РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О.Ю.Шмидта

СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИКА. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ.

Материалы восьмой молодежной тектонофизической школы-семинара

9-12 октября 2023 г., Институт физики Земли РАН, г. Москва

> Москва 2023

УДК 551.2.3 ББК 26.324

Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы восьмой молодежной тектонофизической школы-семинара. – М.: ИФЗ, 2023. – 197 с.

В сборнике публикуются материалы докладов восьмой молодежной школы-семинара по проблемам тектонофизики. Открывается сборник докладами-лекциями по важным разделам тектонофизики, современной геодинамики и геомеханики разломов, в которых рассматриваются вопросы полевой тектонофизики в приложении к фундаментальным и прикладным проблемам рудных и нефтегазовых месторождений, а также к проблемам сейсмических и геологических опасностей. Во второй части сборника публикуются статьи молодых участников школы, в которых отражены результаты новых региональных тектонофизических исследований.

> Ответственный редактор: Доктор физ.-мат. наук Ю.Л. Ребецкий

> > Редакторы Е.А. Мануилова И.В. Бондарь



В оформлении обложки использована фотография А.А. Никонова.

ВНУТРИМАНТИЙНЫЕ ПЛЮМЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ, ИХ НЕОТЕКТОНИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ, СООТНОШЕНИЯ С ВЕРХНЕМАНТИЙНЫМИ ПЛЮМАМИ И ДУГОВЫМИ ЗОНАМИ СУБДУКЦИИ

Трифонов В.Г., Соколов С.Ю.

Геологический институт РАН, г. Москва, Россия, trifonov@ginras.ru, sysokolov@yandex.ru

Введение

В статье представлен новый тип мантийных плюмовых образований – внутримантийные плюмы, восходящие к литосфере из верхней части нижней мантии. Охарактеризованы их структурное выражение на земной поверхности, место в иерархии мантийных плюмов и соотношения с субдуцированными слэбами зон субдукции, выраженными на поверхности дуговыми структурами.

Принята следующая терминология. Мантийный плюм – поток мантийного вещества, восходяший с любых глубин мантии и характеризующийся пониженными для соответствующих глубин скоростями сейсмических волн, что интерпретируется как его разуплотнение и разогрев. Плюмы различаются по глубине заложения. Суперплюмы Африканский (Эфиопско-Афарский) и Тихоокеанский – это обширные плюмы, восходящие от границы ядра и мантии Земли. Внутримантийными мы называем плюмы, восходящие из верхней части нижней мантии. Верхнемантийными плюмами названы объемы мантийного вещества с пониженными скоростями сейсмических волн, не распространяющиеся ниже переходного слоя мантии (410–670 км).

Субдуцированный слэб – объем литосферы, погружающийся в мантию в зоне субдукции и характеризующийся повышенными для соответствующих глубин скоростями сейсмических волн. Стагнирующий слэб [Жао и др., 2010; Toyokuni et al., 2022] – субдуцированный слэб, выполаживающийся на уровне переходного слоя мантии и продолжающийся под аллохтон как субгоризонтальный слой.

Объемы мантии с пониженными для соответствующих глубин значениями скоростей сейсмических волн интерпретируются как разуплотненные и, чаще всего, относительно горячие. Объемы с повышенными скоростями сейсмических волн интерпретируются как уплотненные и относительно холодные. Для краткости объемы мантии с пониженными и повышенными значениями скоростей называют, соответственно, горячими и холодными.

Исходные материалы

Исходными материалами для анализа скоростных неоднородностей мантии послужили в данной работе глобальные модели отклонения скоростей продольных волн (*P*-волн) от средних для соответствующих глубин значений δV_p (%) – MITP08 [Li et al., 2008] и UU-P07 [Amaru, 2007; Hall., Spakman, 2015; Vander Meer et al., 2018].

