

ВЕРХНЯЯ МАНТИЯ КАМЧАТКИ В ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ АНОМАЛИЯХ. РОЛЬ АСТЕНОСФЕРНОГО ДИАПИРИЗМА

А.В. Колосков¹, Л.И. Гонтовая¹, С.В. Попруженко²

¹ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа 9, г. Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: kolosav@kscnet.ru

²Камчатнедра, Министерство природных ресурсов РФ, г. Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию 19 ноября 2013 г.

Проведено сопоставление данных изотопно-геохимического, сейсмотомографического и гравиметрического изучения мантийных характеристик Камчатского и Беринговоморского регионов. Показано, что выявленные изотопно-геохимические аномалии хорошо подтверждаются геофизическими материалами. Сделано предположение о том, что аномалии Центральной Камчатки и Беринговоморского региона являются следствием проникновения в литосферу локальных диапиров, с активностью которых связано возникновение пород внутриплитного геохимического типа. Область сочленения Курило-Камчатской и Командорско-Алеутской островодужных систем характеризуется повышенным участием корового материала в составе вулканических пород мантийного генезиса и сочетанием проявлений островодужного и внутриплитного типов.

Ключевые слова: изотопно-геохимический состав, сейсмическая томография, гравиметрия, литосфера, мантийные диапиры, п-ов Камчатка, Берингово море.

ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Камчатка относится к одному из интереснейших, с точки зрения глубинной геодинамики, регионов Земли. Здесь, как известно, располагаются три вулканических пояса – Восточно-Камчатский (ВКВП), Центрально-Камчатской депрессии (ЦКД) и Срединного хребта (СХ), что отличает этот регион от характерной для островных дуг единой вулканической зоны и отражает протекающие в верхней мантии глубинные процессы. В настоящее время предложены различные модели разворота ВКВП к северо-западу и образования двух параллельных зон четвертичного вулканизма (ЦКД и СХ); большинством авторов они рассматриваются в рамках гипотезы тектоники плит [1, 15, 24].

Помимо собственно островодужных серий, индикаторных для орогенной обстановки, на Камчатке проявлен особый тип вулканизма, который по петрохимическим и геохимическим признакам близок к внутриплитным вулканизмам, развитым в континентальных и океанических областях [9]. Внутриплитный вулканизм обычно противопоставляется островодужному, поскольку, как считается [10], оба типа имеют различные источники и обстановку проявле-

ния. Первый тип прямо или косвенно связывается с эволюцией мантийных диапиров, а второй – с субдукционной геодинамикой. Однако пространственное и временное сочетание обоих типов вулканизма приобретает некую закономерность, свидетельствующую о более тесных, возможно генетических связях между ними [19, 20]. Безусловно, предлагаемые модели развития региона должны находить подтверждение в структурных особенностях и свойствах верхней мантии. В последнее десятилетие наиболее информативные в этом плане данные получены геофизическими методами, в частности гравиметрией и сейсмической томографией (глобальной, региональной, локальной). Последние представлены трехмерными изображениями скоростных свойств среды в виде аномалий объемных продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн от землетрясений [11–13, 15, 16, 21, 35–37, 39, 42–44, 46, 47].

Следует отметить, что в полученных различными авторами результатах присутствуют как черты сходства, так и существенные различия; это касается не только особенностей разработанных скоростных моделей, но и их последующей геологической интерпретации. Первое обусловлено неоднозначностью самого метода сейсмотомографии, результаты которого

в значительной мере зависят от типа (объемные или поверхностные волны) и количества данных, конфигурации сетей наблюдений, исходной скоростной модели и др. Различия глобальных моделей Земли, полученных разными авторами, очень наглядно продемонстрированы в работе [17]. Для района Камчатки они показаны нами на рис. 1. Что же касается геологического истолкования полученных данных, то здесь основное значение приобретает геодинамическая гипотеза, в рамках которой эти данные анализируются и в какой степени они отвечают результатам других геолого-геофизических методов, а также современной тектонике региона. Общим, практически для всех томографических моделей верхней мантии Камчатки, является выделение высокоскоростной аномалии, которой соответствует сейсмофокальная зона (СФЗ), и относительно низкоскоростной – к западу от нее (области мантийного клина). Различия касаются непосредственно геометрии, формы, скоростных характеристик «слэба», рисунка аномалий и их распределения в объемной модели.

Сейсмотомографические построения, которые были выполнены по данным региональных землетрясений, зарегистрированных сетью станций Камчатского филиала Геологической службы РАН, по методике, разработанной в Университете Швейцарии (г. Цюрих), позволили получить более детальные данные о свойствах верхней мантии под Камчаткой до глубины ~ 200 км [13, 46]. Однако, как справедливо замечено в [34], предположения о скоростной структуре Земли, которые лежат в основе сейсмотомографических данных (и, по нашему мнению, их «геодинамическая» интерпретация), в силу специфики самого метода, «должны подвергаться сомнению» и, безусловно, находить дополнительные подтверждения в результатах других геолого-геофизических методов. В данной работе предпринята попытка увязать в одно целое результаты анализа геологических, изотопно-геохимических и геофизических материалов, на основании которых можно получить информацию о глубинном строении рассматриваемой территории.

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ. ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В петрологических моделях островодужного вулканизма, так или иначе, используются данные, касающиеся поперечной изотопно-геохимической зональности. Действительно, наличие такой зональности, которая могла быть сопоставлена с глубиной до сейсмофокальной зоны, является серьезным аргументом в пользу постулируемого субдукционного механизма. В действительности мы наблюдаем более сложную картину.

Так, для Камчатки поперечная зональность, по данным [29], выражается в том, что фронтальная зона характеризуется невысокими отношениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, но повышенными $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Затем в районе Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) значительно возрастают Sr-изотопные отношения, но уменьшаются Pb-изотопные характеристики. В тыловой зоне изотопия Sr опять понижается, а свинца умеренно возрастает. Как видим, прямой корреляционной зависимости для этих характеристик от глубины до сейсмофокального слоя здесь нет.

Первая картина площадного распространения проявлений плиоцен-четвертичного вулканизма Камчатки с различными Sr-изотопными характеристиками приведена в работе [18]. Здесь хорошо видно, что сначала наблюдается локальное возрастание отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в районе ЦКД и Срединного хребта Камчатки, а затем уменьшение этого отношения при движении к тыловой зоне островодужной системы. Закономерность, которая не коррелируется с глубиной до сейсмофокальной зоны.

С добавлением более поздних материалов такая картина приведена на рис. 2. На этом рисунке мы видим ряд изолированных Sr-изотопных аномалий различного уровня.

