

СООТНОШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ И ГЛУБИННОЙ ТЕКТОНИКИ В ПРЕДЕЛАХ АФРИКАНСКОГО РЕГИОНА (ПО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ)

© 2021 г. Е. Н. Меланхолина*

Геологический институт РАН, Пыжевский пер., д. 7, 119017 Москва, Россия

*e-mail: e.melanh@gmail.com

Поступила в редакцию 12.11.2020 г.

После доработки 18.09.2021 г.

Принята к публикации 01.10.2021 г.

Обсуждается пространственная связь элементов нижнемантийного слоя D" как с Большими Магматическими Провинциями (LIPs) фанерозойского возраста, так и с молодыми горячими точками и кимберлитами в пределах Африканского региона. Подобная связь показана также для прогибов Кейп-Кару и Парана, унаследованно развивавшихся вдоль краевых частей региона начиная с раннего палеозоя. Для всех этих поверхностных структур и продуцировавших их плюмов подчеркнута специфическое расположение, указывающее на связь их образования с участками, где контактируют ядро Земли, Большие Низко-Скоростные Провинции (LLSVPs) и стагнирующие слэбы. Рассматриваются соотношения процессов плюм-тектоники и тектоники плит в развитии планеты. В ходе этих процессов выявляется постоянное взаимодействие Тихоокеанского и Индо-Атлантического сегментов Земли. Тихоокеанский сегмент на протяжении фанерозоя характеризовался развитием океанообразования и последующей субдукцией под континенты Индо-Атлантического сегмента. Постоянство спрединга в Тихом океане определялось существованием его связи с Тихоокеанской LLSVP. В пределах слоя D" на участках контакта тихоокеанских субдуцирующих плит и Африканской LLSVP периодически происходила генерация плюмов, приводившая в дальнейшем к распаду суперконтинентов. Это обусловило специфику фанерозойского развития Индо-Атлантического сегмента, с чередованием конвергенции и континентального раскола. Несмотря на значительное сходство Африканской и Тихоокеанской LLSVPs, их роль в образовании крупнейших элементов поверхностной структуры оказывается неодинаковой. Возможно, именно это послужило одной из главных причин принципиальных различий двух сегментов и привело к созданию тектонической асимметрии Земли.

Ключевые слова: сейсмическая томография, граница ядро–мантия, слой D", Большие Низко-Скоростные Провинции (LLSVPs), субдуцированные пластины, плюмы, стагнирующие слэбы, Большие Магматические Провинции (LIPs), горячие точки, Тихоокеанский и Индо-Атлантический сегменты

DOI: 10.31857/S0016853X21060059

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наметились реальные пути для рассмотрения связи поверхностных и глубинных процессов в развитии Земли. Особенно важными являются успехи в изучении глубокой мантии. В частности, результаты исследований по сейсмической томографии уже позволяют судить в общих чертах о характере образований, слагающих слой D" в самых низах нижней мантии. В большинстве представленных глобальных сейсмотомографических моделей, несмотря на различия использованных данных и компьютерных методов, видны важные общие черты. Авторами рассматривается крупномасштабная гетерогенность нижней мантии с обособлением под Афри-

кой и Пацификой Больших Низко-Скоростных Провинций, с поднимающимися от них плюмами, с подходящими к краям провинций высокоскоростными субдуцированными пластинами, что было показано в целом ряде работ, начиная с 1990-х годов [14, 18, 23, 32, 35, 38]. Было обнаружено соответствие между этими нижнемантийными элементами и расположением ряда тектонических структур на поверхности. Наиболее четко это выражено в Африканском регионе [3–5, 32, 34, 35].

Данная статья представляет обзор и обсуждения тектонических соотношений, с использованием опубликованных геолого-геофизических материалов по Африканскому региону. Многие

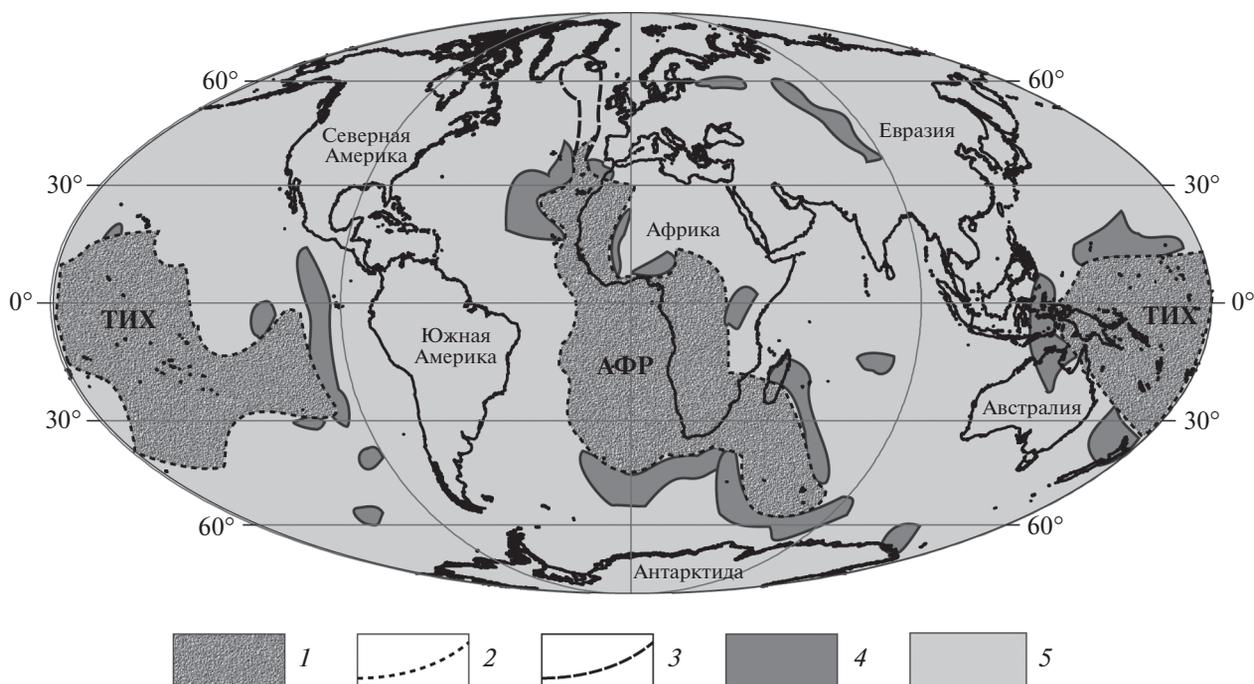


Рис. 1. Схема строения нижнемантийного слоя D'' (с использованием данных [11, 32]).

Обозначено: АФР – Африканская LLSVP, ТИХ – Тихоокеанская LLSVP.

