

НОВЕЙШИЙ ВУЛКАНИЗМ И ЕГО СВЯЗЬ С ПРОЦЕССАМИ МЕЖПЛИТНОГО ЛИТОСФЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКОЙ

В.И. Коваленко, В.В. Ярмолюк, О.А. Богатиков

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 35, Россия

Представлены результаты анализа пространственного распределения новейшего (менее 2 млн лет) вулканизма Земли, связи его с эволюцией современного суперконтинента Северная Пангея и пространственным распределением горячих точек мантии. Новейший вулканизм проявлен в Евразии, Северной и Южной Америке, Гренландии, Атлантике, Арктике, Африке, Индийском и Тихом океанах. Различают вулканизм: срединно-океанических хребтов (СОХ); субдукционный островных дуг и активных континентальных окраин (ОД + АКО); зон континентальной коллизии (КК); внутриплитный (ВП), связанный с горячими точками мантии, континентальными рифтами, трансконтинентальными поясами. Континентальный вулканизм явно связан с эволюцией современного суперконтинента, названного нами Северной Пангеей, объединяющей Евразию, Северную и Южную Америку, Индию, Австралию и Африку. Суперконтинент характеризуется крупными размерами и преобладающей континентальной корой. Геодинамическая позиция и новейший вулканизм Северной Пангеи определяется двумя разнонаправленными процессами: субдукцией литосферных плит со стороны Тихого океана, со стороны Индии, Аравийского полуострова и Африки, вызывающей консолидацию Северной Пангеи, и спредингом океанических плит со стороны Атлантики, приводящим к расклиниванию суперконтинента с изменением его формы по сравнению с Вегенеровской Пангеей и к интервенции атлантического геодинамического режима в Арктику. Продолжительная устойчивая субдукция литосферных плит под Евразию, а также под Северную Америку не только способствовала интенсивному вулканизму ОД+АКО, но и привела к накоплению холодного литосферного материала в глубокой мантии северной части Северной Пангеи, замещению им горячей глубинной мантии и отжатию последней к краям суперконтинента, а затем подъему этого материала вверх в виде мантийных плюмов (источников ВП базитовых магм), являющихся восходящими ветвями глобальной мантийной конвекции, а также восходящими потоками второстепенных конвективных систем, приуроченных к конвергентным границам плит. Распад Вегенеровской Пангеи произошел под воздействием расширяющегося Африканского суперплюма, захватившего сначала Центральную Атлантику, затем южные ее области и Индийский океан и последовательно развивавшегося в сторону Арктики. Плюмовый (ВП) магматизм Евразии и Северной Америки сопровождался поверхностным коллизионным или субдукционным магматизмом, а в Атлантике, Арктике, Индийском и Тихом океанах глубинный плюмовый магматизм (базиты повышенной щелочности) сопровождался поверхностным спрединговым магматизмом (толеитовые базальты).

Вулканизм, мантийные плюмы, суперконтиненты, субдукция, коллизия.

RECENT VOLCANISM IN RELATION TO PLATE INTERACTION AND DEEP-LEVEL GEODYNAMICS

V.I. Kovalenko, V.V. Yarmolyuk, and O.A. Bogatikov

The spatial distribution of recent (under 2 Ma) volcanism has been studied in relation to mantle hotspots and the evolution of the present-day supercontinent which we named Northern Pangea. Recent volcanism is observed in Eurasia, North and South America, Africa, Greenland, the Arctic, and the Atlantic, Indian, and Pacific Oceans. Several types of volcanism are distinguished: mid-ocean ridge (MOR) volcanism; subduction volcanism of island arcs and active continental margins (IA + ACM); continental collision (CC) volcanism; intraplate (IP) volcanism related to mantle hotspots, continental rifts, and transcontinental belts. Continental volcanism is obviously related to the evolution of Northern Pangea, which comprises Eurasia, North and South America, India, Australia, and Africa. The supercontinent is large, with predominant continental crust. The geodynamic setting and recent volcanism of Northern Pangea are determined by two opposite processes. On one hand, subduction from the Pacific Ocean, India, the Arabian Peninsula, and Africa consolidates the supercontinent. On the other hand, the spreading of oceanic plates from the Atlantic splits Northern Pangea, changes its shape as compared with Wegener's Pangea, and causes the Atlantic geodynamics to spread to the Arctic. The long-lasting steady subduction beneath Eurasia and North America favored intense IA + ACM volcanism. Also, it caused cold lithosphere to accumulate in the deep mantle in northern Northern Pangea and replace the hot deep mantle, which was pressed to the supercontinental margins. Later on, this mantle rose as plumes (IP mafic magma sources), which were the ascending currents of global mantle convection and minor convection systems at convergent plate boundaries. Wegener's Pangea broke up because of the African superplume, which occupied

consecutively the Central Atlantic, the South Atlantic, and the Indian Ocean and expanded toward the Arctic. Intraplate plume magmatism in Eurasia and North America was accompanied by surface collisional or subduction magmatism. In the Atlantic, Arctic, Indian, and Pacific Oceans, deep-level plume magmatism (high-alkali mafic rocks) was accompanied by surface spreading magmatism (tholeiitic basalts).

Volcanism, mantle plumes, supercontinents, subduction, collision

ВВЕДЕНИЕ

Главной задачей данной работы является анализ пространственного распределения новейшего вулканизма Земли с упором на его Северное полушарие, связи его с эволюцией современного суперконтинента Северная Пангея и горячими точками мантии. Статья подготовлена нами в рамках программы Президиума РАН № 16, направление 2: «Вулканизм и окружающая среда в условиях изменяющегося климата: вулканические катастрофы, вулканически-активные области и особенности рационального природопользования в их пределах», проект «Неовулканические области России в условиях изменяющегося климата: вулканические катастрофы, источники магм, интенсивность и периодичность извержений, геодинамика вулканизма». Частично эта задача была выполнена нами ранее для Северной Евразии [Коваленко и др., 2008, 2009а,б,в]. Однако при этом выяснилось, что закономерности пространственного распространения новейшего вулканизма Северной Евразии тесно увязаны с некоторыми глобальными процессами, по крайней мере, всего Северного полушария Земли, в связи с чем и возникла тема данной статьи. Почему такой интерес вызывает именно территория Северного полушария Земли? Расположенные в нем Евразия, Северная Америка с участием Южной Америки и всей Африки представляет собой современный суперконтинент, названный нами Северной Пангеей, геологическая и геодинамическая эволюция которого в мезозойско-кайнозойское время привела не только к проявлению интенсивного вулканизма, но и к глобальным процессам изменения всего лика Земли. Мы рассмотрим вопросы образования этого суперконтинента, его роли в распределении новейшего вулканизма, а также связи с горячими точками мантии.

СОВРЕМЕННЫЙ СУПЕРКОНТИНЕНТ СЕВЕРНАЯ ПАНГЕЯ, ЕГО ЭВОЛЮЦИЯ И ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ

Обоснование суперконтинентального статуса современной группировки континентов Земли зависит от определения понятия «суперконтинент». Строгого определения этого понятия в доступной нам литературе мы не нашли. Обычно суперконтинентами называют пространственно объединенные (сближенные между собой) ассоциации континентов, отличающиеся от обычных континентов только размерами. По-видимому, такое понимание термина «суперконтинент» принимается и в последней работе по взаимодействию суперконтинентов и суперплюмов [Li, Zhang, 2009]. Если это верно, то все свойства континентов, кроме их размеров, сохраняются и в суперконтинентах. Очевидно, что главным свойством таких глобальных структурных элементов Земли является наличие в них преобладающей континентальной коры. В геологической истории Земли наиболее обосновано появление таких суперконтинентов, как позднепротерозойская Родиния [Dalziel, 1991; Haernle et al., 1995], раннепалеозойская Гондвана [Meert, van der Voo, 1997; Poweel, 2001; Collins, Pisarewsky, 2005] и уже упоминавшаяся позднепалеозойская Пангея [Wegener, 1966; Scotese, 2004]. Если считать, что последним по времени суперконтинентом на Земле была Пангея, выделенная А. Вегенером [Wegener, 1966] и называемая нами далее Вегенеровской Пангеей, которая на границе палеозоя и мезозоя объединяла почти все главные континенты того геологического времени, то следовало бы ввести еще одно ограничение в термин «суперконтинент»: именно объединение большей части континентов, но не обязательно всех. Это следует из того, что в состав Вегенеровской Пангеи, по данным [Scotese, 1997, 2004], не входили континенты Амурия, Северный и Южный Китай, Малайзия и другие более мелкие континентальные блоки, отделенные от Пангеи океанами Тетис, Палеотетис, Палеоазиатский (рис. 1). Размеры континентальных ассоциаций рассматриваются как важнейшие характеристики суперконтинентов в упоминавшемся выше обзоре З.Х. Ли и С. Зонга [Li, Zhong, 2009], в связи с чем Гондвану они отличают от Родинии и Пангеи как более мелкий суперконтинент от более крупных «настоящих» суперконтинентов.

В современной структуре литосферной оболочки Земли значительные фрагменты Вегенеровской Пангеи оказались пространственно сближенными между собой. Это относится к совокупности материков (рис. 2), объединяющей Евразию, Северную и Южную Америку, Индию и Африку. К этой части Пангеи примыкает также Австралия. И лишь только Антарктида обособлена от этого скопления материков. На вопрос, можно ли пространственно сближенные остатки Вегенеровской Пангеи, в основном расположенные в Северном полушарии Земли, отнести к современному суперконтиненту, ответ лежит в первую очередь в геологической структуре континентальных блоков Северного полушария Земли и осо-

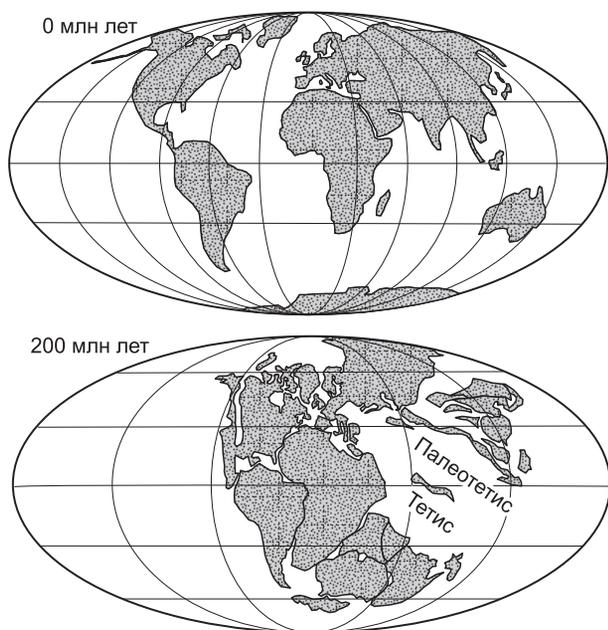


Рис. 1. Распределение материков на современной поверхности Земли (0 млн лет) и в строении Пангеи (200 млн лет назад), по [Scotese, 1997].

бенно Арктики [Граumberг и др., 2001; Пущаровский, 2002; Богданов, 2004; Глебовский и др., 2006; Иванов, Калининский, 2008; Шипилов, 2008], поскольку даже упомянутые выше континентальные блоки Амурия, Северный и Южный Китай и другие, не входившие в структуру Вегенеровской Пангеи, сомкнулись в настоящее время с Евразией. В эпоху образования и эволюции Вегенеровской Пангеи место Северного Ледовитого океана занимал обширный мелководный континентальный бассейн с многочисленными островами, разделенными рифтами с широким проявлением траппового вулканизма [Богданов, 2004]. Единственным морским бассейном с океанической корой, разделявшим Евразийскую и Северо-Американскую плиты и соединявшимся с Тихим океаном, было Южно-Анжуйское

море, литосфера которого была субдцирована под Восточную Евразию в раннем мелу и от которого осталась только Южно-Анжуйская сутурная зона [Богданов, 2004]. Следовательно, ответ на поставленный выше вопрос может быть только положительным, поскольку современная агрегация континентов ничем (кроме формы или очертаний) принципиальным не отличается от Вегенеровской Пангеи. По форме этот современный суперконтинент в отличие от Вегенеровской Пангеи образует вытянутую в субмеридиональном направлении группировку континентов, протягивающуюся от Северного полюса до Южного тропика и с центром в Северном полушарии Земли. В дальнейшем этот суперконтинент мы условно будем называть Северной Пангеей, хотя он содержит гондванские фрагменты и Южного полушария — Южную Америку, часть Африки, Австралию.