Крупная аномалия с диапазоном изменения изотопных характеристик $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7027\text{--}0.7030$ соответствует проявлениям вулканизма в структуре Берингоморского региона. Разрозненные ареалы позднекайнозойского щелочного внутриплитного вулканизма, связанные с зонами растяжения, прослеживаются здесь вдоль континентальной окраины Берингова моря и на некоторых его островах. Вся южная часть региона представлена конвергентной, а вблизи Камчатки – сдвигово-надвиговой границей литосферных плит. Для этой области предлагается модель эволюции вулканизма на основе наличия термальной аномалии в мантии по типу горячей точки или плюма [2]. При этом, развиваются представления о начальной стадии развития плюмовой геодинамики как для Берингоморского блока [3], так и для Северо-Востока Азии [14]. Данные сейсмотомографии свидетельствуют о наличии низкоскоростного разуплотненного мантийного материала до глубины около 410 км под шельфом Берингова моря [37] или для обширной области, включая Берингоморский регион, Чукотку, Корякию и северную часть Камчатки [16].

В западной части Берингоморской структуры располагается небольшая, вытянутая в СЗ направлении аномалия с повышенными Sr-изотопными характеристиками ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7034$) зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутско-Командорской островодужных систем. Повышенные значения этих

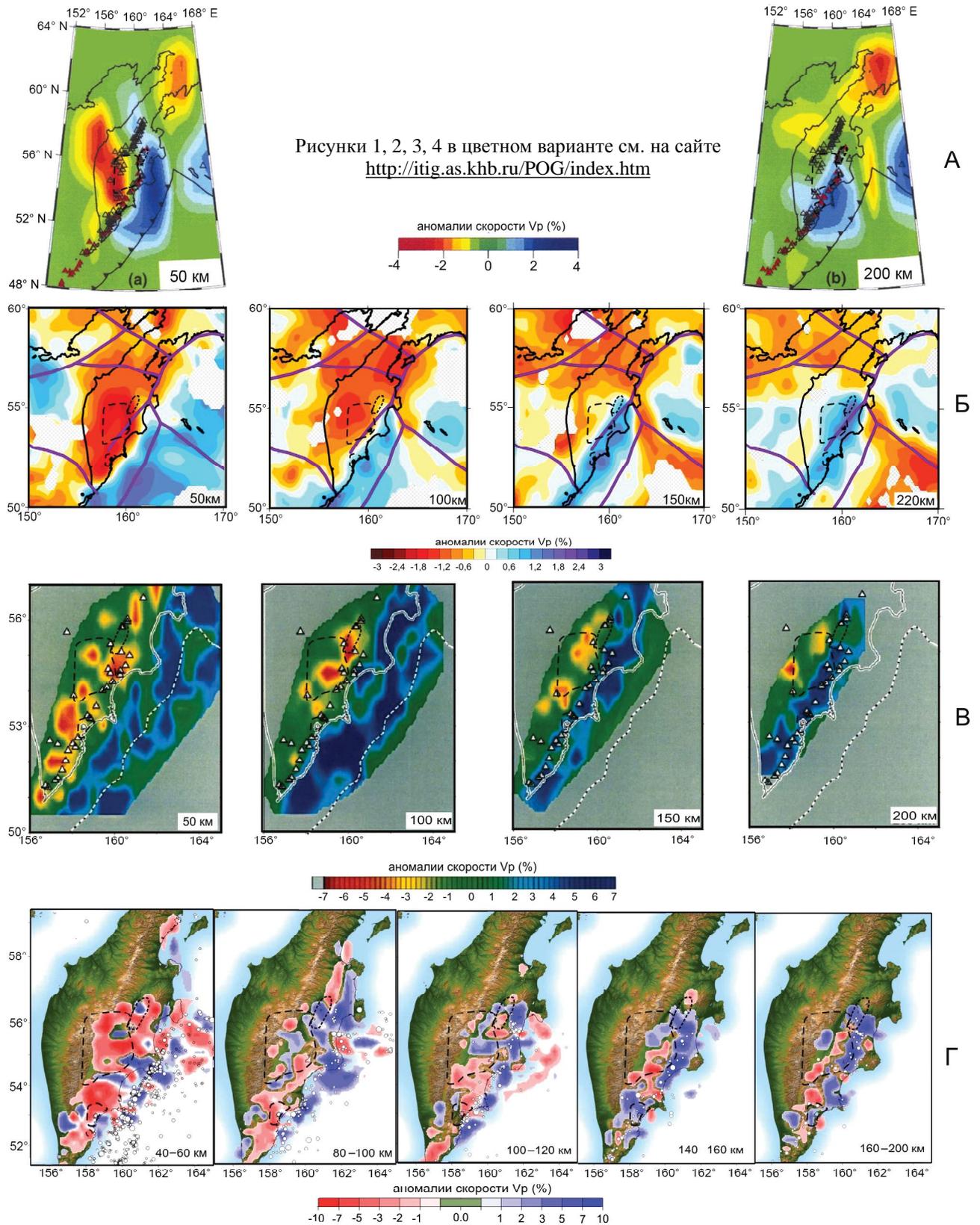


Рис. 1. Сопоставление результатов томографии – глобальной (А [39], Б [21]) и региональной (В [36], Г [13, 46]). Приведены горизонтальные сечения объемных скоростных моделей в аномалиях скорости V_p .

Выделены (черным пунктиром и точками) контуры Sr-изотопных аномалий. Треугольники – вулканы.