1–2 – Большие Низко-Скоростные Провинции (LLSVPs): 1 – области с $V_s \leq -1.0\%$, 2 – ограничения LLSVPs (-1% медленный контур); 3 – -0.8% медленный контур на севере Атлантики; 4 – скопления стагнирующих слэбов с V_s до $+2\%$, иногда больше 2% ; 5 – области нормальной нижней мантии

вопросы, связанные как с исследованием физики минералов, так и с учетом вариаций вязкости мантийного материала, возможности длительной стабильности низкоскоростных скоплений или адвекции высокоскоростных пластин по поверхности земного ядра, требуют дальнейшей разработки и в статье не обсуждаются [33]. Целью статьи является рассмотрение пространственных связей поверхностных и глубинных структур в пределах региона. При этом кажется необходимым привлечение для рассмотрения дополнительных данных по поверхностной тектонике, которым и уделено в статье главное внимание. Особенно существенным является сравнение структур Индо-Атлантического и Тихоокеанского сегментов и выяснение их соотношений с нижнемантийными элементами, что представляется необходимым при рассмотрении причин, определяющих асимметрию Земли.

ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ СЛОЯ D''

На основании сейсмотомографических данных, слой D'' характеризуется значительными латеральными вариациями температуры и состава, что усложняется также и вследствие наличия фазовых изменений. У границы ядро–мантия около 20% площади слоя D'' занимают Большие Низко-Скоростные Провинции (Large Low Shear-Wave

Velocity Provinces – LLSVPs, или суперплюмы), выделяемые преимущественно по отличию скоростей поперечных волн от их средних значений на данном глубинном уровне. Эти провинции под Африкой (TUZO) и под Тихим океаном (JASON) имеют близкие размеры – порядка многих тысяч километров в ширину при высоте до 1400–1800 км [13]. Их центры массы располагаются антиподально в приэкваториальной области Земли (рис. 1).

Обе низкоскоростные провинции характеризуются неправильными очертаниями в плане и чрезвычайно неровной кровлей. В их внутренних частях скорости поперечных волн отклоняются от средних значений вплоть до -2.9% , что может указывать на разогретое состояние материала [14, 32]. Ограничения провинций маркируются -1% -ным медленным контуром, где непосредственно над границей ядро–мантия на большом протяжении наблюдаются наиболее крупные латеральные градиенты скоростей поперечных волн, как это представлено на томографической модели SMEAN [11]. Так, вокруг Африки для 50% длины медленного контура величина краевого скоростного градиента достигает $1.6\%/град$. [32], причем различия между альтернативными характеристиками во многих сейсмотомографических моделях как правило малы. Образование круто наклоненных краев LLSVPs лучше всего объяснимо контролем состава и реологии. Предполагается, что

материал LLSVPs химически индивидуализирован и не смешивается с веществом окружающей мантии. Большинство исследователей рассматривает эти провинции как горячие, но плотные скопления [33].

Помимо низкоскоростных элементов первого порядка, представляет интерес обнаружение непосредственно выше границы ядро–мантия, обычно вблизи краев LLSVPs, сравнительно небольших (несколько сотен километров в поперечнике) ультранизкоскоростных тел, где проявлено понижение скоростей поперечных волн вплоть до 30% [20, 24]. Высказывалось предположение о частичном плавлении здесь мантийного материала [30]. Однако сведения об ультранизкоскоростных телах пока достаточно неопределенны.

Вблизи ограничений Африканской LLSVP фиксируется наличие высокоскоростных субдублированных пластин и их фрагментов, образующих скопления стагнирующих слэбов [21, 28, 36] (см. рис. 1). Скорости поперечных волн в этих пластинах превышают средние значения на 2%, а иногда и значительно больше [32]. Особенно протяженная высокоскоростная зона располагается вдоль южного края LLSVP. Высокоскоростные образования слагают значительную часть слоя D".

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ПРЕДЕЛАХ АФРИКАНСКОГО РЕГИОНА

Вулканические пассивные окраины Африки явились ареной магматических проявлений гигантского масштаба. В мезозойское время здесь было последовательно образовано несколько Больших Магматических Провинций (LIPs): Центрально-Атлантическая, Кару, Парана-Этендека. На их продолжении к востоку и к северу в мел-палеогеновое время были заложены провинции Мадагаскар и Северо-Атлантическая. В пределах всех LIPs получен ряд свидетельств, подтверждающих определяющую роль мантийных плюмов в образовании магм, предполагавшуюся во многих работах, начиная с [26]. Это:

- синхронный глубинный разогрев, вызвавший начало магматизма во всей провинции;
- высокое гипсометрическое положение участков извержений;
- местами радиальное расположение ранних даек;
- огромный объем вулканических и интрузивных комплексов и признаки значительного фракционирования расплавов в ходе развития магматических резервуаров;
- повсеместное образование высокотемпературных плато–базальтов;

– присутствие в южных районах ферропикритов, отвечающих первичным плюмовым выплавкам;

– сейсмотомографические характеристики провинций и расположение значительных положительных аномалий геоида, соответствующих наличию на глубине низкоплотностных гравитирующих масс [3, 5].

Мощная вспышка магматизма указывает на масштабность влияния плюмов на развитие магматического процесса, хотя характер их влияния пока не получил однозначного объяснения. Анализ особенностей магматизма и причин геохимического обогащения расплавов показал для Северо-Атлантической провинции вероятность непосредственного плавления Исландского плюма, включавшего и захваченный литосферный материал [3]. Для магматизма провинций Центрально-Атлантической и Парана-Этендека реконструируется преимущественное формирование расплавов в субконтинентальной литосфере при ее кондуктивном разогревании над плюмами и плавлении древних обогащенных комплексов. При образовании разновозрастных магматических провинций в Северной, Центральной и Южной Атлантике и в обрамлении Южного океана мантийные источники оказываются во многом сходными по геохимическим характеристикам, но различными по степени их проявления [3–5].

Использование палеомагнитных данных и проведенные реконструкции позволили воссоздать более концентрированное первоначальное расположение LIPs по сравнению с современным [14, 32, 34]. Было установлено, что 23 из 25 реконструированных авторами LIPs, как мезо-кайнозойских, так и палеозойских, проектируются радиально вниз на участки низкоскоростных районов в зоне D", образуя кольцо по их краям, как это четко видно на периферии Африканской LLSVP (рис. 2). При этом отмеченные мезозойские провинции располагаются над южной и центральной частями Африканской LLSVP, палеозойские – почти исключительно на севере [35]. Подобное пространственное соответствие нижнемантийным элементам выявлено в Африканском регионе также для многих молодых горячих точек, как и для подавляющей части кимберлитов (преимущественно мезозойских) (рис. 3). На периферии Тихоокеанской LLSVP не наблюдается такой закономерной картины.