Пространственное распределение континентальной и океанической коры в полярной области показано на рис. 2, 3. Несомненно, что континентальная кора здесь преобладает. Океаническая кора занимает ограниченную площадь, возможно, в районах Канадской котловины (океаническая кора здесь сформировалась в мелу [Богданов, 2004] и Евразийского бассейна (см. рис. 2), являющегося арктическим продолжением Атлантического океана. Евразийский бассейн открылся в палеоцене около 53 млн л.н., когда начался спрединг в хр. Гаккеля [Глебовский и др., 2006]. С этого момента возник Северный Ледовитый океан [Граumberг, 2001]. В связи со сказанным континентальную область Северного полушария Земли можно рассматривать как практически сохранившуюся северную часть Вегенеровской Пангеи, разрушаемую со стороны Атлантики («экспансия» Атлантики в Арктику, по образному выражению Ю.М. Пущаровского с соавторами [1999, 2002] и Э.В. Шипилова [2008]). Однако возникновение Атлантики и океанической коры в Арктике лишь изменило форму и общий облик суперконтинента Северной Пангеи (см. рис. 2, 3), так как в результате раздела Евразии и Америки в районе Атлантики эти материки объединились в районе Чукотки и Аляски, да и сам Северный Ледовитый океан в большей своей части по современным представлениям относится к континентальным образованиям.

Преобладающей континентальной корой характеризуются и другие морские бассейны в пределах Северной Пангеи: Средиземноморье (кроме западной его части), Черное море и северная часть Каспийского моря, моря между Чукоткой и Аляской. Поэтому Северная Пангея сохраняет все признаки суперконтинента.

Эти данные в целом позволяют говорить, что формирование суперконтинента Северная Пангея определяется двумя разнонаправленными геодинамическими процессами: субдукцией литосферных плит с востока (со стороны Тихого океана), с юга (со стороны Индии и Аравийского полуострова) и с юго-запада (со стороны Средиземноморья), вызывающей консолидацию суперконтинента, и спредингом океанических плит со стороны Атлантики, приводящим к расклиниванию Северной Пангеи. Для арктической части последней субдукционные процессы не характерны, и геодинамика ее активных областей ближе к процессам локального растяжения.

Сравнивая геодинамику континентов Северного и Южного полушарий Земли, мы должны сделать вывод о слабом проявлении процессов даже локального растяжения в северной части Северной Пангеи по сравнению с ее южной частью при эволюции от позднего палеозоя до современности (см. рис. 1), особенно если учесть преобладающий континентальный характер современного Северного Ледовитого

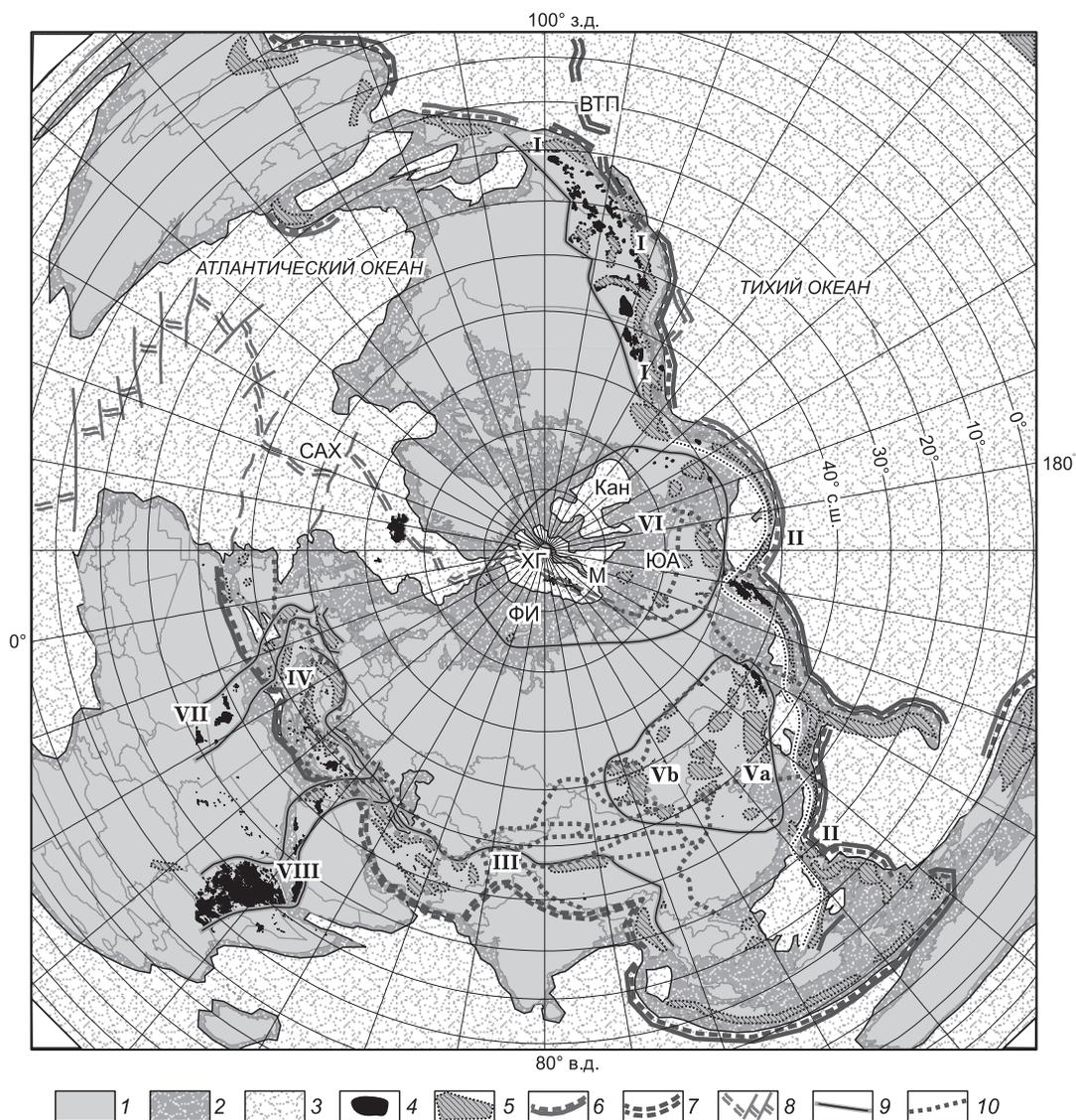


Рис. 2. Схема распределения континентов и областей современного магматизма в Северном полушарии Земли.

1, 2 — континентальные плиты: 1 — собственно континенты, 2 — континентальный шельф; 3 — океанические плиты; 4 — поля современного вулканизма; 5 — области развития вулканических полей внемасштабных размеров; 6 — конвергентные границы плит; 7 — коллизионные границы плит; 8 — дивергентные границы (спрединговые хребты); 9 — границы вулканических провинций; 10 — границы микроплит. Кан — Канадская впадина, М — впадина Макарова, ХГ — Евразийский бассейн и спрединговый хр. Гаккеля, ФИ — острова Франца Иосифа, ЮА — Южно-Ануйская сutura, САХ — Срединно-Атлантический хребет и связанный с ним вулканизм, ВТП — Восточно-Тихоокеанское поднятие и связанный с ним вулканизм. Римскими цифрами показаны главные провинции новейшего вулканизма: I — Западно-Североамериканская с комплексной ассоциацией новейшего вулканизма (ВП) и (ОД + АКО); II — Западно-Тихоокеанская субдукционная (ОД + АКО); III, IV — Азиатская и Европейская ветви Альпийско-Гималайского орогенного пояса с комплексной ассоциацией новейшего вулканизма (ВП) и континентальной коллизии (КК); V, VI — провинции внутриплитного магматизма с комплексной ассоциацией новейшего вулканизма (ВП) и (СОХ); V — Восточной и Центральной Азии (субпровинции: Va — Приморская, Vb — Центрально-Азиатская), VI — Северо-Восточная; VII, VIII — транс-континентальные рифтовые пояса с ассоциациями ВП: VII — Центрально-Африканский—Центрально-Европейский (ЦАЦЕ), VIII — Восточно-Африканский—Транскавказский (ВАТК).

океана. В южной части распавшейся Вегенеровской Пангеи за это время не только резко разделились практически все современные континенты (см. рис. 1), но и часть из них успела консолидироваться в структуре Северной Пангеи (Индия, Аравийский микроконтинент), а другая часть (Австралия и Африка) приближается к такой консолидации. В северной части распавшейся Вегенеровской Пангеи только в кайнозое произошло вначале отделение Северной Америки от Европы, а затем на продолжении возникшего САХ через ряд промежуточных структур (хребты Мона, Книповича, Моллой) возник хр. Гаккеля в

