

УДК 551.211:552.323

П.Л. Тихомиров¹**КРУПНЕЙШИЕ ФАНЕРОЗОЙСКИЕ ПРОВИНЦИИ КРЕМНЕКИСЛОГО ВУЛКАНИЗМА: ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ²**

В статье приведен краткий обзор крупнейших фанерозойских вулканических провинций Земли, включающих значительные объемы (сотни тысяч кубических километров) кремнекислых вулканитов. Предложено выделить эти провинции в особый геодинамический класс, сочетающий приуроченность к активным окраинам с масштабами крупнейших внутриплитных вулканических провинций. В качестве важного фактора, контролирующего масштаб коровой магмогенерации и играющего существенную роль при формировании крупных областей кремнекислого вулканизма, рассматривается остаточная тепловая энергия предшествующих магматических событий.

Ключевые слова: кремнекислый вулканизм, LIP, андерплейтинг, коровый петрогенез.

This article briefly describes the largest Phanerozoic volcanic provinces of the Earth, which comprise the substantial volumes (over 10^5 km³) of silicic extrusive rocks. The provinces of this kind may represent a separate geodynamic class, which combines the volume of largest intraplate volcanic provinces with the subduction-related nature. Thermal energy, preserved in the crust after a previous major magmatic event, is considered to be an important factor which controls the crustal petrogenesis and the formation of large provinces of silicic volcanism.

Key words: silicic volcanism, LIP, underplating, crustal petrogenesis.

Введение. Согласно современным представлениям, в магматических процессах Земли мантийные источники задействованы в гораздо большей степени, нежели коровые. Однако в некоторых, в том числе крупных, вулканических провинциях большая часть разреза представлена кремнекислыми вулканитами, которые интерпретируются как производные континентальной коры [Hildreth, Moorbath, 1988; Bryan et al., 2002]. Как известно, кристаллизационное фракционирование базальтовых магм способно произвести кислые расплавы, но в объеме, резко подчиненном объему исходных базитовых магм. Поэтому принято считать, что в петрогенезе больших объемов кислых вулканитов (от десятков тысяч кубических километров) коровый материал играет ведущую роль. Наиболее популярные модели рассматривают частичное плавление коровых источников при воздействии высокотемпературных базитовых расплавов [Hildreth, Moorbath, 1988; Bryan et al., 2002], а также длительную контаминацию постепенно кристаллизующихся мантийных магм [Riley et al., 2001].

Попытка глобального обобщения данных о крупных провинциях кремнекислого вулканизма предпринята С.Е. Брайаном с соавторами [Bryan et al., 2002; Bryan, Ernst, 2008]. Вулканические области, по размеру сопоставимые с трапповыми и прочими крупными внутриплитными вулканическими провинциями (LIP), но характеризующиеся преобладанием

риолитовых и дацитовых игнимбритов над прочими вулканитами, предложено рассматривать как подтип крупных магматических провинций — SLIP (silicic large igneous provinces). Сформулированы критерии выделения таких провинций, включающие площадные, объемные и возрастные параметры (площадь свыше 10^5 км², объем свыше 10^5 км³ и время формирования до 50 млн лет), а также минимальную долю кислых вулканитов (75% от общего объема изверженного материала). В фанерозойском интервале отмечено всего четыре провинции, удовлетворяющие всем критериям SLIP (рис. 1, таблица): Кеннеди–Коннорс–Обурн (северо-восток Австралии, средний карбон–ранняя пермь), Чон Айке (Патагония и Антарктический п-ов, средняя–поздняя юра), Уитсанди (Восточная Австралия, ранний мел) и Западная Сьерра-Мадре (Мексика, эоцен–миоцен). В качестве благоприятной геодинамической обстановки указывается обстановка растяжения, связанного либо с расколом континента, либо с задуговым рифтингом. Здесь определение SLIP из работы [Bryan et al., 2002] приходит в противоречие с общим определением LIP, подчеркивающим внутриплитную природу их вулканизма и, таким образом, исключаящим генетическую связь с субдукционными обстановками [Coffin, Eldholm, 1992; Bryan, Ernst, 2008]. Расположение всех четырех указанных SLIP вблизи активных континентальных окраин, а также присутствие в составе их фундамента палеозойско-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, доцент, e-mail: tiho@geol.msu.ru

² Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-05-01197-а) и ФЦП «Ведущие научные школы» (грант НШ-841.2008.5).