Нередко у горячих точек – о. Тринидад, о. Св. Елены, о. Реюньон и других – наблюдается след за монотонной возрастной прогрессией, позволяющий определить их связи с LIPs. Такова, например, цепь вулканов Китового хребта, протянувшаяся от провинции Парана-Этендека (133–126 млн лет) до горячей точки Тристан [29]. В ряде случаев от горячих точек, в частности Ис-

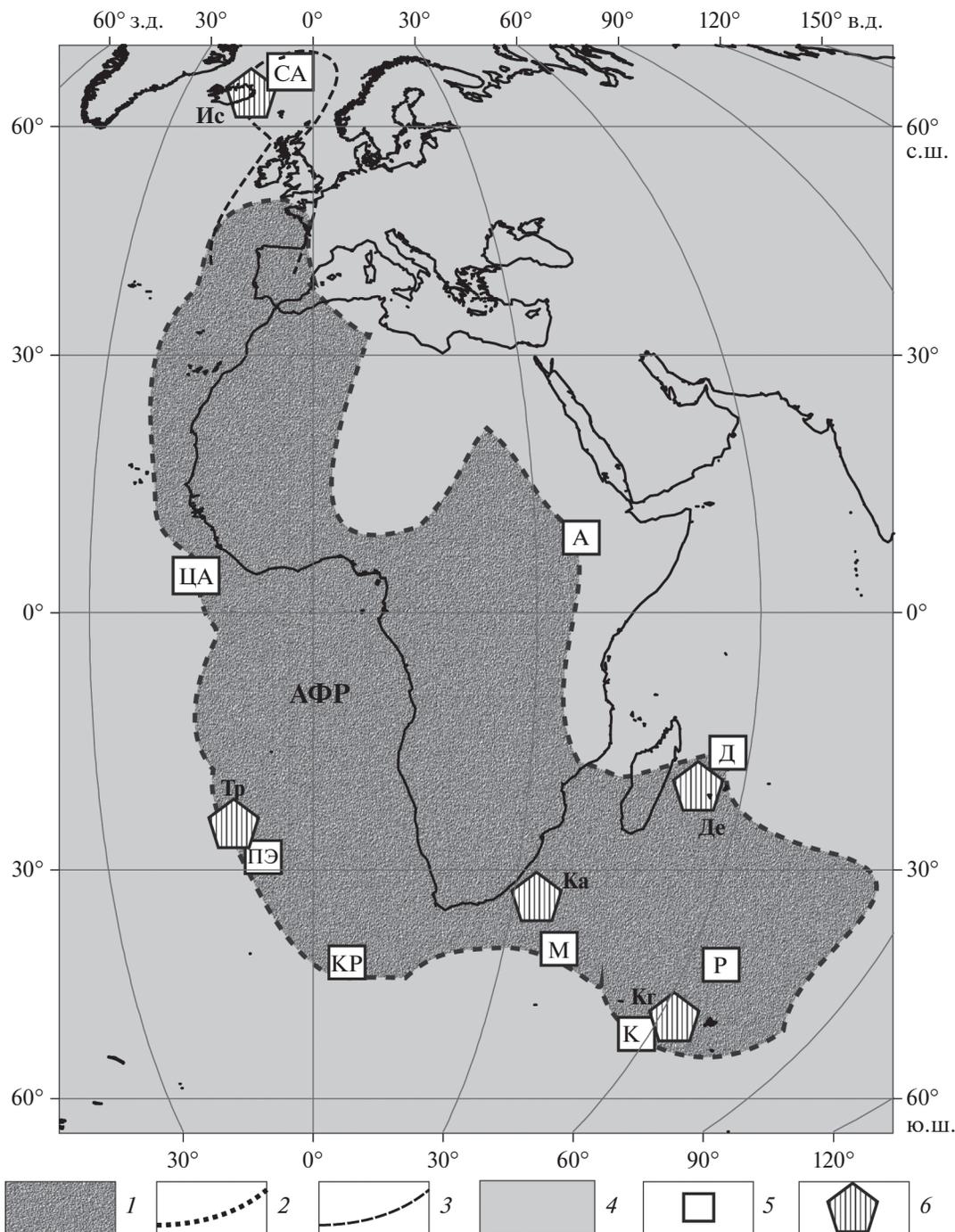


Рис. 2. Локализация мезозойских Больших Магматических Провинций (LIPs) в пределах Африканского региона (с использованием данных [33, 34]).

Положение провинций показано в соответствии с палеомагнитными реконструкциями на время их заложения. Обозначено: АФР – Африканская LLSVP; мезо-кайнозойские LIPs: СА – Северо-Атлантическая (62 млн лет), ЦА – Центрально-Атлантическая (200 млн лет), ПЭ – Парана-Этендека (133 млн лет), КР – Кару (182 млн лет), М – Мадагаскар (87 млн лет), Д – Декан (65 млн лет); К – траппы Кергелена (114 млн лет), А – траппы Афары (31 млн лет), Р – траппы Раджахала (118 млн лет); *плюмы*: Ис – Исландский, Тр – Тристан, Де – Декан, Ка – Кару-Мадагаскар, Кг – Кергелен. 1–2 – Африканская LLSVP: 1 – область с $V_s \leq -1.0\%$, 2 – ограничения LLSVP (–1% медленный контур); 3 – –0.8% медленный контур на севере Атлантики; 4 – области нормальной нижней мантии; 5 – положение LIPs; 6 – положение глубинных плюмов