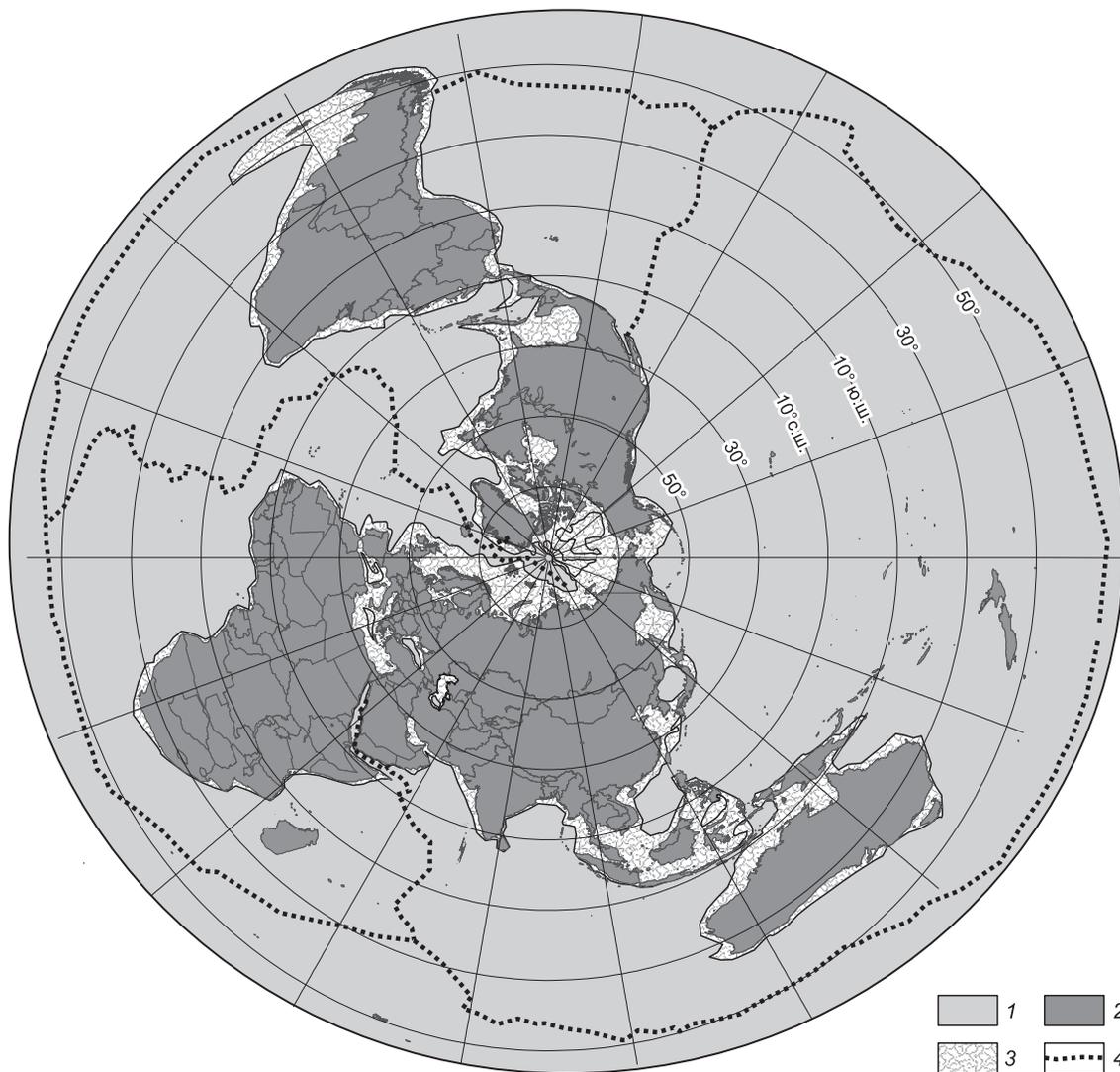


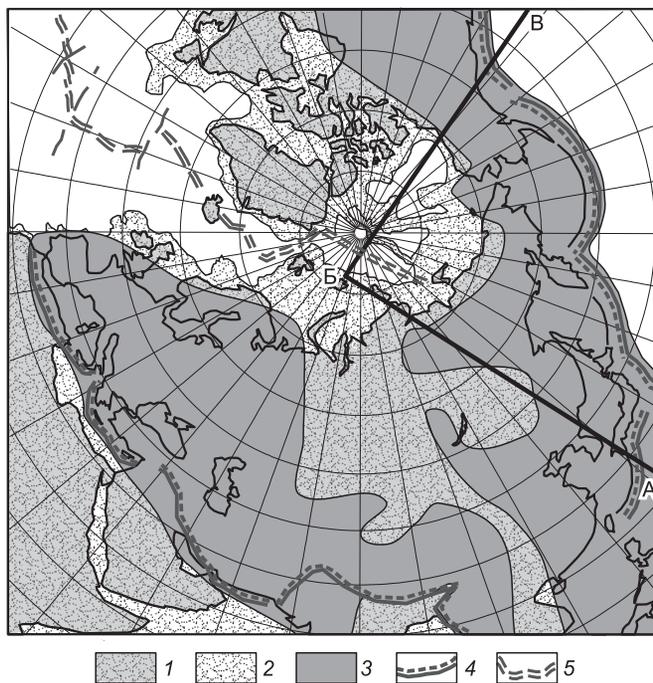
Рис. 3. Современное распределение материков.

Наиболее крупные материи (Евразия, Африка, Северная Америка) образуют композитный суперконтинент, к которому примыкают Австралия и Южная Америка. 1 — океанические плиты, 2, 3 — континенты: 2 — суша, 3 — шельф; 4 — спрединговые хребты.

Северном Ледовитом океане. Но пока имеющиеся эффекты рифтогенеза в Арктике носят скорее локальный, чем глобальный характер. Это, в частности, подчеркивалось в статье [Шипилов, 2008], где указывалось, что рифтогенез и спрединг в Арктике носят незавершенный характер с многочисленными «перескоками» осей спрединга (например, смена осей спрединга в поздней юре—раннем мелу из Канадской впадины в область Лабрадора—Баффина—Макарова, действовавшей до эоцена, затем в современные хребты Мона, Книпповича и Гаккеля). Отличие в геодинамике континентальных блоков Северного и Южного полушарий Земли, видимо, свидетельствует об относительно холодной астеносфере и вообще мантии Северного полушария Земли по сравнению с мантией Южного полушария. В Северном полушарии, как в ловушке, скапливаются литосферные плиты в течение времени от позднего палеозоя до современности и тем самым сохраняют в общих чертах суперконтинентальный характер Северной Пангеи. Эти области, как показано многими исследованиями, располагаются в зонах понижения поверхности геоида. Такой областью в рассматриваемом случае является большая часть суперконтинента Северная Пангея, подстилаемая холодной мантией (рис. 4), возникшей, по мнению многих исследователей и авторов статьи, при охлаждении ее более холодными субдуцируемыми слэбами, опускающимися в мантию вплоть до ее границы с ядром. Учитывая пока плохо изученную сейсмическую структуру глубинной мантии в Арктике, нельзя исключать, что такая холодная мантия подстилает всю территорию Северной

Рис. 4. Распространение высокоскоростной «холодной» мантии в переходной зоне (на глубине ~600 км) Северной Евразии, по [Mauryama, 1994; Mauryama et al., 2007]. Вид с Северного полюса.

1, 2 — континентальные плиты: 1 — собственно континенты, 2 — континентальный шельф; 3 — холодная (высокоскоростная) мантия, 4 — конвергентные границы плит, 5 — дивергентные границы плит (спрединговые хребты). А—Б—В — линия разреза, по которому построена схема на рис. 8.



Пангеи. В этом случае незавершенные процессы рифтогенеза в Арктике, сопровождающиеся спредингом, являются отражением локальных «прорывов» горячей мантии через преобладающую холодную. Такой «прорыв» горячей мантии в Арктику, видимо, имеет глобальные последствия только со стороны Атлантики (см. рис. 1, 2), а возможные остальные «прорывы» горячей мантии «задавливались» субдукцией. Очевидно, этим объясняется, почему формирование Сибирской трапповой провинции не завершилось расколом континента и образованием бассейна с океанической корой, как это типично для других мезокайнозойских трапповых провинций. Скорее всего, Сибирский плюм был также задавлен холодными литосферными плитами, субдуцированными почти со всех сторон Северной Пангеи. Вероятно, из-за глобального сжатия суперконтинента Северная Пангея оказываются низкими скорости спрединга в САХ и ХГ.

В целом в соответствии с представлениями [Mauryama, 1994; Добрецов и др., 2001] кайнозойская история Арктики скорее похожа на последние стадии эволюции суперконтинентов, а сам Северный Ледовитый океан является практически внутриконтинентальным осадочным бассейном, типичным для развитого суперконтинента. Возникновение в его пределах бассейнов с океанической корой и соединение их в начале (в мелу) с Тихим, позднее с Атлантическим (в кайнозое) океанами, разделение Северной Америки и Гренландии — признаки локального распада этого суперконтинента, не приведшего к преобладанию условий растяжения над условиями сжатия. Если учесть, что главной геодинамической тенденцией в Атлантике является растяжение, а по краям Тихого океана — сжатие, то можно говорить о преобладании в Северной Пангее тихоокеанской тенденции над атлантической.

НОВЕЙШИЙ ВУЛКАНИЗМ ЗЕМЛИ И ЕГО СВЯЗЬ С ГЕОДИНАМИКОЙ СУПЕРКОНТИНЕНТА СЕВЕРНАЯ ПАНГЕЯ

Сказанное выше свидетельствует о том, что новейший вулканизм Земли развивался на фоне образования и эволюции суперконтинента Северная Пангея. К областям новейшего вулканизма отнесены территории, в пределах которых вулканическая активность проявлялась в интервале плейстоцена и голоцена (<1.8 млн лет), но с учетом последних изменений тектонического и геодинамического режима проявления вулканизма. Соответственно, на карте новейшего вулканизма Земли (см. рис. 2), являющейся основой представленного в данной статье анализа, отображены вулканические области в первую очередь для последних этапов их активности. Эти этапы существенно отличаются по своей продолжительности для разных вулканических областей, поэтому их возрастной объем также может существенно различаться. Например, на Камчатке современный структурный план проявления вулканизма начал формироваться около 50 тыс. л.н. [Коваленко и др., 2008], и именно вулканизм этого этапа показан на рис. 2. В то же время для внутриплитных областей Центральной Азии геодинамический и тектонический режим вулканизма остается неизменным на протяжении всего позднего кайнозоя (>25 млн лет) и практически нет критериев для разделения их геологической истории на этапы, которые можно было бы связать с принципиальными изменениями в характере вулканической деятельности. Поэтому вулканизм этих областей воспроизведен в объеме всего позднего кайнозоя (см. рис. 2).

Новейший вулканизм проявлен в Евразии, Северной Америке, Гренландии, Атлантике, Арктике, Африке, Индийском и Тихом океанах (см. рис. 2). Проявления вулканизма группируются в пределах подковообразного вулканического мегапояса, одна ветвь которого прослеживается вдоль Тихоокеанской

окраины Северной Америки и востока Азии, а другая — связана с Альпийско-Гималайским орогеническим поясом, отграничивающим территорию Евразии от Африки, Аравийского полуострова, Индостана и Индийского океана. Положение вулканических областей в пределах этого мегапояса в основном определяется связью с литосферными границами конвергентного типа, опоясывающими территории Северо-Американской и Евразийской плит практически со всех сторон, за исключением их Атлантического сегмента, что позволяет определить этот мегапояс как Амеvразийский. В Тихоокеанском секторе мегапояса вулканические области сопряжены с островными дугами (восток Азии) и активными континентальными окраинами (запад Северной Америки), в Альпийско-Гималайском секторе — с зонами коллизии и островными дугами. В обоих случаях субдукционные границы погружаются под континенты в сторону центра, сформированного ими суперконтинента.

Вне Амеvразийского мегапояса выделяются области вулканизма, связанные со спрединговыми зонами Срединно-Атлантического хребта (САХ), срединных хребтов Индийского океана и хр. Гаккеля, и области внутриплитного вулканизма, не связанные с границами литосферных плит (см. рис. 2).

Таким образом, современные вулканические области связаны с обстановками (см. рис. 2): срединно-океанических хребтов (СОХ); островных дуг и активных континентальных окраин (ОД + АКО); зон континентальной коллизии (КК); внутриплитными (ВП), в том числе сопряженными с горячими точками мантии, континентальными рифтами, трансконтинентальными рифтогенными поясами. Нередко эти типы вулканических областей пространственно сближены, в результате чего появляются комбинированные области с постоянным участием ВП: например, СОХ + ВП, (ОД + АКО) + ВП, КК + ВП.

Вулканические области ныне активных СОХ представлены вулканическими проявлениями Срединно-Атлантического хребта, хр. Гаккеля Северного Ледовитого океана, срединно-океанических хребтов Индийского океана, Восточно-Тихоокеанского поднятия (хребта) (см. рис. 2). По САХ, СТП и СОХ Индийского океана имеется огромная литература, насчитывающая тысячи статей и десятки книг. Отметим только, что формирование САХ началось с Центральной Атлантики (170 млн л.н.) и несколько позднее сместилось в Северную Атлантику (70—60 млн л.н.). В отличие от ВТП, являющегося средне- и быстроспрединговым хребтом ($v \approx 10$ см/год), САХ представляет собой медленно спрединговый хребет (1—4.5 см/год). По ХГ сведений намного меньше [Кутинов, 2005; 60 лет..., 2008], он имеет протяженность около 1800 км. Хребет в настоящее время является северным продолжением САХ в глобальной системе срединно-океанических хребтов. Зафиксированная в нем скорость спрединга невысокая (1—1.3 см/год). Однако этот хребет имеет строение, типичное для срединных хребтов. Вдоль континентального обрамления формирующейся в пределах ХГ океанической литосферы на Новосибирских островах, на островах Новая Земля и Шпицберген наблюдаются проявления позднекайнозойского и иногда мелового щелочно-базальтоидного вулканизма, которые, возможно, трассируют границы области рифтогенеза в пределах Евразийского арктического бассейна. Новейший вулканизм, по представлениям некоторых авторов, развит в котловине Макарова [Богданов, 2004] и даже в районе Северного полюса.

Вулканические области (ОД + АКО), формирующиеся над зонами субдукции, представляют Каскадные горы и прилегающие территории на западе Северной Америки, Курильскую, Камчатскую, Алеутскую, Японскую и другие вулканические дуги Восточной и Юго-Восточной Азии [Iwamori, 2007]. Новейший этап их развития определяют вулканы, сформированные, как уже говорилось выше, за последние 40—50 тыс. лет. Среди них выделяются практически все известные морфологические типы вулканов: лавовые плато и вулканические равнины, щитовые вулканы, стратовулканы, кальдеры. Для вулканических продуктов областей этого типа характерны андезиты, хотя общий диапазон составов охватывает все разнообразие пород от базальтов до риолитов и разной фациальной принадлежности (лавы, туфы, игнибриты). Чаще всего вулканические породы относятся к известково-щелочной серии, реже — к толеитовой и субщелочной [Volcanism..., 2007].

