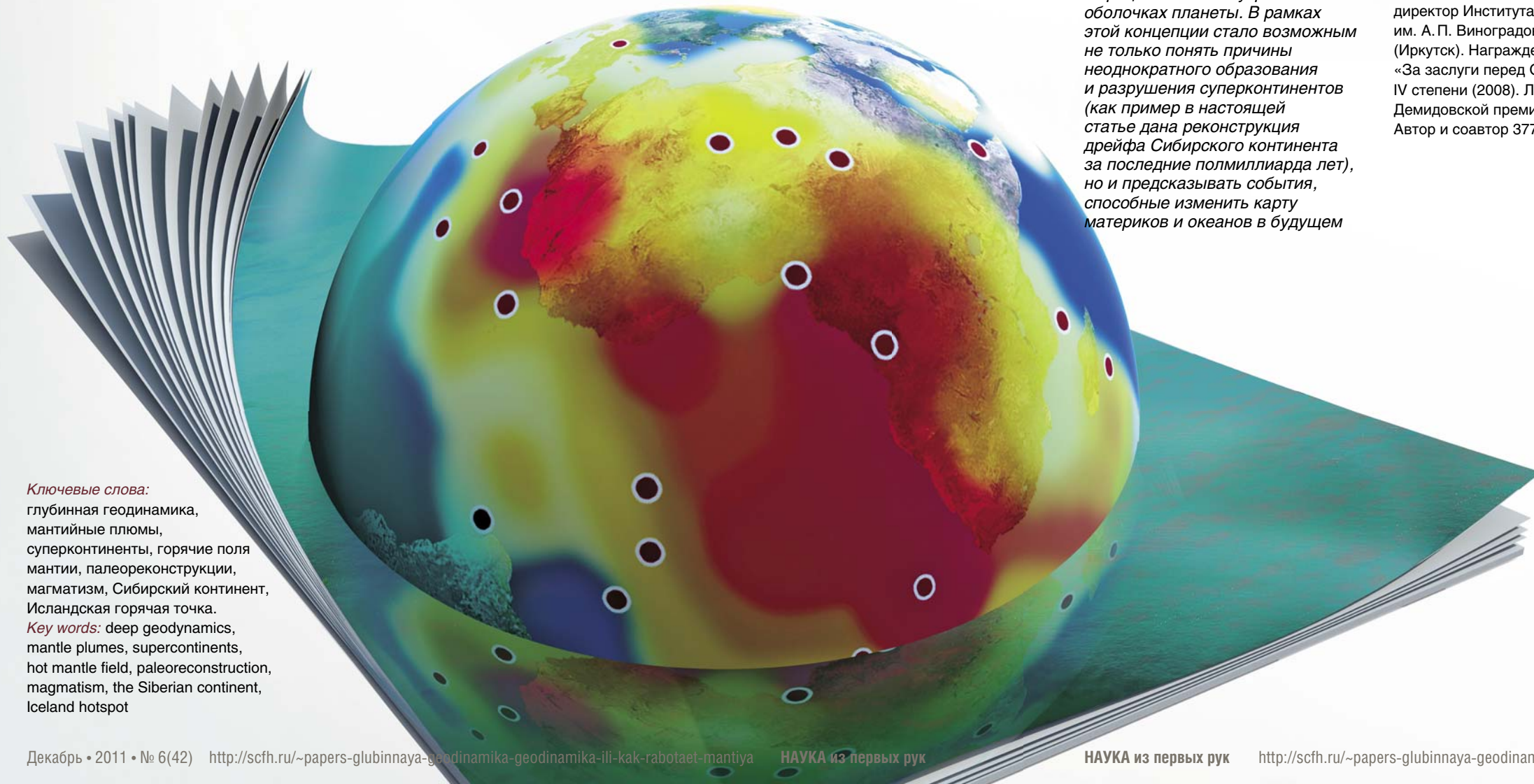


М. И. КУЗЬМИН, В. В. ЯРМОЛЮК

ГЛУБИННАЯ ГЕОДИНАМИКА, или Как работает мантия Земли

Посвящается
Льву Павловичу Зоненшайну



Ключевые слова:
глубинная геодинамика,
мантийные плюмы,
суперконтиненты, горячие поля
мантии, палеорекострукции,
магматизм, Сибирский континент,
Исландская горячая точка.
Key words: deep geodynamics,
mantle plumes, supercontinents,
hot mantle field, paleoreconstruction,
magmatism, the Siberian continent,
Iceland hotspot

В геологии за последние полвека произошли кардинальные изменения во взглядах на внутреннее строение и механизмы геологической эволюции нашей планеты. Благодаря успехам сейсмической томографии в глубинах Земли обнаружены две огромные области более горячей материи, простирающиеся до самого ядра планеты. Интересно, что их проекции на поверхность практически совпали с так называемыми горячими полями мантии, которые были выделены советскими геологами еще тридцать лет назад по косвенным данным. Сделанные открытия легли в основу концепции глубинной геодинамики, которая связала явления, происходившие на поверхности Земли, с процессами во внутренних оболочках планеты. В рамках этой концепции стало возможным не только понять причины неоднократного образования и разрушения суперконтинентов (как пример в настоящей статье дана реконструкция дрейфа Сибирского континента за последние полмиллиарда лет), но и предсказывать события, способные изменить карту материков и океанов в будущем



КУЗЬМИН Михаил Иванович – академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор Института геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН (Иркутск). Награжден Орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени (2008). Лауреат Демидовской премии (2008). Автор и соавтор 377 научных работ



ЯРМОЛЮК Владимир Викторович – академик РАН, заместитель директора Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Москва). Награжден премией им. академика Обручева (2005). Автор и соавтор более 400 научных работ

Геология как наука, в рамках которой стало возможно проводить экспериментальные исследования, предсказывать причины и проявления геологических, особенно глубинных, процессов, определять возраст различных минералов, пород и геологических структур, оформилась только в XX в. И это несмотря на то, что использование определенных минеральных образований было неотъемлемой частью культуры и хозяйственной деятельности человека с начала его существования. Обобщение разрозненных сведений было выполнено только в 30-х годах XIX в. выдающимся британским геологом Ч. Лайелем в фундаментальном труде «Основы геологии» (Lyell, 1830–1833). В нем были сформулированы основные положения об актуализме и униформизме, которые явились первой парадигмой геологии. С этого времени геология стала развиваться в рамках «нормальной науки» (в понятии Т. Куна).

Однако понадобилось много времени, крупные открытия в сопряженных науках, чтобы геология начала отражать Землю в полном объеме с учетом взаимодействия глубинных, эндогенных процессов с поверхностными процессами. Хочется напомнить, что еще в начале XX в. геологи были убеждены, что возраст Земли

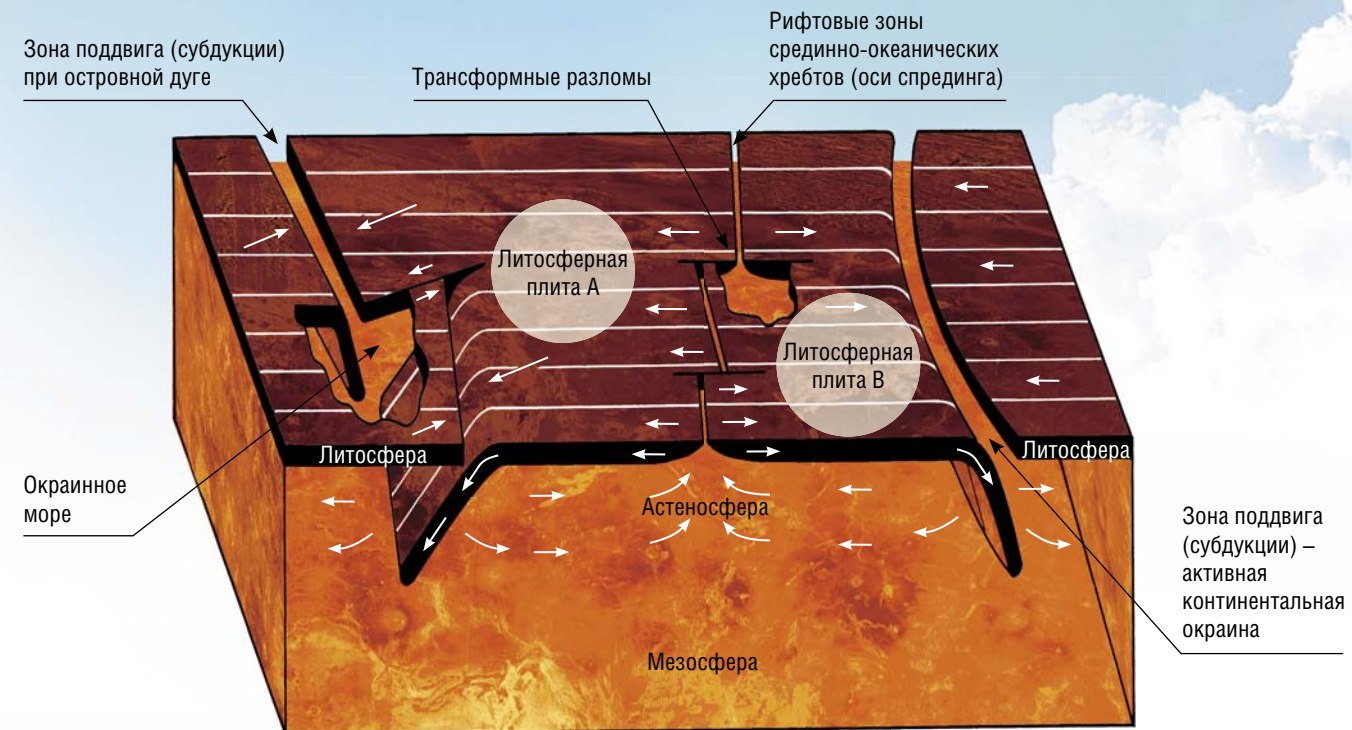
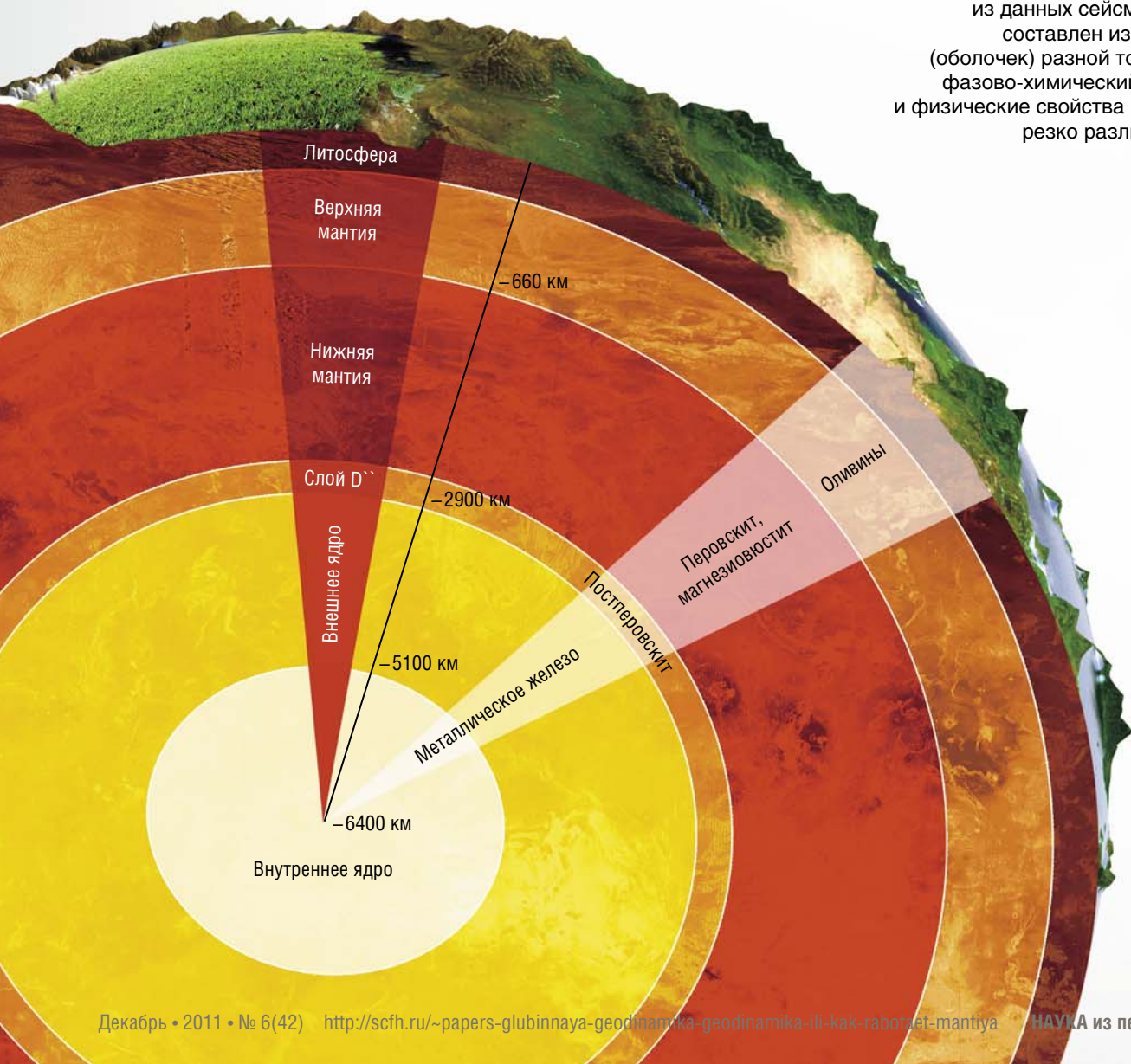
составляет всего 20–100 млн лет, и только открытие радиоактивности, позволившее определять возраст минералов и горных пород, дало инструмент, с помощью которого удалось показать, что возраст нашей планеты составляет около 4,5 млрд лет.