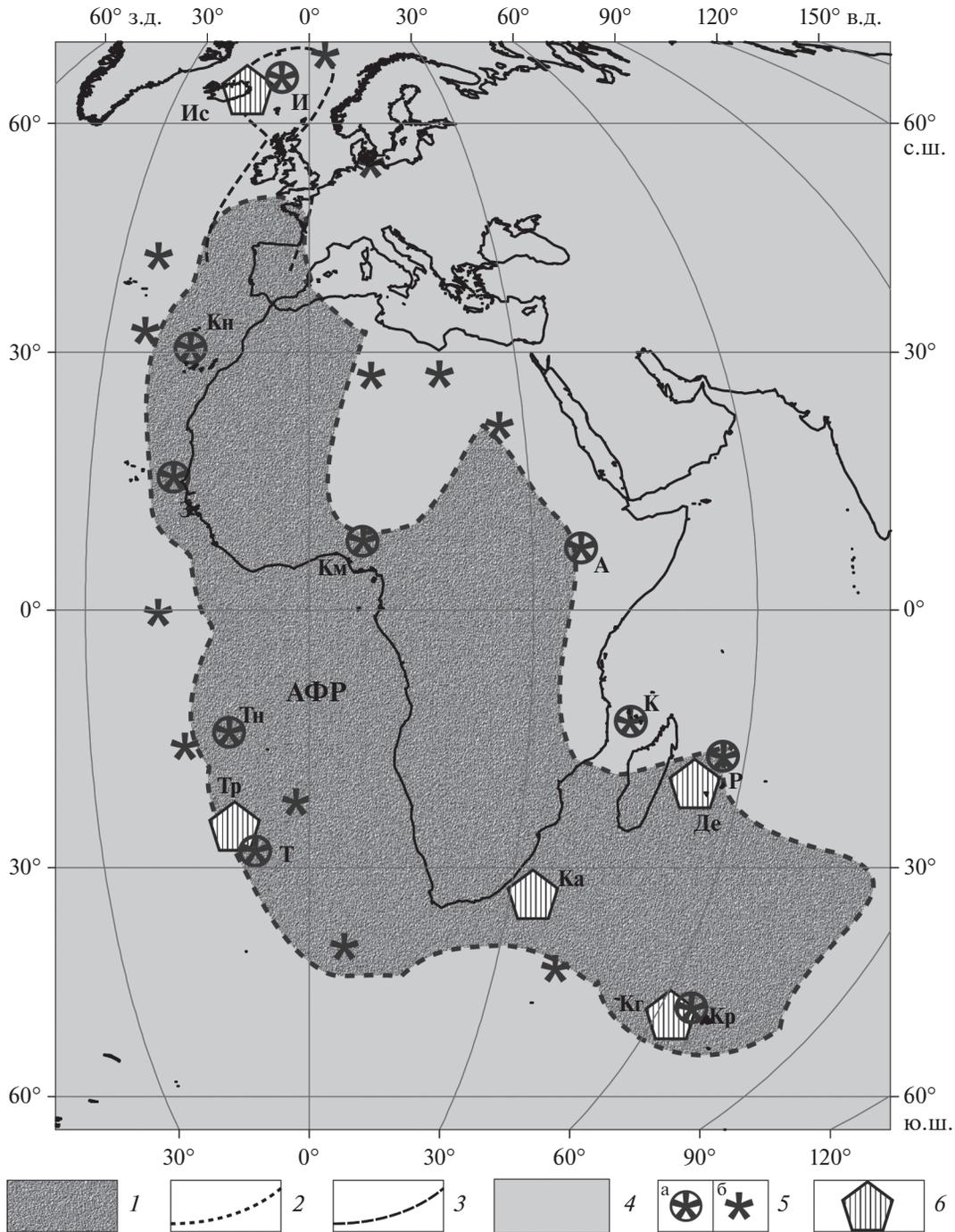


Рис. 3. Локализация важнейших горячих точек в пределах Африканского региона (с использованием данных [33, 34]). Положение горячих точек показано в соответствии с палеомагнитными реконструкциями.

Обозначено: АФР – Африканская LLSVP; горячие точки: И – Исландская, Кн – Канарская, З – Зеленого Мыса, Км – Камерунская, Тн – Триндаде, Т – Тристан, Кр – Кергелен, Р – Реюньон, К – Коморес, А – Афар; плюмы: Ис – Исландский, Тр – Тристан, Де – Декан, Ка – Кару-Мод, Кг – Кергелен.

1–2 – Африканская LLSVP: 1 – область с $V_s \leq -1.0\%$, 2 – ограничения LLSVP (-1% медленный контур); 3 – -0.8% медленный контур на севере Атлантики; 4 – области нормальной нижней мантии; 5 – положение горячих точек: а – с доказанным глубинным происхождением, б – прочих горячих точек; б – положение глубинных плюмов

ландской, Тристан, Буве, Реюньон, по сейсмографическим данным прослеживаются вниз низкоскоростные тела, отвечающие глубинным плюмам и доходящие до краев LLSVP [6, 12, 16,

19, 20, 28, 38]. Плюмы идентифицируются по уменьшению в них скорости и продольных, и поперечных волн, которое в верхних 400 км мантии составляет 2.5 и 4% соответственно [27]. Имидж

плюма может включать широкую “голову” и “хвост” или чаще только сохранившийся “хвост”, подходящий к горячей точке. В результате нарушений тела плюмов иногда приобретают извилистую форму или распадаются на отдельные фрагменты [38]. Небольшие горячие точки в регионе тоже обычно проектируются на краевые части Африканской LLSVP и могут служить поверхностным выражением малоглубинных плюмов, отчлененных от LLSVP и поднятых на верхние уровни мантии в конце мелового—начале кайнозойского времени.

Для всех этих тектоно-магматических структур выявляется пространственная связь с узкими зонами у границы ядро—мантия, лежащими на среднем удалении около 5° от -1% медленных контуров, которые маркируют края Африканской LLSVP. При этом их локализация наблюдается только над крутыми ограничениями провинции, в местах контакта со стагнирующими слэбами. Специфическое расположение указанных структур и продуцировавших их плюмов свидетельствует о генерации последних на участках, где контактируют ядро, LLSVP и скопления стагнирующих слэбов — в условиях, нигде более в мантии не существующих [13]. Роль медленных и быстрых частей слоя D" состоит предположительно в подаче двух различных типов материала для создания плюмов: обогащенного материала и благородных газов из LLSVP и деплетированного материала из стагнирующих слэбов, при некотором участии вещества ядра [13, 32]. Земное ядро служит и основным поставщиком тепла при магмогенерации. Но и механизм этого процесса, и вклад в него каждого из источников остаются неясными.

Вопрос о природе LLSVPs — термохимической или только термальной — в настоящее время является дискуссионным [13, 17]. Более обоснованными, вероятно, могут считаться представления об их термохимической природе. Такие представления, основанные на данных по геофизике и по физике минералов, соответствуют идеям о наличии на глубине сложных геохимических резервуаров, очень древних и отличающихся по составу от окружающей мантии. Появляются и модели таких резервуаров, учитывающие ряд результатов экспериментов [8, 37]. В последнее время делались также попытки связать геохимическое обогащение лав, опробованных в ряде горячих точек южной гемисферы Земли, с их происхождением из Африканской LLSVP [31]. Однако, магмы горячих точек Африканского региона характеризуются значительной геохимической гетерогенностью, определяемой как составом источников, так и широко проявленными процессами контаминации.

Длительно существующая связь тектоно-магматических структур с низкоскоростными райо-

нами в глубокой мантии указывает на продолжительное, с начала триаса (~ 250 млн лет), нахождение LLSVPs в том положении по отношению к оси вращения Земли, как они находятся сейчас. На основе новых палеомагнитных исследований, их стабильное положение было реконструировано и для много более раннего времени, что установлено при рассмотрении 31 LIPs — от раннекембрийских до неогеновых [35]. Длительная поставка с глубины материала для LIPs позволяет считать квазистационарными и объемы питающих LLSVPs (при условии подпитки материалом), которые, таким образом, являются стабильными элементами глубокой мантии.

По моему мнению, древность Африканской LLSVP несомненно подтверждается рассмотрением прогибов Кейп-Кару и Парана, унаследованно развивавшихся вдоль ее южной и западной периферии (рис. 4). Их заложение над краевыми частями LLSVP значительно предшествовало образованию здесь провинций Кару и Парана-Этендека и мезозойских вулканических окраин.