Ярким примером вулканических областей зон континентальной коллизии является глобальный Альпийско-Гималайский орогенный пояс, возникший в зоне столкновения Евразийской плиты с Аравийско-Африканской и Индийской плитами. Новейшая вулканическая активность протекала с разной интенсивностью на всем его протяжении от центральных районов Тибета на востоке до Пиренейского полуострова на западе. В строении возникшего вулканического пояса, выделяемого так же, как Тетический пояс, различаются две ветви — Азиатская и Европейская.

Азиатская ветвь (см. рис. 2) объединяет вулканические области, связанные с той частью коллизионного пояса, которая в настоящее время находится внутри азиатского континента, сформировавшись над зоной столкновения и субдукции Аравийской и Индийской плит под Евразийскую [Collins, Pisarevsky, 2005]. Новейшую историю вулканизма в регионе определяют процессы позднеорогенной стадии, начавшиеся главным образом в плиоцене [Милановский, Короновский, 1973; Spies et al., 1983]. С ними связано формирование крупных лавовых плато, щитовых вулканов, стратовулканов, группирующихся в вулканические цепи, согласные с простиранием горных хребтов. Продуктам вулканизма свойственны широкие

вариации состава: от щелочных и известково-щелочных базальтов через андезиты до риолитов. **Европейская ветвь** (см. рис. 2) коллизионного вулканического пояса прослеживается вдоль северного континентального обрамления Средиземного моря и характеризуется связью с зонами субдукции. Обширная литература по этому вулканизму частично приведена в [Коваленко и др., 2008]. Вулканическая деятельность здесь протекала на протяжении большей части кайнозоя [Harangi et al., 2006; Lustrino, Wilson, 2007]. К новейшему этапу ее развития относятся вулканические проявления плиоплейстоцена. Среди вулканических продуктов региона преобладают андезиты, дациты, риолиты, которыми сложены стратовулканы и пирокластические поля. Современная островодужная вулканическая активность в регионе связана преимущественно с Эгейской и Липарской (Эолейской) вулканическими дугами, где наблюдается ряд центральных вулканов, строение последних определяют андезиты, дациты, риолиты и их пирокласты [Harangi et al., 2006]. Особое место в Средиземноморье занимают вулканы группы Везувия с высококальциевыми щелочными вулканическими породами, их связывают с ВП условиями.

ВП вулканические области образуют территориально обособленные группы, как правило, удаленные от литосферных границ. Подробнее о них сказано ниже при характеристике горячих точек мантии, здесь же кратко упомянем только о внутриплитном вулканизме Евразии, пока мало охарактеризованном в литературе. Наиболее крупной является внутриплитная вулканическая **провинция Восточной и Центральной Азии**. В ее строении выделяется ряд пространственно разобщенных и структурно не связанных вулканических ареалов (областей), история становления которых прослеживается, по крайней мере, в интервале последних 30 млн лет [Ярмолюк и др., 1995]. По особенностям строения этих ареалов и составу вулканических ассоциаций выделяются две субпровинции — Приморская и Центрально-Азиатская (см. рис. 2). Для Приморской характерен контроль вулканизма со стороны системы северо-восточных грабенов, прослеживающихся вдоль края континента и определяющих линейный (рифтогенный) характер распределения вулканических полей. Состав вулканических продуктов в основном определяют лавы толеитовых и субщелочных базальтов, а также щелочных базальтоидов, совместно с которыми местами отмечаются трахириолиты, комендиты, пантеллериты и разнообразные нефелин- и лейцитсодержащие породы.

Вулканические области Центрально-Азиатской субпровинции (см. рис. 2) расположены между Сибирской и Китайской и Таримской платформами. С ними сопряжены системы грабенов (рифтов), например, Байкальская, Хубсугульская, Тункинская и др. Однако в целом вулканическая деятельность не была связана с процессами грабенообразования и преимущественно протекала за пределами рифтовых впадин [Ярмолюк и др., 1995]. Состав вулканических продуктов определяют меланефелиниты, базаниты, трахибазальты, трахиандезибазальты. В принципе этот вулканический ареал продолжается в Юго-Восточную Азию вплоть до западной окраины Тихого океана. Отметим наличие вулканов карбонатитов в Афганистане, относящихся также к ВП типу.

Арктическая внутриплитная вулканическая провинция (см. рис. 2) характеризуется, по данным [Пушаровский, 2002], отдельными небольшими проявлениями позднемиоценового—голоценового вулканизма, сформировавшего отдельные лавовые потоки, шлаковые конусы, штоки и дайки меланефелинитов, базанитов и базальтов, рассредоточенными по территории Чукотки и Аляски. Часть из них контролируется границами плит с современной высокой сейсмической активностью, например, Момским грабеном, лежащим на континентальном азиатском продолжении хр. Гаккеля. Другая часть располагается вдали от границ плит.

В особую группу внутриплитных вулканических областей выделены **трансконтинентальные субмеридиональные рифтовые пояса** — Центрально-Африканский—Центрально-Европейский (ЦАЦЕ) и Восточно-Африканский—Транскавказский (ВАТК). Особенностью этих структур стал их секущий характер по отношению к границам литосферных плит (Евразийской, Африканской, Аравийской) и, в частности, по отношению к Тетическому коллизионному вулканическому поясу [Милановский, Короновский, 1973; Ярмолюк и др., 2004]. Пояс ЦАЦЕ (см. рис. 2) трассируется позднекайнозойскими вулканическими полями и грабенами континентальной Европы (грабены и вулканические районы Центрально-Европейской рифтовой системы, в частности, Рейнский грабен) [Lustrino, Wilson, 2007], Средиземноморья (Пантеллерия, Сардиния, Римская провинция) и прослеживается к югу на территорию Северо-Западной Африки (районы Тибести, Джебель-Харудж, Аира и Ахаггара) вплоть до Гвинейского залива. Рифтовый пояс ВАТК (см. рис. 2) простирается от предгорий Кавказа (район Минеральных Вод) до Танзании. В пределах альпийской складчатой системы он фиксируется вулканическими полями Транскавказского поперечного поднятия, в зоне которого в позднем миоцене—антропогене было сформировано свыше половины всего объема позднеорогенных вулканических пород Средиземноморского пояса [Милановский, Короновский, 1973]. Южнее в пределах Аравийского щита пояс трассируется вулканическими полями и грабенами Левантинской системы и грабена Красного моря, а еще южнее переходит в структуры Восточно-Африканской рифтовой системы. Вещественная характеристика перечисленных типов вулканизма

приведена во многих оригинальных публикациях, а также в [Коваленко и др., 2008], где представлен достаточно полный список работ по данной проблеме.

СВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ СУБДУКЦИИ И МАНТИЙНЫХ ПЛЮМОВ (ГОРЯЧИХ ТОЧЕК МАНТИИ)

Выше было рассмотрено весьма вероятное влияние процессов субдукции литосферных плит на сохранность суперконтинента Северная Пангея в течение более чем 200 млн лет. Также было показано, что процессы субдукции через глобальное сжатие и охлаждение мантии погружающимися холодными литосферными плитами могут влиять на активность и «прорывы» горячей мантии, отжимаемой холодными слэбами. Такие «прорывы» горячей мантии фиксируются в виде мантийных плюмов или горячих точек мантии. Отметим, что пространственная связь суперконтинентов и суперплюмов (или пространственно сближенных ассоциаций плюмов по аналогии с понятием «суперконтинент») с запаздыванием образования суперплюмов по сравнению с формированием суперконтинентов принимается авторами самых разных концепций [Li, Zhong, 2009]. Как известно, горячие точки мантии современной Земли были впервые выделены Дж. Уилсоном [Wilson, 1963] и П. Морганом [Morgan, 1971] как проекции на современную земную поверхность струй глубинного горячего материала. С тех пор изучение связанного с ними внутриплитного океанического и континентального магматизма и геодинамики настолько продвинуло развитие этой гипотезы, что привело, с одной стороны, к построению моделей их глубинного строения [Zhao, 2007], а с другой — к фактическому отрицанию их глубинной природы [Anderson, Natland, 2005]. Наиболее выдающимся достижением современной геофизики и геологии является построение видимых изображений мантийных плюмов и погружающихся в глубины мантии вплоть до границы ее с земным ядром литосферных плит на основе глобальной и локальной сейсмической томографии (особенно высокоразрешающей), а также согласование данных сейсмической томографии и поверхностной геологии Земли. Обзор таких работ представлен в [Maruyama, 1994; Li, Zhong, 2009] и многих других публикациях. В данном разделе мы попытаемся обсудить плохо изученную пока задачу — оценку закономерностей пространственного распределения горячих точек Земли и связи их с современными и прошлыми субдукционными процессами и новейшим вулканизмом. Это важно сделать для современных горячих точек, обоснованных сейсмической томографией, после чего выявленные закономерности их пространственного распределения могут быть распространены и на области внутриплитного вулканизма, глубинное строение которых пока не известно. Здесь также важно подчеркнуть, что как субдукция, так и плюмы связаны между собой через процессы глобальной конвекции, представляя разные, соответственно, нисходящие и восходящие ветви разномасштабных конвективных потоков. При указанных выше скоростях поглощения литосферных плит вдоль конвергентных границ (~100 км/млн лет) объемы субдуцированного вещества за промежутки времени, отвечающие времени существования суперконтинентов (~200 млн лет), достигают огромных размеров (рис. 5), соизмеримых, например, с половиной объема верхней мантии. Очевидно, что поглощение этих объемов сопровождается эквивалентным ростом коры в срединно-океанических хребтах и в областях развития горячих точек мантии. Поэтому поиск механизмов взаимодействия субдукционных и плюмовых процессов является одной из важнейших задач глубинной геодинамики.

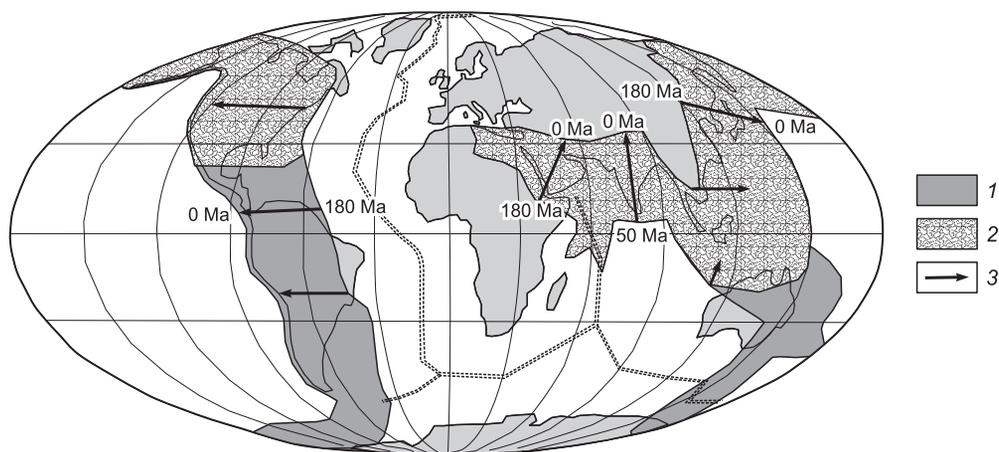


Рис. 5. Эффект захоронения плит за последние 180 млн лет, по [Maruyama et al., 2007].

1 — субдуцированные плиты, 2 — то же, субдуцированные под Северную Пангею, 3 — векторы и линейные размеры перемещения литосферных плит при их конвергенции. Начало стрелок показывает край плиты при начале конвергенции, конец стрелки — современное его положение. Цифрами указан возрастной диапазон, за который произошли перемещения.