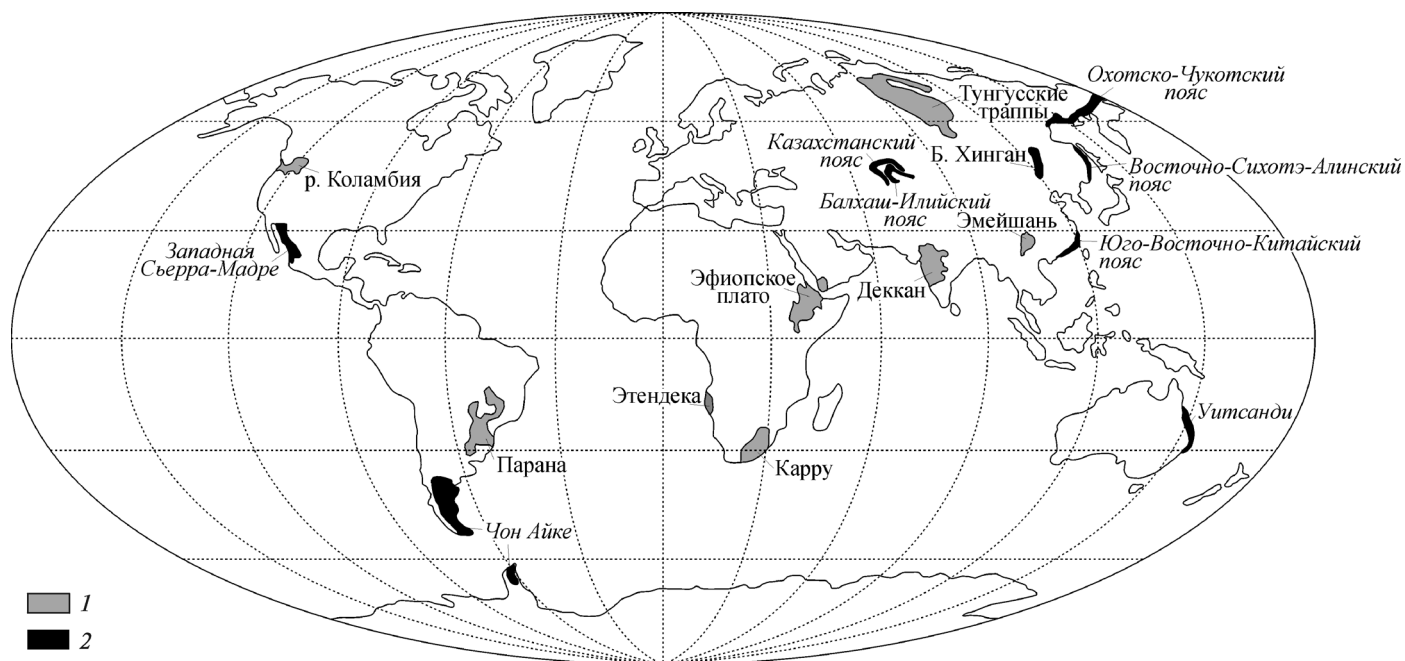


Рис. 1. Расположение крупнейших фанерозойских вулканических провинций континентов, по [Bryan et al., 2002], с изменениями и дополнениями: 1 — мафические LIP; 2 — SLIP

мезозойских субдукционных комплексов оставляют сомнения в абсолютном превосходстве внутриплитных процессов как главных причин формирования магматических провинций этого типа.

Крупные фанерозойские провинции кремнекислого вулканизма Азии. *Общая характеристика: тектонические обстановки, возраст и объем вулканитов.* Более объективному взгляду на проблему происхождения

крупных областей кремнекислого вулканизма способствует привлечение материалов по геологии Азии, вероятно, не попавших в поле зрения авторов обзора SLIP [Bryan et al., 2002]. Здесь известно 6 вулканоплутонических поясов, по объему сопоставимых с крупнейшими вулканическими провинциями Земли и включающих значительные объемы кислых вулканитов: 1) Казахстанский девонский (ранний–поздний

Краткая характеристика крупнейших фанерозойских провинций кремнекислого вулканизма

№ п/п	Название вулканической провинции	Протяженность, км	Площадь, тыс. км ²	Объем, тыс. км ³	Доля кислых вулканитов, %	Время начала и окончания формирования, млн лет	Источник
1	Казахстанский пояс	2100	350*	1004*	57	408–377	Бахтеев, 1987
2	Балхаш-Илийский пояс	1700	275	1200* 350**	45–70	360–250	Бахтеев, 1987; Сейтмуратова, 2002
3	Пояс Большого Хингана	1000	100	≥200	≥50	147–113	Wang et al., 2006; Zhang et al., 2008
4	Юго-Восточно-Китайский пояс	1000	90	>2000	90	146–87	Zhou et al., 2006; Сахно, Акинин, 2008; Тихоокеанская..., 1991
5	Охотско-Чукотский пояс	3200	500	>1043	30–40	106–74	Котляр и др., 1981; Tikhomirov et al., 2008; Мишин и др., 2008
6	Восточно-Сихотэ-Алинский пояс	1400	100	>600	70	90–56	Тихоокеанская..., 1991; Сахно, Акинин, 2008
7	Кеннеди–Коннорс–Обурн	1900	н/д	>500	≥75	320–280	Pankhurst et al., 2000; Bryan et al., 2008; Bryan, Ernst, 2008
8	Чон Айке	3000	>100	>230		188–153	
9	Уитсанди	2500	>500	>2200***		132–95	
10	Западная Сьерра-Мадре	2000	>450	>390		38–20	

Примечания. В некоторых приведенных источниках нет описания процедуры подсчета объемов вулканических провинций, а указан лишь конечный результат, что снижает корректность сопоставления. * — Оценки включают предполагаемый объем эродированных вулканических комплексов; ** — без вулканитов фамен–раннекаменноугольного возраста; *** — в оценку включен объем осадочных комплексов (> 2 млн км³), предположительно представляющих переотложенный вулканогенный материал данной провинции.

девон), 2) Балхаш-Илийский (карбон—пермь), 3) пояс Большого Хингана (поздняя юра—ранний мел), 4) Юго-Восточно-Китайский (ранний—поздний мел), 5) Охотско-Чукотский (альб—сенон) и 6) Восточно-Сихотэ-Алинский (сеноман—палеоцен). Данные о возрасте и объеме этих провинций отражены в таблице вместе с соответствующими характеристиками наиболее известных LIP фанерозоя. Ниже приведено краткое обсуждение опубликованной информации о геологии и геодинамике каждой из этих провинций.

1. *Казахстанский девонский пояс* расположен в зоне, пограничной между эпикаледонским Казахстано-Тянь-Шанским массивом и герцинской Джунгаро-Балхашской складчатой системой. Происхождение этой геоструктуры принято связывать с субдукцией океанической литосферы Джунгаро-Балхашского океанического бассейна под недавно сформированный континентальный блок [Зоненшайн и др., 1990]. Основание пояса включает блоки с докембрийской корой, а также разнообразные террейны, связанные с раннепалеозойскими зонами перехода континент—океан [Дегтярев, 1999]. Угловое несогласие в основании разреза Казахстанского пояса местами отчетливое, местами практически отсутствует. Наиболее поздние проявления островодужного вулканизма в структурах основания Казахстанского пояса датированы ранним силуром [Бахтеев, 1987], а наиболее молодые гранитоидные батолиты — поздним силуром. Становление последних опережает начало формирования самого пояса не более чем на 10 млн лет.

