплутонической щелочной провинции Кузнецкого Алатау.

Феномен вулканизма грабена и Горячегогорского плато состоит в последовательном формировании в начале субщелочной, затем щелочной и завершающей снова субщелочной серии вулканитов, которые пред-

шествовали и сопровождали формирование щелочно-мафитовых плутонов.

Изотопно-геохронологические исследования цирконов из вулканитов U-Pb методом показали на повсеместное нарушение U-Pb изотопной системы минерала, вследствие чего был получен лишь ориентировочный (омоложенный) возраст вулканитов (берешиты – $385 \pm 9,29$ млн лет; трахибазальты – $373,28 \pm 9,78$ млн лет), который не отражает их истинный возраст. Требуются дополнительные исследования подобного рода и, вероятнее всего, на основе изучения бадделита. Тем не менее установлен факт нарушения изотопной системы цирконов из вулканитов, по-видимому, связанный с поствулканическим прогревом пород. Это может быть связано, например, с внедрением тел щелочно-габброидного комплекса (габбро, тералитов), внедрением даек того же состава, а также развитием повсеместной кливажной трещиноватости по вулканитам, выполненной карбонат-кварцевыми жилами, проявлениями барит-полиметаллической и редкоземельно-редкометалльной-радиоактивной минерализации.

Морфотектоника и взаимоотношения девонского вулканизма и плутонизма грабена

Заложение и формирование Растайского грабена сопровождалось не только активным вулканизмом, но и внедрением щелочно-габброидных плутонов. Это подтверждает вулкано-плутонический характер как грабена, так и Кузнецко-Алатауской щелочно-мафитовой провинции и дает возможность оценить характер взаимоотношений вулканитов и комагматичных им щелочно-габброидных плутонов. Важным обстоятельством в этом отношении является расположение грабена во внутренней зоне ареала развития провинции и в ассоциации с несколькими плутонами, тогда как большинство плутонов ареала непосредственной связи с вулканитами не имеют.

В соответствии с доминирующим составом пород [4] в пределах провинции выделены петрографические зоны: южная – габбро-уртитовая; средняя – габбро-тералит-плагноклазовый ийолит – нефелин-сиенитовая; и северная – плагноклазовый ийолит-полевошпатовый уртит – нефелин-сиенитовая. Массивы Подтайга, Урюпский, Учкурюпский и Горячегорский прорывают вулканиты базырской и берешской свит Горячегорского плагио, расположенного в северо-восточной части провинции (рис. 1, б).

Урюпский шток и Подтайга образуют небольшие вулкано-плутонические постройки с соответствующими по составу вулканитами берешской свиты – берешитами и нефелинитами соответственно. Из остальных плутонов провинции только Бархатно-Кийский прорывает вулканиты Растайского грабена.

Тектоническая позиция Растайского и других грабенов Мартайги. Обстановка грабенообразования предопределяется строением дорифтового субстрата и характером рифтогенной активизации. Это относится и к грабенам северо-восточной части Кузнецкого Алатау – Саралинскому, Растайскому и Талановскому. Для них прослеживаются два основных фактора дорифтового контроля. Первый из них заключается в контроле грабенов унаследованными зонами глубинных разломов, являющихся ответвлениями от Кузнецко-Алатауского линеймента. Примечательно, что Растайский грабен занимает в пределах ареала провинции срединное положение, а кулисно расположенные к нему Саралинский [5] и Талановский также приурочены к глубинным разломам, ограничивающим Мартайгинский блок с востока и запада, предопределяя его горстообразный характер по отношению к Минусинскому прогибу с востока и Кузнецкому прогибу с запада. Это определяет тектоническую позицию Кузнецкого Алатау как обрамляющего западного плеча девонского Алтае-Саянского палеорифта [6]. Второй фактор контроля заключается в геологическом строении Мартайгинского блока, в котором и размещается Кузнецко-Алатауская щелочная провинция раннего девона. Мартайгинский геоблок отличается аномальной насыщенностью магматическими образованиями PR, C–O и D [7, 8]. Общая площадь магматов явно превышает стратифицированные осадочные толщи. На этом фоне выделяется так называемый Мартайгинский магматоген (выражение мартайгинских геологов). Он представлен глубоко эродированным площадным вулканогенным ареалом бериккульской свиты (C₂) с сохранившимися от эрозии реликтами вулканов центрального типа, представляющими господствующие вершины региона. В ходе раннедевонской плюм-рифтогенной активизации [9–11] произошло обновление как глубинных проницаемых зон, контролирующих грабены, так и сводообразного эродированного Мартайгинского магматогена, испытывавшего повторное сводообразование.