Формула тектоники литосферных плит (плейт-тектоники)

Литосферные плиты раздвигаются в зонах спрединга и движутся от них вдоль трансформных разломов к зонам субдукции и коллизии, где погружаются в мантию. В качестве источника движения плит был предложен механизм общемантийной конвекции. Первоначально предполагалось, что восходящие ветви конвекции находились под зонами спрединга, а роль нисходящих ветвей выполняют объемы литосферы, погружающиеся в зонах субдукции. Дальнейшие более детальные сейсмотомографические исследования показали, что это неверно. Горячие объемы под зонами спрединга не распространяются глубже 200–300 км, а сами зоны спрединга меняют расположение. Многие объемы литосферы, погружающиеся в зонах субдукции, переходят в стагнирующие слэбы.

В дальнейшем было показано, что функции восходящих ветвей общемантийной конвекции выполняют Африканский и Тихоокеанский суперплюмы (рис. 1). Они удлинены в меридиональном направлении и антиподальны (расположены на противоположных сторонах сфероида). От суперплюмов отходят верхнемантийные потоки, местами охватывющие и верхи нижней мантии. Как показал анализ вулканических проявлений Аравийско-Кавказского потока от Африканского суперплюма с эоцена и следа горячей точки Гавайи – Императорский хребет (северная часть Тихоокеанского суперплюма) с позднего мела, горизонтальные подлитосферные потоки движутся со скоростями от 5 до 15 см/год, в среднем 7-8 см/год [Трифонов, Соколов, 2017]. В ходе таких течений нередко происходит верхнемантийная конвекция. Результатом верхнемантийных течений является перемещение литосферных плит со 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, которые их питают.

Нисходящие ветви конвекции более рассеяны. Наряду со слэбами, проникающими ниже переходного слоя мантии, нисходящие потоки могут быть образованы высокометаморфизованными отслоенными фрагментами низов утолщенной литосферы кратонов и зон коллизии. Скорость погружения отторженных фрагментов низов литосеры Южной Атлантики, подсчитанная путем ее сопоставления со скоростью раздвигания океана, составила 0.9–1.0см/год [Трифонов, Соколов, 2018].



Рис. 1. Сейсмотомографические разрезы δ*Vs* вдоль Африканского (сверху) и Тихоокеанского (снизу) суперплюмов [Соколов, Трифонов, 2012; Трифонов, Соколов, 2017]. Построил С.Ю. Соколов по данным глобальной объемной модели NGRAND [Grand et al., 1997; Becher, Boshi, 2002]

Внутримантийные плюмы

Субмеридиональый ряд внутримантийных плюмов протягивается на востоке Азии. Это с севера на юг плюмы Хангайский, Тибетский и Мьянма–Юньнань (рис. 2). Нами детально изучен **Хангайский плюм** [Трифонов и др., 2023]. В его пределах скорости *P*-волн наиболее понижены в верхней мантии. На уровне переходного слоя понижения становятся прерывистыми, чередуясь с относительно холодными объемами. В верхах нижней мантии контуры плюма сокращаются, и его корни находятся на глубинах 1200–1300 км (рис. 3). Основное тело плюма имеет форму слабо вытянутого меридионально овала, протягивающегося от Гобийского Алтая до Восточного Саяна, причем его корни находятся под югом Хангайского нагорья. Кровля плюма неровная. Отдельные купола поднимаются выше глубины 60 км, «съедая» мантийную часть литосферы. 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.



Рис. 2. Сейсмотомографические разрезы $\delta V p$ через плюмы Хангайский, Тибетский и Мьянма–Юньнань [Трифонов, Соколов и др., 2021]. Построил С.Ю. Соколов по данным глобальной объемной модели МІТР08 [Li et al., 2008]



Рис. 3. Объемное распределение вариаций $\delta V_p(\%)$ скоростей *P*-волн в районе исследований по данным модели MITP08 [Li et al., 2008]. Точка обзора расположена на северо-западе и направление обзора ориентировано с глубины к поверхности. Широтный разрез демонстрирует основное тело Хангайского плюма, а его Хэнтэйская ветвь и низкоскоростные объемы Забайкалья показаны на меридиональном разрезе

С Хангайским плюмом связаны характерные особенности кайнозойской структуры региона (рис. 4). Основному телу 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 с крупными разломами на внешние относительно нагорья

бортах. 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.