2. *Балхаш-Илийский пояс* расположен на территории Джунгаро-Балхашской складчатой системы герцинской консолидации. В современной геологической структуре палеозой Центральной Азии он выглядит «вложенным» в Казахстанский пояс и также имеет подковообразную форму. В фундаменте пояса доминируют герцинские (тельбесские и саурские) комплексы, но на некоторых участках позднепалеозойские вулканы налегают на более древние структуры байкальской и каледонской эпох [Бахтеев, 1987]. Пауза в магматической активности, предшествовавшая заложению вулканического пояса, не превышает 5 млн лет. Формирование Балхаш-Илийского пояса охватывает весьма продолжительный интервал, включающий каменноугольный и пермский периоды (360—290 млн лет), а также, возможно, часть фаменского века позднего девона. Однако следы резкого изменения палеогеографической обстановки, состава вулканических пород, а также имеющиеся внутренние несогласия дают основания для вывода о пространственном совмещении в пределах данного пояса как минимум трех разновозрастных вулканических провинций [Тевелев, 2003]: фаменско-раннекаменноугольной (островодужной), визе—позднекаменноугольной (окраинно-континентальной) и пермской (внутриконтинентальной), каждая из которых включает сотни

тысяч кубических километров вулканических пород. Согласно геодинамическим реконструкциям, две первые провинции имеют субдукционную природу, а последняя, пермская, сформирована уже после закрытия океанического бассейна и, таким образом, является областью посторогенного (субсеквентного) вулканизма.

3. *Пояс Большого Хингана* наложен на герциниды Южно-Монгольской складчатой системы, входящей в состав восточной ветви Урало-Монгольского подвижного пояса. В публикациях зарубежных авторов комплексы фундамента этой вулканической провинции отнесены к Монгольскому орогенному поясу [Zhang et al., 2008]. На северо-западе вулканы Большого Хингана перекрывают докембрийский Керулен-Аргунский массив, неоднократно активизировавшийся в палеозое. На всем протяжении вулканического пояса из-под вулканических фрагментарно обнажаются слабометаморфизованные палеозойские осадочные и вулканогенно-осадочные породы, обильно интродуцированные гранитоидами. Широкое распространение батолитов триас—юрского возраста указывает на относительно короткую, не более 15 млн лет, паузу между формированием провинции Большого Хингана и последним предшествующим крупным магматическим событием. Формирование провинции Большого Хингана последовало за среднеюрской коллизией Сибирского и Северо-Китайского континентов [Tomurtoogoo et al., 2005]. Отмечено, что позднемезозойский вулканизм проявлялся на фоне общего растяжения — в частности, это выразилось в развитии многочисленных грабенообразных структур северо-восточного простирания на территории современных Забайкалья и Восточной Монголии. Вопрос о природе этого вулканического пояса остается дискуссионным. Рассматриваются версии субдукционного и плюмового происхождения пояса Большого Хингана, его связи с постколлизийным гравитационным коллапсом или с даламинацией нижней континентальной коры. Обзор этих гипотез приведен в работе [Zhang et al., 2008].

4. Вулканы *Юго-Восточно-Китайского пояса* распространены на территории Южно-Китайской (Катазийской) тектонической провинции, обрамляющей с юго-востока Южно-Китайский кратон. Континентальная кора здесь сформировалась в раннем протерозое и рифее [Chen, Jahn, 1998], а в триасе подверглась тектонотермальной переработке, сопровождавшейся становлением гранитоидных батолитов. После магматической паузы, примерно соответствующей раннеюрской эпохе (205—180 млн лет), Катазийский блок вновь испытал активизацию. В последовавшем магматическом событии принято выделять три фазы: средне-позднеюрскую, раннемеловую и позднемеловую [Zhou et al., 2006]. Средней и поздней юрой датированы гранитоидные батолиты, образующие огромный, шириной до 400 км, пояс в восточной части Катазийской тектонической провинции. Выявлены разновозрастные с этими плутонами

вулканические комплексы (базальтоиды и шошони-ты), распространенные на площади немногим более 1 тыс км². Формирование существенно кремнекислого Юго-Восточно-Китайского вулканического пояса началось после средне-позднеюрского магматического импульса, практически без перерыва [Zhou et al., 2006]. Позднемезозойский магматизм Катазийского блока принято связывать с субдукцией литосферы Палеоокеана под Китайский континент, а также с процессами задугового и внутридугового рифтинга [Zhou et al., 2006; Jiang et al., 2009].

5. *Охотско-Чукотский пояс* расположен в краевой зоне Верхояно-Чукотской области мезозойской, вблизи границы с аккреционной кайнозойской Корякско-Камчатской областью. Фундамент вулканического пояса включает кратонные блоки с архейско-протерозойской корой и множество палеозойских и мезозойских террейнов континентального, океанического и переходного типов, в различное время аккрецированных к окраине Сибирского континента [Парфенов, 1984]. Тыловая зона пояса с резким азимутальным несогласием перекрывает структуры мезозойской Верхояно-Чукотской области, а фронтальная зона наследует активную окраину Палеоокеана, на которой в поздней юре и неокоеме был активен Удско-Мургаляский вулканический пояс, рассматриваемый как предшественник Охотско-Чукотского, но отличающийся значительной долей субаквальных вулканитов и преобладанием пород среднего-основного состава [Парфенов, 1984; Sokolov et al., 2009]. Комплексы Удско-Мургаляского и Охотско-Чукотского поясов разделены несогласием. Пауза в магматической активности приходится на апт и ранний альб, т.е. составляет примерно 15 млн лет. Однако в структурах фундамента Охотско-Чукотского пояса отмечены следы магматических событий, опережающих начало формирования самого пояса всего на 6 млн лет [Тихомиров и др., 2009]. В геодинамическом аспекте принято рассматривать этот вулканический пояс как провинцию андийского типа, сформировавшуюся над зоной субдукции плит Палеоокеана под окраину Сибирского континента [Парфенов, 1984].

6. *Восточно-Сихотэ-Алинский пояс* расположен на восточную часть позднемезозойской Сихотэ-Алинской складчатой системы. Фундамент, как и у большинства рассматриваемых вулканических поясов, неоднородный и включает комплексы с возрастом от протерозоя до мела, с преобладанием мезозойских. В центральной и восточной зонах Сихотэ-Алинской системы широко распространены раннемеловые гранитоиды. Самые поздние из них (гранитоиды татибинской серии) датированы интервалом 105–85 млн лет [Тихоокеанская..., 1991], что накладывается на предполагаемый интервал формирования Восточно-Сихотэ-Алинского пояса (таблица). Следовательно, эпоха активного вулканизма последовала практически без перерыва за магматическим событием, сопровождавшимся плавлением коры. Считается, что

Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс сформировался в обстановке косоугольной субдукции, сочетающейся окраинно-континентальным вулканизмом со сдвиговыми деформациями [Парфенов, 1984; Ханчук, 2000].