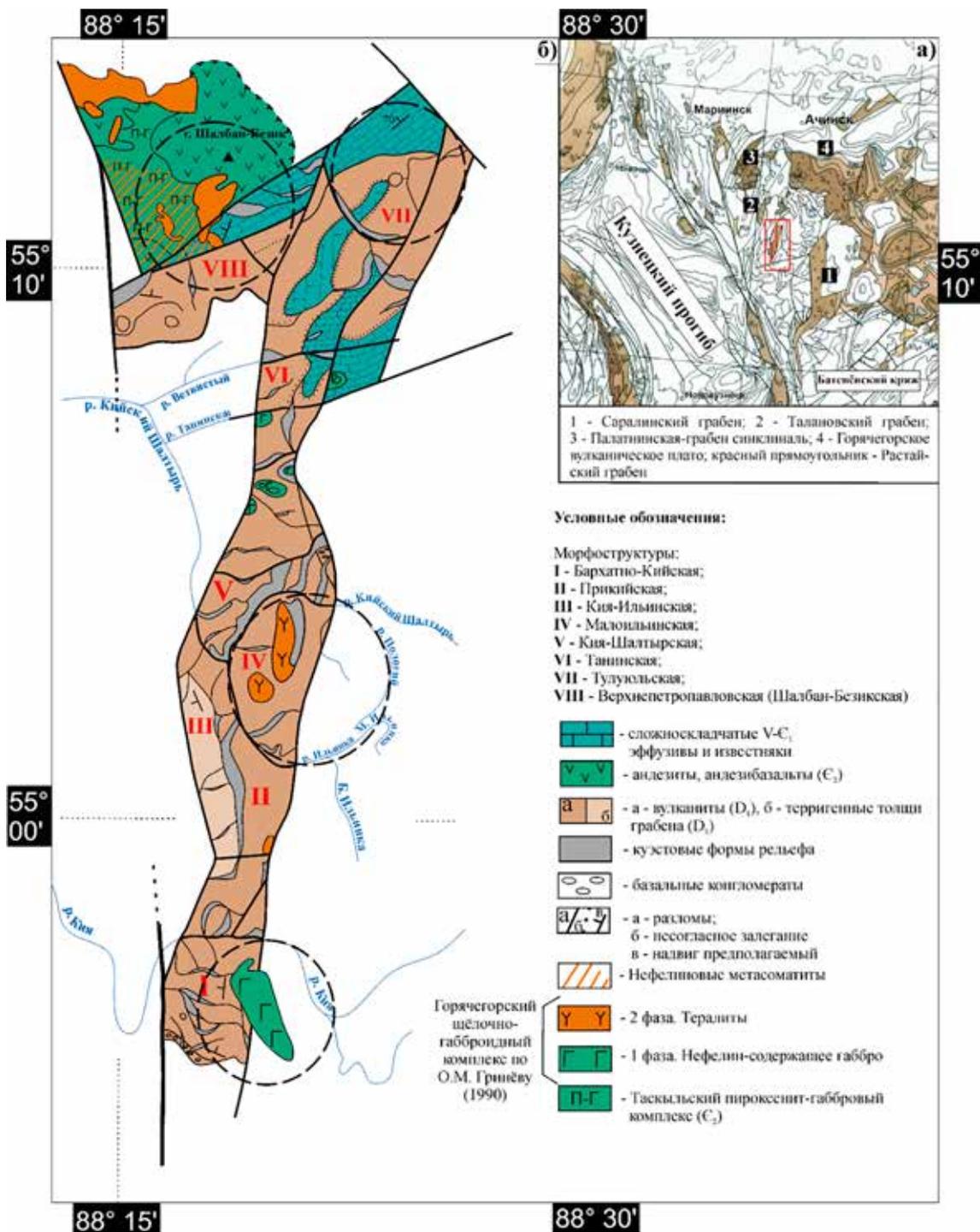


Рис. 1 (а, б). Внемасштабная схема выделенных основных типов вулканотектонических морфоструктур Растайского грабена

Морфоструктуры Растайского грабена. Расположение грабена в осевой продольной зоне девонского палеосвода Мартайги и форма грабена в плане с характерными раздувами и сужениями говорит о его формировании вследствие присводового рас-

тяжения-раздвига. Двухбортное строение южной половины грабена указывает на более интенсивные раздвиговые напряжения в этой части свода. Однобортный характер северной половины грабена показывает на проницаемость для вулканизма только

западного продольного разлома, ограничивающего его борт. В целом система структурообразующих разломов имеет у грабена типичный рифтовый характер: продольные прибортовые разломы раздвигового типа пересекаются поперечными (трансформными) нарушениями, делящими грабен на сегменты примерно равного размера.