Скользящие по астеносфере

Для развития геологической науки большое значение имели полученные в прошлом столетии данные о строении Земли. Особо важным стало выделение *литосферы*, в которую включена земная кора. Литосфера характеризуется большой прочностью в отличие от подстилающей ее *астеносферы*, в которой имеется частично расплавленное вещество, в связи с чем в ней могут возникать конвективные потоки. Но все возможные

Почти половина массы Земли состоит из **Mg-перовскита**, который устойчив в широком интервале давлений. Это основной минерал нижней мантии. Наиболее важным геологическим открытием XXI в. стало обнаружение в **D''-слое**, разделяющем нижнюю мантию и ядро, фазы постперовскита. Этот минерал имеет тот же химический состав, но на 2% более высокую плотность, чем перовскит. Фазовый переход перовскита в постперовскит влечет за собой повышение температуры на 50°C. Это, очевидно, и вызывает тепловую конвекцию, приводящую к подъему мантийного вещества от слоя **D''** в верхи мантии

Земной шар, как следует из данных сейсмологии, составлен из «сфер» (оболочек) разной толщины, фазово-химический состав и физические свойства которых резко различаются



Тектоника литосферных плит подразумевает их механическое взаимодействие с мантийной «подложкой». Под влиянием конвекции в астеносфере они перемещаются по горизонтали. Кроме того, в зонах поддвига (субдукции) происходит опускание плиты в мантию, а в зонах спрединга образуется новая океаническая кора – центральные (рифтовые) структуры срединно-океанических хребтов.
По: (Айзекс, Оливер, Сайкс, 1974)

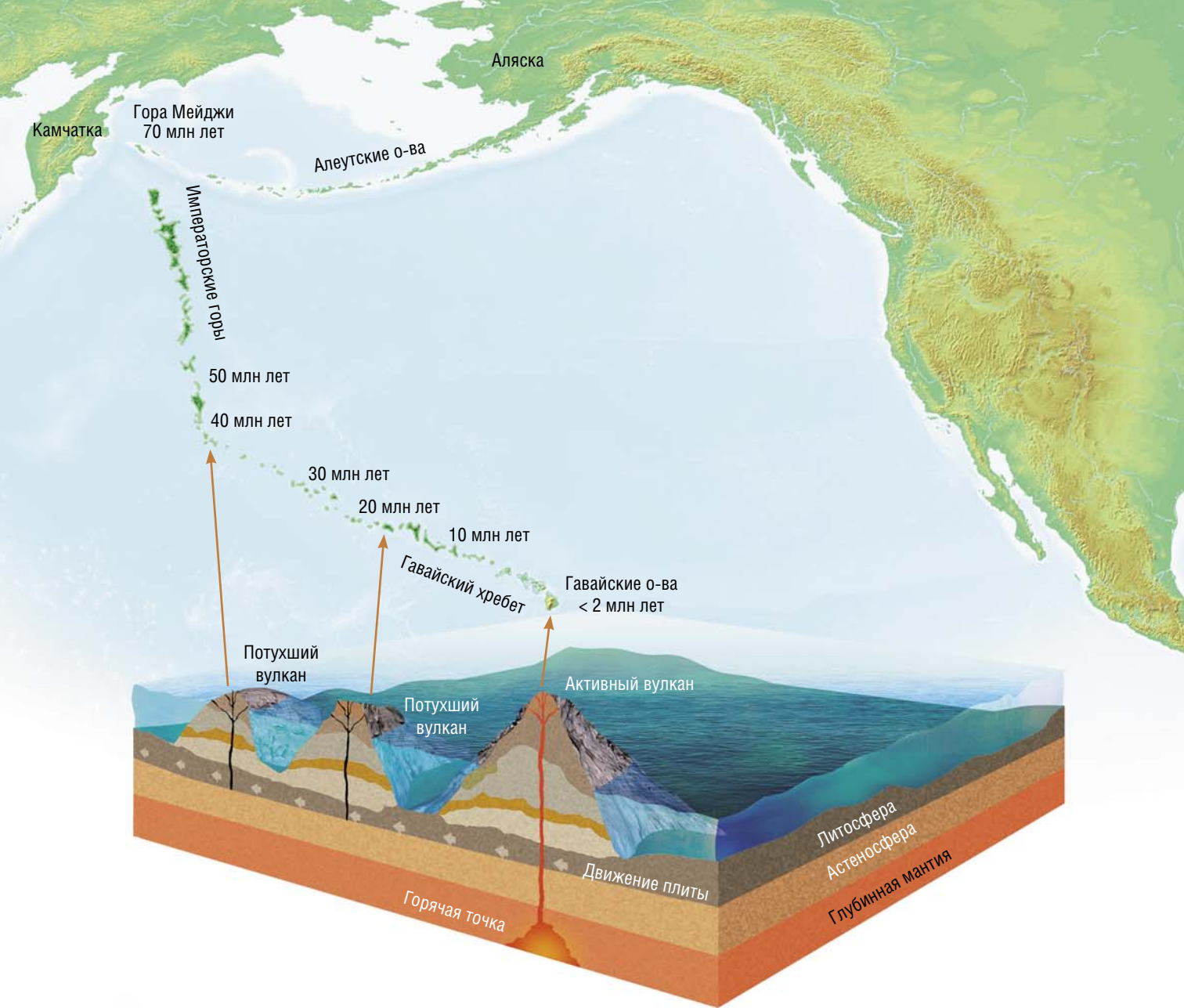
разрывы, а соответственно, глубинные и поверхностные землетрясения, регистрируются именно в литосфере.

Три десятилетия назад в подошве *мантии* (внутренней оболочки) был открыт сравнительно узкий, имеющий мощность 150–350 км, *слой D''*, характеризующийся резким градиентом температуры: примерно от 4000° в подошве до 3000° на верхней границе. Этот слой имеет большое значение, так как до него доходят отдельные куски погружающейся в мантию литосферы и оттуда же начинается подъем глубинного мантийного вещества к поверхности Земли, о чем будет подробнее сказано ниже.

Крупные открытия, сделанные во второй половине прошлого столетия, привели к более полному пониманию особенностей строения и развития нашей планеты, но главное – была сформулирована концепция тектоники литосферных плит. В 1961 г. англичанин Р. Дитц и американец Г. Хесс, анализируя батиметрическую карту дна океанов, пришли к выводу, что срединно-океанические хребты, возвышающиеся над абиссальными долинами на 1–2 км, приурочены

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ ТЕКТОНИКИ ПЛИТ

- Две внешние оболочки Земли – литосфера и астеносфера – взаимодействуют.
- Вещество астеносферы способно к течению, в связи с чем в ней может возникать конвекция, поддерживаемая энергией из внутренних оболочек Земли.
- Литосфера представляет собой внешнюю твердокаменную оболочку Земли, пассивно реагирующую на процессы, протекающие в астеносфере. Она расчленена узкими поясами деформации – зонами, характеризующимися высокой тектонической (в частности, сейсмической) и магматической активностью: рифтовыми срединно-океаническими хребтами и зонами субдукции. Эти зоны «разбивают» литосферу на ряд жестких литосферных плит, которые под действием сил вязкого трения, вызванных конвективными (или иными) потоками в астеносфере, перемещаются относительно друг друга