Из сказанного выше и из данных таблицы можно заключить, что один из шести перечисленных вулканических поясов Азии (Юго-Восточно-Китайский) по объему и составу полностью соответствует критериям SLIP [Bryan et al., 2002; Bryan, Ernst, 2008]. Остальные пять вулканических областей при общем объеме вулканитов, не уступающем таковому типичных LIP, отличаются несколько меньшей долей кремнекислых пород (от 30–40 до 70%, при пороговом значении в 75% для «признанных» SLIP). Тем не менее по этому параметру рассматриваемые пояса гораздо ближе к SLIP, чем к обычным, базитовым вулканическим провинциям, где объемная доля кислых изверженных пород не превышает 5% [Bryan et al., 2002]. Отметим также, что отдельные сегменты азиатских вулканических поясов, имеющие протяженность в сотни километров, содержат свыше 75% кислых вулканитов при общем объеме в сотни тысяч кубических километров, и в случае полной эрозии прочих сегментов полностью соответствовали бы определению SLIP, сформулированному С.Е. Брайаном с соавторами.

Продолжительность вулканической активности большинства вулканических провинций Азии, перечисленных в таблице, укладывается в 50 млн лет — рамки, предложенные в качестве граничного значения для LIP [Bryan, Ernst, 2008]. В двух случаях (Балхашско-Илийский и Юго-Восточно-Китайский пояса) активный вулканизм имел место на протяжении более длительного времени, но в обеих этих провинциях выявлены следы совмещения нескольких вулканических событий (рис. 2). По меньшей мере одно из этих событий привело к формированию магматической провинции, соответствующей всем временным и объемным характеристикам SLIP.

Геология и геохимия крупных провинций кремнекислого вулканизма: общие особенности. При значительной пространственной разобщенности крупных провинций кремнекислого вулканизма и их принадлежности к разным складчатым областям и даже к разным подвижным поясам некоторые особенности их строения, расположения в общей региональной структуре и состава пород являются общими.

1. Все крупные фанерозойские провинции кислого вулканизма сформированы в активных зонах перехода континент—океан, относящихся к Тихоокеанскому и Урало-Монгольскому подвижным поясам, или во внутриконтинентальных областях в непосредственной близости (первые сотни километров) от активных окраин (рис. 1). Вулканиты налагают на сравнительно молодую континентальную кору, подвергавшуюся плавлению незадолго до начала формирования SLIP (таблица, рис. 2). Этот признак отличает все провинции данного типа от базитовых LIP, как

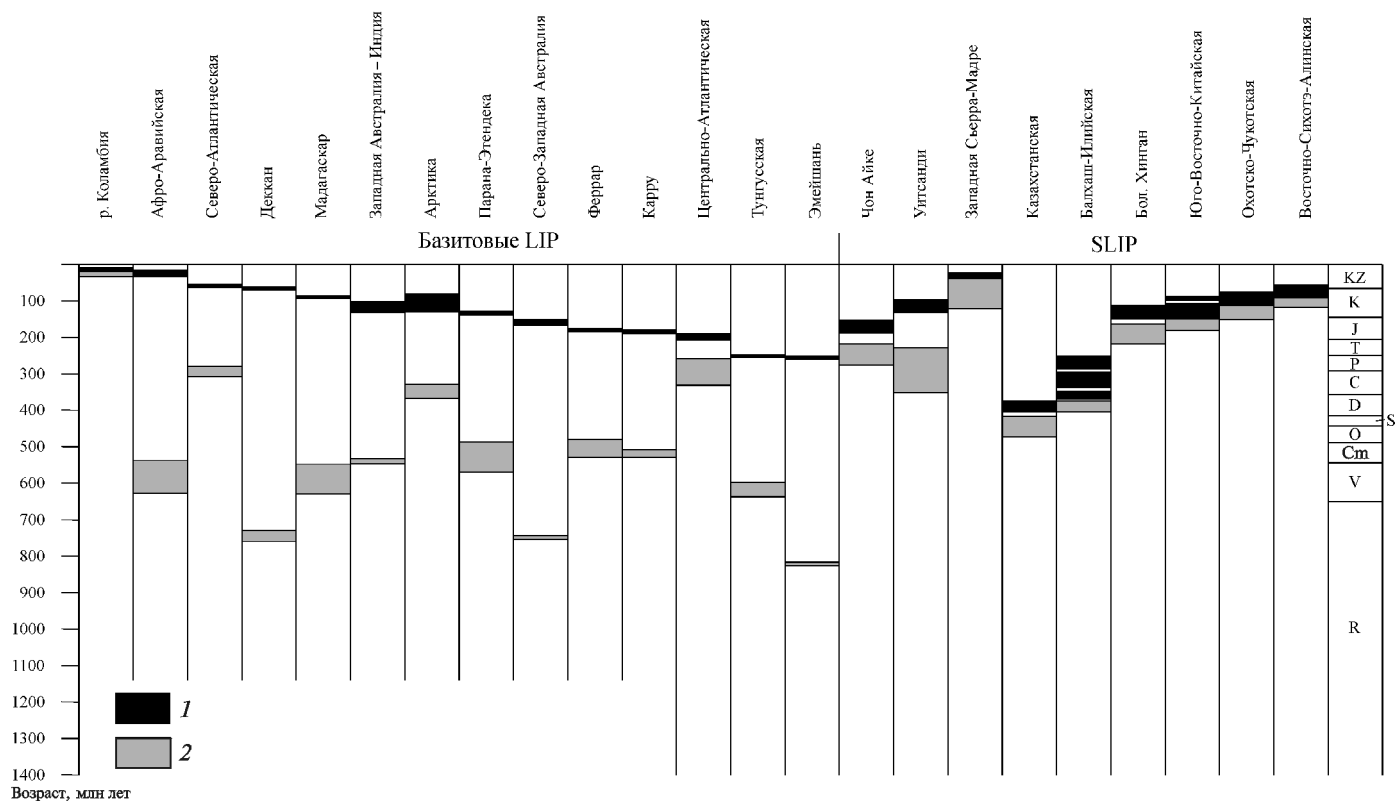


Рис. 2. Возраст крупнейших фанерозойских вулканических провинций Земли в сопоставлении с возрастом последних магматических событий, предшествовавших их заложению (по [Bryan, Ernst, 2008], с изменениями и дополнениями): 1 — временной интервал формирования LIP; 2 — временной интервал последнего магматического события, предшествовавшего формированию LIP. Источники данных — см. таблицу. Для Балхаш-Илийской и Юго-Восточно-Китайской вулканических провинций показан возраст главных магматических импульсов

правило, сформированных на древнем архейско-протерозойском фундаменте [Bryan et al., 2002].