Среди этих блоков-сегментов установлены два основных типа частных морфоструктур: 1) депрессионно-вулканические, выполненные приразломным напластованием лав, обладающих куэстообразным типом рельефа, отражающим ритмично-импульсный характер приразломного вулканизма. Потоки слагают пачки, а пачки – ритмы, слагающие толщи; 2) второй тип морфоструктур связан с раздувами грабена по ширине, в которых фоновый куэстообразный рельеф нарушается формированием купольных вулкано-плутонических построек. Выделяются три таких постройки: Бархатно-Кийская; Малоильинская и Верхнепетропавловская (Шалбан-Безикская). Основой их строения являются купольно-кольцевые вулканические постройки, интродуцированные сравнительно крупными телами щелочных габброидов. Характерно, что эти морфоструктуры «насажены» на ограничивающие грабен продольные разломы. Одна их часть располагается внутри грабена, а другая размещается в пределах обрамляющего «плеча» грабена, сложенного породами дорифтового цоколя (рис. 1, а). Характерно также, что в пределах грабена откартировано множество мелких штоков габбро, тералитов, но они не формируют купольных морфоструктур. Выделенные и в разной степени эродированные купольные вулкано-плутонические морфоструктуры непосредственно связаны с грабеном, но имеют при этом обособленную структурно-тектоническую позицию и согласованно вписаны в петрографическую зональность щелочной провинции. Плутоны выделенных морфоструктур связаны с вулканиками грабенов парагенетически и представляют собой самостоятельный этап интрузивного магматизма в рамках раннедевонского рифтогенного режима.

Стратиграфия и последовательность формирования магматитов грабена

В отсутствие вскрытого разреза грабена и его слабой обнаженности, стратиграфическая и петрогеохимическая корреляция толщ вулкаников грабена с базырской, берешской и ашпанской свитами горячего-

ского стратотипа позволяет воссоздать этот разрез с естественной для него последовательностью формирования толщ и отметить определяющее сходство и различия между толщами грабена и свитами стратотипа.

Нижняя слабодифференцированная толща трахибазальтов и базальтов грабена уверенно коррелируется с такой же по составу субщелочной базырской свитой. Состав пород толщи следует считать наиболее близким к исходным магмам генерирующего их глубинного очага. Парагенезис минералов у них также идентичен.

Средняя дифференцированная щелочная толща удовлетворительно коррелируется по составу и набору основных разновидностей с берешской свитой стратотипа. Однако отличается явно ограниченным развитием пород, богатых вкрапленниками нефелина – берешитов. Тем не менее по уровню щелочности на TAS-диаграмме занимает место щелочной серии. Следует отметить, что высокощелочные нефелинитовидные берешиты (фоидиты) и берешиты в разрезе берешского стратотипа залегают в основании свиты. Выше они сменяются дифференциатами менее богатыми нефелином, но с большим содержанием плагиоклаза – калинатрового полевого шпата.

Верхняя, существенно терригенная, толща грабена с ограниченным присутствием основных и средних пород требует доизучения. В стратотипе она представлена трахибазальтами, трахиандезитобазальтами, подобными по составу ашпанской свите Горячегогорского плато.

Установленные вулкано-плутонические морфоструктуры грабена позволяют утверждать, что вулканиды и плутоны провинции являются производными единого щелочно-мафитового очага, но разных этапов его эволюции – раннего вулканического и сменяющего его плутонического. Об этом, кроме единого ареала развития, говорит вся совокупность петрографических, петрохимических и геохимических данных, характеризующих плутоны [4], материалы настоящей статьи, а также ряд публикаций разных авторов последних двадцати лет [2].

Материнские магмы, условия генерации, дифференциации, мантийные и коровые источники

Для оценки указанных параметров анализ вещественного состава магматитов, как вещественных свидетелей работы мантии, имеет первостепенное значение. В нашем случае состав и последовательность вне-

дрения дифференциатов как вулканитов, так и пород плутонов щелочно-мафитовой провинции Кузнецкого Алатау позволяет предположить, что первичной магмой(ми) являлись пикробазальтовые и трахибазальтовые расплавы.