Рис. 4. Кайнозойская тектоника севера Центральной Азии [Трифонов и др., 2023]

1 – изолинии вершинной поверхности фундамента на поднятиях и подошвы чехла во впадинах (м), 2 – осадочное и вулканическое заполнение позднемеловых и кайнозойских впадин и грабенов; 3 – равнины с кайнозойским платформенным чехлом; 4 – плиоцен-четвертичные разломы; 5 – крупные активные разломы, достоверные (а) и предполагаемые (b); 6 – прочие активные разломы, достоверные (а) и предполагаемые (b); 7 – сбросы; 8 – надвиги и взбросы; 9 – сдвиги; 10 – границы слабо опущенных линейных прогибов (Селенгино-Витимского и Восточной Монголии)

Поднятия Хангайского и Хэнтэйского нагорий периодически проявлялись сносом с них обломочного материала, начиная с юрского времени [Аржанникова, 2021]. С олигоцена поднятие Хангайского нагорья отражено в осадках С-образного пояса впадин. Впадины заполнены озерными и флювиальными отложениями [Девяткин, 1981; Мац и др., 2001; Рассказов и др., 2010; Хатчинсон и др., 1993]. Мощность олигоцен-четвертичных осадков, накопившихся во впадинах пояса, возрастает от

300 м на юге в Долине Озер, где эти осадки залегают на платформенных отложениях верхнего мела – эоцена, до 500 м в Котловине Больших Озер, 700–800 м в Убсунурской впадине и 2500 м в Тункинской впадине, где они залегают на породах фундамента. В Южной впадине Байкала, начавшей погружаться не позднее эоцена, к середине плиоцена накопилось до 5-7 км осадков. С позднего плиоцена она продолжала погружаться как часть Байкальской рифтовой зоны, тогда как более западные впадины Собразного пояса вовлекались в общее поднятие региона.

Поднятия Хангайского и Хэнтэйского нагорий и обрамляющие впадины образуют длительно развивавшийся структурный парагенез, связанный с воздействием Хангайского плюма (рис. 5). 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], этот вулканизм, по крайней мере, частично является плюмовым. Все проявления плюмового вулканизма находятся в пределах Хангайского плюма и его ответвлений.





 1 – изолинии вершинной поверхности фундамента на поднятиях и подошвы чехла во впадинах; 2 – отложения кайнозойских впадин и грабенов; 3 – крупные разломы; 4
контуры прогибов, Селенгино-Витимского и Восточной Монголии; 5–8 – контуры Хангайского плюма на разных глубинах: 5 – 67 км, 6 – 248 км, 7 – 384 км, 8 – 655 км

Наряду с «хангайским» парагенезом, на севере Центральной Азии проявился другой структурный парагенез, лучше всего выраженный системой активных разломов (рис. 6). Для него характерно преобладание сдвигов и зон сдвиговых деформаций в условиях транспрессии на западе и в центре региона и транстенсии и растяжения в Байкальской рифтовой зоне и Забайкалье. Второй парагенез отчетливо проявился в плиоцен-четвертичной структуре, но развивался и раньше, одновременно с «хангайским» парагенезом. Простирающиеся на северо-восток грабены Забайкалья формировались, начиная с поздней юры. Элементами той же системы можно считать Южную и Центральную впадины Байкала, заложенные не позднее эоцена. Активные разломы и связанные с ними структурные элементы участвуют в строении Саян, Монгольского и Гобийского Алтая, развивавшихся с олигоцена.



Рис. 6. Крупные активные разломы севера Центральной Азии.

1 – активные разломы со скоростями движения ≥1 мм/год, достоверные и предполагаемые; 2 – активные разломы со скоростями движения <1 мм/год, достоверные и предполагаемые; 3 – сбросы; 4 – взбросы и надвиги; 5 – сдвиги; 6 – эпицентры землетрясений с магнитудами Ms = 7–7/9 (а) и ≥8 (b)

Таким образом, в кайнозойской структуре севера Центральной Азии сочетаются проявления двух одновременно развивавшихся структурных парагенезов, обусловленных геодинамическими процессами на разных уровнях тектоносферы. «Хангайский» парагенез связан с воздействием Хангайского плюма. Второй парагенез связан с взаимодействием Индийской и Сибирской платформ и отодвиганием от последней Амурской плиты.