2. Наиболее распространенные элементы разреза крупных областей кремнекислого вулканизма — игнимбритовые потоки и обширные покровы. Нередко вулканизм сопровождается развитием кальдер. Широко распространены гранитоидные плутоны, комагматичные с вулканитами; их доля от общей площади вулканического пояса во многом определяется уровнем эрозионного среза.

3. Обобщенные разрезы большинства указанных провинций имеют трехчленное строение. Нижние вулканогенные стратоны могут содержать значительную долю вулканитов среднего-основного состава («нижние андезиты»), в середине разреза доминируют кислые вулканиты (при переменном соотношении дацитов и риолитов), а для завершающих стадий вулканизма характерны излияния базитов («верхние базальты»), иногда чередующиеся с извержениями кислых магм. Структурно-вещественные характеристики пород нередко могут быть весьма изменчивы по латерали, что затрудняет расчленение и корреляцию разрезов, а также корректное выделение стратонов.

4. Данные прецизионной геохронологии (SHRIMP U–Pb даты по цирконам и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ даты по фракциям санидина, амфибола и биотита) позволяют выявить эпизодический характер формирования SLIP, с чередованием периодов весьма активных

извержений и относительного затишья [Wang et al., 2006; Bryan, Ernst, 2008; Tikhomirov et al., 2008]. К сожалению, для выводов о динамике большинства рассматриваемых геоструктур надежных датировок пока недостаточно.

5. Породам SLIP, независимо от кремнекислотности, свойственно совмещение геохимических признаков надсубдукционных и внутриплитных образований. К первым относятся широкое распространение известково-щелочных серий с Ta–Nb-минимумом, Pb-максимумом и повышенным отношением LILE/HFSE, ко вторым — повышенные значения $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ и $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ и общее обогащение несовместимыми литофильными элементами. Признаки, типичные для внутриплитных магматитов, усиливаются вверх по разрезу и максимальны у «верхних базальтов». Отмечена также пространственная связь вулканитов повышенной щелочности с блоками относительно мощной и древней континентальной коры, вплоть до формирования щелочных серий.

Наличие общих геологических и геохимических характеристик у крупнейших провинций кремнекислого вулканизма (как признанных SLIP, так и шести вулканических поясов Азии) подтверждает корректность их объединения в один класс. Автор не склонен настаивать на включении всех шести перечисленных выше азиатских вулканических поясов в глобальный список SLIP, поскольку в двух из шести рассмотрен-

ных провинций доля кремнекислых вулканитов составляет менее половины. Однако очевиден плавный переход от типичных SLIP к областям, сложенным вулканитами кислого и среднего состава в сопоставимых долях. Приведенные факты указывают на то, что подобные геоструктуры, несмотря на вариации их объема, возраста и среднего состава пород, могут формироваться под влиянием сходных процессов.

Геодинамическая позиция крупных провинций кремнекислого вулканизма. Определения LIP (включая провинции кремнекислого вулканизма) подчеркивают их генетическую связь с внутриплитными процессами. Например, вулканизм провинции Чон Айке рассмотрен с связи с расколом Гондваны и формированием траппов Карру, провинции Уитсанди — с континентальным рифтингом, также имеющим отношение к расколу Гондваны, а области Западной Сьерра-Мадре — с задуговым растяжением [Bryan, Ernst, 2008]. Однако включение в группу SLIP вулканических провинций Центральной и Восточной Азии, описанных выше, дает основания для пересмотра этих взглядов. Четыре вулканических пояса Азии — Казахстанский, Охотско-Чукотский, Восточно-Сихотэ-Алинский и Юго-Восточно-Китайский — принято рассматривать в качестве вулканических дуг андийского типа, т.е. типичных надсубдукционных образований [Парфенов, 1984; Зоненшайн и др., 1990; Jiang et al., 2009]. Каменноугольные комплексы Балхаш-Илийского пояса также отнесены к проявлениям субдукционного вулканизма [Филиппова и др., 2001; Тевелев, 2003], но для более поздних пермских вулканитов этой же провинции обычная субдукционная модель не годится, поскольку в начале перми прекратил существование соответствующий океанический бассейн [Зоненшайн и др., 1990]. Альтернативные модели связывают пермский вулканизм Балхаш-Илийского пояса с деламинацией литосферного слэба, последовавшей за закрытием океана [Тевелев, 2003]. Наконец, вулканическая область Большого Хингана, согласно существующим палеотектоническим реконструкциям, на момент формирования находилась слишком далеко от окраины континента, чтобы считать ее надсубдукционной. При всем разнообразии мнений в последнее время наиболее популярна модель, связывающая вулканизм Большого Хингана с деламинацией нижней коры восточной части Азии [Zhang et al., 2008].

Из сказанного следует, что попытку исключить влияние субдукционных процессов на формирование подобных провинций следует признать несостоятельной: очевидна генетическая связь с субдукционными системами как минимум половины рассматриваемых вулканических областей, а остальные сформированы в относительной близости от действующих активных окраин, что тоже вряд ли случайно. Налицо противоречие между общим определением крупных магматических провинций (LIP), акцентирующим их внутриплитное происхождение [Coffin, Eldholm,

1992; Bryan, Ernst, 2008], и генетической связью по меньшей мере части SLIP с конвергентными границами плит. В этой ситуации придется либо исключить SLIP из списка LIP (если оставить внутриплитное происхождение в числе обязательных для LIP условий), либо признать возможность генетической связи LIP с субдукционными системами, и разделять LIP на классы в соответствии с их геодинамической позицией. Нетрудно заметить существование постепенного перехода от SLIP к обычным, существенно андезитовым поясам андийского типа: последние тоже могут включать немалые объемы (десятки тысяч кубических километров) кремнекислых вулканитов [Hildreth, Moorbath, 1988]. Вместе с тем прямая связь SLIP с субдукционными магматическими системами наблюдается не всегда, и очевидно, что сама по себе обстановка окраинно-континентального пояса не является условием, достаточным для формирования SLIP. Вопросы генезиса крупных провинций кремнекислого вулканизма обсуждаются в следующем разделе.