Сравнение трендов дифференциации петрогенных компонентов вулканитов и плутонов провинции с трендами главных магматических серий: габбро – диорит – гранит Урала и базальт – андезит – дацит – риолит острова Исландия – показало, что, начиная с первых дифференциатов исследуемых серий пород провинции, субщелочных базальтов и габбро, они значимо отклоняются от индикаторных серий в сторону явного накопления Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , и эта тенденция нарастает к конечным членам серий. При этом накопление имеет нелинейный характер. Если учесть, что тренд серии базальт – андезит – дацит – риолит формировался в условиях срединно-океанического хребта Атлантики, т.е. при отсутствии континентальной коры, то становится понятно, что в случае с исследуемыми дифференциатами наличие или отсутствие земной коры не играет решающей роли в петрогенезисе исследуемых серий провинции. Логичнее предположить, что в нашем случае проявлено активное участие плюмового флюидно-магматического взаимодействия в ходе выплавления и дифференциации исходных магм [4].

Редкие и рассеянные элементы. Анализ уровней содержания и распределения редких и рассеянных элементов серий пород провинции со своей стороны вскрывает ряд важных особенностей их выплавления и дифференциации. Так, согласно специальным исследованиям, известно, что характерные для мафитов Sr, Ni, Co, V связываются с различными степенями плавления мантийного вещества субстрата, а отношение Ni/Co используется для определения первичности магматических дифференциатов. В нашем случае это соотношение по средним составам вулканитов соответствует значениям: для субщелочных лав грабена (0,88), щелочных лав (1,31) и высокощелочных лав (2,0), что указывает на малые степени селективного плавления субстрата и на большую относительную близость фойдитов к первичным выплавкам.

Наиболее ярко геохимическая специализация пород выражена повышенными и высокими содержаниями Ba, Sr, Zr, Nb, Hf, Ta, Th, U, Ti, P. При этом для K, R, Ti и в меньшей степени Sr и Ba установлено, что специализация расплавов на них закладывает-

ся на ранних стадиях плавления мантийного субстрата и они полностью переходят в расплав. Подобная специализация характерна для определенного типа магм и продуцирующего их мантийного субстрата. В первую очередь это источники EM2, метасоматическая обогащенная мантия, магмы E-MORB, OIB и магмы рифтовых зон. При этом вариации и содержания TiO_2 (%) в субщелочных, щелочных и фойдитовых трендах изученных вулканитов составляют 0,75–2,12; 0,64–2,01 и 0,79–1,42 соответственно, что свидетельствует о близких глубинах выплавления исходных расплавов этих серий. Практически то же самое характерно и для распределения P_2O_5 вулканитов грабена.

Средние содержания типоморфных микроэлементов вулканитов в субщелочных, щелочных и фойдитовых сериях соответственно составляют (г/т): Ba – 439,2; 903,4; 923,0; Sr – 1233; 863,8; 1127,9; Zr – 166,3; 186,8; 169,1; Nb – 19,0; 33,17; 26,8; Th – 5,29; 6,15; 4,81; U – 2,1; 3,1; 3,81. Как видим, по содержанию микроэлементов рассматриваемые, разные по щелочности, серии щелочной провинции несколько разнятся, что можно расценивать как показатель вариации глубины залегания магматических центров и малых степеней плавления мантийного субстрата. Аналогичный вывод получен для вулканитов Горячегогорского плато провинции [2].

Важным фактором щелочного магмогенеза является флюидно-магматическое взаимодействие, которое обуславливает обогащение расплавов большей частью характерных для них микроэлементов, особенно крупноионных. Индикатором подобных процессов является содержание и отношение Th/U. Установлено, что у пород, представляющих кристаллизаты первичных магм, отношение Th/U является минимальным. Вариации содержаний Th составляют (г/т) в субщелочной серии ~ 1,17–11,22; щелочной – 1,34–9,88; и высокощелочной ~ 1,29–10,26; а U ~ 0,38–4,93; 0,93–6,43 и 0,61–9,05 соответственно. Th/U отношение по средним составам для субщелочной серии составляет 2,1, щелочной – 2,0 и фойдитовой – 1,3. Эти значения указывают на то, что субщелочные и щелочные породы характеризуются первично-магматическими отношениями Th/U, а фойдиты – магматическими с наложением метасоматических процессов. Вариации в количественных содержаниях, типоморфных для исследуемых пород, элементов определяются режимом взаимодействия плавления субстрата с флюидным потоком.