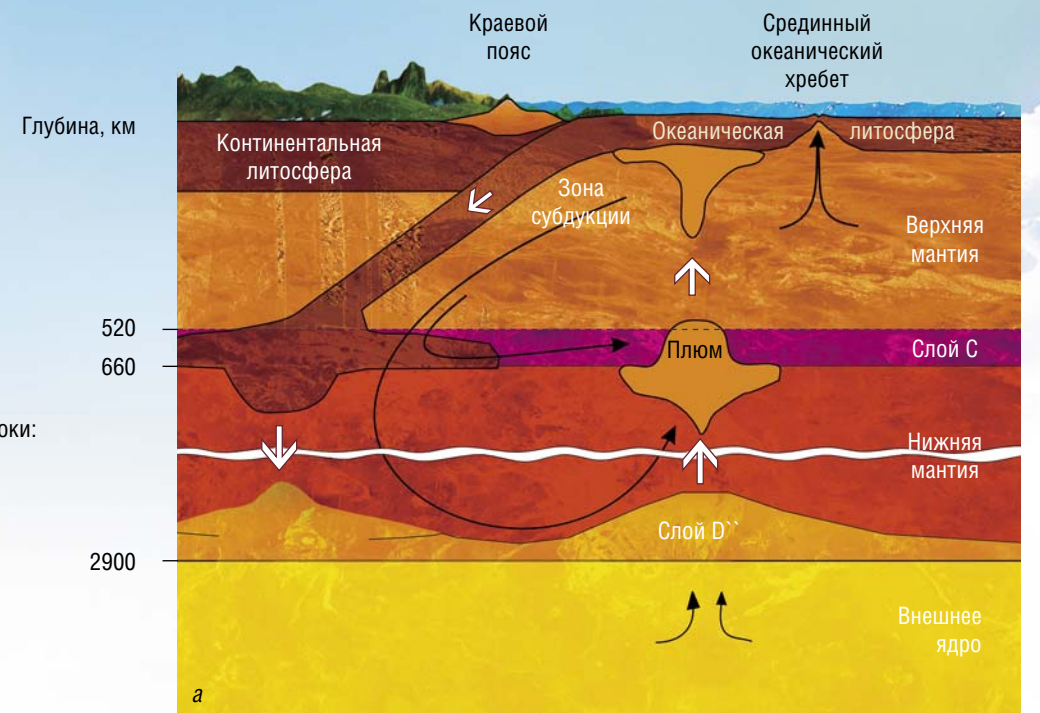


к центральным частям океанов. Наиболее хорошо это видно в Атлантическом океане, где подобный хребет прослеживается вдоль осевой зоны новообразованной коры океанического дна. Процесс разрастания океанического ложа они назвали «sea flow spreading» (растекание океанического дна). Образование новой коры происходит в центральных (рифтовых) структурах срединно-океанических хребтов.

Американцы Ф. Вайн и М. Мэтьюз (1963) подтвердили *спрединг* наличием полосовых магнитных аномалий, образование которых определяется намагниченностью пород океанической коры в соответствии с современной им полярностью планетного магнитного поля. Полярность периодически меняется во времени с прямой (современная полярность) на обратную.

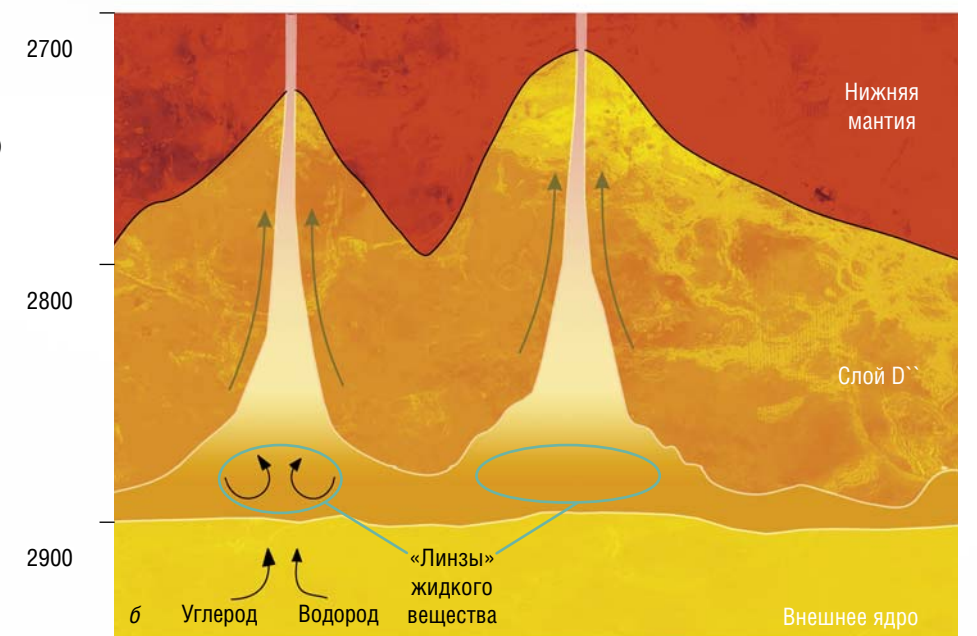
Возраст вулканических островов Гавайско-Императорского хребта в Тихом океане в направлении от о-ва Мейджи до о-ва Гавайи последовательно уменьшается. Формирование подобной островной цепи происходит в результате движения океанской литосферной плиты над неподвижной горячей точкой в мантии.
По: (Уилсон, 1963)

Принципиальное отличие горячих точек от литосферных плит заключается в том, что перемещаются именно плиты, поэтому они занимают на поверхности Земли разную позицию в разное время, а горячие точки, напротив, долгое время сохраняют свое положение относительно абсолютной системы географических координат



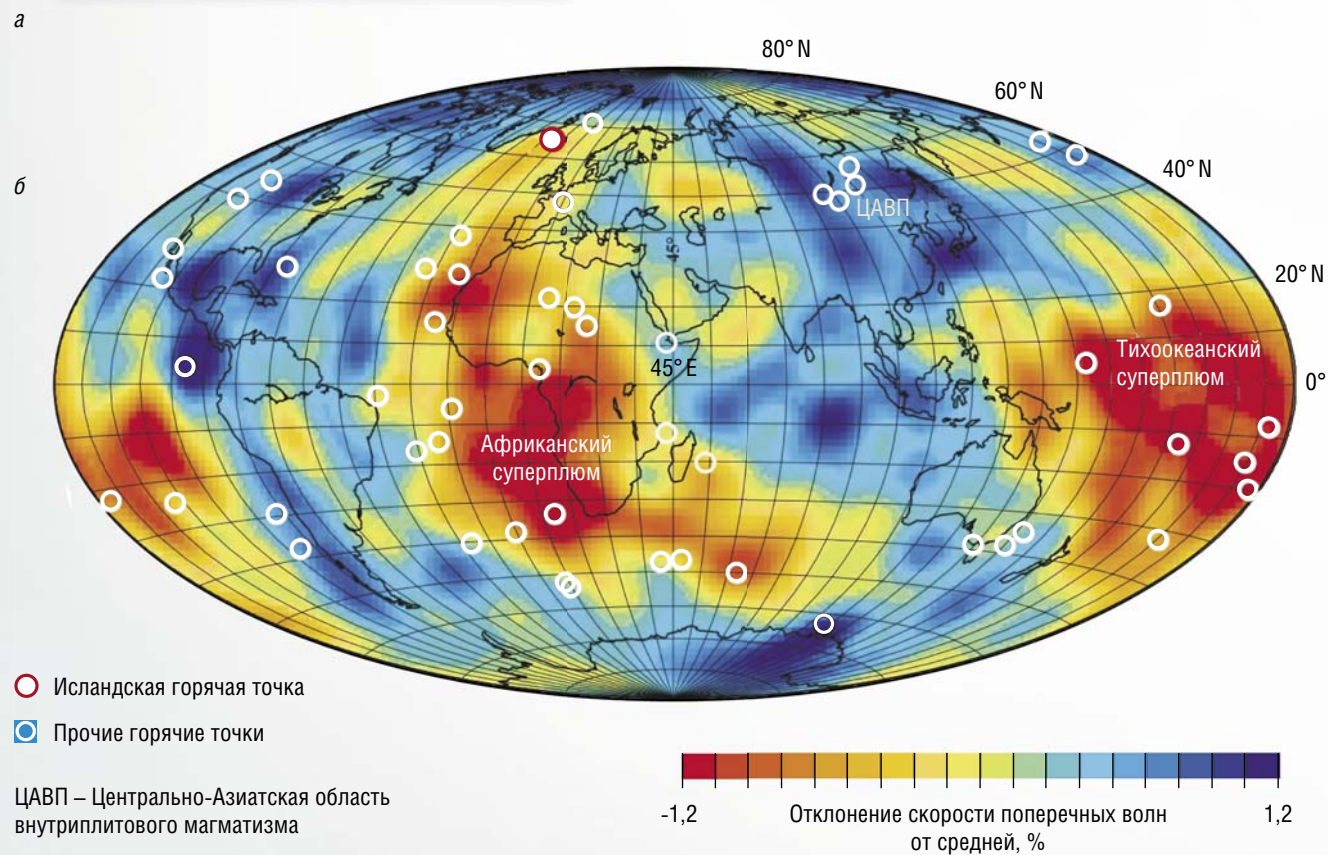
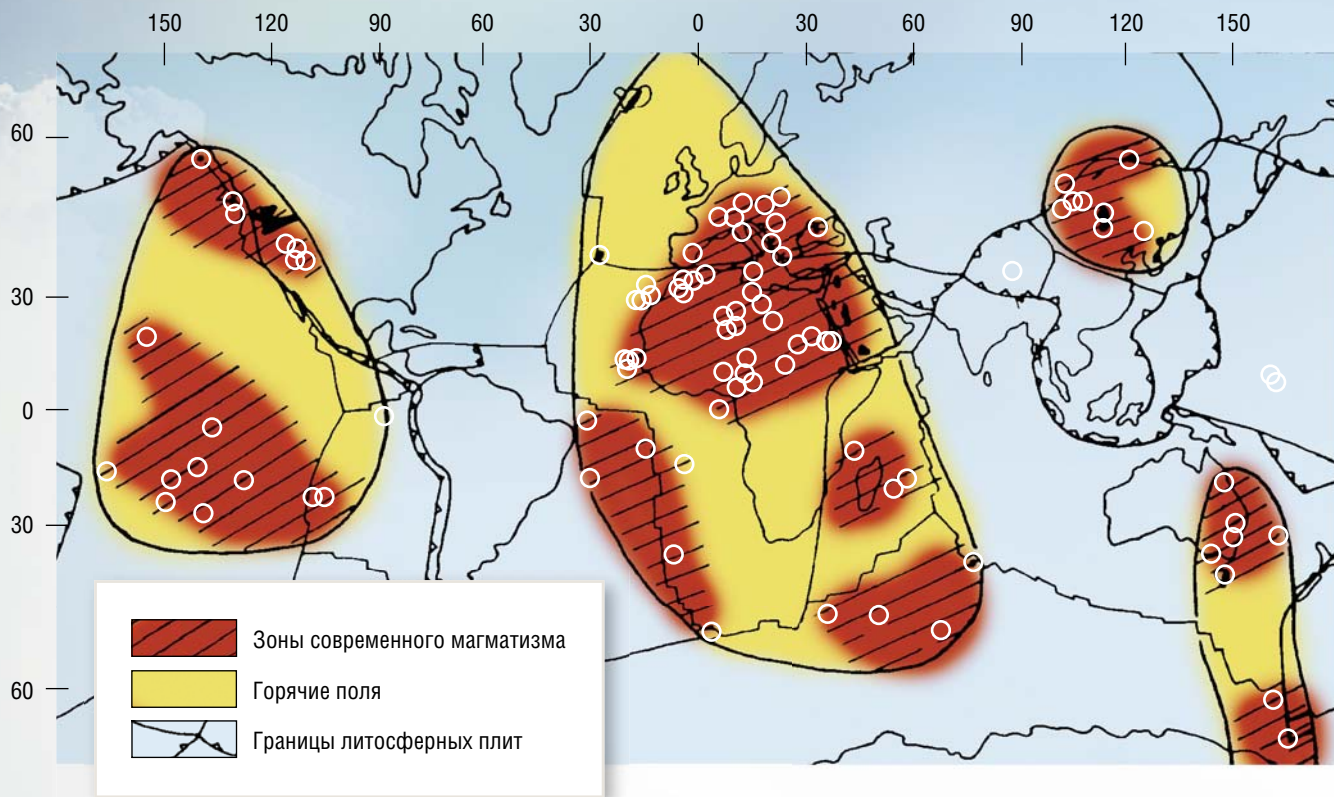
Конвекционные потоки:
 ⇨ первичные
 → вторичные