Факторы, способствующие формированию SLIP.

Как отмечено выше, генерация значительных объемов кислых магм требует вовлечения в петрогенез вещества континентальной коры. В надсубдукционных обстановках плавление корового протолита индуцируется высокотемпературными базальтовыми магмами, которые поднимаются из мантии и задерживаются у основания коры вследствие относительно невысокой плотности последней (явление андерплейтинга). Плавлению подвергается главным образом материал нижней коры, непосредственно контактирующей с базитовыми магмами [Hildreth, Moorbath, 1988], но допускается и магомгенерация на уровне средней и верхней коры. В качестве главного фактора, способствующего появлению аномального количества кислых магм, С.Е. Брайан с соавторами [2002] указывают повышенное содержание воды в коровом протолите, что в свою очередь обусловлено дегазацией субдуцирующего слэба и относительно водных мантийных магм, зарождающихся в области мантийного клина. Это объяснение представляется вполне логичным, если учесть, что все SLIP наложены на комплексы фанерозойских зон субдукции. Однако детали строения вулканических поясов Евразии, включенных в список крупнейших провинций кислого вулканизма, дают основания для выделения еще одного генетического фактора, возможно, более важного, чем состав протолита, — термической истории фундамента вулканических провинций.

Как видно из диаграммы, показанной на рис. 2, временной интервал между событием, породившим крупную вулканическую провинцию, и последним магматическим событием, выявленным в структурах фундамента этой провинции, резко различен для SLIP и базитовых LIP. Для первых он не превышает 100 млн лет, а в подавляющем большинстве случаев — 20 млн лет (разрыв в 100 млн лет установлен

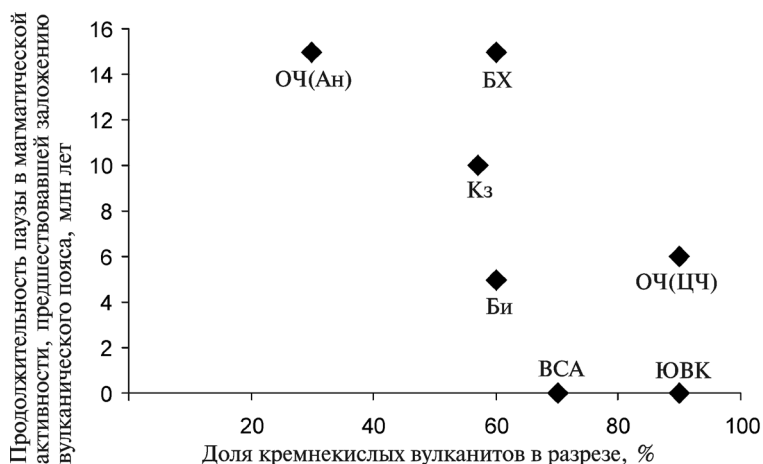


Рис. 3. Зависимость доли кремнекислых вулканитов в разрезах крупных фанерозойских вулканических поясов Евразии от продолжительности магматической паузы, предшествовавшей началу формирования этих поясов.

Пояснения см. в тексте.

Вулканические пояса: Кз — Казахстанский, БИ — Балхаш-Илийский, БХ — хр. Большой Хинган, ЮВК — Юго-Восточно-Китайский, ОЧ (Ан) — Охотско-Чукотский (Анадырский сегмент), ОЧ (ЦЧ) — Охотско-Чукотский (Центрально-Чукотский сегмент), ВСА — Восточно-Сихотэ-Алиньский; источники данных — см. таблицу

для раннемеловой провинции Уитсанди, большей частью скрытой водами Кораллового и Тасманова морей; возможно, фундамент этой вулканической области включает и более молодые магматические породы). Существенно базитовые трапповые провинции формировались, как правило, после более долгого перерыва в магматической активности. Для 12 из 14 мезозойско-кайнозойских LIP период довулканического затишья длился от 200 до 650 млн лет, и лишь две вулканические области (р. Коламбия и Центральной Атлантики) нарушают эту закономерность.

Некоторые детали строения рассмотренных выше вулканических поясов Азии представляют дополнительные доказательства значения «унаследованной» тепловой энергии в формировании крупных очагов кислых магм:

- из трех сегментов (звеньев) Казахстанского пояса наибольшая доля кислых вулканитов отмечена в северо-восточном звене [Бахтеев, 1987]. Именно эта часть вулканического пояса наложена на Чингизский мегантиклинорий, завершивший развитие в силуре, позже всех прочих структур фундамента;

- из трех эпох вулканической активности Балхаш-Илийского пояса (рис. 2) наиболее высокое среднее содержание SiO_2 отличает изверженные породы второй и третьей эпох [Тевелев, 2003], отвечающих времени максимального разогрева коры;

- согласно новым данным прецизионной геохронологии Охотско-Чукотского пояса [Tikhomirov et al., 2008; Мишин и др., 2008], в альбе здесь накапливались преимущественно толщи «нижних андезитов». И лишь на одном участке получены альбские даты для мощных, свыше 1 км, однородных толщ кислых вулканитов — там, где Охотско-Чукотский пояс пересекается с другим вулканическим поясом, Тытыль-

веемским, завершившим развитие в апте, всего за 6 млн лет до заложения Охотско-Чукотской провинции [Тихомиров и др., 2009].

На рис. 3 оценки доли кислых вулканитов в разрезах шести азиатских SLIP коррелируют с продолжительностью магматической паузы, предшествующей формированию вулканической области (для Охотско-Чукотского пояса приведены оценки для двух его смежных сегментов — Анадырского и Центрально-Чукотского). При всей неточности используемых данных корреляция вполне определенная.

Резонным представляется вопрос, почему базитовые магмы, будучи источником тепла при плавлении корового протолита и, согласно расчетам, превосходя коровые магмы по объему [Bergantz, 1989], относительно бедно представлены среди изверженных продуктов SLIP. Наиболее правдоподобное объяснение [Bryan et al., 2002] указывает на экранирующее воздействие обширной зоны частичного плавления в коре (рис. 4). Утрата веществом континентальной коры способности к хрупким

деформациям приводит к тому, что транспортировка относительно плотных базитовых магм к поверхности по трещинам—магмоводам будет серьезно затруднена. При этом увеличение объема андерплейтинга стимулирует дальнейшее плавление коры с соответствующим усилением экранирующего эффекта.