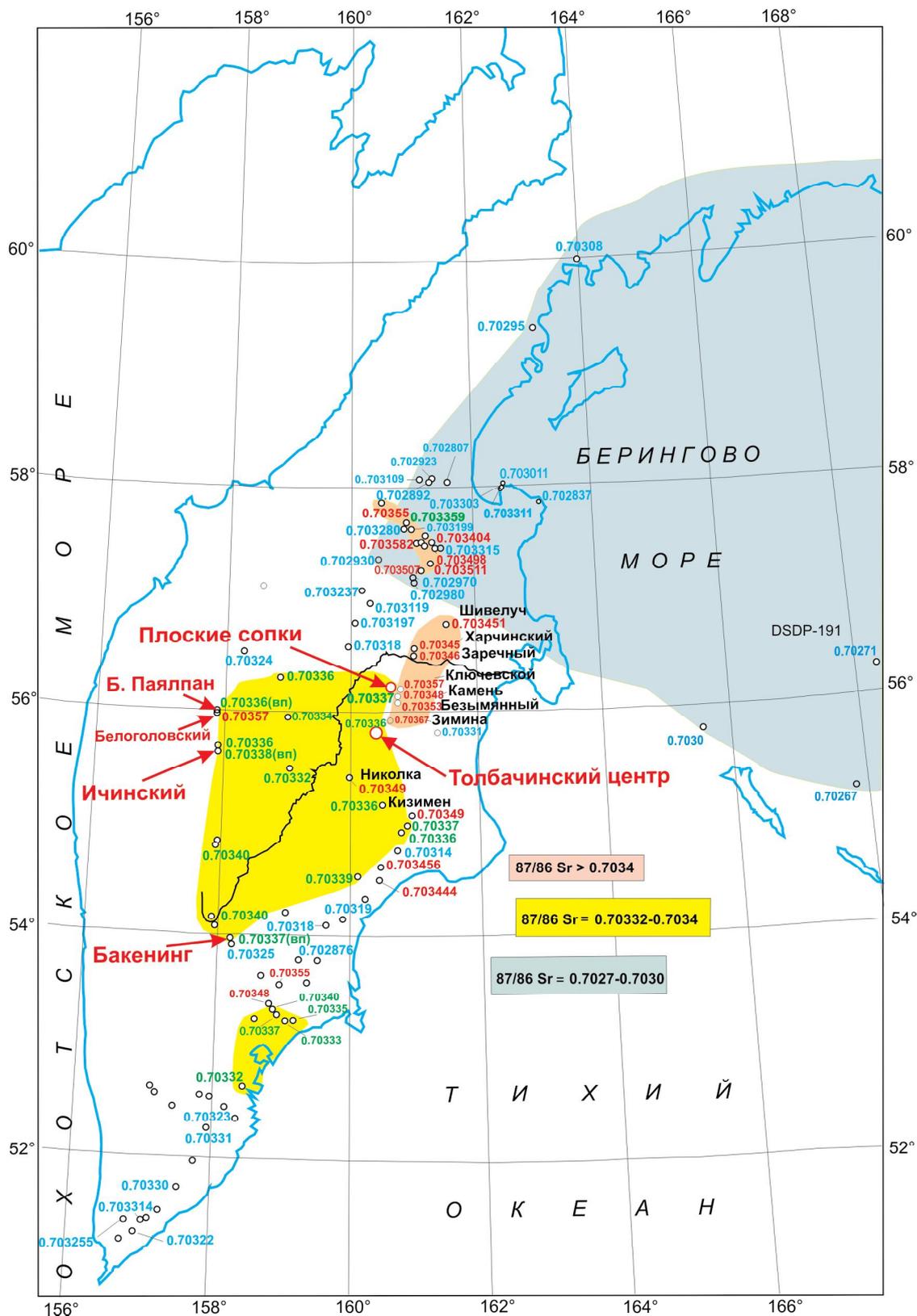


Рис. 2. Картина пространственного распределения позднеплиоцен-четвертичных вулканов Камчатки и Берингово-морского региона с различными Sr-изотопными характеристиками.

Использованы данные из работ: [6, 26–30, 33, 38, 40, 41, 45, 48, 49, 52–54].

изотопных отношений, вероятно, свидетельствуют о существенном вкладе корового материала в составы продуцируемых расплавов.

Подобная аномалия с повышенными Sr-изотопными отношениями располагается южнее, в районе северного окончания ЦКД с большим количеством активных стратовулканов. Магматизм этой зоны обычно рассматривается в рамках субдукционной модели [29, 53–55]. При этом одним из возможных показателей образующихся при плавлении поддвигаемой литосферной плиты расплавов используется своеобразный «адакитоподобный» состав некоторых вулканических пород, встреченных на вулкане Шивелуч, наиболее приближенном к зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутско-Командорской островодужных систем. Адакиты – высокомагнезиальные андезиты с характерными параметрами содержания и отношения микрокомпонентов (высокие концентрации Sr, высокие отношения Sr/Y, La/Yb), которые относительно обогащены совместимыми элементами, такими как Mg, Sr и Ni. В соответствии с [31], адакиты и ассоциирующие с ними магнезиальные андезиты в обстановке конвергенции литосферных плит рассматриваются как индикаторы процессов плавления относительно молодой (и нагретой) субдуцируемой океанической плиты. Однако наличие относительно холодной и «немолодой» (около 50 млн лет) субдуцируемой океанической коры под вулканом Шивелуч явилось препятствием для прямого использования модели субдукции. Это обстоятельство вынудило авторов модели [55] рассматривать участок этого сочленения в качестве своеобразного «slab-window», на манер «калифорнийского мантийного окна», и предполагать существование в качестве дополнительного источника тепла поднимающийся поток астеносферного материала. Такая модель, однако, не исключает и возможности изотопно-геохимического вклада в состав вулканических пород рассматриваемой области со стороны берингоморского мантийного плюма (диапира), хотя внутриплитный тип вулканизма в составе пород вулкана Шивелуч отсутствует.

Наибольший интерес, по-видимому, представляет аномальная зона в центральной части полуострова, ограниченная значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70332\text{--}0.7034$, и сходная по изотопному составу небольшая аномалия в r-не Авачинской группы вулканов. Выделенный интервал Sr-изотопных значений соответствует изотопным составам проявлений внутриплитного вулканизма в Камчатской островодужной системе на вулканах Ичинский [9, 29], Бакенинг [32], в южной части Центральной Камчатской депрессии [23]. Подобные изотопные характеристики были обнаружены также в базальтах Плоского Толбачика и его ареальной зоны [33] и на Плоских сопках [29]. Высококальциевые

глиноземистые базальты южного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения еще в 1990 г. О.Н. Волинцом были отнесены к вулканическим сериям неостроводужной группы [8]. Теперь становится понятным, что их следует также относить к внутриплитному типу. Проявление внутриплитного геохимического типа в составе Камчатских вулкаников подразумевает возможность использования модели мантийного диапира для объяснения этой аномалии [19, 51].

«Точечная» аномалия в районе Авачинской группы вулканов наиболее примечательна. Здесь нет проявлений внутриплитного типа. Однако в составе вулкаников наряду с андезибазальтами обычного островодужного типа обнаружены экзотические породы – авачиты с содержанием MgO до 15–20 % [22]. Кроме того, Авачинский вулкан отличается необычайно высоким содержанием глубинных ксенолитов, состав которых варьирует от лерцолитов до гарцбургитов и дунитов. По-видимому, это особый тип глубинной активизации, скорее напоминающий геосолитон Р.М. Бембеля [7], чем обычный диапир.

Необходимо отметить существование различий в характере проявления вулканизма внутри этой аномальной зоны и за ее пределами. Первые представлены крупными, длительно развивающимися центрами позднеплиоценового–четвертичного вулканизма с хорошо проявленными как докальдерными, так и посткальдерными комплексами (вулканы Ичинский, Бакенинг, Толбачиский центр, Плоские сопки). Вторые – это локальные четвертичные стратовулканы, очень редко представленные кальдерными и посткальдерными образованиями (большинство вулканов Ключевской группы). Необходимо подчеркнуть также то обстоятельство, что выделяемые на рис. 2 Sr-изотопные аномалии не проявлены ни в характере распространения изотопов неодима, ни в свинцово-изотопных характеристиках. В целом, для Камчатской островодужной системы наблюдаются повышенные значения Pb-изотопных отношений в ее фронтальной части. Кроме того, анализ Pb-изотопных характеристик свидетельствует о наличии под Камчаткой, так же как и под Курилами, «мантийного домена» Индоокеанского типа.