Тибетский плюм расположен под Центральным и Восточным Тибетом севернее южнотибетского блока Лхаса. Подобно Хангайскому плюму, он наиболее ярко выражен горячими объемами верхней мантии, прерывисто представлен на уровне переходного слоя мантии и продолжается в виде сужающейся книзу воронки в нижнюю мантию до глубин 1500–1600 км (рис. 7). Плюм характеризуется утонением (до полного исчезновения) мантийной части литосферы и значительным поднятием земной поверхности. Проявлений внутриплитного вулканизма не обнаружено. Тибетский плюм сообщается с Хангайским на востоке на уровне низов верхней и верхов нижней мантии.

Расположенный южнее плюм Мьянма–Юньнань прослежен до глубины 1500 км. Плюм имеет сложную конфигурацию. На севере он соединяется с юго-восточным окончанием Тибетского плюма, а его южная ветвь прослеживается далеко на юг (рис. 8). Объем верхней мантии, рассеченный слэбом Зондской островной дуги, может быть ответвлением этого плюма или отдельным внутримантийным плюмом, восходящим с глубины ~1200 км.



Рис. 7. Объемное распределение вариаций $\delta V_p(\%)$ скоростей *P*-волн в районе исследований по данным модели МІТР08 [Li et al., 2008]. Точка обзора расположена на северо-востоке и направление обзора ориентировано с глубины к поверхности; широтный и меридиональный разрезы δV_p демонстрируют Тибетский плюм



Рис. 8. Сейсмотомографический разрез вдоль субмеридионального профиля (положение показано на рис. 10) по данным модели UU-P07 [Amaru, 2007; Hall, Spakman, 2015; Vander Meer et al., 2018]. Пунктиром показано пересечение с разрезом рис. 9

На востоке и юго-востоке Азии выделяются также горячие объемы мантии под островными дугами и задуговыми морями (рис. 9). В отличие от рассмотренных плюмов, они охватывают верхнюю мантию, фрагментарно представлены в ее переходном слое и не распространяются глубже, будучи результатом верхнемантийной конвекции.

Внутримантийные плюмы Хангайский, Тибетский, Мьянма-Юньнань группируются в субмеридиональный ряд, примерно равноудаленный от Африканского и Тихоокеанского суперплюмов. Внутримантийные плюмы представляют особую категорию плюмовых образований, восходящих из верхней части нижней мантии. Этим они отличаются как от верхнемантийных горячих объемов, так и от Африканского и Тихоокеанского суперплюмов. Суперплюмы поднимаются от границы ядра и мантии, крупные и сопровождаются протяженными ответвлениями на уровне верхней мантии и верхов нижней мантии, оказывающими глобальные геодинамические воздействия. У рассмотренных внутримантийных плюмов ареал структурного воздействия существенно меньше. Если суперплюмы имеют наибольшую площадь распространения в низах мантии, а выше представлены отдельными струями, то рассмотренные внутримантийных низкоскоростных объемов Юго-Восточной

Азии является связь с ними поднятий земной поверхности, тогда как низкоскоростным верхнемантийным объемам соответствуют либо впадины задуговых морей, либо островные дуги, где поднятия рельефа являются преимущественно вулканическими.



Рис. 9. Сейсмотомографический разрез вдоль субширотного профиля (положение показано на рис. 10) по данным модели UU-P07 [Amaru, 2007; Hall, Spakman, 2015; Vander Meer et al., 2018]. Пунктиром показано пересечение с разрезом рис. 8

Выделены мантийные объемы со слабо пониженными скоростями *P*-волн, которые могут быть интерпретированы 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. В связи с этим заслуживает внимания гидрид железа, образующийся при участии водорода, поступающего из земного ядра. Показано, что гидрид железа стабилен при температурах и давлениях, характерных для нижней мантии примерно на уровне основания внутримантийных плюмов, но неустойчив выше [Пущаровский Ю.М., Пущаровский Д.Ю., 2010].