Редкоземельные элементы (REE) варьируют в сопоставимых и ограниченных пределах изученных серий (г/т): субщелочные (66,38–258,8, среднее 139,59), щелочные (69,24–275,74, среднее 167,04); высокощелочные (65,74–256,31, среднее 148,75). Вариации LREE/HREE составляют: у субщелочных 3,9–9,2; щелочных 3,6–9,2, среднее 6,6; и высокощелочных 4,0–7,9, среднее 5,9. Вероятно, это говорит о довольно стабильном составе мантийного субстрата, но подверженном вариациям степени его плавления, возможно глубине залегания и об устойчивых тенденциях дифференциации первичных расплавов в пределах серий и представляющих их разновидностей вулканитов. Анализ спайдерграмм выделенных серий, кроме отмеченных признаков явного генетического родства как между сериями, так и вулканитами базырской свиты Горячегогорского плато (рис. 2, а–е), позволяет выявить еще одну тенденцию процессов плавления мантийного субстрата и последующей дифференциации выплавов.

В правой части геохимических спектров (от Dy до Lu) наблюдается максимальное сближение содержаний и характера распределения REE у мантийных реперов (N-MORB, E-MORB), OIB, IAB и исследуемых вулканитов, тогда как в направлении левой части диаграмм геохимические спектры этих образований веерообразно расходятся, причем спектры N-MORB и E-MORB теряют элементы от Cs до Tb, а остальные породы обогащаются ими. При этом исследуемые вулканиты в наибольшей степени соответствуют OIB. В принципе это обогащение вулканитов является равнодействующей совокупности процессов селективного плавления, магматической дифференциации, а также, как показывают приведенные выше примеры и работы последних лет, флюидно-магматического взаимодействия и мантийно-корового взаимодействия. Параметры этих процессов в определенной степени конкретизируются при помощи комплекса геохимических индикаторов-диаграмм, приведенных на рис. 3, а–е.