Более крупный прогиб Парана на окраине Южной Америки, протяженностью 2000 км, развивался от верхнего ордовика вплоть до поздне-мелового времени, с прогибанием около 7–8 км [25]. При платформенном характере разреза, в истории прогиба (около 360 млн лет) установлены и значительные перерывы седиментации, и проявления базальтового магматизма, особенно в меловое время. Прогиб Кейп-Кару на юге Африки сравним по своим особенностям с прогибом Парана и может рассматриваться как часть той же предрасковой структуры [5, 15, 23]. Установлено близкое сходство разрезов палеозоя—нижнего мезозоя в пределах этих прогибов, указывающее на их длительные связи [23]. Опускание в прогибе Кейп-Кару фиксируется на протяжении ~ 320 млн лет, начиная с раннего ордовика до середины юры, отмеченной мощной вспышкой магматической деятельности. Следовательно, по времени и общей длительности развития прогиб сопоставим с прогибом Парана, но отличается проявлением интенсивных деформаций во время герцинской орогении, перерывом седиментации длительно — в 30 млн лет и миграцией осадочного депозита к северу, с обособлением прогиба Кару. Оба прогиба — Кейп-Кару и Парана, расположенные над краевыми частями LLSVP, явились местами наиболее обильной магмогенерации при заложении LIPs.

Тектоно-магматические события в пределах всех отмеченных LIPs, связанных с плюмами, послужили подготовкой к последовательному расколу суперконтинента Пангеи-3. Специальное рассмотрение провинций показало, что первоначальное раздробление и магматизм при заложении проксимальных окраин привели лишь к не-

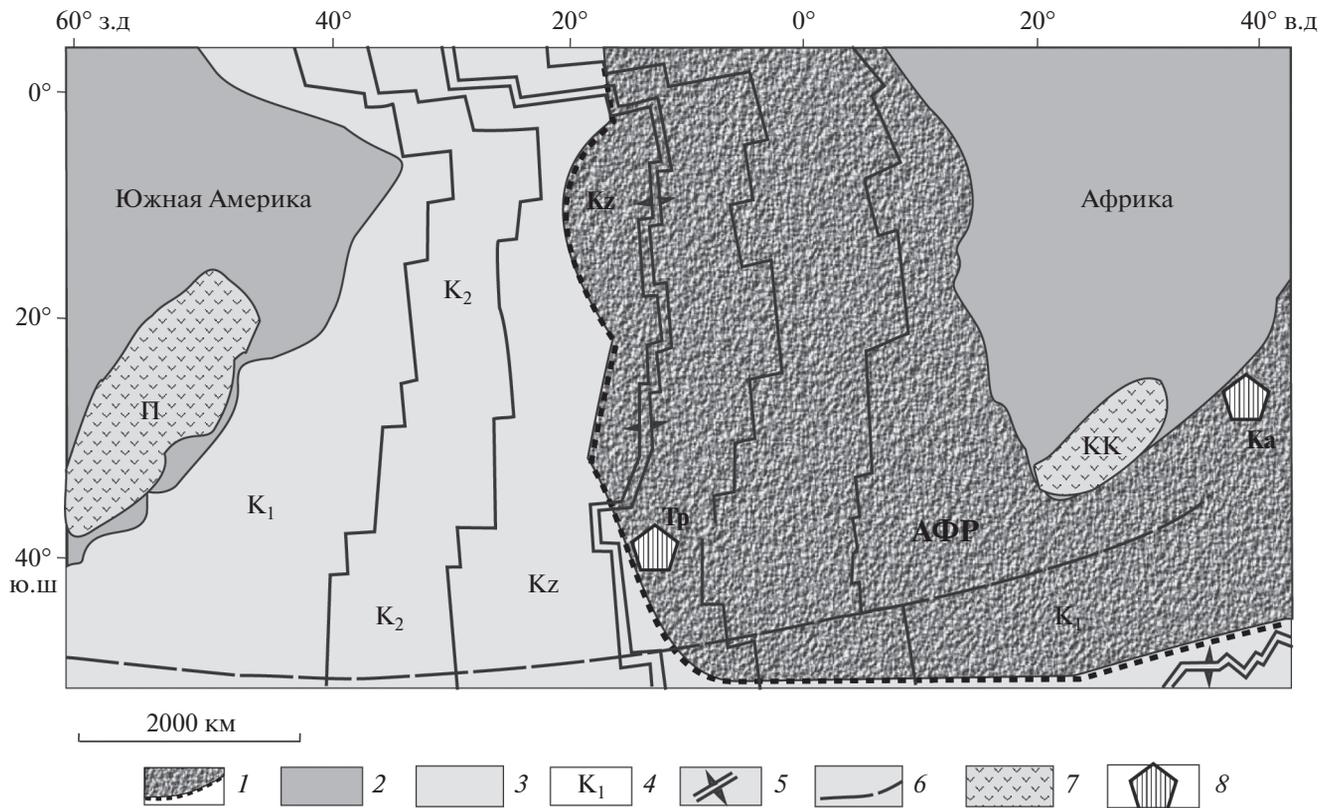


Рис. 4. Локализация тектоно-магматических структур Кейп-Кару и Парана в пределах Африканского региона (с использованием данных [15, 25]).

Обозначено: АФР – Африканская LLSVP; *плюмы*: Ка – Кару-Мод, Тр – Тристан; *прогибы* (показаны в их современном положении): Кк – Кейп-Кару (O₁–J₂), П – Парана (O₃–K₂).

1 – Африканская LLSVP и ее ограничение; 2 – фрагменты суперконтинента Пангея-3; 3–6 – океанические структуры: 3 – океаническое ложе, 4 – возраст океанического дна, 5 – спрединговые хребты, 6 – трансформный разлом Агульяс–Фолкленд; 7 – прогибы; 8 – положение глубинных плюмов

значительным преобразованиям древней континентальной коры, тогда как позднее в дистальных зонах произошли важнейшие магматические события и континентальный раскол, следовавший вдоль прогибов Кейп-Кару и Парана [3]. Таким образом, развитие раскола суперконтинента и новообразование границ плит определялось конфигурацией края Африканской LLSVP.

СООТНОШЕНИЯ LLSVPs С ИНДО-АТЛАНТИЧЕСКИМ И ТИХООКЕАНСКИМ СЕКМЕНТАМИ ЗЕМЛИ

В глобальном масштабе следует отметить пространственное соответствие антиподальных LLSVPs основным сегментам Земли – Индо-Атлантическому и Тихоокеанскому. Сравнение двух LLSVPs показывает их определенное сходство и по сейсмографическим характеристикам, и по древности заложения. Для Африканской LLSVP длительность существования предположительно оценивается фанерозоем, возможно, и дольше.

Тихоокеанская LLSVP сравнима по своей древности с Африканской LLSVP. Р. Ларсон [22] рассматривал ее, как остаток гигантской среднемировой мантийной структуры, определявшей развитие и глубинных, и поверхностных процессов в Тихом океане. Учитывая устойчивый характер геодинамических обстановок в пределах Тихоокеанского региона начиная с рифея, нами было высказано предположение о значительно более раннем заложении Тихоокеанской LLSVP [2].

