

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ ТЕКТОНИКИ И ГЕОДИНАМИКИ
ПРИ ОНЗ РАН
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ГИН РАН)
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ им. М.В. ЛОМОНОСОВА



**ТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА
ЗЕМНОЙ КОРЫ И МАНТИИ:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ-2024**

Материалы LV Тектонического совещания

Том 2

Москва
ГЕОС
2024

В.Г. Трифонов¹, С.Ю. Соколов¹

**Иерархия мантийных плюмов
и их геодинамические воздействия**

Мантийным плюмом называют объем, который характеризуется пониженными для соответствующих глубин скоростями сейсмических волн, что интерпретируется как его разуплотнение и разогрев. Разуплотненное вещество плюма поднимается к литосфере. В зависимости от глубин, с ко-

¹ Геологический институт РАН, Москва, Россия

торых происходит подъем, мы различаем суперплюмы, внутримантийные и верхнемантийные плюмы. Африканский и Тихоокеанский суперплюмы – обширные объемы, восходящие от границы ядра и мантии Земли. Внутримантийными мы называем плюмы, восходящие из верхней части нижней мантии. Верхнемантийными плюмами называют низкоскоростные объемы мантийного вещества, не распространяющиеся ниже переходного слоя мантии (410–670 км).

Суперплюмы удлинены в меридиональном направлении и антиподальны. Они имеют наибольшую площадь распространения в низах мантии, а выше представлены отдельными струями. Наряду с субвертикальными, от них отходят наклонные и сублатеральные низкоскоростные потоки на уровне верхней мантии и верхов нижней мантии. Как показал анализ вулканических проявлений Аравийско-Кавказского потока от Африканского суперплюма, прослеженных с эоцена, и следов горячей точки Гавайев – Императорского хребта (северной части Тихоокеанского суперплюма), прослеженных с позднего мела, подлитосферные потоки движутся со скоростями от 5 до 15 см/год, в среднем 7–8 см/год. Их движение создает предпосылки для верхнемантийной конвекции. Результатом подлитосферных течений является перемещение литосферных плит, которое происходит с существенно меньшими скоростями (от 0.1–0.3 см/год при медленном спрединге до 0.5–2 см/год при быстром спрединге). Скорости горизонтальных потоков общемантийной конвекции, вероятно, соизмеримы со скоростями восходящих потоков суперплюмов, которые их питают.

Категория внутримантийных плюмов была выделена нами на примере субмеридионального ряда плюмов Азии – с севера на юг Хангайского, Тибетского и Мьянма–Юньнань. Они примерно равноудалены от Африканского и Тихоокеанского суперплюмов и обладают сходными между собой и отличными от суперплюмов чертами. Они имеют форму, близкую к опрокинутому конусу, т.е. наибольшую площадь распространения на уровне верхней мантии, где скорости сейсмических волн наиболее понижены. На уровне переходного слоя мантии понижения скоростей становятся прерывистыми, чередуясь с относительно высокоскоростными объемами. В верхах нижней мантии контуры плюмов сокращаются, и негативные отклонения скоростей становятся меньше. Корни плюмов находятся на глубинах от 1200–1300 км у Хангайского плюма до 1500–1600 км у Тибетского и ~1500 км у плюма Мьянма–Юньнань. Последний имеет сложную конфигурацию, и его южная ветвь прослеживается далеко на юг, где объем верхней мантии, рассеченный слэбом Зондской островной дуги, может быть ответвлением этого плюма или отдельным плюмом, восходящим с глубины ~1200 км.

На уровне низов верхней и верхов нижней мантии выявлены каналы связи плюма Мьянма–Юньнань с юго-восточным окончанием Тибетского

плюма, который, в свою очередь, связан с юго-восточным окончанием Хангайского плюма. Основное тело Хангайского плюма имеет форму слабо вытянутого меридионального овала, протягивающегося от Гобийского Алтая до Восточного Саяна, причем его корни находятся под югом Хангайского нагорья. Юго-восточнее Хэнтэйского нагорья идентифицирована меньшая по размеру область пониженных скоростей, сообщающаяся с основным телом плюма на глубинах 800–1000 км. Потоки от основного тела плюма и его Хэнтэйского ответвления распространяются в Забайкалье. Кровля Хангайского плюма неровная. Отдельные купола поднимаются выше глубины 60 км, «съедая» мантийную часть литосферы. Тибетский плюм также характеризуется утонением (до полного исчезновения) мантийной части литосферы.

Над внутримантийными плюмами субмеридионального ряда происходит поднятие земной поверхности. Основному телу Хангайского плюма соответствует поднятие Хангайского нагорья, достигающее максимальной высоты ~4 км на юге, где находятся корни плюма. С юго-востока поднятия Хангайского и Хэнтэйского нагорий ограничены поясом плоских впадин северо-восточного простирания, простирающимся примерно вдоль границы Монголии. С юга, запада и севера Хангайское нагорье ограничено С-образным поясом впадин. Это Долина Озер на юге, Котловина Больших Озер и Убсунурская впадина на западе, Тувинские и Тункинские впадины на севере. Продолжением пояса можно считать Южную впадину Байкала на ранних стадиях ее развития. В более северо-восточной части Байкала и Забайкалье пояс впадин замещается грабенами северо-восточного простирания.