В зоне субдукции происходит погружение литосферной (океанической) плиты в мантию (а). Большая часть плиты задерживается в слое С, но частично материал литосферы опускается и до слоя D'' (пограничный слой между ядром и мантией). В слое D'' происходит зарождение суперплюма (б). Подъем вещества начинается из жидких «линз», которые состоят из частично расплавленного вещества мантии и идентифицируются по ультранизкой скорости распространения сейсмических волн сквозь них. Суперплюм поднимается от слоя D'' в виде гриба, шляпа которого остается в окрестности перехода между верхней и нижней мантией (а). Оттуда вещество поднимается малыми плюмами к поверхности Земли



В 1965 г. канадский геофизик Дж. Уилсон выделил особый тип разломов – трансформных. Их образование связано с горизонтальным перемещением океанической литосферы в стороны от срединно-океанического хребта. В. Морган и ряд других исследователей (1968) показали существенные различия глубинных геофизических структур срединных океанических хребтов и зон островных дуг. Для последних характерен поддвиг – опускание океанической литосферы в мантию до глубин около 600 км. Этот процесс был назван *субдукцией*.

После окончательного формулирования в 1968 г. основных положений тектоники плит, объясняющей современную динамику Земли, эта теория сразу же завоевала признание большинства ученых мира. Так, уже в 1971 г. более трети статей по геологии, опубликованных в журнале *Nature*, было



По поверхностным проявлениям внутриплитового магматизма за последние 15 млн лет были выявлены 47 так называемых горячих точек. Они группируются в четыре весьма обширные (до 10 тыс. км в поперечнике), но компактные зоны, названные «горячими полями мантии Земли»: Африканскую, Тихоокеанскую, Центрально-Азиатскую и Тасманскую (а) (Зоненшайн, Кузьмин, 1983). Границы этих полей примерно совпадают с контурами «низкоскоростных» мантийных провинций (б), выделенных позднее на основе карты поля скоростей распространения сейсмических волн в мантии. Эти области, соответствующие частично расплавленному веществу мантии, часто называют также суперплюмами. Их связь с современными проявлениями вулканизма подтверждается также локализацией на поверхности планеты всех известных на сегодня 49 горячих точек, определенных методом сейсмотомографии. По: (Зоненшайн и др., 1991; Courtillot et al., 2003; Burke, Torsvik, 2004; Burke et al., 2008)

посвящено соответствующей тематике – предложенная концепция дала возможность объяснить большую часть современных эндогенных процессов. В скором времени положения тектоники плит были применены к расшифровке истории формирования горно-складчатых поясов, при этом многие геологи считали, что новая концепция позволяет решить большую часть проблем, связанных с эволюцией Земли.

По следу горячей точки

Еще в 1963 г., когда только создавались основы тектоники плит, Т. Уилсон (Wilson, 1963) обратил внимание на действующие вулканы, которые располагаются внутри океанических плит и образуют вулканические цепи, ориентированные противоположно по отношению к вектору перемещения океанической плиты. Было сделано предположение, что вулканические цепи связаны с горячими точками мантии, прожигающими литосферу по мере ее прохождения над ними. Принципиальным отличием горячих точек от литосферных плит является то, что литосферные плиты перемещаются по астеносфере и поэтому занимают на поверхности Земли разную географическую позицию в разное время, горячие же точки долгое время сохраняют свое положение относительно абсолютной системы географических координат, тождественной современной.

К началу 70-х годов гипотеза горячих точек была принята многими исследователями. Предполагалось, что горячие точки представляют собой геохимические аномалии, так как магматические породы из таких точек (по сравнению с базальтами срединно-океанических хребтов) обогащены многими рассеянными химическими элементами. Сторонники этой концепции считали, что магматические породы, сформированные горячими точками, связаны с «пятнами» разогретой астеносферы, которые неподвижны и в свою очередь питаются мантийными плюмами – струями, поднимающимися

из глубин нижней мантии, возможно от границы «ядро – мантия». В целом представления о горячих точках предполагали наличие узких (порядка 150 км в поперечнике) мантийных струй (или столбов), которые пронизывают всю толщу мантии, оставаясь неподвижными на протяжении десятков миллионов лет.

Внутри литосферной плиты, которая стоит над «пятном» разогретой мантии, формируется вулкан; при смещении плиты относительно горячей точки над ней образуется новый вулкан, а в итоге – цепь потухших вулканов, которые фактически трассируют след, прожигаемый горячей точкой на плите.

В этом отношении впечатляющим примером служит Гавайская горячая точка, с которой связано возникновение Гавайско-Императорского хребта, существующего почти 100 млн лет. Эту точку использовали многие исследователи для реконструкции перемещений Тихоокеанской плиты. Следует отметить, что реконструкция по Гавайской точке полностью совпадает с реконструкцией движения Тихоокеанской плиты, восстановленной по полосовым магнитным аномалиям.

Однако ряд исследователей, например (Runcorn, 1980), указывали, что геологические и физико-химические параметры мантии делают маловероятным существование плюмовых столбов. Была выдвинута концепция мембранной тектоники (Turcotte, 1974), согласно которой жесткие литосферные плиты, перемещаясь по эллиптической поверхности Земли, проходят через участки с различным радиусом кривизны, в результате чего в плитах возникают глубокие трещины, которые заполняются базальтовой выплавкой. Особенности состава мантийных выплавок объяснялись только разной глубиной образования магматических расплавов. У нас в стране такое объяснение горячих точек горячо поддерживалось О. Г. Сорохтиным (1979). Однако все эти гипотезы не предполагали наличия каких-либо глубинных структур Земли, влияющих на геологические процессы в верхних оболочках.

ВНУТРИПЛИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ

Внутриплитовые магматические породы образуют ассоциации пород повышенной щелочности, которые включают в первую очередь базальты, обогащенные литофильными химическими элементами, более свойственные породам коры и не характерные для верхней мантии.

В океанах внутриплитовый магматизм представлен главным образом базальтами океанических плато и островов, которые выделяются в особый геохимический тип базальтов – OIB (ocean island basalt, базальты океанических островов). К их составу близки базальты трапповых провинций, ярким примером которых являются Сибирские траппы.

В пределах континентов элементный состав пород внутриплитовых ассоциаций намного разнообразней, однако между составами базальтов океанических островов и базальтов внутриконтинентальных горячих точек отмечается большое сходство благодаря их соответствию OIB-типу

Первопроходцы горячих полей

К 1980 г. внутриплитовая магматическая активность была установлена как в океанах (вулканические острова и плато), так и на континентах, где о ее проявлениях свидетельствовали большие геохимические отличия по сравнению с породами, связанными с границами плит. При этом для отдельных горячих точек детально исследовались связанные с ними внутриплитовые магматические породы, особенности их состава и т. п.

Однако работ по анализу общих взаимосвязей горячих точек (как глубинных образований) и поверхностных геологических структур не было. Чтобы восполнить этот пробел в знаниях, видный советский геолог Л. П. Зоненшайн предложил автору этой статьи М. И. Кузьмину рассмотреть данную проблему. Подход был исключительно простым – найти чисто географические закономерности распределения на земной поверхности продуктов внутриплитового магматизма. При этом во внимание были приняты лишь объекты, имеющие сравнительно небольшой (0–15 млн лет) возраст, чтобы возможный дрейф континентов не вносил больших искажений.

Из полученной в результате карты распределения горячих точек следует, что существуют четыре области распространения современного внутриплитового магматизма: две больших – Тихоокеанская и Африканская и две малых – Центрально-Азиатская и Тасманская. Наиболее крупные из них достигают 10 000 км в перечнике (Африканская и Тихоокеанская). Их размеры сопоставимы с размерами главных литосферных плит, однако контуры областей не совпадают с границами этих плит.

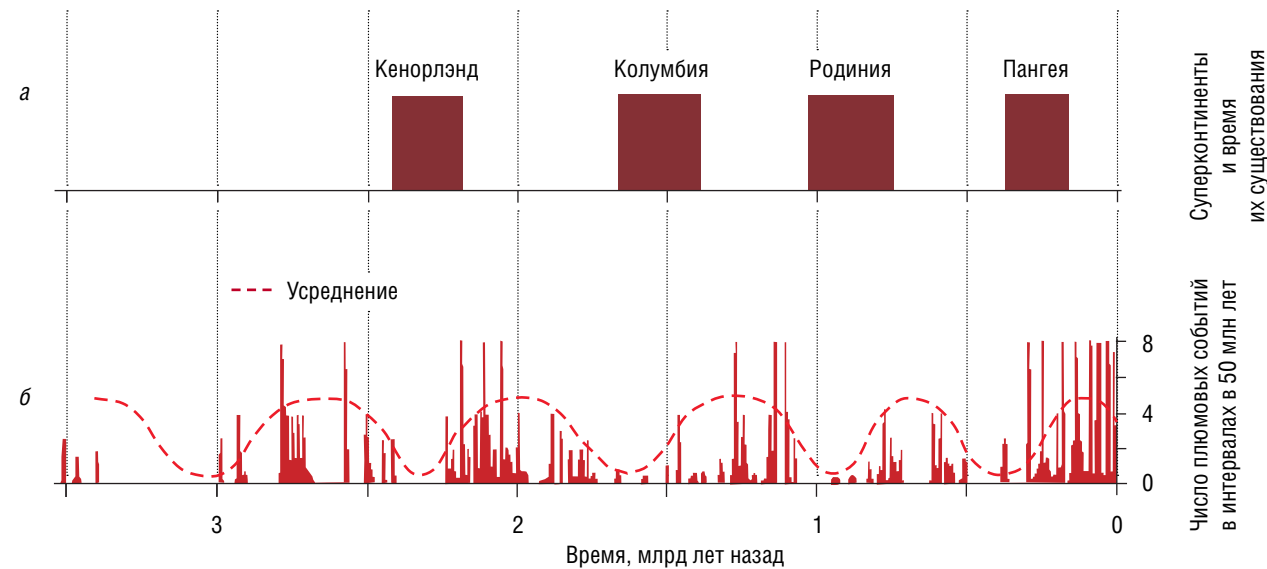
Результаты были опубликованы в статье «Внутриплитовый магматизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли» (Зоненшайн, Кузьмин, 1983), а области распространения внутриплитового магматизма были названы *горячими полями* Земли. Было отмечено, что горячие поля Земли совпадают с крупными положительными аномалиями в рельефе, а также положительными отклонениями формы геоида. Судя по геохимическим особенностям внутриплитовых магматических пород, этим областям отвечают аномалии вещественного состава, по-видимому, связанные с нижней мантией. Последний вывод следует из того, что породы, образующиеся в океанических рифтовых зонах (т. е. на краях плит), являются продуктами плавления верхней, сильно истощенной в геохимическом отношении, мантии – и поэтому имеют очень низкое содержание всех литофильных химических элементов.