Объемы мантии с повышенными скоростями сейсмических волн

Субдуцированные слэбы отмечены на юго-востоке Азии повышенными скоростями *P*-волн. «Холодная» верхняя часть мантии Индийской платформы утолщается (вероятно, деформационно) с приближением к Предгималайскому прогибу от 150 до 350 км и севернее погружается под Гималаи и Южный Тибет до глубины 800–850 км (см. рис. 2).

В Андаманской части Зондской дуги такого утолщения океанской плиты с приближением к зоне субдукции не происходит. Слэб непрерывно прослеживается до глубины ~800 км, давая короткое ответвление типа стагнирующего слэба на глубинах 500–750 км (см. рис. 9). Филиппинский слэб очень слабо проявлен в верхней части верхней мантии и имеет четкое выражение лишь на глубинах 300–750 км. Марианский слэб на глубинах до 200 км выражен лишь узкой зоной «холодной» мантии и глубже расширяется, достигая глубины 750 км. Все три слэба юго-восточной окраины Азии соединяются на глубине с общирной линзой высокоскоростной мантии, которая имеет плоскую кровлю, повышающуюся к востоку с глубин 800 км до 750 км, и выпуклую книзу подошву, которая достигает глубины 1600 км под южной частью Южно-Китайского моря. Эту линзу можно рассматривать как результат объединения стагнирующих частей трех слэбов, хотя она расположена не в переходном слое мантии, что характерно для таких структур, а под ним.

Кинематика сейсмического течения в Зондской и Гималайской дугах

Согласно традиционным плейт-тектоническим представлениям, восточная часть Индийского океана как часть Индийской литосферной плиты пододвигается под Зондскую островную дугу по азимуту ~35° CB (рис. 10). Из-за изгиба дуги чистый поддвиг имеет место только в центральной части дуги, а на ее окончаниях сочетается со сдвиговыми перемещениями или замещается ими.



Рис. 10. Принципиальная схема горизонтального движения литосферных плит и блоков в Юго-Восточной Азии (синие стрелки). Для континентальной части Китая и Индии схема построена по данным GPS на основании работ [Wang, Shen, 2020; Todrani et al., 2021]. Для Индонезии схема построена по данным GPS [Susilo et al., 2016]. Схема движения Австралийской плиты построена по данным модели NNR-MORVEL56 [Argus et al., 2011]. Красными линиями показаны рифты Андаманского и Южно-Китайского морей. Пунктирной линией показаны положения разрезов рис. 8 и рис. 9

Мы проверили справедливость такой модели данными о механизмах очагов землетрясений в островной дуге и ее окрестностях [Соколов, Трифонов, 2023]. Методика определения механизмов не позволяет отличить поддвиг от надвига, но указывает азимут перемещения (рис. 11). Оказалось, что значительная часть механизмов согласуется с моделью, т.е. направления сейсмического поддвиганадвига ориентированы фронтально к дуге в ее центральной части и частично или полностью замещаются сдвигами на окончаниях дуги. Но наряду с ними многочисленные 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, где направления перемещений отличаются от основных надвигов на ~180°. Таким образом, в Зондской дуге присутствуют свидетельства как пододвигания Индийской плиты под дугу, так и надвигания на плиту самой дуги.



Рис. 11. Направления смещений (rake) вдоль плоскостей разрывов сильных землетрясений по данным каталога CMT [Global..., 2018]. На врезке – облако значений азимутов подвижки вдоль Зондского желоба и правого сдвига Саганг

Аналогичное сочетание направлений сейсмических подвижек выявлено в Гималаях. Согласно модели, Индийская платформа пододвигается под Гималаи в направлении ~25°, причем направления пододвигания изменяются на окончаниях Гималаев в областях Пенджабского (до 350°) и Ассамского синтаксисов (рис. 12). Наши исследования показали, что часть механизмов очагов землетрясений согласуется с этой моделью, тогда как у другой, значительной, части механизмов перемещения ориентированы нормально к простиранию горной системы, отражая ее надвигание на Индийскую платформу (рис. 13).