При общем сходстве антиподальных LLSVPs, их роль в создании крупнейших элементов структуры на поверхности Земли оказывается неодинаковой, что определило принципиальные различия Индо-Атлантического и Тихоокеанского сегментов Земли [2, 7]. Особенности тектонического стиля и геодинамики двух сегментов выявляются начиная с рубежа 1 млрд лет, когда произошло разделение земной поверхности на два полушария – океаническое (Панталасса, или Прото-Пацифик) и континентальное (Родиния). И объяснение этого, видимо, следует искать в особенностях глубокой мантии.

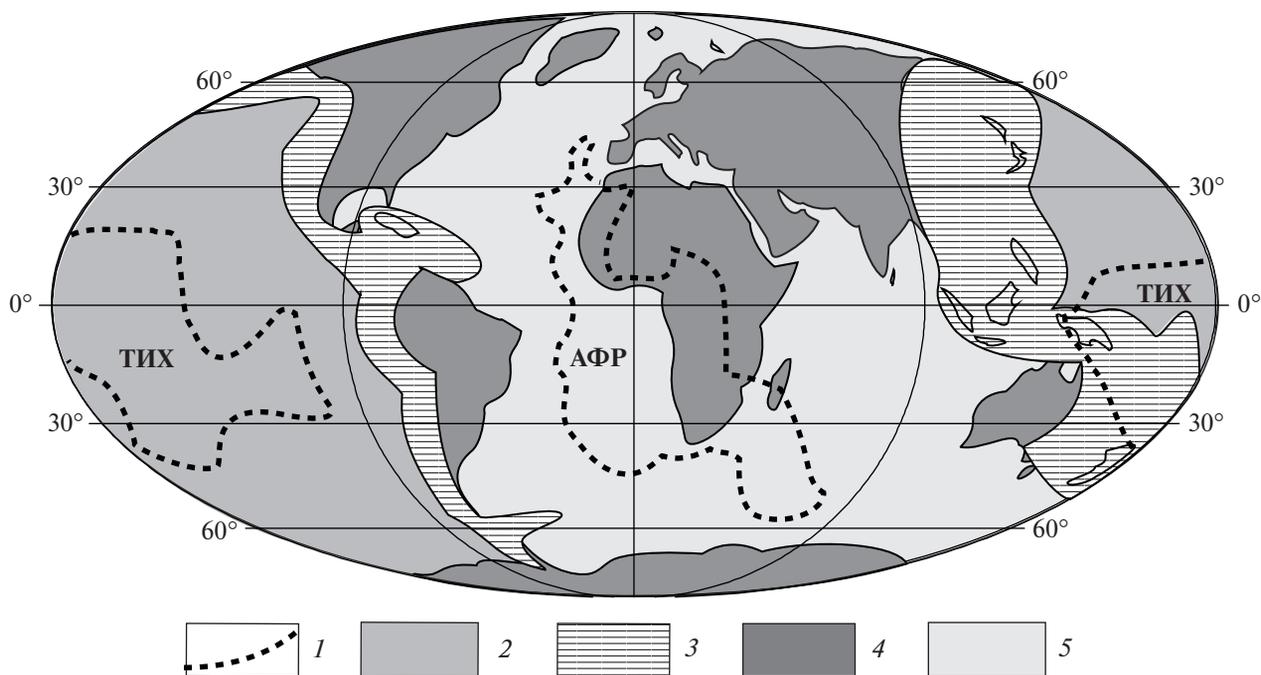


Рис. 5. Соотношения нижнемантийных элементов со структурами Индо-Атлантического и Тихоокеанского сегментов Земли (с использованием данных [2, 32]).
 Обозначено: АФР – Африканская LLSVP, ТИХ – Тихоокеанская LLSVP.
 1 – ограничения LLSVPs; 2–3 – Тихоокеанский сегмент: 2 – ложе Тихого океана, 3 – аккреционные и островодужные системы Тихоокеанского пояса; 4–5 – Индо-Атлантический сегмент: 4 – фрагменты суперконтинента Пангея-3, 5 – ложе молодых океанов

Четкому строению Тихоокеанского сегмента с древним океаном в центре и окружающими его аккреционными складчатыми сооружениями и островодужными системами (Тихоокеанским поясом) соответствует общая картина глубинных неоднородностей с расположением в основной части региона Тихоокеанской LLSVP, а по периферии – системы зон субдукции (рис. 5). Ось спрединга в пределах Восточно-Тихоокеанского хребта, по-видимому, связана каналом с областью LLSVP, как это можно предполагать по глубинному профилю в работе [9]. Эта связь может определять специфику Тихоокеанского сегмента.

Для Индо-Атлантического сегмента, наоборот, характерна концентрация древних континентальных масс. Изучение сборки и распада суперконтинентов Гондвана и позднее Пангея-3 позволяет выявить постоянное чередование событий конвергенции и континентального раскола, с новообразованием океанов. В центре сегмента, над Африканской LLSVP, на протяжении не менее 200 млн лет сохранялось устойчивое положение Африканского континента [14]. Вокруг континента были последовательно образованы мантийные плюмы, связанные с краями LLSVP. Именно здесь были локализованы и последующий континентальный раскол, и начало спрединга. Но оси спрединга в Атлантике и Индийском

океане не имеют непосредственной связи с Африканской LLSVP.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В приведенном рассмотрении сейсмотомографических данных в статье, вслед за [14, 32, 35], была подчеркнута важность взаимного расположения LLSVPs, быстрых частей слоя D'' и ядра Земли для создания плюмов. Можно предполагать, что достижение субдуцирующими литосферными пластинами краев LLSVPs служило в качестве пускового механизма при генерации плюмов. Формирующиеся плавучие плюмы и опускающиеся тяжелые литосферные пластины и их фрагменты могут предположительно рассматриваться как основные элементы в схемах обще-мантийной конвекции.

Таким образом, новые работы К. Берка, Д. Торсвика с соавт. [14, 32, 33, 35] намечают связи плюм-тектоники и тектоники плит в развитии планеты. Механизм тектоники плит посредством субдукции вносит вклад в геодинамику нижней мантии, где погружающиеся литосферные плиты достигают поверхности земного ядра. Объяснение дальнейшего перемещения плит по поверхности ядра пока остается проблематичным. Но в ряде случаев фиксируется приближение их фраг-

ментов к краю Африканской LLSVP, где происходит последующая инициация плюмов [35, 36]. С этого времени начинается действие плюмтектонического механизма. Образование глубинных плюмов и подъем к поверхности вызывают не только масштабную магмогенерацию, но и континентальный раскол, с новообразованием границ плит, срединно-океанических хребтов и началом нового цикла тектоники плит. Исходя из оценок скоростей погружения плит и последующего поднятия плюмов, временной разрыв между субдукцией и становлением LIP предположительно считается близким или большим 120 млн лет [34].