Таким образом, выделенные горячие поля мантии Земли можно было представить как области, в которых происходит подъем вещества и энергии нижней мантии к поверхности планеты, а располагающиеся между ними *холодные поля* (связанные с зонами субдукции литосферных плит) – как зоны, в которых вещество опускается в низы мантии. В совокупности эти процессы вырисовывали согласованную систему конвекционных течений в мантии.

Если процессы, связанные с верхними оболочками, можно было описать в рамках тектоники литосферных плит, то обнаружение горячих полей позволило говорить о том, что конвективные явления имеют более глубинную природу. Иными словами, полученные результаты позволили впервые высказать представления о взаимосвязи процессов в нижней и верхней мантии.

Узкие мантийные струи, с которыми связаны горячие точки, могли представлять собой плюмы, отходящие от границы раздела нижней и верхней мантии, куда подходит разогретое вещество нижней мантии. Именно они порождают внутриплитовый магматизм и создают систему горячих точек. Неподвижность отдельных горячих точек относительно мигрирующих над ними литосферных плит определяется фиксированным положением горячих полей в глубинных горизонтах Земли, которое оставалось неизменным в течение как минимум 150 млн лет (Геотектоника, 1983). Заметим, что все эти выводы были сформулированы до появления сейсмоотографии, позволившей геологам понять внутреннюю структуру мантии во всем ее объеме.

К сожалению, информация о горячих полях мантии Земли так и не дошла до мирового геологического сообщества. Англоязычная версия статьи была подготовлена во время пребывания авторов в океанической экспедиции на Цейлоне и отправлена почтой в редакцию журнала *Earth Planetary Science Letters*, но до адресата



В истории Земли предположительно существовали как минимум четыре суперконтинента. Установлены временные интервалы возникновения этих континентов и их раскалывания под действием суперплюмов на отдельные континентальные массивы (а). Эти события происходят циклично и коррелируют с плюмовой активностью (б). Наиболее хорошо изучена история формирования и распада двух суперконтинентов: Родинии и Пангеи. По данным: (Li, Zhong, 2009; Torsvik et al., 2004)

Большую работу по пропаганде в Советском Союзе идей тектоники плит проделал замечательный геолог – член-корреспондент РАН Лев Павлович Зоненшайн (1929–1993). Он был инициатором перевода на русский язык фундаментальных работ по тектонике плит, которые и определили принятие этой парадигмы российским геологическим сообществом. Во многих регионах Советского Союза Зоненшайн создал научные творческие коллективы, задачей которых являлось переосмысление геологических данных с новых позиций. Наконец, он привлек специалиста по петрологии и геохимии магматических пород различных типов активных зон Земли (М. И. Кузьмина) и специалиста по металлогении и ранним (докембрийским) периодам развития Земли (В. М. Моралева) к написанию монографии «Новая глобальная тектоника, магматизм и металлогения». Эта книга вышла в свет в 1976 г. и стала настольной книгой для многих российских геологов, стремившихся изучить основы тектоники плит. Кроме того, он со своими коллегами-друзьями М. И. Кузьминым и Л. М. Натаповым подготовил монографию «Тектоника плит территории СССР» (вышедшую в издательстве «Недра» в 1990 г. и через год изданную за рубежом), ставшую фактически пояснительной запиской к геодинамической карте СССР.

Уже в начале 90-х годов Л. П. Зоненшайн понимал, что геология стоит перед переходом к глубинной геодинамике, охватывающей процессы в объеме всей Земли.

В обращении к третьему международному совещанию по тектонике плит в Звенигороде 25 октября 1991 г. перед сложнейшей операцией он писал: «Назревает новая революция, она рождает новую науку, ее можно было бы назвать ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКОЙ. Тектоника плит входит в нее лишь составной частью. Имеются в виду процессы в нижней мантии и на границе ядро – мантия (многие пионерские работы в этом направлении делались и в нашей стране, и об этом надо помнить)». В тот же день Лев Павлович написал М. И. Кузьмину: «Как мы можем развивать хоть что-то подобное на создание общей теории (глубинной геодинамики) у нас в стране». Он считал, что необходимо развивать следующие направления в геологии: «(1) взаимодействие внешнее ядро – мантия, (2) слой D` и его геодинамика, (3) обмен и потоки вещества ядро – нижняя мантия – верхняя мантия, (4) глубинная геохимия и geochemical signature (особенности геохимии мантии), (5) историческая геохимия и историческая геодинамика, начиная с аккреции Земли до сегодня. Совсем не упомянул внутреннее ядро, ничего почти не знаем о нем, а может быть, outer – inner core interactions (взаимодействие внешнего и внутреннего ядра) – главное?».

В конце письма он писал: «Уверен, что международное научное сообщество с этими задачами справится, а мы выпадаем. Большая просьба как-то все же действовать, чтобы моя уверенность (в смысле нашего выпадения) оказалась напрасной».

не дошла. Полноценной копии не было, начались работы над другими задачами. Отсутствие подготовленной аудитории привело к тому, что эта идея на какое-то время была забыта.

Сейсмотомография – ключ к пониманию глубинных процессов

В 70–80-х годах прошлого столетия в результате совершенствования вычислительной техники и роста количества исследований по сейсмологии большое развитие получила сейсмотомография. На основе анализа скоростей прохождения сейсмических волн через тело Земли в ее мантии выделены крупные объемы, имеющие разные скорости прохождения этих волн. Благодаря этому факту и работе многих исследователей были сделаны очень важные выводы.

На Земле существуют две большие «низкоскоростные» провинции: Африканская и Тихоокеанская, которые в настоящее время также называются *суперплюмами*, так как данные сейсмотомографии показывают, что «низкоскоростное» мантийное вещество проследивается от слоя D'' до верхов мантии. Следует заметить, что проекции этих мантийных провинций на поверхности Земли совпадают с выделенными ранее горячими полями мантии Земли.

В отличие от них высокоскоростные мантийные провинции ассоциируются с холодными областями, которые характеризуются опусканием и поглощением литосферных плит мантией в зонах субдукции. Субдуцированная (поглощаемая) литосфера частично остается на границе верхней и нижней мантии, а частично погружается до слоя D'', расположенного на границе «ядро – мантия». Этот процесс формирует общемантийную конвекцию: «холодное» субдуцированное вещество в виде нисходящих потоков погружается в глубь мантии Земли, компенсирующий подъем горячей мантии происходит в виде мантийных плюмов. Погрузившееся в слой D'' вещество литосферы под влиянием энергии, поступающей от ядра, формирует частично расплавленные массы (Keagey *et al.*, 2009), которые являются зародышами поднимающихся к поверхности Земли горячих плюмов.

Горячая мантия суперплюмов в виде огромного облака поднимается через нижнюю мантию, распадаясь на ряд изолированных плюмов, которые образуют скопления горячих точек в верхней мантии в литосфере. Сопряженность восходящих и нисходящих потоков в мантии позволила предполагать тесную связь между процессами глубинной геодинамики, которым отвечают мантийные плюмы, и тектоникой плит.

Наиболее убедительным аргументом связи тектоники плит и тектоники плюмов является взаимосвязь про-

цессов образования суперконтинентов и суперплюмов в единых суперконтинентальных циклах. В настоящее время установлено, что в процессе эволюции Земли возникали суперконтиненты, объединяющие практически все континентальные массы Земли. В дальнейшем они разрушались под действием суперплюмов, и движения отдельных континентов становились центробежными. Исследователи предполагают, что в разное время на нашей планете существовали как минимум четыре суперконтинента (Кенорленд, Колумбия, Родиния и Пангея), которые в дальнейшем разбивались зародившимися под ними суперплюмами.

Суперконтинент Родиния сформировался около 1 млрд лет назад и начал распадаться спустя примерно 250 млн лет под воздействием расположенного под ним Родинийского суперплюма. Предполагается, что одновременно с Родинийским существовал антиподальный ему суперплюм, расположенный в океане в противоположном Родинии секторе Земли. После распада Родинии составляющие ее континенты, в том числе и Сибирь, могли переместиться в соответствующие области позднерифейского океана.

Попытка решения задачи абсолютных георекоkonструкций была предпринята в работе, опубликованной в журнале *Earth-Science Review* (Kuzmin *et al.*, 2010). Полученные результаты позволили ответить на ряд вопросов, связанных с оценкой роли плюмов в геологической истории Земли и особенно с пониманием места горячих полей мантии Земли среди движущих механизмов ее развития.

Исландская горячая точка и дрейф Сибирского континента

Для того чтобы понять историю формирования Сибири в фанерозое, авторами были выполнены палеогеодинамические реконструкции. Для определения широтного положения геологических объектов в геологическом прошлом одним из ключевых является палеомагнитный метод. Для определения долготного положения требуются дополнительные построения.

При интерпретации установленных палеомагнитным методом данных был сделан вывод, что после распада Родинии Сибирь была выдворена за пределы суперконтинента и попала под влияние суперплюма, антиподального Родинийскому. Именно с этим суперплюмом, по-видимому, большую часть фанерозоя взаимодействовал Сибирский континент. Но для того, чтобы выполнить соответствующие абсолютные (т.е. привязанные к современной сетке географических координат) палеорекоkonструкции, необходимо было определить положение проекции этого суперплюма на земной поверхности или, что то же самое, отвечающее ему горячее поле мантии.