Рис. 12. Принципиальная схема горизонтального движения литосферных плит и блоков в зоне коллизии Индостана и Тибета (синие стрелки), построенная по данным GPS на основании работ [Hao et al., 2019; Gan et al., 2021]. Пунктирной линией показано положение разреза рис. 8. Красной линией показана ось горизонтального растяжения и сдвига по данным [Ребецкий, Алексеев, 2014; Алексеев, Ребецкий, 2021; Wang, Barbot, 2023]



Рис. 13. Направления смещений (rake) вдоль плоскостей разрывов сильных землетрясений по данным каталога CMT [Global..., 2018]. Облако значений азимутов подвижки вдоль фронта Гималаев

Итак, в Зондской дуге, наряду с пододвиганием Индийской плиты, присутствует и, возможно, доминирует надвигание дуги, нормальное к ее фронту и направленное в сторону пододвигающейся плиты. 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. Растяжение задугового бассейна могло обусловить надвигание Зондской дуги. Аналогичное надвигание на Индийскую платформу установлено в Гималайской дуге. В тылу надвигающейся дуги находятся Тибетский внутримантийный плюм и область растяжения Тибета, выявленная геодинамическим анализом механизмов очагов землетрясений [Ребецкий, Алексеев, 2014; Алексеев, Ребецкий, 2021] и активных разломов [Трифонов, Зеленин и др., 2021], а также моделированием кинематики региона [Wang, Barbot, 2023]. Возможно, и в этом случае тыловое растяжение также обусловило надвигание дуги.

Заключение

В ходе выполненного исследования получены следующие новые результаты.

1. Подтвержден более детальными материалами, ранее сделанный вывод о том, что восходящими ветвями общемантийной конвекции являются суперплюмы, а ее нисходящие ветви образованы не столько субдуцированными слэбами, сколько отторженными высокометаморфизованными фрагментами утолщенной литосферы кратонов и зон коллизии. Уточнено положение мантийных потоков от суперплюмов.

2. Выделена и охарактеризована новая категория внутримантийных плюмов, восходящих из верхней части нижней мантии и этим отличающихся как от верхнемантийных плюмов и других проявлений верхнемантийной конвекции, так и от суперплюмов как проявлений общемантийной конвекции. Эти внутримантийные плюмы расположены в Центральной и Юго-Восточной Азии и образуют меридиональный ряд. На примере Хангайского плюма выявлено их воздействие на новейшую структуру земной коры.

3. Установлено, что в Зондской островной дуге и дуге Гималаев происходит не только пододвигание под них соседней Индийской плиты, но и встречное надвигание обеих структурных дуг, направленное по нормали к простиранию их сегментов. Надвигание может быть обусловлено задуговым растяжением.

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

Список литературы

- Алексеев Р.С., Ребецкий Ю.Л. Модель эволюции литосферы Гималайско-Тибетского орогена // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. № 4 (52). С. 89–107.
- Аржанникова А.В.Морфоструктурная эволюция Прибайкалья и Забайкалья в позднем мезозое и кайнозое. Дис... д-ра геол.-мин. наук. Иркутск: ИЗК СО РАН. 2021. 410 с.
- Девяткин Е.В. Кайнозой Внутренней Азии (стратиграфия, геохронология, корреляция. М.: Наука. 1981. 196 с. (Тр. Сов. -Монг. геол. эксп. № 27).
- Жао Д., Пирайно Ф., Лиу Л. Структура и динамикамантии под Восточной Россией и прилегающими регионами // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 9. С. 1188–1203.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алекшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хрустов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-воСОРАН, филиал «Гео», 2001. 252 с.

Пущаровский Ю.М., Пущаровский Д.Ю. Геология мантии Земли. М.: НЕОС. 2010. 140с.

- Рассказов С.В., Саньков В.А., Ружич В.В., Смекалин О.П. Путеводитель геологической экскурсии в Тункинскую рифтовую долину. Иркутск: ИЗКСОРАН. 2010. 40 с.
- Ребецкий Ю.Л., Алексеев Р.С. Поле современных тектонических напряжений Средней и Юговосточной азии // Геодинамика и Тектонофизика. 2014. Т. 5. № 1. С. 257–290. doi:10.5800/GT2014510127
- Соколов С.Ю., Трифонов В.Г. Роль астеносферы в перемещении и деформации литосферы (Эфиопско-Афарский суперплюм и Альпийско-Гималайский пояс) // Геотектоника. 2012. № 3. С. 3–17.