Согласно данным **региональной сейсмографии**, верхняя мантия (ВМ) под Камчаткой характеризуется ярко выраженной вертикальной и латеральной скоростной неоднородностью. Это касается не только особенностей структуры высокоскоростного фокального слоя, но и мантийного клина. К сожалению, относительно детально удается охарактеризовать только районы восточной и, частично, центральной Камчатки (ЦКД включительно), что связано со спецификой конфигурации региональной сети наблюдений. Слой литосферы между услов-

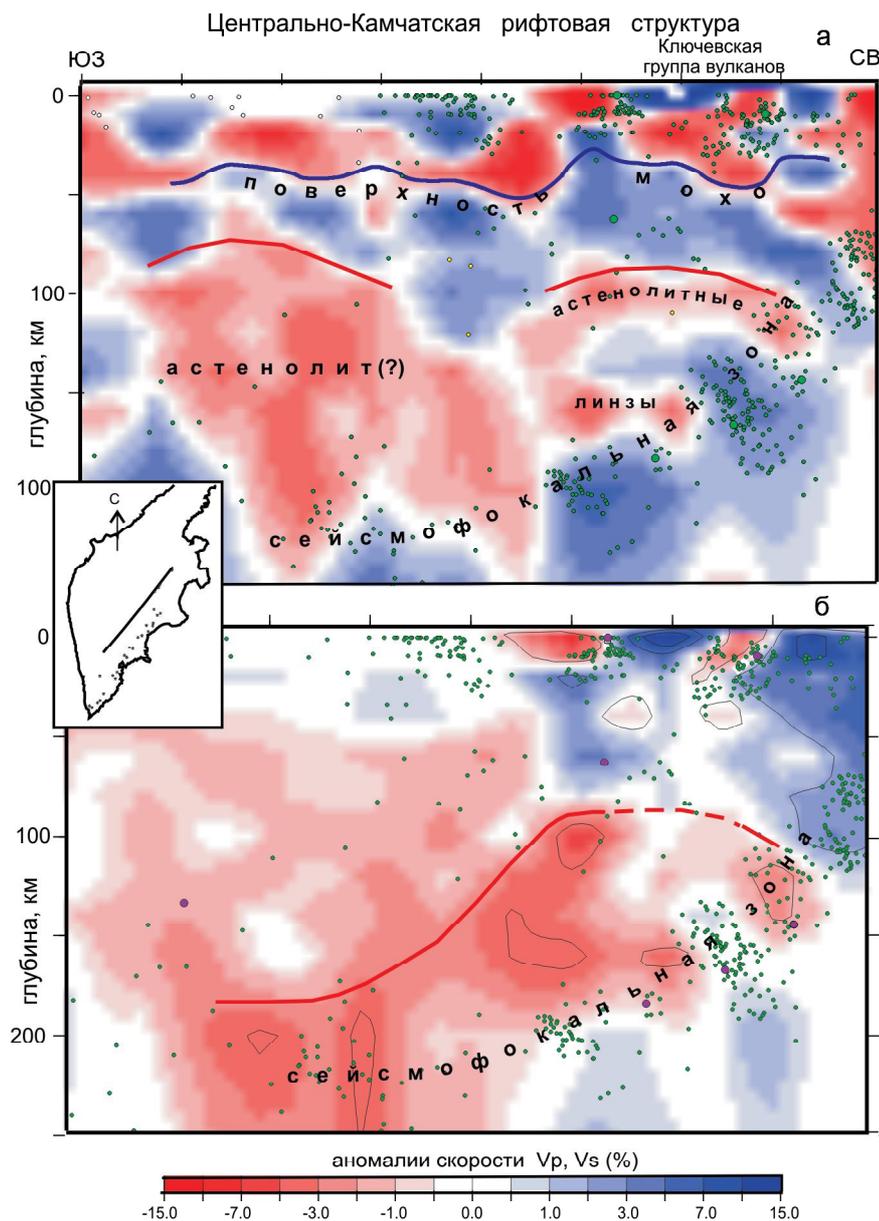


Рис. 3. Вертикальные сечения объемной скоростной модели по профилю, ориентированному вдоль п-ва Камчатка.

а – распределение мантийных неоднородностей в аномалиях скорости V_p ; б – то же в аномалиях скорости V_s . Положение профиля в плане показано на врезке. Подписаны некоторые элементы тектоники.

но отмеченным по изолинии скорости $V_p = 7.5$ км/с разделом Мохо и до глубины ~ 80 – 100 км характеризуется на скоростных сечениях положительными аномалиями скорости продольных волн V_p и четко выраженной блоковой структурой (рис. 3а). На горизонтальных сечениях ВМ хорошо проявлены различия в структуре аномальных зон V_p отрицательного знака под вулканическими поясами (ВКВП и ЦКД) (рис. 1г). На картах выделены поперечные к простиранию Камчатки аномальные скоростные структуры, с которыми связаны особенности геометрии высокоскоростного фокального слоя; вероятно, они соответствуют разломным зонам мантийного заложения, в частности, Авачинской и Кроноцко-Крутогоровской [24]. Под ЦКД прослежена низкоскоростная глубинная анома-

лия, которая на глубине ~ 150 км представлена узкой линейной формой, а выше по разрезу на глубине около 40–60 км – обширной аномалией, определенно имеющей продолжение под СХ (рис. 1г, рис. 4). Конфигурация камчатской сети станций не позволяет выполнить там сейсмотомографические построения, однако данные глобальной томографии [21, 39] соответствуют такому предположению. Контуры этой скоростной неоднородности в целом неплохо увязываются с изотопной аномалией (рис. 2), хотя, безусловно, отличаются в деталях. При этом не вызывает сомнений, что в центральной части полуострова в верхней мантии выделяется глубинная структура, которая отличается характерными скоростными особенностями. В частности, вертикальные сечения вдоль и вкост Камчатки