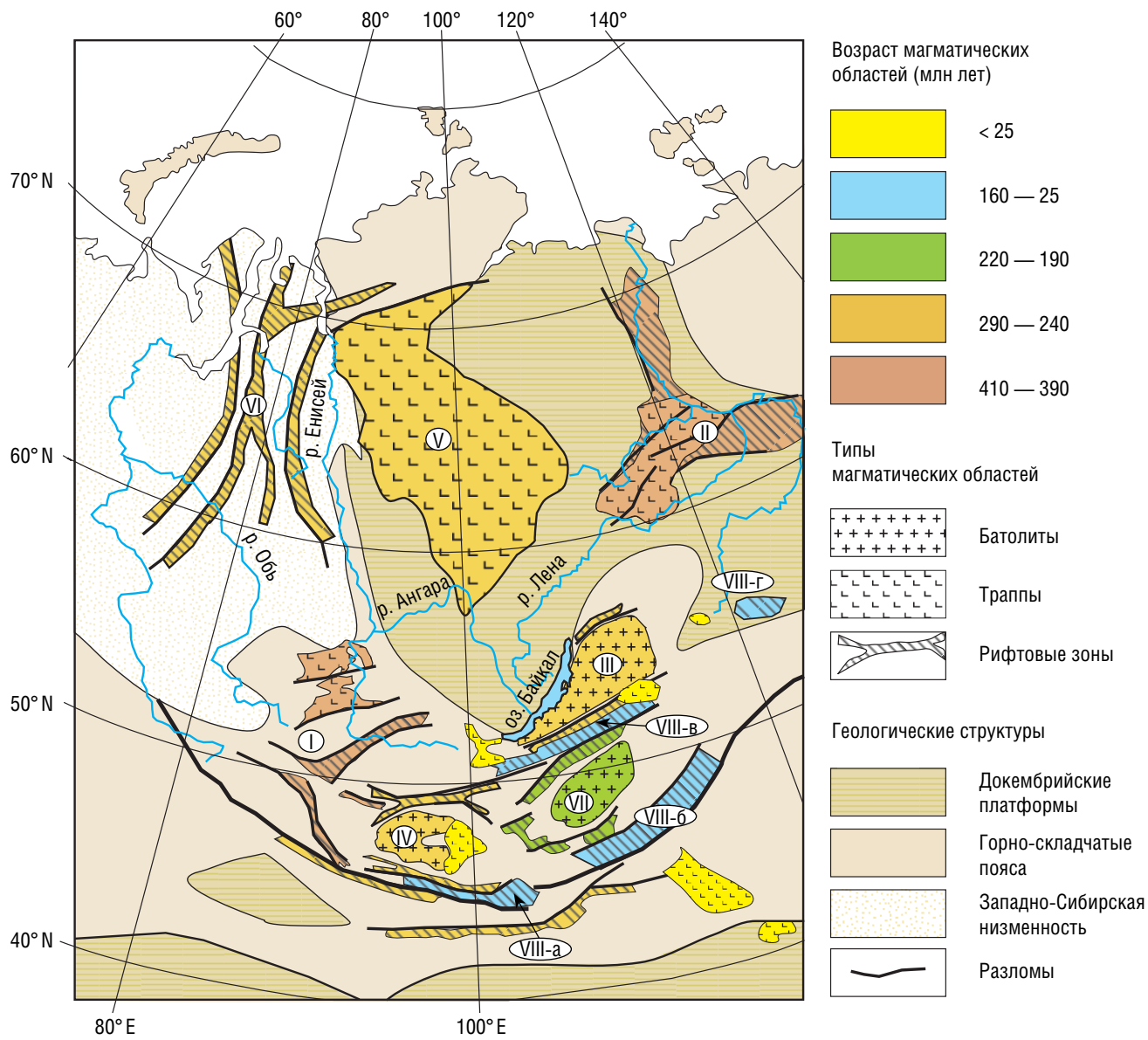
- Океаны
- Древние кратоны (континентальные платформы)
- Континентальный шельф
- Проекция горячих полей мантии
- Рифтовые зоны
- Зоны субдукции

Результат реставрации Родинийского плюма, который был ответственен за раскол Родинии. После распада составляющие ее континенты (в том числе и Сибирь), вероятно, перемещались в соответствующие области позднерифейского океана и могли оказаться под влиянием другого суперплюма. Его местонахождение можно ожидать в противоположной Родинии области Земли – по аналогии с Пангеей. Так, распад последней произошел под влиянием Пангейского (Африканского) суперплюма, хотя в то же время на планете существовал и антиподальный по отношению к нему Тихоокеанский суперплюм, активность которого зафиксирована системой горячих точек (Гавайи, Лайн и др.) и меловыми лавовыми плато (например, Онтонг-Ява).

По данным: (Li, Zhong, 2009)

Было принято решение использовать для этого Исландскую горячую точку, имеющую неизменное географическое положение в длительном интервале геологического времени. Так, судя по следу, оставленному этим плюмом в литосфере Сибири, Северной Америки и Северной Атлантики, он однозначно существует уже как минимум 150 млн лет. Кроме того, ряд исследователей считает, что 250 млн лет тому назад он же определил формирование Сибирской трапповой провинции. Действительно, пермо-триасовая палеоширота Сибирских траппов ($62^\circ \pm 7^\circ$) приблизительно соответствует современной географической широте Исландии ($65^\circ \pm 2^\circ$). Кроме того, данные по элементному составу относимых к Исландской горячей точке базальтов Западно-Сибирской рифтовой системы, Сибирских траппов, базальтов Арктического бассейна, Восточной Гренландии и Исландии свидетельствуют об изотопно-геохимических связях этих проявлений мантийного магматизма. Так, соотношение изотопов Sr и Nd в этих разновозрастных базальтах образует единый тренд в интервале времени от 300 млн лет назад до современности (Kuzmin *et al.*, 2010).

Все эти сопоставления позволяют говорить о том, что северная граница Африканского горячего поля (суперплюма), фиксируемая Исландской горячей точкой, уже существовала к рубежу 250 млн лет. Была освещена и более ранняя страница в его истории: в статье (Torsvik *et al.*, 2008) показано, что большая изверженная провинция с центром в Скагерракском грабене (Северное море), охватывающая огромную территорию от Англии до Германии и Швеции, существовала около 300 млн лет назад. В то время ее центр располагался в краевой



ВНУТРИПЛИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ СИБИРСКОЙ ЧАСТИ АЗИАТСКОГО КОНТИНЕНТА

В разных областях Сибири обнаружены многочисленные позднерифейские и венд-кембрийские офиолитовые и островодужные комплексы, в которых содержатся породы, отвечающие базальтам типа OIB, характерные для океанических плато или океанических островов. Из этого следует, что в океане, окружавшем Сибирский континент, около 600 млн лет назад существовали океанические острова, образованные горячими точками. Такие же горячие точки воздействовали и на сам континент, в результате чего в его пределах сформировался ряд областей внутриплитного магматизма. Практически весь фанерозой, вплоть до самого последнего времени (> 25 млн лет), континент и его ближайшее океаническое окружение находились под влиянием горячего мантийного поля – суперплюма (Ярмолук и др., 2006; Kuzmin *et al.*, 2010; Кузьмин и др., 2011). Так, после распада Родинии наиболее раннее взаимодействие литосферы Сибирского континента с мантийными плюмами пришлось на ранний и средний палеозой и привело к образованию двух крупных магматических провинций – Алтае-Саянской и Вилюйской. В первой неоднократно происходило образование комплексов щелочных магматических пород, свойственных мантийным плюмам. Расцвет внутриплитной активности в области был сопряжен с образованием системы грабенов (или рифтов), возникшей над крупным мантийным плюмом. Их образование сопровождалось крупномасштабными излияниями базальтовых лав, в том числе типа OIB. Другая изверженная провинция сформировалась в виде 3-лучевой системы рифтовых зон, одна ветвь которой представлена Вилюйским рифтом, а две другие ветви – краевыми расколами, определившими восточную (в современных географических координатах) границу палеоконтинента. По каждой из этих областей было сформировано не менее 10^5 км³ изверженных пород, сформированных в узком (продолжительностью 20–30 млн лет) интервале, что позволяет отнести их к разряду крупнейших изверженных провинций. В среднем девоне магматическая активность резко сократилась. Следующая эпоха активного взаимодействия Сибири с мантийными плюмами пришлось на интервал 320–190 млн лет назад. В это время в ее пределах возникло несколько крупных магматических провинций. Одна из них – Баргузинская – охватывает территорию более $2 \cdot 10^5$ км² и характеризуется зональным строением: периферию образуют рифтовые зоны, а в центре располагается Ангаро-Витимский гранитоидный батолит. Предполагается, к его образованию привело масштабное плавление коры из-за теплового воздействия базальто-

вых магм. Т.е. эта центральная зона является примером формирования внутриплитовых гранитоидных пород под воздействием мантийного плюма. Важнейшим событием конца позднего палеозоя на Северо-Азиатском континенте стало образование гигантской магматической провинции, объединяющей трапповую область Сибирской платформы и рифтовую систему Западной Сибири. Наиболее интенсивное их формирование, по оценкам, происходило в очень узком (3 млн лет) интервале времени. Вулканизм был связан с грабенами Западно-Сибирской рифтовой системы, которые прослеживаются через всю Западно-Сибирскую низменность от ее южной границы до акватории Ледовитого океана, имея протяженность более 1500 км. В этот же период внутриплитовым магматизмом было охвачено и южное складчатое обрамление Сибири. Здесь сформировались траппы Тарима и сопряженная с ними система субпараллельных рифтовых зон в пределах Монголии: Гоби-Тяньшаньская и Главного Монгольского линиамента (разлома). Прогрессивному смещению центров плюмовой магматической активности в глубь Сибирского континента отвечают две другие рифтовые системы: Гоби-Алтайская и Северо-Монгольская. Одновременно со становлением последних двух зон между ними возник Хангайский гранитоидный батолит, формирование которого также связывается с плавлением коры под воздействием внутриплитных источников тепла. Становление рифтовой системы Центральной Азии завершилось образованием зонального Монголо-Забайкальского магматического ареала в раннем мезозое. К рубежу 190 млн лет внутриплитовая активность резко сократилась, обозначив окончание соответствующей эпохи внутриплитового магматизма. Однако воздействие мантийных плюмов на литосферу Сибирского палеоконтинента возобновилось в позднем мезозое, когда в пределах Центрально-Азиатского обрамления Сибирской платформы образовался ряд рифтовых областей. Расцвет тектонической и магматической активности пришелся на начало раннего мела. Последующий этап характеризовался постепенно затухающей магматической активностью: в ряде областей в это время формировались отдельные небольшие по размерам лавовые поля и щитовые вулканы. Новая вспышка внутриплитной активности пришлось на позднекайнозойскую эпоху (< 25 млн лет), охватив территорию Центральной и Восточной Азии. В это время сформировались новые вулканические области: Южно-Байкальская и другие, что было связано с зарождением серии новых горячих точек.