Пространственная связь с нижнемантийными элементами устанавливается в Африканском регионе как для Больших Магматических Провинций фанерозойского возраста, так и для молодых горячих точек и для кимберлитов. Отчетливо намечается соответствие глубинным элементам также тектоно-магматических структур Кейп-Кару и Парана, унаследованно развивавшихся вдоль краевых частей Африканской LLSVP начиная с раннего палеозоя. Локализация этих поверхностных структур указывает на образование продуцирующих плюмов в участках, где контактируют ядро Земли, LLSVPs и скопления стагнирующих слэбов. Однако, остается не решенным вопрос об относительной роли этих элементов в процессе магмогенерации и не объяснен механизм этого многофакторного процесса.

Выявляется пространственное соответствие между глубинными и поверхностными структурами первого порядка — LLSVPs и двумя основными сегментами Земли. Выше показано, что при определенном сходстве LLSVPs, стиль тектонического развития сегментов оказывается принципиально различным. Тихоокеанский сегмент на протяжении фанерозоя характеризовался консервативным развитием спрединга в его внутренней части и субдукцией океанической литосферы по периферии, под континенты Индо-Атлантического сегмента. Субдукция в пределах Индо-Атлантического сегмента, по-видимому, периодически служила пусковым механизмом для магообразования и подготовки континентального раскола.

На вопрос о причинах обособления на Земле двух сегментов и создания асимметрии в ее развитии, впервые поднятый в работах В.И. Вернадского [1] и Н.С. Шатского [10], пока не получено ответа. Однако, намечаются некоторые предварительные соображения. Представляется, что в Тихоокеанском регионе процесс спрединга определялся существованием непосредственной связи океанических структур с Тихоокеанской LLSVP, сохранявшейся в течение всего фанерозоя. Это отличает Тихоокеанский сегмент от Индо-Атлан-

тического, где такой связи не устанавливается. Развитие тихоокеанского спрединга и субдукции по периферии океана приводили к сближению и взаимодействию структур двух сегментов на глубине, у поверхности ядра. На участках контакта субдуцирующих плит и LLSVP — в условиях, существовавших только в мантии Африканского региона, происходила генерация плюмов, определившая последующий распад суперконтинентов Гондваны и затем Пангеи-3. Возможно, такое взаимодействие Тихоокеанского и Индо-Атлантического сегментов послужило важнейшим фактором в создании тектонической асимметрии Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для характеристике соотношений поверхностной и глубинной тектоники в статье привлечен далеко не весь объем опубликованных данных по этой проблеме. Но даже краткое обсуждение геолого-геофизических данных показывает несомненную пространственную связь тектоно-магматических структур Африканского региона с крупными нижнемантийными элементами. На этой основе намечается взаимодействие плейт- и плюмтектонических процессов в ходе общемантийной конвекции. Последовательность событий включает:

- процесс спрединга, субдукцию созданной океанической литосферы;
- достижение погружающейся плитой границы ядро—мантия и края LLSVP;
- происходящее в результате образование плюмов и их подъем, с развитием магмогенерации;
- континентальный раскол, приводящий к реорганизации границ плит и началу нового плейт-тектонического цикла.

Исходя из периодичности плейттектонических циклов, можно допустить их соответствие циклам конвекции.

Таким образом, в развитии конвекции можно предполагать ведущую роль взаимодействия Тихоокеанского и Индо-Атлантического сегментов Земли. Тихоокеанский сегмент в течение фанерозоя характеризуется развитием океанообразования и последующей субдукции, Индо-Атлантический сегмент — чередованием событий конвергенции и континентального раскола. Длительно существующие антиподальные LLSVPs — Тихоокеанская и Африканская — вероятно, могут осуществлять основной контроль за термальной, магматической и структурной историей Земли. Различная роль двух LLSVPs позволяет поставить вопрос и о различии их природы.

Изложенные соображения можно рассматривать как один из отправных моментов в изучении связи поверхностных и глубинных процессов. Реконструкция взаимодействия Индо-Атлантического

ского и Тихоокеанского сегментов в ходе этих процессов может способствовать как определению их участия в создании асимметрии планеты, так и пониманию динамики фанерозойского развития асимметричной Земли.

Благодарности. Автор благодарит рецензента С.Ю. Соколова (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за комментарии, которые позволили улучшить статью.

Финансирование. Работа выполнена при финансировании по Госзаданию № 0135-2019-0050.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. 374 с.
2. Меланхолина Е.Н., Руженцев С.В., Моссаковский А.А. Развитие глубинных ап- и даунвеллингов и геодинамика Земли. — В сб.: *Фундаментальные проблемы общей тектоники.* / Под ред. Ю.М. Пушаровского. — РАН, Межведомственный тектонический комитет. М.: Научный мир, 2001. С. 315–342.
3. Меланхолина Е.Н., Суцевская Н.М. Развитие континентальных окраин Атлантического океана и последовательный раскол суперконтинента Пангея-3 // *Геотектоника.* 2017. № 1. С. 44–58.
4. Меланхолина Е.Н., Суцевская Н.М. Тектоно-магматическое развитие континентальных окраин Южной Атлантики и раскрытие океана // *Геотектоника.* 2018. № 2. С. 20–41.
5. Меланхолина Е.Н., Суцевская Н.М. Тектоника пассивных окраин Южного океана в регионе Африки — Восточной Антарктиды // *Геотектоника.* 2019. № 4. С. 25–42.
6. Пучков В.Н. “Великая дискуссия” о плюмах: так кто же все-таки прав? // *Геотектоника.* 2009. № 1. С. 3–22.
7. Пушаровский Ю.М. Главная тектоническая асимметрия Земли: Тихоокеанский и Индо-Атлантический сегменты и взаимоотношения между ними. — В кн.: *Тектонические и геодинамические феномены.* / Под ред. Ю.Г. Леонова. М.: Наука, 1997. С. 8–24. (Тр. ГИН РАН, Вып. 505).
8. Пушаровский Ю.М., Пушаровский Д.Ю. Геология мантии Земли. М.: ГЕОС., 2010. 140 с.
9. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. Подлитосферные течения в мантии // *Геотектоника.* 2017. № 6. С. 3–17.
10. Шатский Н.С. Тектонические закономерности распределения эндогенных рудных месторождений. М.: Наука, 1965. С. 191–200.
11. Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2002. Vol. 3. No. 1. P. 1003. <https://doi.org/10.129/2001GC000168>
12. Bijwaard H., Spakman W. Tomographic evidence for a narrow whole mantle plume below Iceland // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1999. Vol. 166. P. 121–126.
13. Burke K., Steinberger B., Torsvik T.H., Smethurst M.A. Plume Generation Zones at the margins of Large Low Shear Velocity Provinces on the core–mantle boundary // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008. Vol. 265. P. 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.09.042>
14. Burke K., Torsvik T.H. Derivation of Large Igneous Provinces of the past 200 million years from long-term heterogeneities in the deep mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. Vol. 227. P. 531–538.
15. Catuneanu O., Wopfner H., Eriksson P.G., Cairncross B., Rubidge B.S., Smith R.M.H., Hancox P.J. The Karoo basins of south-central Africa // *J. African Earth Sci.* 2005. Vol. 43. P. 211–253.
16. Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. Three distinct types of hot spots in the Earth’s mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 205. P. 295–308.
17. Davies D.R., Goes S., Sambridge M. On the relationship between volcanic hotspot locations, the reconstructed eruption sites of large igneous provinces and deep mantle seismic structure // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015. Vol. 411. P. 121–130.
18. Dziewonski A.M., Lekic V., Romanowicz B.A. Mantle Anchor Structure: An argument for bottom up tectonics // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. Vol. 299. P. 69–79.
19. French S.W., Romanowicz B. Broad plumes rooted at the base of the Earth’s mantle beneath major hotspots // *Nature.* 2015. Vol. 525. P. 95–99.
20. Garnero E.J., Lay T., McNamara A. Implications of lower-mantle structural heterogeneity for existence and nature of whole-mantle plumes // *GSA Spec. Pap.* 2007. Vol. 430. P. 79–88.
21. Grand S.P. Mantle shear-wave tomography and the fate of subducted slabs // *Philos. Trans. Math. Phys. Engineer. Sci.* 2002. Vol. 360. No. 1800. P. 2475–2491.
22. Larson R.L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume // *Geology.* 1991. Vol. 19. No. 6. P. 547–550.
23. Linol B., de Wit M.J., Milani E.J., Guillocheau F., Scherer C. New regional correlations between the Congo, Paraná and Cape-Karoo Basins of Southwest Gondwana. — In: *Geology and resource potential of the Congo basin.* / Ed. by M. de Wit, F. Guillocheau, (Region. Geol. Rev. 2015). P. 183–192.
24. McNamara A.K. A review of large low shear velocity provinces and ultra low velocity zones // *Tectonophysics.* 2019. Vol. 760. P. 199–220.
25. Milani E.J., Faccini U.F., Scherer C.M., Araújo L.M., Cupertino J.A. Sequences and stratigraphic hierarchy of the Paraná basin (Ordovician to Cretaceous), southern Brazil // *Bol. IG-USP. Sér. Cient.* 1998. Vol. 29. P. 125–173.
26. Morgan W.J. Convection plumes in the lower mantle // *Nature.* 1971. Vol. 230. P. 42–43. <https://doi.org/10.1038/230042a0>
27. Nataf H.-C. Seismic imaging of mantle plumes // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 2000. Vol. 28. P. 391–417.
28. Nolet G., Allen R., Zhao D. Mantle plume tomography // *Chem. Geol.* 2007. Vol. 241. P. 248–263.
29. O’Connor J.M., Duncan R.A. Evolution of the Walvis Ridge–Rio Grande rise hot spot system: Implications for African and South American plate motions over plumes // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95. No. B1. P. 17475–17502. issn: 0148-0227. <https://doi.org/10.1029/90JB00782>