Поскольку в процессе андерплейтинга базальтовые магмы способны распространяться вдоль зон с высоким плотностным градиентом (как правило, вдоль основания коры) на сотни километров [Saunders et al., 2007], области плавления коры и связанные с ними ареалы кремнекислого вулканизма могут смещаться в глубь континента относительно позиции обычных надсубдукционных поясов (рис. 4). Можно допустить, что именно с этим явлением связаны проблемы реконструкции позиции палеозон Беньюфа для некоторых из рассмотренных вулканических поясов, например, для Охотско-Чукотского. Сохраняется принципиальная возможность формирования SLIP без непосредственной связи с субдукционными процессами — в том случае, если объем андерплейтинга, достаточный для выплавления сотен тысяч кубических километров коровых магм, будет обеспечен без участия магм субдукционного генезиса. Подобный сценарий мог иметь место при формировании провинции Большого Хингана, если следовать версии о деламинации субконтинентальной литосферы Северо-Китайского кратона в позднем мезозое [Zhang et al., 2008].

Обсуждаемые в статье процессы представляют лишь некоторые стороны общей модели формирования SLIP. Корректное решение вопроса о происхождении крупных провинций кремнекислого вулканизма предполагает оценку влияния состава протолита, в частности, содержания воды в породах

нижней коры. Но в силу объективных причин данные о составе нижнекоревых комплексов пока еще сравнительно скудны. Возможно, определенного прогресса в решении этой проблемы можно достичь, используя методы численного моделирования.

Выводы. 1. Рассмотренные вулканические пояса Центральной и Восточной Азии имеют объемные, вещественные и временные характеристики, отвечающие таковым крупных провинций кремнекислого вулканизма (SLIP) или приближающиеся к ним настолько, что представляется целесообразным выделить подобные провинции в особый класс.

2. Вулканизм, по масштабу не уступающий вулканизму LIP, не ограничивается внутриплитными обстановками, и в ряде случаев обнаруживает связь с субдукционными системами.

3. От обычных поясов андийского типа, помимо объема и состава, большинство SLIP отличаются расположением в дальних тылах активных окраин. Возможная причина этого явления — латеральное распространение базитовых магм, скапливающихся у основания мощной и относительно малоплотной континентальной коры и являющихся главным источником тепловой энергии, стимулирующей коровой петрогенез.

4. Продолжительность магматической паузы между формированием крупной магматической провинции и предшествующим значимым магматическим событием составляет 0–20 млн лет для большинства SLIP и от 200 до 650 млн лет (т.е. на 1–2 порядка больше) для большинства крупных континентальных базитовых провинций. Доля кремнекислых вулканитов в разных сегментах некоторых вулканических поясов также обнаруживает зависимость от термической истории фундамента: чем короче перерыв в магматической активности, тем большие объемы коры

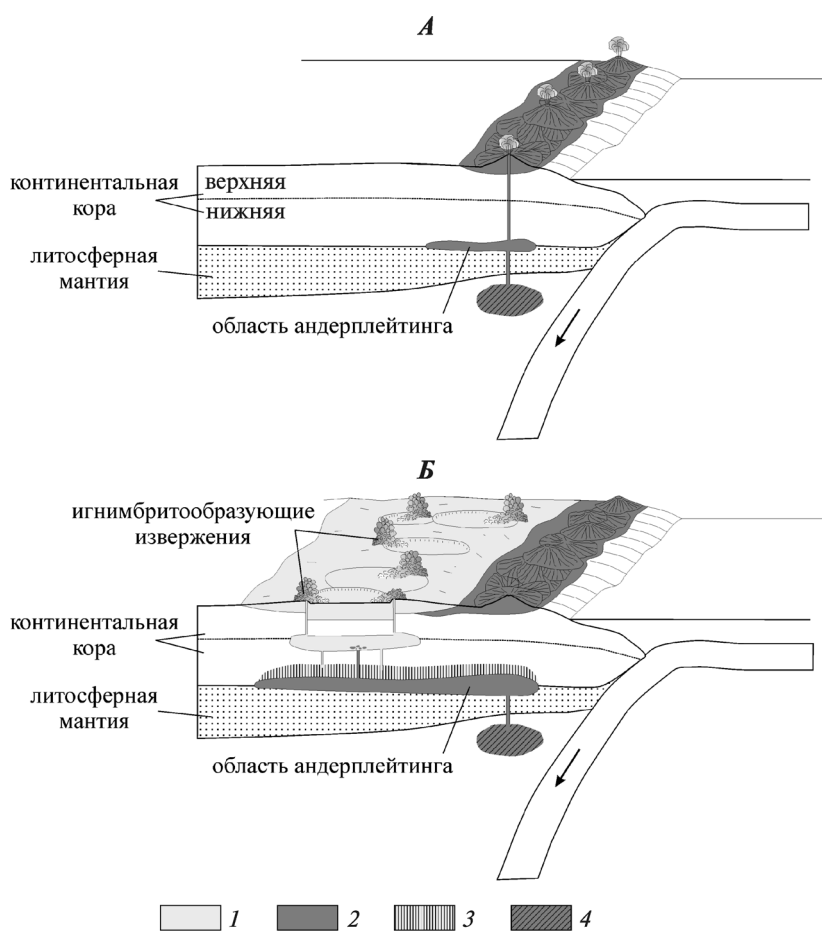


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая механизм формирования крупной области кремнекислого вулканизма. На ранней стадии (А) активен вулканический пояс андийского типа с преобладанием изверженных пород среднего и основного состава. Впоследствии (Б) расширение объема андерплейтинга и прогрессирующий разогрев континентальной коры приводят к частичному плавлению ее нижней части. Область корового плавления, достигнув определенных размеров, препятствует подъему базитовых магм при сохранении возможности смешения производных коры и мантии. Поверхности достигают главным образом магмы существенно корового происхождения, извергающиеся с высокой эксплозивностью; широкое распространение малоглубинных промежуточных камер приводит к образованию кальдер.