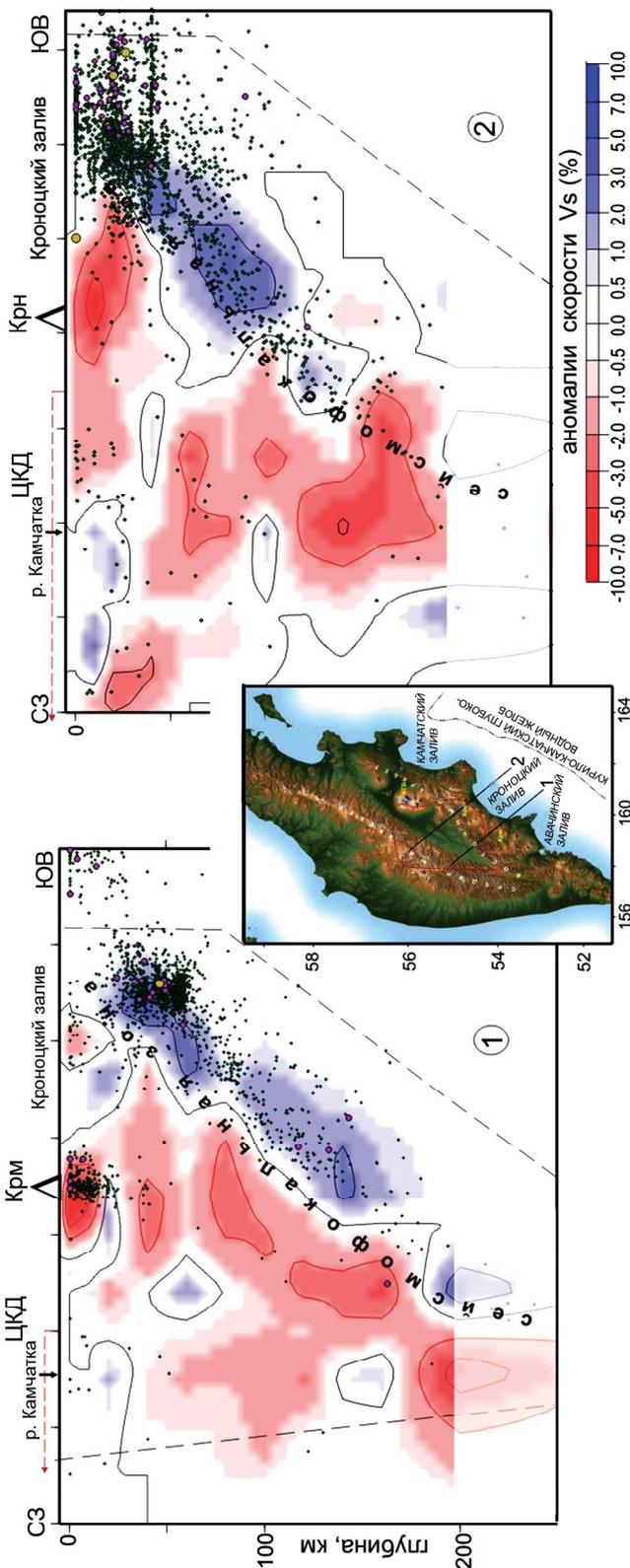


Рис. 4. Вертикальные сечения объемной скоростной модели вкост полуострова (в аномалиях скорости V_s).

Треугольниками отмечены вулканы: Карымский (Крм) и Кронотский (Крн). Положение профилей показано на врезке. Пунктирной линией со стрелкой (см. р. Камчатка) отмечен контур Sr-изотопной аномалии; пунктирной – область рассчитанной скоростной модели.

в аномалиях скорости V_s позволяют проследить эти особенности практически от низов коры и до глубины не менее 150–200 км (рис. 3 б, рис. 4). Представляется возможным предположить, что она может быть обусловлена мантийным «астенолитом» (астенолитной «линзой», «диапиром»), активность которого существенно усложняет общую картину зонального в плане распределения изотопно-геохимических характеристик проявлений позднекайнозойского вулканизма региона. Характерной и, как представляется, весьма показательной и значимой особенностью региональной скоростной модели, представленной в аномалиях V_s , является резкое скачкообразное изменение свойств ВМ в области, приуроченной к Кронотско-Крутогоровской разломной зоне (рис. 3 б). Совместно с анализом особенностей сейсмичности и погружением «кластеров» землетрясений в направлении северо-восток – юго-запад вдоль профиля, полученные результаты могут использоваться при моделировании протекающего в этом районе глубинного процесса (в данной статье этот вопрос не обсуждается). В целом, скоростная структура ВМ под Ключевской группой вулканов представляется наложенной на более глубокую Центрально-Камчатскую структуру.

Анализ низкочастотных составляющих **поля силы тяжести** (ПСТ) в редукции Буге как с использованием данных региональных наземных гравиметрических съемок, так и карт, построенных по результатам спутниковой альтиметрии, показывает наличие обширной отрицательной аномалии с эпицентром, приблизительно, в районе треугольника, образованного вулканами Ичинский, Бакенинг и Плоский Толбачик (рис 5). Форма отрицательной аномалии определяется не столь однозначно на схемах различных частотных составляющих, однако можно уверенно говорить о вытянутости ее в С-В направлении. Не менее интересной особенностью морфологии низкочастотных составляющих ПСТ является наличие зоны относительно повышенных значений, обрамляющих с востока вышеупомянутый минимум. Показанное на рис. 5 смещение оси гравитационных ступеней при анализе поля от относительно высокочастотных к низкочастотным составляющим может свидетельствовать о наличии более уплотненной зоны в мантии с тенденцией погружения с востока на запад. Если это предположение справедливо, то область с $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7034$ для большинства стратовулканов Ключевской группы и в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутско-Командорской островодужных систем мо-

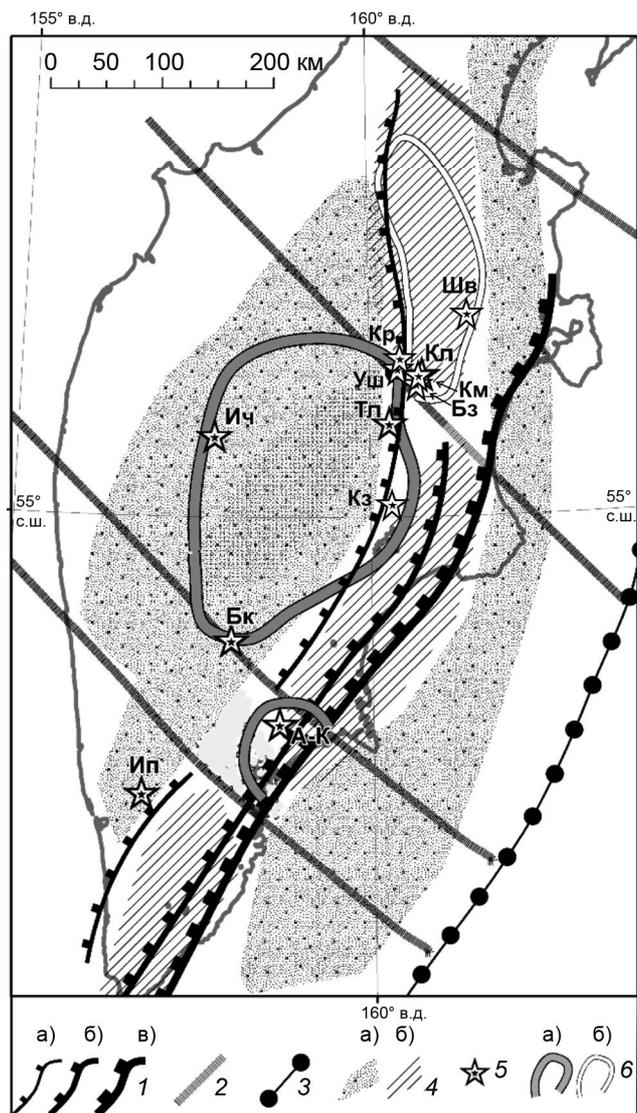


Рис. 5. Схема низкочастотных аномалий поля силы тяжести (ПСТ) в редукции Буге.

1 – оси повышенных горизонтальных градиентов; а, б, в – последовательно от относительно низкочастотных к высокочастотным составляющим ПСТ; 2 – предполагаемые по геофизическим данным крупные разломы С-З направления; 3 – ось Курило-Камчатского глубоководного желоба; 4 – аномалии ПСТ: а – относительные понижения (минимумы), б – повышения; 5 – крупные четвертичные вулканы: Кл – Ключевская сопка, Км – Камень, Бз – Безымянный, Шв – Шивелуч, Тл – Плоский и Острый Толбачики, Уш – Ушковский, Кр – Крестовский; Бк – Бакенинг, Ич – Ичинский, Ип – Ипелька, А-К – Авачинский и Корякский; 6 – области изотопных аномалий: а – ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70332\text{--}0.7034$), б – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7034$.