30. *Rost S., Garnero E.J., Williams Q.* Fine-scale ultralow-velocity zone structure from high-frequency seismic array data // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. No. B09310. P. 1–14.
<https://doi.org/10.1029/2005JB004088>
31. *Schwindrofska A., Hoernle K., Hauff F., van den Bogaard P., Werner R., Garbe-Schönberg D.* Origin of enriched components in the South Atlantic: Evidence from 40 Ma geochemical zonation of the Discovery Seamounts // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2016. Vol. 441. P. 167–177.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.041>
32. *Torsvik T.H., Smethurst M.A., Burke K., Steinberger B.* Large igneous provinces generated from the margins of the large low-velocity provinces in the deep mantle // *Geophys. J. Int. Tectonic. Geodynam.* 2006. Vol. 167. P. 1447–1460.
33. *Torsvik T.H., Steinberger B., Ashwal L.D., Doubrovine P.V., Trønnes R.G.* Earth evolution and dynamics – A tribute to Kevin Burke // *Canad. J. Earth Sci.* 2016. Vol. 53. No. 11. P. 1073–1087.
<https://doi.org/10.1139/cjes-2015-0228>
34. *Torsvik T.H., Steinberger B., Robin L., Cocks M., Burke K.* Longitude: Linking Earth's ancient surface to its deep interior // *Earth Planet Sci Lett.* 2008. Vol. 276. P. 273–282.
35. *Torsvik T. H., van der Voo R., Doubrovine P., Burke K., Steinberger B., Ashwal L.D., Trønnes R., Webb S.J., Bull A.L.* Deep mantle structure as a reference frame for movements in and on the Earth. // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 2014. Vol. 111. No. 24. P. 8735–8740.
36. *Van der Meer D.G., van Hinsbergen D.J.J., Spakman W.* Atlas of the underworld: Slab remnants in the mantle, their sinking history, and a new outlook on lower mantle viscosity // *Tectonophysics.* 2018. Vol. 723. P. 309–448.
37. *White W.M.* Probing the Earth's deep interior through geochemistry // *Geochem. Perspect.* 2015. Vol. 4. No. 2. P. 95–251.
<https://doi.org/10.7185/geochempersp.4.2>
38. *Zhao D.* Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics // *Physics Earth Planet. Inter.* 2004. Vol. 146. P. 3–34.

Relationships between Superficial and Deep Tectonics in the African Region: Based on Geologic-Geophysical Data

E. N. Melankholina*

Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 119017 Moscow, Russia

**e-mail: e.melanh@gmail.com*

The spatial relationships of lower mantle D" layer elements with Phanerozoic Large Igneous Provinces (LIPs), as well as with the young hotspots and kimberlites in the African region are discussed. The similar relationships are also shown for the Cape-Karoo and Parana extended basins, inheritedly being developed along edge parts of the region from the Early Paleozoic. The specific location is emphasized for all these superficial structures and plumes producing them. Such location indicates the connection of these structures origin with the places where Earth core, Large Low-Velocity Provinces (LLSVPs) and slab graveyards are in close contact. The relationships of plum- and plate-tectonic processes in Earth evolution are under discussion. Constant interaction of Earth Circum-Pacific and Indo-Atlantic segments is detected in the course of these processes. The Circum-Pacific segment was characterized by ocean formation during Phanerozoic time and subsequent subduction under the continents of Indo-Atlantic segment. The consistency of Pacific spreading was obviously determined by the existence of its connection directly with Pacific LLSVP. Within the D" layer in the places of contact of the Pacific subducting slabs and African LLSVP plum generation happened periodically subsequently leading to supercontinental breakup. This determined the specific peculiarity of Indo-Atlantic segment development: the alternation of convergence and continental breakup during Phanerozoic time. On the whole, despite significant similarities of antipodal LLSVPs, their role in creating of the superficial largest structural elements turns out to be inequable. Perhaps this is what served as one of the main reasons for two segments fundamental differences and led to the creation of Earth tectonic asymmetry.

Keywords: core–mantle boundary, D" layer, subducted slabs, plumes, seismic tomography, Large Igneous Provinces (LIPs), Large Low-Velocity Provinces (LLSVPs), hotspots, Circum-Pacific and Indo-Atlantic segments