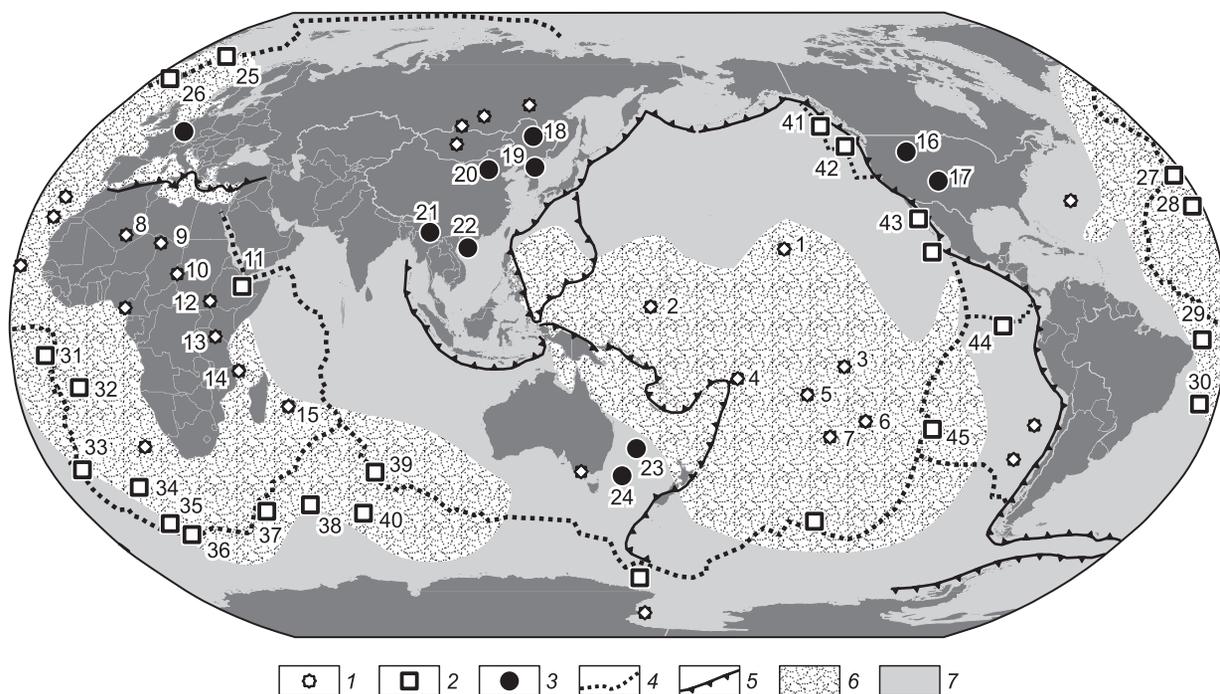


Рис. 6. Схема распределения горячих точек в системе литосферных плит Земли.

Приведены горячие точки, плюмовая природа которых подтверждена методами сейсмотомографии, по [Zhao, 2007]. 1—3 — горячие точки: 1 — внутренних участков литосферных плит, связанных с суперплюмами, 2 — контролирующими позицию срединно-океанических хребтов (СОХ), 3 — тяготеющие к конвергентным границам плит; 4, 5 — границы литосферных плит: 4 — дивергентные (СОХ), 5 — конвергентные (ОД, АКО); 6 — проекции горячих полей мантии (суперплюмов); 7 — океанические бассейны.

Цифрами обозначены: 1—7 — горячие точки Южно-Тихоокеанского суперплюма: 1 — Гавайская, 2 — Каролинская, 3 — Маркизская, 4 — Самоа, 5 — Таити, 6 — Питкаирн, 7 — Макдональд; 8—15 — горячие точки Африканского суперплюма: 8 — Хоггар, 9 — Тибести, 10 — Дарфур, 11 — Афар, 12 — Восточно-Африканская, 13 — Виктория, 14 — Коморы, 15 — Реюньон; 16—24 — горячие точки конвергентных границ плит: 16 — Еллоустоун, 17 — Ратон, 18 — Вудалянчи, 19 — Чангбайши, 20 — Датонг, 21 — Тенгчонг, 22 — Хайнань, 23 — Лорд Хоуэ, 24 — Восточно-Австралийская; 25—45 — горячие точки СОХ: 25 — Ян Майен, 26 — Исландия, 27 — Азоры, 28 — Новая Англия, 29 — Фернандо, 30 — Тринидад, 31 — Вознесения, 32 — Святая Елена, 33 — Тристан, 34 — Гоф, 35 — Метеор, 36 — Буве, 37 — Марион, 38 — Крозе, 39 — Амстердам, 40 — Кергелен, 41 — Бови, 42 — Кобб, 43 — Баджа, 44 — Галапагосы, 45 — Пасхи.

Количество горячих точек на современной поверхности Земли колеблется у разных авторов. Для своего анализа мы воспользуемся тем набором современных горячих точек, глубинное строение которых было показано методами сейсмической томографии [Zhao, 2007] (рис. 6). Среди них обычно выделяют локальные внутриплитные проявления размерами от сотен до первых тысяч километров в поперечнике (собственно горячие точки) и огромные суперплюмы (горячие поля мантии и т.п.), имеющие поперечник вплоть до десятков тысяч километров. К последним относят [Miyuama et al., 2007; Zhao, 2007; Li, Zhong, 2009] Южно-Тихоокеанский и Африканский суперплюмы, обычно объединяющие между собой несколько сближенных локальных горячих точек. Наиболее известные горячие точки этих суперплюмов показаны на рис. 6 (светлые области).

В связи с пространственным размещением мантийных плюмов относительно границ литосферных плит выделяются следующие группы горячих точек (см. рис. 6): 1) пространственно приуроченные к конвергентным границам плит (зоны субдукции и коллизии); 2) возникшие в пространственной связи с формированием дивергентных границ и определивших заложение и развитие спрединговых зон срединно-океанических хребтов; 3) расположенные вне зон формирования литосферных границ. К первой группе могут быть отнесены горячие точки, сопряженные с западной границей Северной и Южной Америки, с восточной и южной окраинами Азии и Австралии (см. рис. 6, точки 16—24). К этой группе близка горячая точка Эйфель в Западной Европе, пространственно близкая к субдукционной зоне Средиземноморья (Тэтиса), а также горячие точки восточной границы Тихого океана (см. рис. 6, точки 41—44), часть которых занимает двойственную позицию, позволяющую рассматривать их как в связи с конвергентными границами, так и в связи со спрединговой позицией. К этой же группе горячих точек мы относим области проявления ВП магматизма, сближенные с Альпийско-Гималайским коллизионным по-

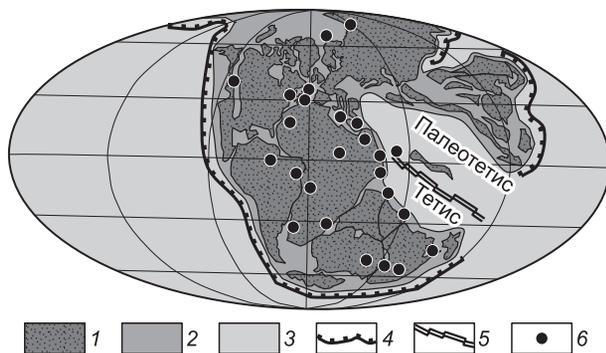


Рис. 7. Схема размещения горячих точек мантии в структуре Пангеи.

Реконструкция Пангеи на 190 млн л.н., по [Scotese, 1997]. Позиция горячих точек соответствует их современному размещению на земной поверхности. Горячие точки Атлантического СОХ занимают позицию вдоль шва между Африкой и обеими Америками. 1 — континенты, 2 — шельф, 3 — океан, 4 — зоны субдукции, 5 — зоны спрединга, 6 — современные горячие точки африканского горячего поля мантии, спроецированные на Пангею.

ясом [Пушаровский, 2002; Коваленко и др., 2008, 2009в] в Евразии. По ним томографических данных пока мало [Зорин и др., 1988, 2006; Zorin et al., 1989, 2003; Zhao, 2004, 2007; Зорин, Турутанов, 2005].

Ко второй группе относятся горячие точки Атлантического океана, определившие границу раскола между континентами Восточного и Западного полушарий (см. рис. 6, точки 25—37, 39, 44, 45). Современное положение горячих точек этой группы не всегда совпадает с осевой зоной срединного хребта, но во время позднепалеозойской Пангеи они находились в зоне раскола между Америкой, Африкой, Антарктидой и Австралией, очевидно, участвуя в их разделении при образовании Атлантического и Индийского океанов (рис. 7). Видимо, близки к этой группе некоторые предполагаемые горячие точки Арктики и ее сочленения с северной Атлантикой. В раннем мелу в Арктике открывается Канадская глубоководная впадина, входящая в Американо-Евразийский бассейн, и образуется крупное вулканическое плато Франца-Иосифа. Последнее во времени объединяется с огромными меловыми дайковыми поясами и полями вулканических пород на арктических островах Канады и Гренландии, которые относятся к категории крупных изверженных провинций (LIP, HALIP) [Maher, 2001; Buchan, Ernst, 2006]. Реконструированный на момент до распада Гренландии, Свальбарды и Земли Франца-Иосифа центр этих радиальных дайковых поясов намечается на северо-восточном краю о. Королевы Елизаветы и связывается с воздействием мантийного плюма. Формирование этих дайковых поясов по предварительным данным растягивается на меловой и третичный периоды. Примерно в это же время [Богданов, 2004] происходит спрединг в осевой части упомянутой впадины Макарова (см. рис. 2) и субдукция в ее восточной части, сопровождающаяся островодужным вулканизмом. По данным Н.А. Богданова [2004], в конце мела над этой зоной субдукции возникает вулканическое плато Альфа-Менделеева, которое он сопоставляет с вулканическими плато плюмовой природы, а также образуются внутриплитные базиты на континентальном шельфе Евразии, Гиперборейском куполе (купол Де Лонга, по [Филатова, Хаин, 2007]), в Канадском арктическом архипелаге и в районе Кейп-Вашингтон (север Гренландии).

Третью группу составляют горячие точки внутренних участков литосферных плит, тяготеющие к центральному участку проекции суперплюмов (см. рис. 6, светлые области) на земную поверхность. Таким образом, практически все подтвержденные сейсмической томографией горячие точки находят свое место в данной простейшей классификации.

Рассмотрим смысл связи горячих точек с современными приповерхностными геодинамическими процессами. Прежде всего, обратим внимание на горячие точки, сопряженные с конвергентными границами плит. Главным процессом на таких границах, как известно, является субдукция холодной литосферы в переходную мантию, а затем даже, судя по данным глобальной сейсмической томографии, нередко на дно мантии на границу ее с земным ядром. Причины такого опускания дискуссионны. При значительном объеме субдуцированных холодных литосферных плит с образованием, по образному выражению С. Маруямы с соавторами [Maruyama, 1994; Maruyama et al., 2007], «кладбища» слэбов происходит охлаждение переходной, а затем и всей мантии. Возможно, это осуществляется как через обмен теплом между горячей мантией и холодными слэбами, так и путем замещения в ходе конвекции более холодными и плотными слэбами глубинной горячей и менее плотной мантии. Последняя должна подниматься вверх в виде плюмов. Таким образом, погружение литосферы в глубь мантии в соответствии с балансом масс порождает общемантийные конвективные процессы и приводит также к образованию локальных конвективных ячеек вблизи конвергентных границ плит (рис. 8). Преимущественное развитие локальных ячеек на этих границах является следствием неустойчивости нисходящих ветвей конвективных потоков, которая фиксируется геофизическими методами в форме разрывов слэбов, наличия стагнированных участков субдуцированных плит и эпизодическим погружением в нижнюю мантию их фрагментов, а также сопряженными с ними потоками низкоскоростной (восходящей?) мантии. Этот простейший физический механизм удовлетворительно объясняет причину приуроченности горячих точек субдукционной группы к зонам конвергентных границ литосферных плит [Коваленко и др., 2009а,б]. Конкретный пример пространственной близости субдуцируемых литосферных плит и мантийного плюма приведен в

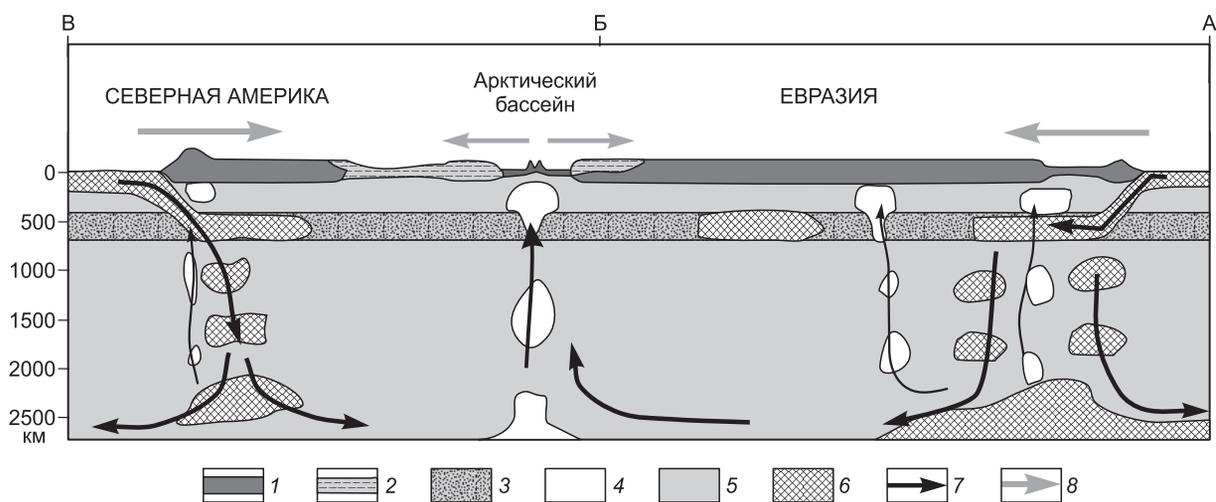


Рис. 8. Геодинамические обстановки, контролирующие формирование суперконтинента Северная Пангея.