жет объясняться тем, что первичные магматические очаги здесь, в отличие от области Центральной аномалии ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70332\text{--}0.7034$), либо располагаются в литосферной мантии, либо находятся относительно ближе к подошве земной коры, что и приводит к изменению $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения. Это положение иллюстри-

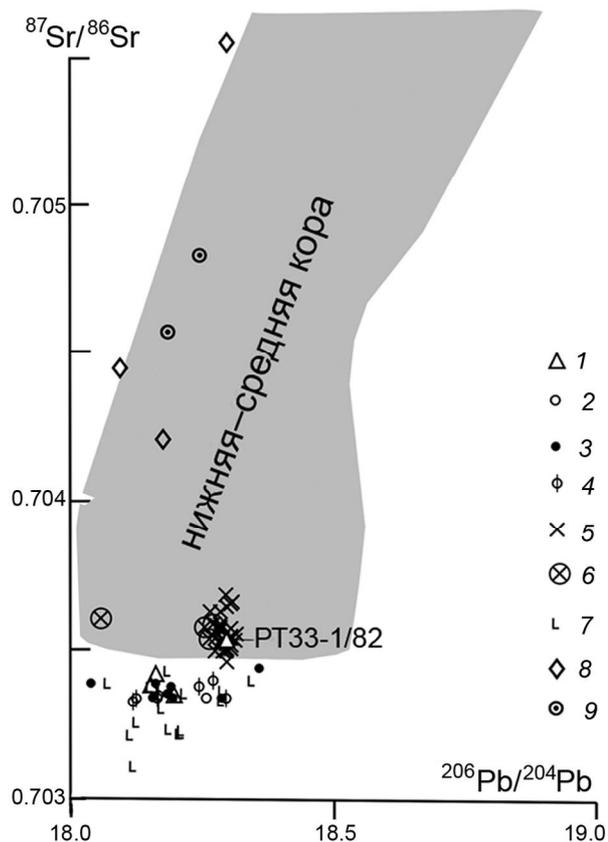


Рис. 6. Соотношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в породах различных вулканов Ключевской группы и базальтов внутриплитного типа Срединного хребта Камчатки.

1–3 – Толбачинский центр: глиноземистые базальты Толбачинского вулкана (1), базальты ареального вулканизма глиноземистого (2) и магнезиального (3) типа; 4 – Ушковский вулкан; 5 – вулканы Ключевской, Камень; 6 – вулкан Безымянный; 7 – внутриплитные вулканиты (вулканы Ичинский, Бакенинг); 8 – метаморфиты Хавывенской возвышенности, 9 – метаморфиты Ганальского хребта. Использованы материалы: [25, 28, 29, 33, 48, 49]. Нижняя-средняя кора – по [4].

руется диаграммой рис. 6, на которую отдельно вынесены изотопные составы, с одной стороны, пород Толбачинского центра и Ушковского вулкана, а с другой стороны, – вулканов: Ключевской, Камень и Безымянный. Точки изотопных составов пород первой группы локализуются в области мантийных составов, а второй – сдвинуты в поле нижней-средней коры, что явно свидетельствует об их разноглубинном питании.

Существование мантийного диапира в районе центральной Камчатки, по нашему мнению, находит подтверждение и в неотектонических особенностях рассматриваемого района. Особенности современного рельефа говорят о контрастном зонально-блоковом характере неотектонических движений в рассматриваемом районе. Однако в данном случае нас в большей мере интересует обобщенный их характер.

Вполне возможно, что наличие горячего мантийного диапира должно каким-то образом проявиться в обобщенных особенностях рельефа, вулканизма и тектоники центральной части Камчатки. Обобщенные характеристики рельефа мы можем проанализировать либо по спутниковым альтиметрическим аномалиям в свободном воздухе, либо рассмотрев особенности осредненного рельефа. Результаты получаются очень близкими. На рис. 7 приведена схема осредненного рельефа центральной части Камчатки. Хорошо видно, что в области предполагаемого мантийного диапира наблюдается изометричная аномалия рельефа, которую по осредненным данным можно характеризовать как сводовое поднятие, осложненное с востока Центрально-Камчатской депрессией (зона растяжения), с юга – Малкинско-Петропавловской зоной поперечных дислокаций, а с севера – зоной сочленения с Алеутско-Командорской островодужной системой. Сходные «контурные» ограничения аномальных свойств верхней мантии представлены и в вышерассмотренных результатах региональной сейсмотомографии, что позволяет авторам по совокупности данных предложить модель поднимающегося астеносферного диапира в литосферную мантию до глубины 40–60 км. Этот диапир реализуется затем в виде отдельных потоков «мантийных струй» – «hot fingers» («горячих пальцев»), описанных в [50] для С-В Японии. Детальная разработка модели астеносферного диапиризма описана нами ранее в работе [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный подход к изучению изотопно-геохимических и геофизических аномалий в пределах рассматриваемого региона позволяет сделать ряд достаточно обоснованных выводов.

1. Выявленная в пределах Центральной Камчатки обширная изотопно-геохимическая аномалия находит свое отражение в сейсмотомографических моделях и хорошо согласуется с данными гравиметрии. Это позволяет интерпретировать ее как следствие проникновения астеносферного диапира в низы литосферной мантии до глубин порядка 40–60 км.

2. Особенности вещественного состава крупных вулканических центров Камчатки, таких как Ичинский, Бакенинг, Толбачинский, Плоские сопки, определяются влиянием этого мантийного диапира (образование базальтов внутриплитного геохимического типа).

3. В составе крупных стратовулканов Ключевской группы, таких как Харчинский, Ключевской, Безымянный, отражается менее глубокий коромантийный уровень питания с существенной добавкой корового материала. Породы внутриплитного геохимического типа здесь отсутствуют.