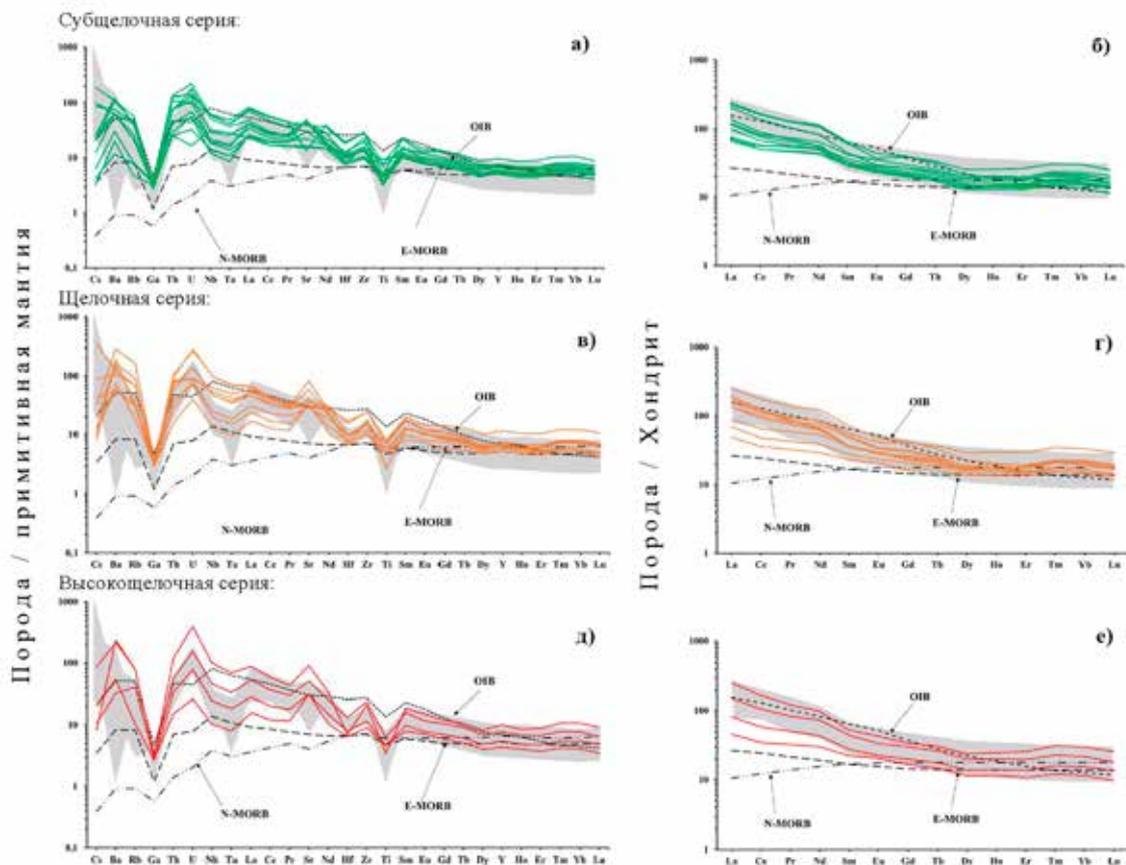


Рис. 2 (а–е). Мультиэлементные спайдерграммы содержания микроэлементов в вулканитах: а, б – субщелочной (базальт-трахибазальтовой) серии; в, г – щелочной (базанит-тефрит-фонотефритовой) серии; д, е – высокощелочной (флюидитовой) серии

Интерпретация полученных данных при анализе геохимических дискриминационных диаграмм (рис. 3, а–е) позволяет сказать следующее. Магмогенерирующий очаг Растайского грабена имел приразломный многоканальный характер, сопровождающийся декомпрессионными эффектами, обусловленными тектонической обстановкой присводового растяжения. Зона магмогенерирующего субстрата имела определенный вертикальный размах и включала мантийные «слои» разной геохимической специализации, унаследованной от сложной додевонской истории региона. Вулканизм имел волновой (импульсный) характер, возобновлявшийся генерацию последовательно проявившихся расплавов, соответствующих субщелочной базальтовой, щелочной базальтоидной и фойдолитовой сериям, одновременным с базырской, берешской и ашпанской свитами Горячегогорского плато. Состав субстрата был специализирован на генерацию высокоглиноземистых, ще-

лочных магм при низких степенях его плавления (до 3%). По составу протолит соответствовал шпинелевому и гранат-шпинелевому лерцолитам. Система магмогенерации оживлялась плюмовыми эманациями, включавшими флюидно-магматическое взаимодействие вещества плюма и протолита. В пределах литосферы и земной коры, благодаря насыщенности флюидами, расплавы взаимодействовали с разноглубинным литосферным веществом с метками EM2, OIB, IAB, E-MORB, а также веществом нижней и средней коры, сохраняя плюмовые метки. Для фойдитов нельзя исключать ликвационную природу с отделением от первичных выплавов, под влиянием пересыщения их флюидными компонентами или образования самостоятельной выплавки.

Металлогеническая специализация вулканитов грабена выразилась в проявлении барит-полиметаллического, редкоземельно-радиоактивного и золото-серебро-висмутного оруденения.