Разрез построен вдоль профиля А—Б—В (см. рис. 4). Субдукционные процессы вдоль границ Евразии и Северной Америки ведут к наращиванию континентов и определяют условия для их консолидации в виде суперконтинента и устойчивого состояния последнего. Субдукция литосферы порождает восходящие мантийные потоки горячей (низкоскоростной) мантии вблизи конвергентных границ, но, кроме того, приводит к образованию мантийного плюма под центральной частью суперконтинента. Этот плюм вызывает литосферный раскол, противодействующий субдукционным силам сжатия. 1 — континентальная литосфера, 2 — осадочный бассейн Арктики, 3 — переходный слой мантии, 4 — горячая (низкоскоростная) мантия, 5 — стандартная мантия, 6 — субдуцированная литосфера и холодная (высокоскоростная) мантия, 7 — мантийные потоки, 8 — направление стресса.

статье [Hoernle et al., 1995], касающейся новейшего вулканизма в центре Западной Европы и в Западном Средиземноморье. Практически весь Западно-Европейский регион новейшего вулканизма, сопряженный в первую очередь с Центрально-Европейским рифтовым поясом и включающий другие вулканические районы Западной Европы, а также Восточную Атлантику и Западное Средиземноморье, подстилается плоской низкоскоростной аномалией *P*- и *S*-сейсмических волн площадью $2500 \times 4000 \text{ км}^2$, интерпретируемой как выступ горячей мантии. Эта аномалия располагается в основном в зоне переходной мантии и контролирует область локального растяжения, рифтообразования и распространение новейшего вулканизма в данном регионе при общем сжатии в результате субдукции Африканской плиты под Евразийскую. Здесь же рядом с низкоскоростной аномалией отмечены две высокоскоростные, сопоставляемые с остатками холодной субдуцированной океанической литосферы Африканской плиты, погружающейся на северо-запад под Эолейскую островную дугу.

Приуроченность второй группы горячих точек к области СОХ может быть связана с результатами глобальных субдукционных процессов. Ведь современные СОХ возникли при распаде суперконтинента Вегенеровская Пангея. Например, Атлантика возникла при разделении Америки, Евразии, Африки, как считается, под воздействием более глубинных причин, а именно мантийных плюмов, поднявшихся с границы ядра и мантии, которые инициировали спрединг, являющийся вторичным и более поверхностным процессом. Перечисленные выше атлантические горячие точки отвечают за открытие Атлантического океана. Благодаря возникновению Атлантических плюмов в северной части суперконтинента открылась Северная Атлантика и на ее продолжении к северу — Евразийский бассейн в пределах Северного Ледовитого океана. Соответственно, разделение Восточной Гондваны с отделением Африки, Антарктиды и Австралии связано с активностью горячих точек в Индийском океане и на западной границе его с Южной Атлантикой (см. рис. 1, 7). Если исходной позицией горячих точек второй группы была Вегенеровская Пангея, то вряд ли следует сомневаться, что мантия под ней должна быть охлажденной длительной субдукцией литосферных плит, иначе невозможно представить сам механизм образования суперконтинентов.

В этой трактовке образование суперплюмов навряд ли должно отличаться от предложенного механизма образования обычных плюмов. Их специфика состоит в огромных размерах и большей, видимо, длительности существования. В то же время нельзя не отметить, что два главных суперплюма — Южно-Тихоокеанский и Африканский — сильно отличаются друг от друга. Например, судя по имеющимся данным [Maguana, 1994], Южно-Тихоокеанский суперплюм — океанический, «работает», очевидно, с перерывами с рифея, когда, возможно, образовался Тихий океан и благодаря которому он и существует

до сего времени [Пушаровский и др., 1999; Пушаровский, 2002]. Нередко Южно-Тихоокеанский суперплюм считают молодым (не древнее 120 млн лет), но все равно признают и наличие более древних суперплюмов (суперплюма) в этой области Земли, называя их (его) Южно-Тихоокеанским палеосуперплюмом [Li, Zhong, 2009]. Благодаря его активности около 700—800 млн л.н. начинает распадаться суперконтинент Родиния, возникший по данным многих авторов в результате гренвильской орогении. Процесс появления суперконтинента Родиния явился итогом длительной субдукции литосферных плит со стороны океана Панталассы. По мнению С. Маруямы [Maruyama et al., 2007], «кладбище» опустившихся на дно мантии гренвильских литосферных плит в настоящее время находится в районе Южно-Тихоокеанского суперплюма, окаймляя его с периферии. Если это так, то распад Родинии в результате появления и начала активности Южно-Тихоокеанского суперплюма, скорее всего, был связан с перестройкой конвективных глобальных мантийных потоков того времени и с образованием замкнутой под суперконтинентом конвективной системы. Другими словами, формирование Южно-Тихоокеанского суперплюма объясняется вполне удовлетворительно субдукцией литосферных плит, их опусканием на дно мантии и выдавливанием за счет этого горячего мантийного материала. Размеры и длительность активности суперплюма (около 700—800 млн лет) могут быть обусловлены длительностью субдукции, накоплением большего объема плит на дне мантии и дополнительной пертурбацией земного ядра с выделением его тепла за счет конвекции при охлаждении внешнего ядра под воздействием «кладбища» холодных слэбов.

Сложнее обстоит дело с Африканским суперплюмом. Он расположен на континенте и признаков глобального расширения литосферы вплоть до образования океанов над ним как будто бы нет. И это несмотря на явно линейное расположение горячих точек (см. рис. 6, точки 8—14). Возможно, это связано с более молодым возрастом последних, а также незначительными скоростями спрединговых процессов (~1—2 см/год) не только на границах Африканской плиты, но и во внутренних ее участках, например, в Красном море. Все внутриконтинентальные горячие точки Африки и спровоцированные ими рифтовые зоны, включая Красное море, имеют преимущественно позднекайнозойский возраст, тогда как горячие точки зон спрединговых хребтов, ограничивающих Африканскую плиту, сформировались еще в раннемеловое время. По-видимому, можно говорить о расширении во времени сферы воздействия Африканского суперплюма на литосферную оболочку Земли, что хорошо видно по смещению его активных границ (зон спрединга) в стороны от Африки, а также о появлении более молодых центров плюмовой активности в его центре. Упомянутые в начале статьи внутриконтинентальные пояса ЦАЦЕ и ВАТК явно связаны с активностью Африканского суперплюма. И хотя очевидно, что геодинамическое положение Африканского суперплюма требует дальнейших исследований, нам представляется вероятным, что плюмы Атлантики и Арктики (вплоть до плюма Северного полюса), а также запада Индийского океана отражают активность Африканского суперплюма. В этом случае появление Африканского суперплюма должно быть связано с распадом Вегенеровской Пангеи, вызвано глубинной субдукцией слэбов под нее и выдавливанием ими горячей мантии в виде суперплюма.

ОБЩАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОВЕЙШЕГО ВУЛКАНИЗМА НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОЙ ПАНГЕИ

Для представления такой модели мы, как уже говорилось выше, различаем геодинамические обстановки плитной тектоники, установленной конвективными процессами в верхней мантии (до глубины 660 км), и глубинной геодинамики, включающей всю мантию вплоть до слоя D_2 на границе ядра и мантии [Добрецов и др., 2001]. Последняя, определяемая так же как плюм-тектоника [Maruyama, 1994], управляется общемантийной конвекцией с опусканием холодной субдуцированной литосферы в глубокую мантию вплоть до границы ее с земным ядром и вызванными этим процессом восходящими потоками горячей мантии в виде суперплюмов и более мелких глубинных плюмов. Модель также учитывает наличие эволюционирующего суперконтинента Северная Пангея и пространственное распределение новейшего вулканизма на современной Земле.

Естественно возникает вопрос, каким образом существование суперконтинента Северная Пангея способствовало проявлению упомянутых выше закономерностей пространственного распределения на его территории новейшего вулканизма. Очевидно, что участие суперконтинента в распределении новейшего вулканизма могло быть связано со следующими механизмами. 1. Субдукционные процессы, проявленные почти со всех сторон суперконтинента в рамках плитной тектоники, привели к возникновению вулканических ассоциаций ОД, АКО, КК в пределах вулканического мегапояса (запад обеих Америк, восток и юго-восток Азии, Тетический Альпийско-Гималайский пояс Евразии). 2. Глубинная субдукция и связанная с нею глобальная конвекция, в том числе восходящие горячие мантийные струи, содействовали образованию областей внутриплитного вулканизма, нередко пространственно сближенного с проявлениями субдукционного (в пределах Альпийско-Гималайского орогенического пояса и тихоокеанских границ Северной Пангеи) либо спредингового (в Атлантике и Арктике) вулканизма. Мы предполагаем,

что глубинная глобальная конвекция возникает при выдавливании холодными слэбами горячего мало-плотного мантийного материала. При этом наряду с глобальной системой конвекции должны возникать конвективные ячеи второго порядка, приуроченные к зонам субдукции, с восходящими мантийными струями и соответствующим ВП вулканизмом.

Предлагаемая модель связи возникновения мантийных плюмов и генерируемого ими вулканизма с глубиной субдукцией снимает вопрос о причинах появления мантийных плюмов и связанного с ними внутриплитного вулканизма в альпийском Тетическом поясе Евразии, расположенного над холодной мантией [Maquyama et al., 2007; Zhao, 2007]. С. Мауяма с соавторами и Д. Жао предположили, что третично-четвертичный базитовый вулканизм Восточной и Юго-Восточной Азии связан с образованием «большого мантийного клина», размер которого определяется не только зоной субдукции Тихоокеанской плиты под Азию, но и субгоризонтальным продолжением последней в области переходной мантии (410—660 км) на запад почти на 1500 км. Эта идея для новейшего вулканизма Прибайкалья была развита в работах [Zhao, 2004; Зорин, Турутанов, 2005; Зорин и др., 2006] (рис. 9). Однако представленная модель не объясняет, как могло сохраняться постоянство состава и характера вулканизма этих областей за 150 млн лет их существования при том, что положение субдукционных зон на востоке Азии за это время неоднократно изменялось с существенным отступлением (более 1500 км) их к востоку — от района хр. Малый Хинган (ранний мел) до Японских островов (современное положение). К тому же состав вулканизма типично внутриплитный, без признаков островодужной специфики. Наконец, концентрация вулканизма в ряде, а не в одной вулканической области не может быть связана с одной конвективной системой в астеносфере «большого» мантийного клина. Неясно, почему в одних островодужных системах имеются стагнирующие плиты, а в других их нет.