Продукты внутриплитового магматизма океанического типа сохранились в структурах Сибирского палеоконтинента, зафиксировав таким образом активность суперплюма, антиподального Родинийскому. Так, в складчатых поясах, обрамляющих Сибирь, широко распространены внутриплитовые породы океанического генезиса, возраст которых соответствует временам после распада Родинии. Кроме того, в пределах Сибирской платформы в результате взаимодействия континента с горячими точками мантии на протяжении фанерозоя был сформирован целый ряд крупных изверженных провинций. По данным: (Ярмолук и др., 2000, 2003, 2006), модифицировано

Крупные изверженные провинции:
 Ранний – средний палеозой:
 I – Алтае-Саянская,
 II – Вилюйская;
 Поздний палеозой:
 III- Баргузино-Витимская,
 IV - Центрально-Азиатская,
 Пермо-триасс:
 V – Сибирские траппы,
 Ранний мезозой:
 VI – Западно-Сибирская рифтовая система,
 Позднемезозойские – кайнозойские рифтовые системы:
 VII – Восточно-Монгольская-Забайкальская;
 VIII-а – Южно-Хангайская (Гоби-Алтайская);
 VIII-б – Восточно-Монгольская;
 VIII-в – Западно-Забайкальская;
 VIII-г – Центрально-Алданская

части Африканского горячего поля, а именно вблизи его экваториальной зоны. В соответствии с этими данными, тогдашние контуры Африканской мантийной провинции были близки к современным.

Учитывая меридиональную вытянутость Африканского горячего поля и ее географическую стабильность, зафиксированную Исландской горячей точкой за последние 250 млн лет, было сделано предположение, что перемещения Сибири по широте в фанерозое были ограничены рамками этого поля. Соответственно, меридиональные границы Африканского суперплюма (между 10° з.д. и 70° в.д.) были приняты за рамки, в пределах которых Сибирь меняла долготную позицию. При этом ее широтные перемещения были существенно более значительны, что следует из данных многих авторов, обобщение которых сделал геофизик В. А. Кравчинский (Кузьмин и др., 2011 а). На основании этих реконструкций была составлена схема дрейфа Сибирского континента, начиная от 570 млн лет назад до современности.

Откуда приплыла Сибирь

Есть многочисленные свидетельства того, что Сибирь перемещалась, начиная с конца рифея (~600 млн лет назад), через область развития мантийных плюмов. По палеомагнитным данным установлено, что в Джидинском (Южная Бурятия) фрагменте древней океанической коры базальты типа OIB формировались на 15–20° S, т. е. уже 570 млн лет назад Сибирский континент помещался в пределах влияния Африканской «низкоскоростной» мантийной провинции (LLSVP).

В течение раннего кембрия, по данным (Pisarevsky *et al.*, 1997), долготная позиция Сибирского континента в пределах Африканского горячего поля мантии была определена меридианом 20° E. Начиная со среднего кембрия, Сибирь стала двигаться в северном направлении от 20° S, приблизившись почти к экваториальной широте в раннем и среднем ордовике. При этом в интервале от 512 до 480 млн лет назад меридиональная составляющая скорости движения достигла 5 см/год. Если допустить, что было еще и смещение по долготе, то суммарная скорость должна быть выше. Важно подчеркнуть, что полученная величина является относительно высокой по сравнению с современными темпами дрейфа континентов. Поэтому естественно предположить, что сдвиг поперечно меридиану был минимальным.

Реконструкции перемещения Сибири в более позднее время (вплоть до пермо-триасса) опирались на данные по зафиксированным в ее строении следам горячих точек – Алтае-Саянской, Вилюйской, Баргузинской (Сибирских траппов) и Монгольской. Эти реконструкции показали, что в предположении фикси-

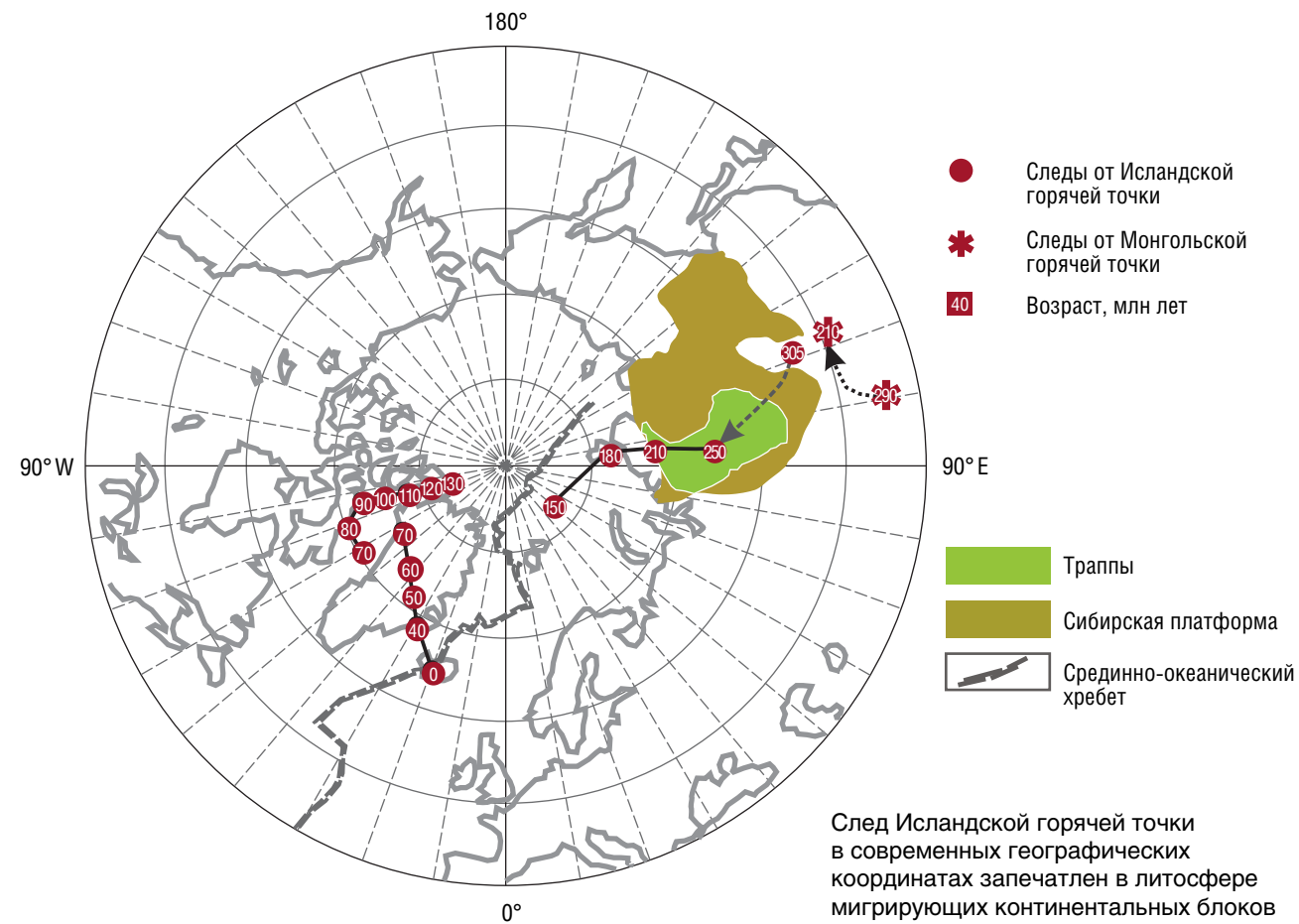
рованной меридиональной позиции Сибири скорость ее перемещения в северном направлении составляла около 7 см/год.

Наиболее ранний мантийный плюм, который проявился в структуре Сибирского континента, повлиял на характер развития Алтае-Саянской области еще в ордовике (Добрецов, 2011). Позднее, в раннем девоне, после столкновения Алтае-Саянской области с Сибирью этот плюм (координаты $40 \pm 15^\circ \text{N}; 0^\circ \text{E}$) способствовал возникновению тройной системы грабенов Алтае-Саянской рифтовой области. К середине девона Сибирь продолжала располагаться над Алтае-Саянской горячей точкой, которая благодаря вращению континента перекрыла Вилюйскую горячую точку (координаты $35 \pm 15^\circ \text{N}$ и около 20°W). Воздействие последней на литосферу привело к образованию грабенов Вилюйской рифтовой системы и расколу континента в его восточной части. После того как континент отошел от этих горячих точек, их следы затерялись. Более длительное воздействие на Сибирский континент оказали Исландская и Монгольская горячие точки, ответственные за ряд магматических ареалов Центральной Азии.

Как следует из палеомагнитных данных, в раннем карбоне Сибирь переместилась за 40 млн лет от 30° к 60° N, т. е. средняя скорость составила примерно 11 см/год. Столь высокая величина указывает на то, что перемещение происходило вдоль меридиана, т. е. практически отсутствовал сдвиг континента в параллельном экватору направлении. Это перемещение привело к столкновению и к тому, что южная (в современных координатах) Забайкальская окраина Сибири накрыла Исландскую горячую точку (Kuzmin *et al.*, 2010). Взаимодействие плюма со структурами этой окраины привело к образованию Баргузинского зонального магматического ареала с батолитовым Ангаро-Витимским ядром и периферическими рифтовыми зонами. Столь специфическая форма выражения плюмовой активности определялась особенностями проявления плюма в субдукционной обстановке активной континентальной окраины, которые привели к масштабному анатексису (плавлению) коры.

Вращение Сибири по часовой стрелке на протяжении пермского периода (от 280 до 250 млн лет назад) привело к миграции магматизма, связанного с Исландской горячей точкой от Баргузино-Витимского ареала к провинции Сибирских траппов. Соответствующий след движения Сибири прослеживается по палеомагнитным данным, в частности по перемагничиванию древних пород в Озерном полиметаллическом и Сухоложском золотом месторождениях на пермо-триасовую ориентацию (Kuzmin *et al.*, 2010).

Одновременно с Баргузино-Витимским ареалом другой внутриплитный магматический ареал возник



След Исландской горячей точки в современных географических координатах запечатлен в литосфере мигрирующих континентальных блоков Арктического бассейна.
По данным: (Kuzmin *et al.*, 2010; Харин, 2000; Lundin, Dore, 2005; Lawver, Muller, 1994)

в Южной Монголии, где сформировались рифтовые зоны Гоби-Тяньшаньская и Главного Монгольского линиаменты (310–285 млн лет), а также траппы Тарима. Их образование было связано с Монгольской (или Таримской) горячей точкой. Вращение Сибири в перми и раннем мезозое, которое привело к смещению местоположения Сибирских траппов над Исландской точкой, определило также миграцию магматизма над Монгольской горячей точкой в Забайкалье. Эта миграция привела к образованию Хангайского и Восточно-Монгольского-Забайкальского зональных магматических ареалов, подобных по своему строению Баргузинскому.