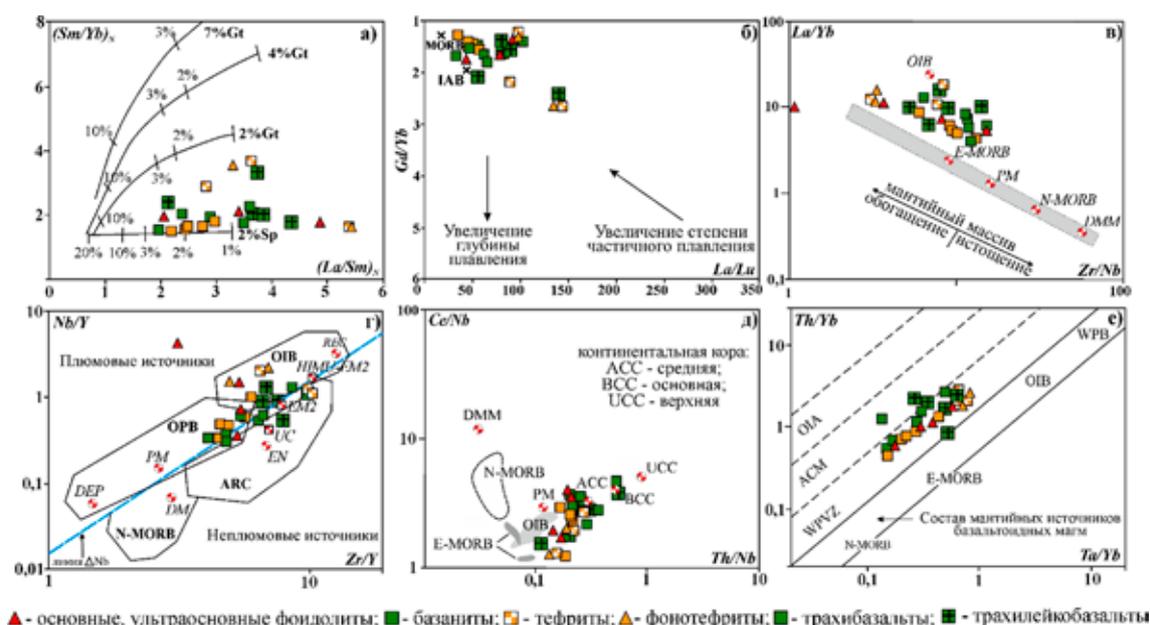


Рис. 3 (а–е). Источники параметров выплавления и геодинамической обстановки проявления вулканизма Растайского грабена по геохимическим данным: а – диаграмма $(Sm/Yb)_N - (La/Sm)_N$ [12] составов и степени равновесного плавления вероятных мантийных субстратов. Концентрации РЗЭ нормализованы по хондриту; б – диаграмма $Gd/Yb - La/Lu$ [13] сравнительной оценки глубины и масштабов плавления протолитов: IAB – базальты активных континентальных окраин и островных дуг; в–д – диаграммы $La/Yb - Zr/Nb$, $Nb/Y - Zr/Y$ [14] и $Ce/Nb - Th/Nb$ геохимических индикаторов источников вулканитов: OIB – внутриплитные континентальные и океанические базальты, E-MORB – базальты срединно-океанических хребтов (обогащенных редкими литофильными элементами); PM – примитивная мантия, N-MORB – базальты срединно-океанических хребтов (деплетированных), DMM – деплетированная мантия MORB, REC – рециклинговый компонент, EM2 – обогащенная мантия с высоким Rb/Sr, UC – верхняя кора, EN – литосферная мантия, DM – деплетированная мантия, DEP – глубоко-деплетированная мантия, ARC – поле составов вулканитов островных дуг, OPB – базальты океанического плато; е – $Th/Yb - Ta/Yb$ [15]: OIA – островные дуги, ACM – активные континентальные окраины, WPVZ – внутриплитные вулканические зоны, WPB – зона составов внутриплитных базальтов

Заключение

Комплекс морфотектонических, петролого-геохимических и изотопно-геохронологических исследований Растайского грабена позволяет отметить ключевые характеристики его структурной эволюции и оценить параметры проявления щелочно-базитового магматизма в Кузнецко-Алатауской щелочно-мафитовой провинции.

Формирование грабена связано с девонской плюм-рифтогенной активизацией унаследованных глубинных зон и ростом регионального свода в северо-восточной части Кузнецкого Алатау, контролировавших проявление базальтового вулканоплутонизма. В обстановке присводового растяжения оживлялись субмеридиональные проницаемые зоны грабена, осложненные поперечными и диагональными нарушениями, служившие каналами поступления магм и формирования вулканотектонических, а затем вулканоплутонических морфоструктур грабена.

В вулканотектонических морфоструктурах накапливались ритмично построенные разрезы лав, с образованием слабо дифференцированных субщелочных базальтов; дифференцированных щелочных базальтоидов, а также фойдитов, затем снова субщелочных базальтов. Петрографически и петрохимически субщелочные, щелочные и фойдитовые вулканиды коррелируются с базырской и берешской свитами Горячегорского плато.

В качестве исходных расплавов рассматриваются трахипикробазальты и пикробазальты, формировавшиеся под воздействием тепла плюма и его флюидов, которые взаимодействовали с гетерогенной литосферной мантией и земной корой. Кроме вещества плюма и шпинель-гранатового лерцолита (протолита) с 3% объемом его плавления, геохимически в составе вулканидов зафиксировано вещество PM, EM2, E-MORB, IAB, земной коры (BCC и ACC) при доминанте OIB.

Установленная минерагеническая специализация вулканидов грабена открывает перспективы выявления коренного баритополиметаллического, редкоземельно-радиоактивного и висмут-золото-серебряного оруденения.

Работа выполнена с использованием оборудования Томского регионального центра коллективного пользования ТГУ.

Список литературы

1. Гринёв О.М. О механизме формирования грабеновых структур северной части Кузнецкого Алатау // Вопросы геологии Сибири. Томск: Издательство Томского университета. 1994. С. 237–259.