В работе [Maquyama et al., 2007] высказано предположение, что на востоке Азии, подстилаемой в основном холодной мантией, мантийные плюмы носят водный (0.2 мас.% воды в мантийном источнике), а не термальный характер из-за интенсивной дегидратации большого объема субдуцированных плит. А. Д. Смит [Smith, 1998] объяснял этот магматизм связью с источником типа DUPAL, появившимся за

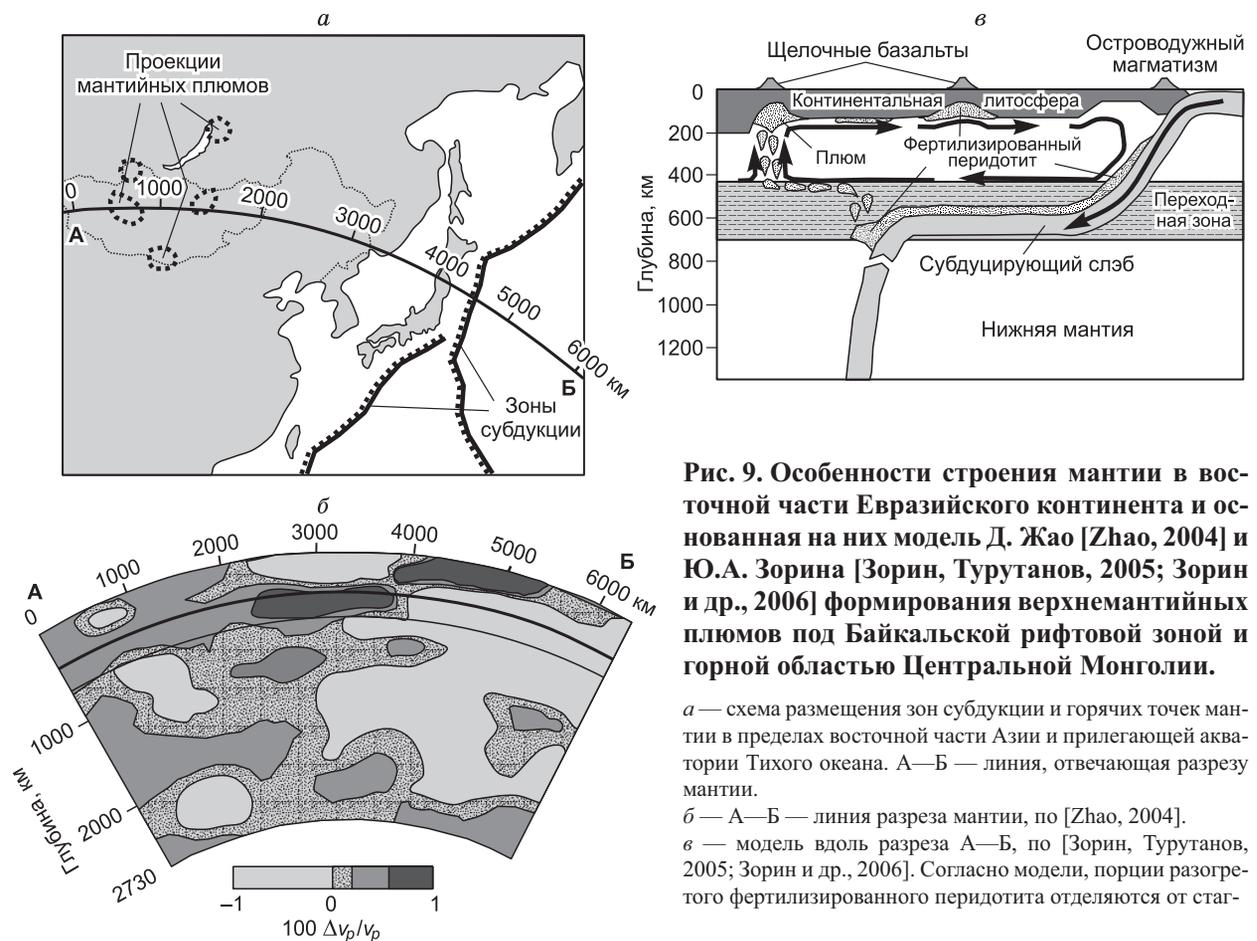


Рис. 9. Особенности строения мантии в восточной части Евразийского континента и основанная на них модель Д. Жао [Zhao, 2004] и Ю.А. Зорина [Зорин, Турутанов, 2005; Зорин и др., 2006] формирования верхнемантийных плюмов под Байкальской рифтовой зоной и горной областью Центральной Монголии.

а — схема размещения зон субдукции и горячих точек мантии в пределах восточной части Азии и прилегающей акватории Тихого океана. А—Б — линия, отвечающая разрезу мантии.

б — А—Б — линия разреза мантии, по [Zhao, 2004].

в — модель вдоль разреза А—Б, по [Зорин, Турутанов, 2005; Зорин и др., 2006]. Согласно модели, порции разогретого фертилизированного перидотита отделяются от стаг-

нированного по глубине слэба при его погружении в нижнюю мантию. После отделения они всплывают сквозь верхнюю часть переходной зоны и вовлекаются в конвекцию. Восходящая ветвь этой конвекции распадается на отдельные струи, которые и представляют собой верхнемантийные плюмы.

счет метасоматизированной мантии клина, возникшей либо при субдукции, либо за счет поднимающихся водных мантийных плюмов (распад при 410 км богатого водой и литофильными элементами вадслита на оливин и богатый водой и литофильными элементами расплав). Пока эта идея не подтверждена прямыми наблюдениями по содержаниям воды в базитовых магмах данного региона. Имеющиеся первые наши результаты по составам расплавных включений таких базитов показывают сухой их характер с содержаниями воды, не превышающими средних содержаний в магмах океанических плюмов [Коваленко и др., 2007].

В нашей трактовке связь появления мантийных плюмов и внутриплитного вулканизма за счет глубокой субдукции литосферных плит и вытеснения ими горячей мантии вверх мантийных струй представляется вполне закономерной. Само наличие суперконтинента и опускание в глубокую мантию холодных литосферных слэбов — достаточная причина для появления под суперконтинентом горячих плюмов. При тех огромных объеме и массе субдуцированных плит под суперконтинент Северная Пангея ими должна быть выдавлена не меньшая масса горячей малоплотной глубинной мантии, способной образовывать плюмы и даже суперплюмы. Например, рассчитанные длины субдуцированной литосферы (см. рис. 5) составляют для Японии 10 000 км за последние 100 млн лет и 15 000 км за последние 150 млн лет, для Тетиса в Западных Альпах 500 км за последние 100 млн лет и 1100 км за последние 150 млн лет [Maquyama et al., 2007]. Таким образом, наша гипотеза объясняет одно из наиболее дискуссионных явлений в глубинной геодинамике: почему суперконтинент, образованный над холодной мантией, через некоторое время разваливается под воздействием горячих плюмов.

Так произошло и с суперконтинентом Вегенеровская Пангея (см. рис. 1). Однако наиболее интенсивно распад ее осуществлялся в Южном полушарии с разделением Южной Америки, Австралии, Индии, Антарктиды и с образованием нового суперконтинента Северная Пангея другой по сравнению с Вегенеровской Пангеей конфигурацией континентов. Под ним тоже должен был бы сформироваться новый суперплюм и, возможно, он появляется в виде расширяющегося Африканского суперплюма, проникающего даже в Арктику, а затем, вероятно, и в Восточную Сибирь (через Момский грабен), а также образовавшего трансконтинентальные пояса ЦАЦЕ и ВАТК. Но не исключено, что в условиях субдукционного сжатия Северной Пангеи вместо суперплюма сформировались «распыленные» более мелкие плюмы. Практически второй вариант мы наблюдаем в реальной геологии.

В самом кратком виде модель образования новейшего вулканизма Северной Пангеи сводится к следующему (рис. 10). Длительная субдукция литосферных плит под Евразию (и разные ее части), а также под Северную Америку привела к стабилизации материков в пределах Северной Пангеи и образованию вдоль конвергентных границ суперконтинента краевого вулканического Амевазийского мегапояса. За время существования суперконтинента (>200 млн лет) были субдуцированы огромные объемы холодной литосферы, соизмеримые с объемом верхней мантии в его основании. Поглощение такого гигантского объема вещества сопровождалось развитием системы разноуровневых конвективных потоков как в верхней, так и в нижней мантии. Нестационарная субдукция (разрывы слэбов, разрушение стагнированных участков слэбов и погружение их в нижнюю мантию) являлась причиной компенсационного подъема горячей мантии (мантийных плюмов) вблизи конвергентных границ плит, определяя сложный характер магматических проявлений в пределах всего краевого вулканического мегапояса от Дальнего Востока до запада западной Европы и западной окраины Северной Америки.

Глубинная субдукция, связанная с погружением литосферных слэбов в нижнюю мантию через глобальную конвекцию, вызвала образование восходящих мантийных струй и вдали от конвергентных границ, прежде всего, в областях скопления наиболее горячей нижней мантии, особенно под суперконтинентами, подстилаемыми «кладбищами» опустившихся на границу земных ядра и мантии слэбов. Под суперконтинентами складывается особая геодинамическая обстановка, в которой вследствие опоясывающей его субдукции литосферных плит и вызванного этой субдукцией выжимания глубинной горячей мантии был сформирован восходящий поток или плюм (суперплюм) под центральными областями суперконтинента. На наш взгляд, таким суперплюмом, расколовшим Вегенеровскую Пангею, был Африканский. Трудно сказать, был ли этот суперплюм сразу сложной конфигурации, определившей раскрытие Атлантического и Индийского океанов (см. рис. 6, белый цвет), или он развивался во времени, увеличивая свою площадь, не ясно. Расширение площади активности Африканского суперплюма как будто бы фиксируется проникновением условий растяжения в Арктику (открытие сначала Канадского бассейна, затем Евразийского). Однако проникновению этого суперплюма в Северную Атлантику и Арктику явно препятствует круговая субдукция вокруг этой части суперконтинента Северная Пангея, создающая здесь глобальные условия сжатия, препятствующие подъему плюмов, но последние все же изредка «прорывались» в верхние оболочки Земли. Субмеридиональная вытянутость Африканского суперплюма похоже хорошо коррелирует с аналогичной формой суперконтинента Северная Пангея.

Подводя итог, несколько слов скажем о возможном соотношении суперконтинента Северная Пангея и Тихоокеанского суперплюма. Фактически это вопрос о соотношении Тихоокеанского и Индо-Ат-

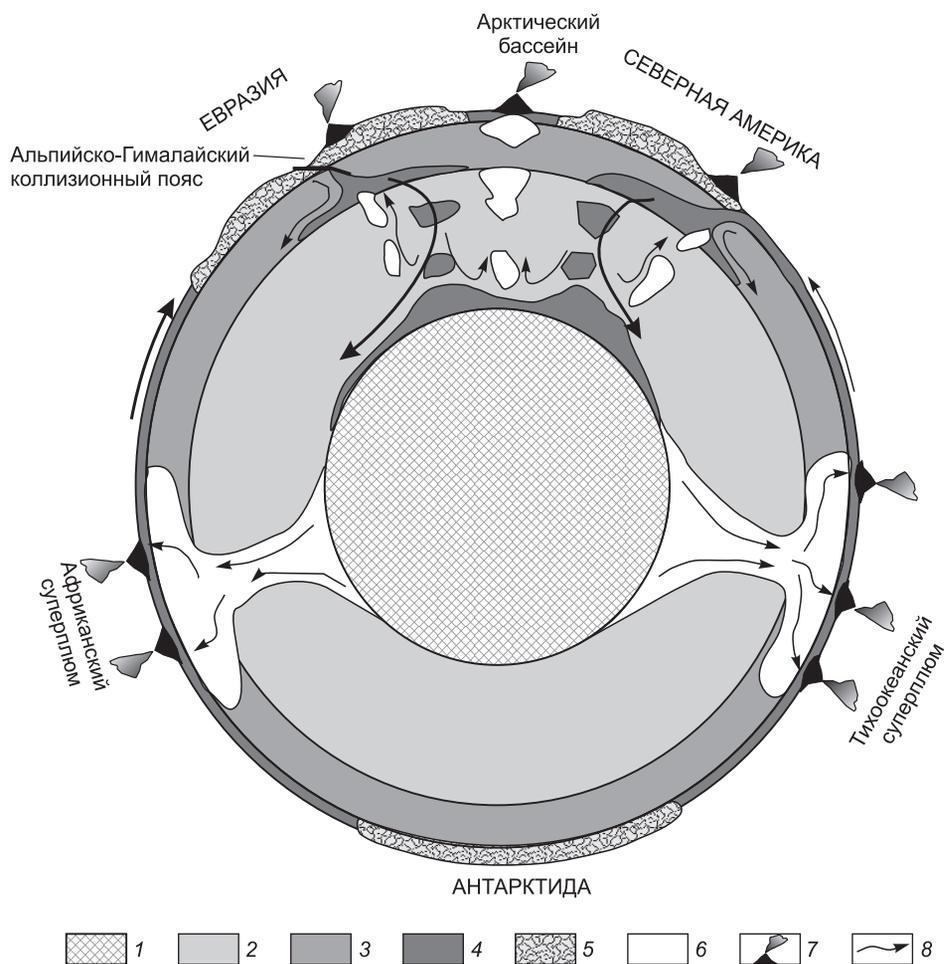


Рис. 10. Модель глобальных геодинамических процессов, приведших к формированию суперконтинента Северная Пангея и определивших закономерности проявления новейшего вулканизма.