Поднятия Хангайского и Хэнтэйского нагорий периодически проявлялись сносом с них обломочного материала, начиная с юрского времени (данные А.В. Аржанниковой, 2021 г.). С олигоцена поднятие Хангайского нагорья отражено в осадках С-образного пояса впадин. Впадины заполнены озерными и флювиальными отложениями. С позднего плиоцена Южная впадина Байкала продолжала погружаться как часть Байкальской рифтовой зоны, тогда как более западные впадины С-образного пояса вовлекались в общее поднятие региона. Поднятия Хангайского и Хэнтэйского нагорий и обрамляющие впадины образуют длительно развивавшийся структурный парагенез, связанный с воздействием Хангайского плюма. В регионе проявился меловой и кайнозойский внутриплитный базальтовый вулканизм, всесторонне изученный В.В. Ярмолюком, С.В. Рассказовым и их коллегами. Согласно В.В. Ярмолюку и др. (1995 г.), этот вулканизм, по крайней мере, частично является плюмовым. Все проявления плюмового вулканизма находятся в пределах Хангайского плюма и его ответвлений.

Наряду с «хангайским» парагенезом, в том же регионе Азии выделяется другой структурный парагенез, элементы которого лучше всего вы-

ражены системой активных разломов, проявлены в плиоцен-четвертичной структуре и заложились одновременно с «хангайским» парагенезом. Этот парагенез отражает взаимодействие плит и блоков литосферы. Пространственное совмещение двух парагенезов обусловлено геодинамическими процессами, происходящими на разных уровнях тектоносферы.

Обнаружены мантийные объемы со слабо пониженными скоростями *P*-волн, которые можно интерпретировать как каналы проникновения материала обоих суперплюмов во внутримантийные плюмы. Вместе с тем, мы допускаем собственные источники их формирования в результате минеральных преобразований на уровне их корней. Так, гидрид железа, образующийся при участии водорода, поступающего из земного ядра, стабилен при температурах и давлениях, характерных для нижней мантии примерно на уровне основания внутримантийных плюмов, но неустойчив выше (данные Ю.М. Пушаровского и Д.Ю. Пушаровского, 2010 г.).

К категории внутримантийных может относиться Исландский плюм, примерно антиподальный плюмам рассмотренного субмеридионального ряда, прослеженный до глубин 1500–1600 км и, возможно, связанный на глубине с Африканским суперплюмом.

На востоке и юго-востоке Азии выделяются также горячие объемы мантии под островными дугами и задуговыми морями. Они охватывают верхнюю мантию, фрагментарно представлены в ее переходном слое и не распространяются глубже, будучи результатом верхнемантийной конвекции. В отличие от внутримантийных плюмов, низкоскоростным верхнемантийным объемам соответствуют не поднятия земной поверхности, а либо впадины задуговых морей, либо островные дуги, где поднятия рельефа являются преимущественно вулканическими.

Ареалы структурного воздействия внутримантийных и верхнемантийных плюмов существенно меньше, чем у суперплюмов. Своеобразное выражение таких воздействий обнаружено нами при анализе кинематики Зондской островной дуги и Гималайской дуги.

Согласно плейт-тектонической модели, восточная часть Индийского океана как часть Индийской литосферной плиты поддвигается под Зондскую дугу по азимуту $\sim 35^\circ$ СВ. Из-за изгиба дуги чистый поддвиг имеет место только в центральной части дуги, а на ее окончаниях сочетается со сдвиговыми перемещениями или замещается ими. Мы проверили справедливость такой модели данными о механизмах очагов землетрясений в островной дуге и ее окрестностях. Оказалось, что значительная часть механизмов согласуется с моделью, т.е. направления сейсмического поддвига–надвига ориентированы фронтально к дуге в ее центральной части и частично или полностью замещаются сдвигами на окончаниях дуги. Но наряду с ними многочисленны землетрясения, механизмы которых указывают на поддвиг–надвиг, нормальный к простиранию сегментов

дуги, причем в некоторых сегментах землетрясения с такими механизмами преобладают. Такая ориентировка сейсмического течения согласуется с надвиганием дуги на пододвигающуюся плиту. Есть также более редкие антитетические надвиги, у которых направления перемещений отличаются от основных надвигов на $\sim 180^\circ$.

Аналогичное сочетание направлений сейсмических подвижек выявлено в Гималаях. Согласно модели, подкрепленной GPS данными, Индийская платформа пододвигается под Гималаи в направлении $\sim 25^\circ$, причем направления пододвигания изменяются на окончаниях Гималаев в областях Пенджабского (до 350°) и Ассамского синтаксисов. Наши исследования показали, что часть механизмов очагов землетрясений согласуется с этой моделью, тогда как у значительной, части механизмов перемещения нормальны к простиранию горной системы, отражая ее надвигание на Индийскую платформу.

Итак, в Зондской и Гималайской дугах, наряду с пододвиганием Индийской плиты, присутствует и, возможно, доминирует надвигание дуги, нормальное к ее фронту и направленное в сторону пододвигающейся плиты. В Зондской дуге надвигание сочетается с обилием «горячих» и, соответственно, разуплотненных мантийных масс, связанных как с внутримантийным плюмом Мьянма–Юньнань, так и с верхнемантийными образованиями плюмового типа, характерными для Андаманского задугового моря и ответственными за развитие в нем рифтовых структур. Аналогичным образом, в тылу надвигающейся Гималайской дуги находятся Тибетский внутримантийный плюм и область растяжения Тибета, выявленная геодинамическим анализом механизмов очагов землетрясений (данные Ю.Л. Ребецкого и Р.С. Алексеева, 2014 г. и 2021 г.) и активных разломов (данные В.Г. Трифонова и Е.А. Зеленина, 2021 г.), а также моделированием кинематики региона (данные Wang & Barbot, 2023). Возможно, в обоих случаях тыловое растяжение, связанное с разуплотнением горных масс, обусловило надвигание дуги.

Работа выполнена на средства Российского научного фонда, грант № 22-17-00049.