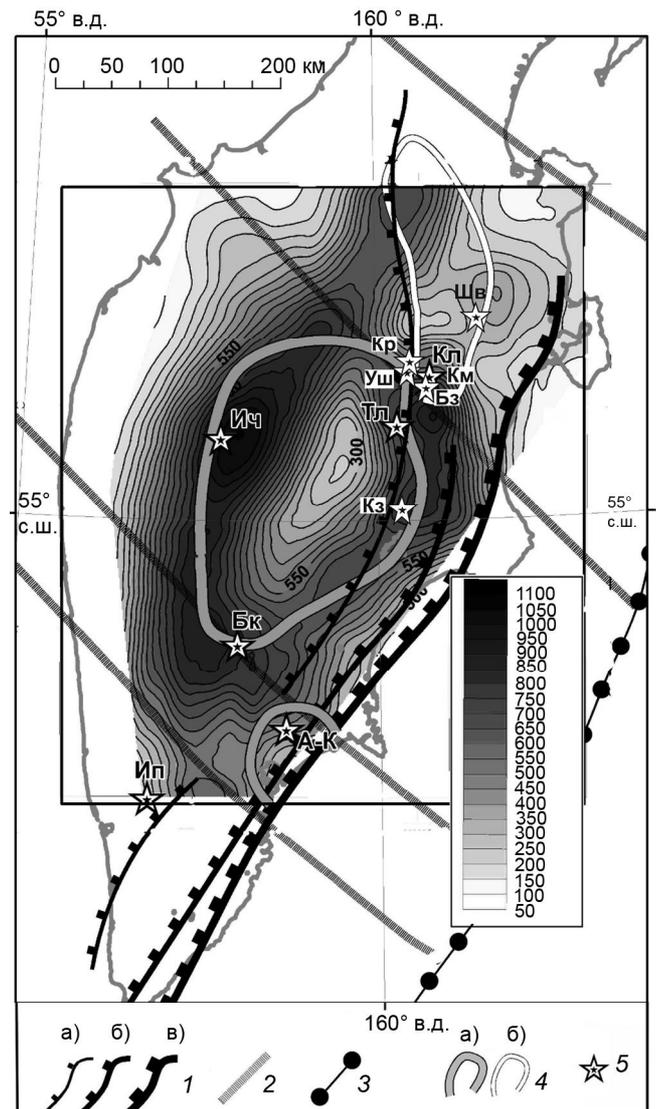


Рис. 7. Схема осредненного рельефа местности (шкала – абсолютная высота в метрах).

Условные обозначения 1, 2, 3 – см. на рис. 5; 4 – соответствует знаку б на рис. 5; 5 – четвертичные вулканы.

4. Проявления щелочно-базальтового внутриплитного вулканизма в структуре Берингоморского региона также необходимо рассматривать в рамках поднимающегося диапира.

5. В зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутско-Командорской островодужных систем наблюдается наложение аномалии с повышенными Sr-изотопными составами на Берингоморскую аномалию с умеренными Sr-изотопными характеристиками. Здесь наблюдается сочетание пород как внутриплитного, так и островодужного геохимических типов.

6. Анализ полученных материалов остро ставит проблему пространственного и возрастного сочетания моделей субдукционной геодинамики и диапиризма.

Статья написана в рамках проекта РФФИ № 13-05-12090 «Астеносферный диапиризм на границах континентальных и океанических литосферных плит».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А. Геодинамические условия вулканизма и магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы // Петрология. 2006. № 3. С. 248–265.
2. Акинин В.В., Апт Ю.Г. Позднекайнозойский щелочно-базитовый вулканизм на Северо-Востоке России // Магматизм и оруденение Северо-Востока России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1997. С. 155–175.
3. Акинин В.В., Калверт А., Хоуриган Дж и др. Состав и эволюция щелочно-базальтовых магм вулканического поля Имурук, п-ов Сьюард, Аляска (Берингоморская вулканическая провинция) // Геология, география и биологическое разнообразие Северо-Востока России: Материалы Дальневост. регион. конф. Владивосток, 2006. С. 44–46.
4. Акинин В.В., Андроников А.В., Мукаса С.Б. и др. Меловая нижняя кора континентальных окраин севера Пацифики: петролого-геохронологические данные по ниже-средне-корытым ксенолитам // Петрология. 2013. Т. 21, № 1. С. 34–42.
5. Аносов Г.И., Колосков А.В., Флеров Г.Б. Особенности проявления ультрамафитов Камчатского региона с позиций вихревой геодинамики // Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 129–200.
6. Апт Ю.Е., Акинин В.В., Райт Дж. Е. Изотопы Sr, Nd, и Pb в неогеновых меланефелинитах и в глубинных ксенолитах на Северо-Востоке России // Геохимия. 1998. № 1. С. 28–37.
7. Бембель Р.М., Мегеря В.М., Бембель С.Р. Геосолиитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. Тюмень: Изд-во «Вектор бук», 2003. 308 с.
8. Вольнец О.Н., Антипин В.С., Перепелов А.Б. и др. Геохимия вулканических серий островодужной системы в приложении к геодинамике (Камчатка) // Геология и геофизика. 1990. № 5. С. 3–13.
9. Вольнец О.Н., Колосков А.В., Виноградов В.И. и др. Изотопный состав стронция и кислорода позднекайнозойских К-На щелочных базальтов внутриплитного геохимического типа, Камчатка // Петрология. 1995. Т. 3, № 2. С. 207–213.
10. Вольнец О.Н., Карпенко С.Ф., Кэй Р.У. и др. Изотопный состав позднекайнозойских К-На щелочных базальтоидов Восточной Камчатки: отражение гетерогенности мантийного источника магм // Геохимия. 1997. № 10. С. 1005–1018.
11. Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В. Глубинные процессы и геофизические модели мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива // Геология и полезные ископаемые мирового океана. Киев: Наук. думка, 2006. № 2. С. 107–122.
12. Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В., Апрельков С.Е. Верхняя мантия Камчатки: глубинная модель и связь с тектоникой // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 2. С. 80–91.
13. Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В. Структура верхней мантии зоны перехода океан-континент в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 13–29.
14. Грачев А.Ф. Четвертичный вулканизм и проблемы геодинамики Северо-Восточной Азии // Физика Земли. 1999. № 9. С. 19–37.
15. Добрецов Н.Л., Кулаков И. Ю., Литасов Ю.Д. Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 12. С. 1633–1662.
16. Жао Д., Пирайно Ф., Лиу Л. Структура и динамика мантии под Восточной Россией и прилегающими регионами // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 9. С. 1188–1203.
17. Кабан М.К. Структура верхней мантии континентов по сейсмическим и гравитационным данным // Эл. науч.-инф. Вестн. ОНЗ РАН. 2002. № 1 (20).
18. Колосков А.В. Изотопно-геохимическая неоднородность плиоцен-четвертичных вулканических пород Камчатки, геометрия субдукционной зоны, модель флюидно-магматической системы // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С. 16–42.
19. Колосков А.В. Аномальные магматические зоны современных островодужных систем. Корьяско-Камчатская вулканическая зона // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Ред. чл.-корр. РАН А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. С. 398–417.
20. Колосков А.В., Хубуная С.А. Новые данные по петрологии вулканических пород района Чичинаутзин: источники магматических расплавов и происхождение Трансмексиканского вулканического пояса // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 4. С. 24–39.
21. Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52Б, № 6. С. 830–851.
22. Кутыев Ф.Ш., Иванов Б.В., Овсянников А.А. и др. Экзотические лавы Авачинского вулкана // Докл. АН СССР. 1980. Т. 255, № 5. С. 1240–1243.
23. Перепелов А.Б., Татарников С.А., Павлова Л.А. и др. НЕВАДАКТИВНЫЙ вулканизм Центральной Камчатской депрессии // Вулканизм и геодинамика / IV Всерос. симп. по вулканологии и палеовулканологии: Материалы симпоз. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. Т. 2. С. 449–454.
24. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. В. Беринга, 2009. 191 с.
25. Тарарин И.А., Дриль С.И., Сандимирова Г.П. и др. Изотопный состав стронция, неодима и свинца в метаморфических породах Хавывенской возвышенности восточной Камчатки // Докл. РАН. 2010. Т. 431, № 2. С. 238–241.
26. Федоров П.И., Колосков А.В., Ляпунов С.М. Геохимия и петрология позднекайнозойских вулканических пород мыса Наварин (восток Корьянского нагорья) // Геохимия. 1993. № 9. С. 1284–1296.
27. Akinin V.V., Sobolev A.V., Ntaflou T. et al. Clinopyroxene megacrysts in melanephelinitic volcanoes (Chukchi Peninsula, Russia): application to composition and evolution of mantle melts // Contrib. Mineral. Petrol. 2005. V. 150. P. 85–101.
28. Castelana B. Geology, chemostratigraphy and petrogenesis of the Avachinsky volcano, Kamchatka, Russia. Phd. N 981805050. 1998.
29. Churikova T., Dorendorf F., Woerner G. Sources and fluids in mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation // J. Petrol. 2001. V. 42. P. 1567–1593.
30. Davis A.S., Gunn S.H., Gray L.-B. et al. Petrology and isotopic composition of Quaternary basanites dredged from the Bering