1 — магмы и вулканиты кислого состава; 2 — магмы и вулканиты среднего–основного состава; 3, 4 — области магмогенерации в коре и мантии соответственно

участвуют в петрогенезе. Из этого следует, что одной из причин формирования SLIP является тепловая энергия, сохранившаяся в коре после предшествующего магматического события.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бахтеев М.К. Палеозойские орогенные вулканоплутонические пояса. М.: Недра, 1987. 168 с.
 Дегтярев К.Е. Тектоническая эволюция раннепалеозойской активной окраины в Казахстане. М.: Наука, 1999. 123 с.
 Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М. Тектоника литосферных плит на территории СССР. Кн. 1. М.: Недра, 1990. 326 с.
 Котляр И.Н., Белый В.Ф., Милов А.П. Петрохимия магматических формаций Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. М.: Наука, 1981. 223 с.
 Мишин Л.Ф., Акинин В.В., Мишин Е.Л. Новые данные о возрасте магматических пород западного сектора Охотско-

Чукотского вулканогенного пояса // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 5. С. 12–24.

Парфенов Л.М. Континентальные окраины и островные дуги мезозой северо-востока Азии. Новосибирск: Наука, 1984. 192 с.

Сахно В.Г., Акинин В.В. Первые данные U–Pb датирования вулканических пород Восточно-Сихотэ-Алинского пояса // Докл. РАН. 2008. Т. 418, № 2. С. 226–231.

Сейтмуратова Э.Ю. Позднепалеозойские вулканогенные и вулканогенно-осадочные формации Жонгаро-Балхашской складчатой области (стратиграфия, геолого-петрологические особенности). Алма-Ата, 2002. 254 с.

Тевелев Ал.В. Средне-позднепалеозойское развитие Урало-Казахстанской складчатой системы: Автореф. докт. дис. М., 2003. 48 с.

Тихомиров П.Л., Калинина Е.А., Кобаяши К., Накамура Э. Тытыльвеевский вулканоплутонический пояс — раннемеловая магматическая провинция Северо-Восточной Азии // Геология полярных областей Земли: Мат-лы 42-го Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2009. Т. 2. С. 239–241.

Тихоокеанская окраина Азии. Магматизм / Под ред. С.С. Зинина, И.Н. Говорова, В.Г. Сахно. М.: Наука, 1991. 262 с.

Филиппова И.Б., Буш В.А., Диденко А.Н. Среднепалеозойские субдукционные пояса — ведущий фактор формирования структуры Центрально-Азиатского покровно-складчатого пояса // Российский журн. наук о Земле. 2001. Т. 3, № 6. С. 18–36.

Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 5–34.

Bergantz G.W. Underplating and partial melting: implications for melt generation and extraction // Science. 1989. Vol. 245. P. 1093–1095.

Bryan S.E., Ernst R.E. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs) // Earth. Sci. Rev. 2008. Vol. 86. P. 175–202.

Bryan S.E., Ferrari L., Reiners P.W. et al. New Insights into Crustal Contributions to Large-volume Rhyolite Generation in the Mid-Tertiary Sierra Madre Occidental Province, Mexico, Revealed by U–Pb Geochronology // J. of Petrology. 2008. Vol. 49. P. 47–77.

Bryan S.E., Riley T.R., Jerram D.A. et al. Silicic volcanism: an under-valued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins // Magmatic Rifted Margins / Geol. Soc. of America. Spec. Pap. 2002. Vol. 362. P. 99–118.

Chen J.F., Jahn B.M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence // Tectonophysics. 1998. Vol. 284. P. 101–133.

Coffin M.F., Eldholm O. Volcanism and continental break-up: A global compilation of large igneous provinces // Magmatism and the causes of continental break-up. Geol. Soc. [London] Spec. Publ. 1992. Vol. 68. P. 17–30.

Hildreth W. S., Moor bath S. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile // Contrib. Mineral. Petrol. 1988. Vol. 98. P. 455–499.

Jiang Y.-H., Jiang S.-Y., Dai B.-Z. et al. Middle to late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan province, southeast China: Implications for a continental arc to rifting // Lithos. 2009. Vol. 107. P. 185–204.

Pankhurst R.J., Riley T.R., Fanning C.M., Kelley S.P. Episodic Silicic Volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of Magmatism Associated with the Break-up of Gondwana // J. Petrol. 2000. Vol. 41. P. 605–625.

Riley T.R., Leat P.T., Pankhurst R.J., Harris C. Origins of large volume rhyolitic volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by crustal melting // J. Petrol. 2001. Vol. 42. P. 1043–1065.

Saunders A.D., Jones S.M., Morgan L.A. et al. Regional uplift associated with continental large igneous provinces: The roles of mantle plumes and the lithosphere // Chem. Geology. 2007. Vol. 241. P. 282–318.

Sokolov S.D., Bondarenko G.Y., Khudoley A.K. et al. Tectonic reconstruction of Uda-Murgal arc and the Late Jurassic and Early Cretaceous convergent margin of Northeast Asia–Northwest Pacific // Geology and tectonic origins of northeast Russia: A Tribute to Leonid Parfenov. Stephan Mueller Spec. Publ. Ser. 4. 2009. P. 273–288.

Tikhomirov P.L., Kalinina E.A., Kobayashi K. et al. The volcanic flare-ups in silicic large igneous provinces: data from the Okhotsk-Chukotka belt, NE Russia // The COE-21 Intern. Symp. MISASA-III «Origin, Evolution and Dynamics of the Earth». Japan, Misasa, 2008. P.151–152.

Tomurtogoo O., Windley B.F., Kroner A. et al. Zircon age and occurrence of the Adaatsag ophiolite and Murov shear zone, central Mongolia: constraints on the evolution of the Mongol–Okhotsk ocean, suture and orogen // J. Geol. Soc. London. 2005. Vol. 162. P. 125–134.

Wang F., Zhou X.H., Zhang L.C. et al. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): timing and implications for the dynamic setting of NE Asia // Earth Planet. Sci. Lett. 2006. Vol. 251. P. 179–198.

Zhang J.H., Ge W.C., Wu F.Y. et al. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, Northeastern China // Lithos. 2008. Vol. 102. P. 138–157.

Zhou X., Sun T., Shen W. et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution // Episodes. 2006. Vol. 29, N 1. P. 26–33.

Поступила в редакцию
20.10.2009