В мезозое Сибирь двигалась от Исландской горячей точки и это смещение зафиксировано следом магматических проявлений, который сформировался на протяжении мезозоя в Арктическом бассейне. Проведенные реконструкции показали, что тогда Сибирь вышла из-под влияния Африканского горячего поля, и

в интервале между 190 и 160 млн лет назад внутриплитная магматическая активность в пределах Сибирского континента не зафиксирована.

Активизация внутриплитных процессов в южном обрамлении Сибирской платформы в позднем мезозое и кайнозое была связана с образованием здесь ряда долгоживущих горячих точек мантии, которые сохраняют свою устойчивую географическую позицию на протяжении более 140 млн лет. Эти горячие точки тяготеют к скоплению мантийных плюмов, выявленному Жао (Zhao, 2009) в пределах юго-западной окраины Тихого океана, которое, по-видимому, отвечает одному из ответвлений Тихоокеанского суперплюма. Поэтому можно полагать, что к началу позднего мезозоя Сибирь существенно сместилась к востоку и попала в сферу влияния Тихоокеанского плюма. Столь быстрое широтное перемещение Сибирского континента, по-видимому, произошло вследствие раскрытия в это время Атлантического и Индийского океанов.

Суммируя вышеизложенное, прежде всего можно сказать, что Земля представляет собой самоорганизующуюся систему, развитие которой сопряжено со взаимодействием ее внутренних оболочек. Это взаимодействие проявляется в процессах разномасштабной конвекции.

Верхнемантийная конвекция приводит в движение литосферные плиты. В свою очередь ее энергетическая подпитка обеспечивается более глубокой конвекцией, которая определяется, с одной стороны, процессами в зонах субдукции, где происходит погружение «холодных» литосферных блоков в глубины мантии вплоть до границы с ядром, что порождает противотоки более горячей мантии к поверхности Земли; с другой стороны, обменные процессы на границе ядра и мантии приводят к значительному разогреву последней, возможно, вплоть до ее плавления в слое D^{''}. Такая перегретая и менее плотная мантия обретает повышенную плавучесть и также устремляется кверху, стимулируя в конечном счете процессы общемантийной конвекции.

В отличие от нисходящих потоков субдуцированных слэбов, имеющих геометрию крупных пластин с большими линейными размерами, подъем горячей мантии к поверхности Земли происходит в виде отдельных струй или мантийных плюмов. В настоящее время установлено, что такие восходящие струи мантии в основном сконцентрированы в двух секторах Земли, которые поэтому выделяются как суперплюмы: Тихоокеанский и Африканский. Нижняя мантия этих суперплюмов характеризуется повышенной температурой и в сейсмических полях выделяется областями пониженных скоростей распространения волн, что позволяет выделять их также в виде крупнейших низкоскоростных мантийных провинций.

Очевидно, что роль таких суперплюмов в формировании структуры литосферной оболочки Земли трудно переоценить. И здесь возникает вопрос об их природе – когда и почему зарождается суперплюмы, какова длительность их существования, насколько стабилен режим их воздействия на литосферу?

Определенный вклад в решение этих вопросов вносят выполненные авторами исследования. Прежде всего, они зафиксировали то, что проявления внутриплитной активности в пределах Сибирского континента в течение всего фанерозоя стали следствием его миграции над скоплением горячих точек, которое сопоставляется с современным Африканским суперплюмом и отвечающей ему LLSVP. Непрерывность внутриплитной активности в рамках этого суперплюма позволяет говорить о его возрастной идентичности суперплюму, антиподальному тому, который разрушил Родинию. Следовательно, этот суперплюм существует не менее одного миллиарда лет. А учитывая то, что Родинийский суперплюм сопоставляется с Тихоокеанским по месту

своего проявления, оба этих суперплюма следует рассматривать как наиболее долгоживущие глубинные структуры Земли.

Связь суперплюмов с процессами формирования и разрушения суперконтинентов в настоящее время является общепризнанной. Но последние результаты позволяют говорить, что осколки суперконтинентов, после их разрушения суперплюмом-убийцей, перемещаются в области Земли, контролируемые антиподальным суперплюмом, и образуют над ним новую суперконтинентальную агломерацию. Такое участие суперплюмов в образовании и последующем разрушении суперконтинентов, по-видимому, отражает их противофазную активность, вероятно, связанную с разным проявлением отвечающих им конвективных процессов, одной из причин которой мог стать эффект термостатирования (Коваленко и др., 2010; Kovalenko *et al.*, 2010).

Наконец, следует сделать вывод прогнозного характера. Тот факт, что при образовании суперконтинента, в частности Пангеи, отдельные континенты проходят над разновозрастными горячими точками суперплюмов и сохраняют в своем строении их следы, позволяет предполагать, что уже в ближайшем будущем существующие методы изучения магматических пород позволят дать оценку эволюции их мантийных источников как для отдельных плюмов, так и для суперплюмов в целом. В конечном итоге это будет способствовать пониманию общих закономерностей эволюции Земли.

Литература

Айзекс Б., Оливер Дж., Сайкс Л. Сейсмология и новая глобальная тектоника // Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. С. 133–179.

Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН; филиал «Гео», 2001. 407 с.

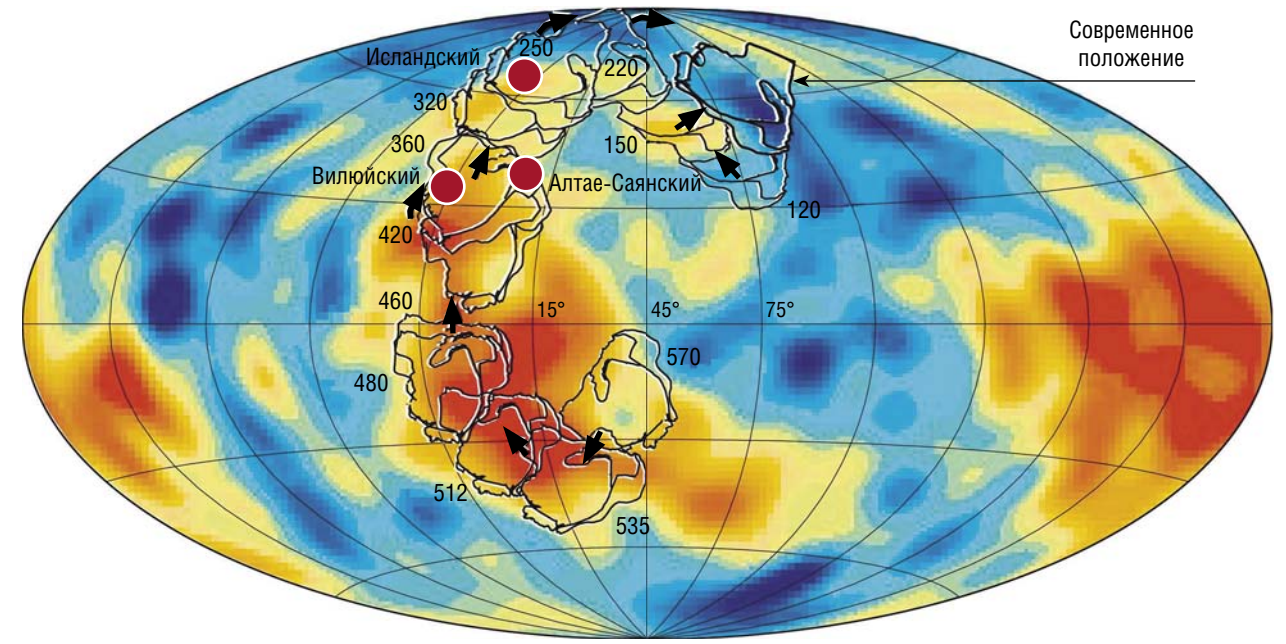
Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М. Геодинамическая модель пермтриасовых мантийных плюмов Евразии как основа прогноза рудных месторождений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 9. С. 1159–1187.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Внутриплитовый вулканизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли // Геотектоника. 1983. № 1. С. 28–45.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Палеогеодинамика. М.: Наука, 1992. 192 с.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР: в 2 кн. М.: Недра, 1990. Кн. 1. 326 с. Кн. 2. 334 с.

Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы (отв. ред.



На основе палеорекострукции получена схема миграции Сибирского континента над Африканской мантийной провинцией за последние 570 млн лет. По: (Kuzmin *et al.*, 2010)

- ➔ Перемещение континента
- 220 Возраст в млн лет, отвечающий положению континента
- Мантийные плюмы

В.И. Коваленко, В.В. Ярмолук, О.А. Богатиков). Т. 2: Новейший вулканизм Северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. ИГЕМ РАН, ИФЗ РАН, 2008. 430 с.

Кузьмин М.И., Ярмолук В.В., Кравчинский В.А. Абсолютные палеогеографические реконструкции Сибирского континента в фанерозое: к проблеме оценки времени существования суперплюмов // Докл. Акад. наук, 2011 а. Т. 437. № 1. С. 68–73.

Кузьмин М.И., Ярмолук В.В., Кравчинский В.А. Фанерозойский внутриплитный магматизм Северной Азии: абсолютные палеогеографические реконструкции африканской низкоскоростной мантийной провинции // Геотектоника. 2011б. Т. 45, № 6. С. 3–23.

Хаин В.Е. Основные проблемы современной геологии. М.: Научный мир, 2003. 348 с.

Харин Г.С. Импульсы магматизма Исландского плюма // Петрология. 2000. Т. 8, № 2. С. 115–130.

Condie K. C. Mantle Plumes and their Record in Earth History. Cambridge University Press, 2001. 305 p.

Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Bogatikov O.A. Modern Volcanism in the Earth's Northern Hemisphere and Its Relations with the Evolution of the North Pangaea Modern Supercontinent and with the Spatial Distribution of Hotspots on the Earth: The Hypothesis of Relations between Mantle Plumes and Deep Subduction // Petrology. 2010. Vol. 18, No. 7. P. 657–676.

Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // Earth-Science Review. 2010. Vol. 102. No. 1–2. P. 29–59.

Li Z.X., Zhong S. Supercontinent–superplume coupling, true polar wander and plume mobility: plate dominance in whole-mantle tectonics // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2009. 176, 143–156.

Maruyama S., Santosh M., Zhao D. Superplume, supercontinent, and postperovskite: mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core–mantle boundary // Gondwana Research. 2007. 11 (1–2). 7–37.

Morgan W.J. Deep mantle convection plumes and plate motions // Bull. Am. Assoc. Petroleum Geol. 1972. Vol. 56. P. 203–213.

Yuen D.A., Maruyama S.H., Karato S.-I., Windley B.F. Superplumes: Beyond Plate Tectonics. Springer, 2007. 569 p.

Авторы благодарят Вадима Кравчинского, который, к сожалению, не принимал участия в написании этой работы, но без его обоснования абсолютных реконструкций Сибирского континента невозможно было бы получить научные результаты, популярное изложение которых авторы представляют в настоящей статье