- Sea continental margin near Navarin basin // *Can. J. Earth Sci.* 1993. V. 30, N 5. P. 975–984.
31. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // *Nature*. 1990. V. 347. P. 662–665.
 32. Dorendorf F., Churikova T., Koloskov A. et al. Late Pleistocene to Holocene activity at Bakening volcano and surrounding monogenetic centers (Kamchatka): Volcanic geology and geochemical evolution // *J. Volcan. Geotherm. Res.* 2000. V. 104. P. 131–151.
 33. Dosseto A., Bourdon B., Goron J-L. et al. U-Th-Pa-Ra study of the Kamchatka arc: New constraints on the genesis of arc lavas // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2003. V. 67, N 15. P. 2857–2877.
 34. Ekstrom G., Dziewonski A.M. The unique anisotropy of the Pacific upper mantle // *Nature*. 1998. V. 394. P. 168–172.
 35. Gorbatov A., Kostoglodov V., Suarez G. et al. Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone // *JGR*. 1997. V. 102. P. 17883–17898.
 36. Gorbatov A., Dominguez J., Suarez G. et al. Tomographic imaging of the P-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula // *Geophys. J. Int.* 1999. V. 137. P. 269–279.
 37. Gorbatov A.S., Widiyantoro S., Fukao Y. et al. Signature of remnant slabs in the North Pacific from P-wave tomography // *Geophys. J. Intern.* 2000. V. 142. P. 27–36.
 38. Hart S. R. Heterogeneous mantle domains: signatures, genesis and mixing chronologies // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1988. V. 90. P. 273–297.
 39. Jiang G., Zhao D., Zhang G. Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka // *Tectonophysics*. 2009. V. 495. P. 190–203.
 40. Kay R.W., Sun S.S., Lee-Hu C.N. Pb and Sr isotopes in volcanic rocks from the Aleutian Islands and Pribilof Islands, Alaska // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1978. V. 42. P. 263–273B.
 41. Kepezhinskas P., Mc Dermott F., Defant J. et al. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1997. V. 61, N 3. P. 577–600.
 42. Lees J.M., J. Van Decar, Gordeev E. et al. Three dimensional images of the Kamchatka-Pacific plate cusp // *Volcanism and subduction. The Kamchatka Region* // *Geophys. Monogr. Ser.* 2007a. V. 172. P. 65–75. AGU, Washington, D.C.
 43. Levin V., Shapiro N., Park J. et al. Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka // *Nature*. 2002. V. 418. P. 763–766.
 44. Levin V., Park J., Brandon M. et al. Crust and upper mantle of Kamchatka from teleseismic receiver function // *Tectonophysics*. 2002. V. 358. P. 233–265.
 45. Moll-Stalcup E.J. The origin of the Bering sea basalt province, western Alaska // *Proceeding of the Int. Conf. Arctic Margins (Magadan, Russia, 1994)*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1995. С. 113–123.
 46. Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L., Sanina I., Levina V. Correlation of Kamchatka lithosphere velocity anomalies with subduction processes // *Volcanism and subduction. The Kamchatka Region. Geophys. Monogr. Ser.* 172. P. 97–106. Copyright 2007 by the AGU. 10/ 1029/172GM09 (350 pp).
 47. Peyton V., Levin V., Park J., Brandon M., Lees J. Mantle flow at a slab edge: seismic anisotropy in the Kamchatka region // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 379–382.
 48. Pineau F., Semet M.P., Grassineau N. et al. The genesis of the stable isotope (O, H) record in arc magmas: the Kamchatka's case // *Chem. Geol.* 1999. V. 135. P. 93–124.
 49. Portnyagin M., Bindeman I., Hoernle K. et al. Geochemistry of primitive lavas of the Central Kamchatka Depression: Magma generation at edge of the Pacific Plate / Eichelberger J. (ed.) // *Volcanism and tectonics of the Kamchatka peninsula and adjacent arcs. Geophys. Monograph. Ser.* 2007. V. 172. P. 199–239.
 50. Tamura Y., Tatsumi Y., Zhao D. et al. Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 197. P. 105–116.
 51. Volynets O.N. Geochemical types, petrology and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island-arc system // *Intern. Geol. Rev.* 1994. V. 36, N 4. P. 373–405.
 52. Yogodzinski G.M., Rubenstone J.L., Kay S.M. et al. Magmatic and tectonic development of the Western Aleutians: An oceanic arc in a strike-slip setting // *J. Geoph. Res.* 1993. V. 98, N B7. P. 11807–11834.
 53. Yogodzinski G.M., Volynets O.N., Koloskov A.V. et al. Magnesian andesites and the subduction component in a strongly calc-alkaline series at Piip Volcano, Far Western Aleutians / *J. Petrol.* 1994. 35 (1). P. 163–204.
 54. Yogodzinski G.M., Kay R.W., Volynets O.N. et al. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandor region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge // *GSA Bull.* 1995. V. 107, N 5. P. 505–519.
 55. Yogodzinski G.M., Lee J.M., Churikova T.G. et al. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges // *Nature*. 2001. V. 409. P. 500–504.

Рекомендована к печати В.Г. Сахно

A.V. Koloskov, L.I. Gontovaya, S.V. Popruzhenko

The upper mantle of Kamchatka in isotopic-geochemical and geophysical anomalies. The role of astenospheric diapirism

Data on the isotopic-geochemical studies, seismic tomography and gravimetric survey of the Kamchatka and Bering Sea regions are correlated. It was shown that the isotopic-geochemical anomalies revealed are in good accordance with the geophysical data. It was suggested that the anomalies in the Central Kamchatka and Bering Sea regions are the result of local diapirs penetration into the lithosphere, the activities of which are associated with the formation of the rocks of intraplate geochemical type. The junction of the Kurile-Kamchatka and Komandor-Aleutian island arc systems is characterized by an elevated portion of the crust material in the composition of volcanic rocks of the mantle genesis and combination of the island and intraplate types.

Key words: isotopic-geochemical composition, seismic tomography, gravimetry, lithosphere, mantle diapirs, Kamchatka peninsula, Bering Sea.