1—5 — различные оболочки Земли: 1 — ядро, 2 — нижняя, 3 — верхняя мантии, 4 — океаническая, 5 — континентальная литосферы; 6 — горячая мантия плюмов; 7 — вулканические области; 8 — направления перемещения масс между оболочками Земли. Пояснения см. в тексте.

лантического сегментов Земли или ее главной асимметрии, который впервые поставил В.И. Вернадский и далее был развит Н.С. Шатским, Ю.М. Пушаровским, А.А. Моссаковским, С.В. Руженцевым и другими. Если идея многих, включая перечисленных ученых, о развитии главной асимметрии Земли еще с рифея верна, то следует предполагать, что раскол суперконтинентов от Родинии до Вегенеровской Пангеи имел место исключительно в Индо-Атлантическом сегменте Земли. Роль Тихоокеанского суперплюма или суперплюмов состояла в «разгоне» литосферных плит из этого сегмента в и под Индо-Атлантический сегмент, в итоге чего мы имеем уже почти миллиард лет более холодную мантию под ним и концентрацию в нем континентов Земли. Если учесть соизмеримость площади Индо-Атлантического сегмента Земли с площадью современных континентов, то вероятность сохранения суперконтинентального статуса Индо-Атлантического сегмента Земли кажется не такой необоснованной.

Авторы признательны академику Н.Л. Добрецову за его доброжелательный анализ настоящей статьи и за сделанные им конструктивные замечания и предложения.

Статья подготовлена при поддержке РФФИ (гранты 08-05-00472, 08-05-00347) и программы Президиума РАН № 16.

ЛИТЕРАТУРА

- Богданов Н.А. Тектоника Арктического океана // Геотектоника, 2004, № 3, с. 13—30.
 Глебовский В.Ю., Каминский В.Д., Минаков А.Н., Меркурьев С.А., Чилдерс В.А., Брозина Дж.М. История формирования Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана по результатам геосторического анализа аномального магнитного поля // Геотектоника, 2006, № 4, с. 21—42.

- Грамберг И.С.** Сравнительная геология и минерагения океанов и их континентальных окраин с позиции стадийного развития океанов // Геотектоника, 2001, № 6, с. 3—19.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.** Глубинная геодинамика. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 407 с.
- Зорин Ю.А., Турутанов Е.Х.** Плумы и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (7), с. 683—697.
- Зорин Ю.А., Балк Е.В., Новоселова М.Р., Турутанов Е.Х.** Толщина литосферы под Монголо-Сибирской горной страной и сопредельными регионами // Физика Земли, 1988, № 7, с. 32—42.
- Зорин Ю.А., Турутанов Е.Х., Кожевников В.М., Рассказов С.В., Иванов А.В.** О природе кайнозойских верхнемантийных плумов в Восточной Сибири (Россия) и Центральной Монголии // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (10), с. 1060—1074.
- Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Ярмолюк В.В.** Средние составы магм и мантии срединно-океанических хребтов и внутриплитных океанических и континентальных обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол базальтов // Петрология, 2007, т. 15, № 4, с. 361—396.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Богатиков О.А.** Карта новейшего вулканизма Северной Евразии: районирование и обстановки формирования // Новейший вулканизм Северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. М., ИГЕМ РАН, 2008, с. 13—18.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Богатиков О.А.** Геодинамическое положение новейшего вулканизма Северной Евразии // Геотектоника, 2009а, № 5, с. 3—24.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Богатиков О.А.** Современный суперконтинент Северного полушария Земли (Северная Пангея): магматическая и геодинамическая эволюция // Докл. РАН, 2009б, т. 427, № 3, с. 1—6.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Богатиков О.А.** Закономерности пространственного распределения «горячих точек» мантии современной Земли // Докл. РАН, 2009в, т. 427, № 5, с. 654—658.
- Кутинов Ю.Г.** Экогеодинамика Арктического сегмента земной коры. Архангельск, Изд-во ИЭПС, УрО РАН, 2005, 388 с.
- Милановский Е.Е., Короновский Н.В.** Орогенный вулканизм и тектоника Альпийского пояса Евразии. М., Недра, 1973, 280 с.
- Пушаровский Ю.М.** Планетарная экспансия тектоногеодинамических процессов Индо-Атлантического сегмента Земли в пределы Тихоокеанского сегмента // Геотектоника, 2002, № 1, с. 3—12.
- Пушаровский Ю.М., Меланхолина Е.Н., Моссаковский А.А., Руженцев С.В.** Глубинная тектоника Земли: строение, структурная асимметрия, геодинамика геосфер // Докл. РАН, 1999, т. 366, № 1, с. 88—91.
- Филатова Н.И., Хаин В.Е.** Тектоника Восточной Арктики // Геотектоника, 2007, № 3, с. 3—29.
- 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане /** Под ред. В.Л. Иванова, В.Д. Каминского. СПб., ВНИИОкеангеология, 2008, 647 с.
- Шипилов Э.И.** Генерации спрединговых впадин и стадии распада Вегенеровской Пангеи в геодинамической эволюции Арктического океана // Геотектоника, 2008, № 2, с. 1—23.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г.** Внутриплитная позднемезозойская—кайнозойская вулканическая провинция Азии — проекция горячего поля мантии // Геотектоника, 1995, № 5, с. 41—67.
- Ярмолюк В.В., Богатиков О.А., Коваленко В.И.** Позднекайнозойские трансконтинентальные структуры и магматизм Евро-Африканского сегмента Земли и геодинамика их формирования // Докл. РАН, 2004, т. 395, № 1, с. 91—95.
- Anderson D.L., Natland J.** A brief history of the plume hypothesis and its competitors: concept and controversy // Plates, plumes, and paradigms / Eds. G.R. Foulger, J. Natland, O.L. Anderson. Special Pap. GSA, 2005, v. 388, p. 31—54.
- Buchan K.L., Ernst R.E.** The High Arctic Large Igneous Province (HALIP): evidence for an associated giant radiating dyke swarm // www.largeigneousprovinces.org/LOM.html, 2006.
- Collins A.S., Pisarevsky S.A.** Amalgamating eastern Gondwana: the evolution of the Circum-Indian orogens // Earth-Sci. Rev., 2005, v. 71, № 3—4, p. 229—270.
- Dalziel I.W.D.** Pacific margins of Laurentia and Antarctica-Australia as a conjugate rift pair: evidence and implications for an Eocambrian supercontinent // Geology, 1991, v. 19, p. 598—601.
- Hatangi S., Downes H., Seghedi I.** Tertiary-Quaternary subduction processes and related magmatism in the Alpine-Mediterranean region // European lithosphere dynamics / Eds. D. Gee, R. Stephenson. Geol. Soc. London, Mem., 2006, v. 32, p. 167—190.

- Hoffman P.F.** Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside—out? // *Science*, 1991, v. 252, p. 1409—1412.
- Hoernle K., Zhang Y.S., Graham D.** Seismic and geochemical evidence for large-scale mantle upwelling beneath eastern Atlantic and western and central Europe // *Nature*, 1995, v. 374, p. 34—39.
- Iwamori H.** Transportation of H₂O beneath the Japan arcs and its implication for global water circulation // *Chem. Geol.*, 2007, v. 219, p. 182—198.
- Li Z.X., Powell C.M.** An outline of the Paleogeographic evolution of the Australasian region since the beginning of the Neoproterozoic // *Earth-Sci. Rev.*, 2001, v. 53, p. 237—277.
- Li Z-X., Zhong S.** Supercontinent-superplume coupling, true polar wander and plume mobility: plate dominance in whole-mantle tectonics // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2009, doi:10.1016/j.pepi.2009.05.004.
- Lustrino M., Wilson M.** The circum-Mediterranean anorogenic Cenozoic igneous province // *Earth Sci. Rev.*, 2007, v. 81, p. 1—65.
- Maher H.D. Jr.** Manifestations of the Cretaceous High Arctic Large Igneous Province in Svalbard // *J. Geol.*, 2001, v. 9, p. 91—104.
- Maruyama S.** Plume tectonics // *J. Geol. Soc. Japan*, 1994, v. 100, p. 24—49.
- Maruyama S., Santosh M., Zhao D.** Superplume, supercontinent and postperovskite: mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core-mantle boundary // *Gondwana Res.*, 2007, v. 11, p. 7—37
- Meert J.G., van der Voo R.** The assembly of Gondwana 800—550 Ma // *J. Geodyn.*, 1997, v. 23, № 3—4, p. 223—235.
- Morgan W.J.** Convection plumes in the lower mantle // *Nature*, 1971, v. 230, p. 42—43.
- Smith A.D.** The geodynamic significance of the DUPAL anomaly in Asia // *Mantle dynamics and plate interaction in East Asia. Geodynamics Series*, Amer. Geophys. Union, Washington DC, 1998, v. 27, p. 89—105.
- Scotese C.R.** Paleogeographic atlas. Arlington, Texas, University of Texas at Arlington, 1997, 45 p.
- Scotese C.R.** A continental drift flipbook // *J. Geol.*, 2004, v. 112, № 6, p. 729—741.
- Spies O., Lensch G., Mihm A.** Petrology and geochemistry of the post-ophiolitic Tertiary volcanics between Sabzevar and Quchan, NE Iran // *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaeontologie Abhandlungen*, 1983, v. 168, p. 389—408.
- Volcanism and subduction: the Kamchatka region** / Eds. J. Eichelberger, E. Gordeev, P. Izbekov, M. Kasahara, J. Lees. Washington, Geophysical Monograph 172, AGU, DC, 2007, 369 p.
- Wegener A.** The origin of continents and oceans. London, Methuen and Co. Ltd., 1966, 248 p.
- Wilson J.T.** A possible origin of the Hawaiian Islands // *Canad. J. Phys.*, 1963, v. 41, p. 863—870.
- Zhao D.** Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2004, v. 146, p. 3—35.
- Zhao D.** Seismic images under 60 hotspots: search for mantle plumes // *Gondwana Res.*, 2007, v. 12, p. 335—355.
- Zorin Yu.A., Kozhevnikov V.M., Novoselova M.R., Turutanov E.Kh.** Thickness of the lithosphere beneath the Baikal rift zone and adjacent regions // *Tectonophysics*, 1989, v. 168, p. 327—337.
- Zorin Yu.A., Turutanov E.Kh., Mordvinova V.V., Kozhevnikov V.M., Yanovskaya T.B., Treusov A.V.** The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure // *Tectonophysics*, 2003, v. 371, p. 153—173.

*Поступила в редакцию
22 марта 2010 г.*