2. Воронцов А.А., Гринёв О.М., Ярмолюк В.В., Никифоров А.В. Девонская трахитобазальт-фонотефрит-ийолит-тефритофолит-трахитовая ассоциация Урюп-Семёновского ареала Минусинского прогиба: геологическое строение, геохимические и Sr-Nd изотопные характеристики // Современные направления развития геохимии. 2022. С. 118–122.

3. Воронцов А.А., Ярмолюк В.В. Геохимические и изотопные (O, Sr, Nd) свидетельства взаимодействия мантийных и коровых магм при формировании базальт-андезит-трахит-риолитовой серии Батеневского поднятия Минусинского прогиба // Геосферные исследования. Томск. 2017. № 1. С. 16–27. DOI: 10.17223/25421379/2/3.

4. Гринёв О.М. Эволюция щелочно-габброидного магматизма Кузнецкого Алатау: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 1990. 18 с.

5. Grinev O.M., Grinev R.O., Adylbaev R.R., Bogorodov A.A. O. Saralinsky graben-devonian rift of the Kuznetsk-Minusinsk zone, Altai-Sayan folded area // Geological Tour of Devonian and Ordovician Magmatism of Kuznetsk Alatau and Minusinsk basin. Altay-Sayan Region, Siberia. 2020. P. 43–77. DOI: 10.1007/978-3-030-29559-2_3.

6. Ernst R.E., Rodygin S.A., Grinev O.M. Age correlation of Large Igneous Provinces with Devonian biotic crises // Global and Planetary Change. 2020. Vol. 185. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.103097.

7. Кузьмин М., Ярмолюк В., Кравчинский В. Глубинная геодинамика – основной механизм развития Земли // Наука в России. 2013. № 6. С. 10–19.

8. Воронцов А.А., Перфилова О.Ю., Крук Н.Н., Тарасюк А.С. Позднеордовикский вулканизм северной части Алтае-Саянской области и его геодинамическая природа: научное издание // Доклады Академии наук. М., 2019. Т. 485. № 4. С. 457–463. DOI: 10.31857/S0869-56524854457-463.

9. Vorontsov A.A., Perfilova O.Y., Kruk N.N. Geodynamic setting, structure, and composition of continuous trachybasalt-trachyandesite-rhyolite series in the north of Altai-Sayan area: the role of crust-mantle interaction in continental magma formation // Russian geology and geophysics. 2018. T. 59. № 12. P. 1640–1659. DOI: 10.1016/j.rgg.2018.12.009.

10. Ветров Е.В., Уваров А.Н., Андреева Е.С., Ветрова Н.И., Жимулёв Ф.И., Степанов А.С., Вишневецкая И.А., Червяковская М.В. Среднепалеозойский магматизм Центрально-Тувинского прогиба (Восточная часть Алтае-Саянской складчатой области): петрогенезис, тектоника и геодинамика // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 12. С. 1607–1629. DOI: 10.15372/GiG2021187.

11. Воронцов А.А., Перфилова О.Ю., Буслов М.М., Травин А.В., Махлаев М.Л., Дриль С.И., Катраевская Я.И. Плюмовый магматизм северо-восточной части Алтае-Саянской области: этапы, состав источников, геодинамика (на примере Минусинского прогиба) // Доклады академии наук. 2017. Т. 472, № 4. С. 449–455. DOI: 10.7868/S0869565217040223.

12. Bi J.H., Ge W.C., Yang H., Zhao G.C., Xu W.L., Wang Z.H. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Dongfanghong gabbroic complex at the eastern margin of the Jiamusi Massif, NE China: Petrogenesis and tectonic implications // Lithos. 2015. Vol. 234/235. P. 27–46. DOI: 10.1016/j.lithos.2015.07.015.

13. Boyce J.A., Nicholls I.A., Keays R.R., Hayman P.C. Variation in parental magmas of Mt Rouse, a

complex polymagmatic monogenetic volcano in the basaltic intraplate Newer Volcanics Province, southeast Australia // Contr. Miner. Petrol. 2015. Vol. 169, Is. 11. 21 p. DOI: 10.1007/s00410-015-1106-y.

14. Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. Vol. 79. P. 491–504. DOI: 10.1016/j.lithos.2004.09.014.

15. Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust // Treatise on Geochemistry, Elsevier Ltd. 2003. Vol. 3. P. 593–659. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03035-8.