Соколов С.Ю., Трифонов В.Г. Дуговые структуры и строение верхней мантии Центральной и Юго-Восточной Азии по данным сейсмотомографии и сейсмичности // Геотектоника. 2023 (в печати).

- *Трифонов В.Г., Зеленин Е.А., Соколов С.Ю., Бачманов Д.М.* Активная тектоника Центральной Азии // Геотектоника. 2021. №3. С.60–77.
- *Трифонов В.Г., Соколов С.Ю.* Подлитосферные течения в мантии // Геотектоника. 2017. № 6. С. 3–17. doi:10.7868/S0016853X1706008X.
- Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. Тектонические явления мезозоя и кайнозоя и геодинамические процессы, их

определяющие // Геотектоника. 2018. № 5. С. 75–89. doi: 10.1134/S0016853X18050077

- *Трифонов В.Г., Соколов С.Ю., Бачманов Д.М., Соколов С.А., Трихунков Я.И.* Неотектоника и строение верхней мантии Центральной Азии // Геотектоника. 2021. № 3. С. 31–59.
- Трифонов В.Г., Соколов С.Ю., Соколов С.А., Мазнев С.В., Юшин К.И., Demberel S. Хангайский внутримантийный плюм (Монголия): 3D модель, влияние на кайнозойскую тектонику и сравнительный анализ // Геотектоника. 2023. № 6. С. 1–36. doi:10.31857/S0016853X23060073, EDN: GFPLXF
- Хатчинсон Д.Р., Гольмиток А.Ю., Зоненшайн Л.П., Мур Т.К., Шольц К.А., Клитгорд Л.Д. Особенности строения осадочной толщи озера Байкал по результатам многоканальной сейсмической съемки // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 10–11. С. 25–36.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г. Внутриплитная позднемезозойская–кайнозойская вулканическая провинция Азии – проекция горячего поля мантии // Геотектоника. 1995. № 5. С. 41– 67.
- Amaru M. Global travel time tomography with 3-D reference models // Geologica Ultraiectina. V.274. Mededelingen van de Faculteit Geowetenschappen Universiteit Utrecht. 2007. Dissertation thesis. 174 p. ISBN: 978-90-5744-139-4
- *Argus D.F., Gordon R.G., DeMets C.* Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // Geochemistry Geophysics Geosystems G³. 2011. Vol. 12. N.11. P. 1–13.
- *Becker T.W., Boschi L.* A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // Geochemistry Geophysics Geosystems. 2002. Vol.3. P. 1–48. doi: 10.129/2001GC000168
- Gan W., Molnar P., Zhang P., Xiao G., Liang S., Zhang K., Li Z., Xu K., Zhang L. Initiation of Clockwise Rotation and Eastward Transport of Southeastern Tibet Inferred from Deflected Fault Traces and GPS Observations // GSA Bulletin. 2021. doi: 10.1130/B36069.1
- Global CMT catalog. 2018. (www.globalcmt.org/CMTsearch.html). (Access 2018-10-31)
- Grand, S.P., Van Der Hilst, R.D., Widiyantoro, S., 1997. Global seismic Tomography: A snapshot of convection in the Earth. GSA Today 7 (4), 1–7.
- *Hall R., Spakman W.* Mantle structure and tectonic history of SE Asia // Tectonophysics. 2015. V.658. P.14–45.
- *Hao M., Li Y., Zhuang W.* Crustal movement and strain distribution in East Asia revealed by GPS observations // Nature. Scientific Reports. 2019. 9:16797. doi: 10.1038/s41598-019-53306-y
- *Li, C., van der Hilst, R.D., Engdahl, E.R., Burdick, S.* A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle. Geochemistry Geophysics Geosystems G³2008. 9 (5), 1–21.
- Susilo S., Meilano I., Abidin H.Z., Sapiie B., Efendi J., Wijanarto A.B. Velocity field from twenty-two years of combined GPS daily coordinate time series analysis // AIP Conference Proceedings. 2016. 1730. 040003. doi: 10.1063/1.4947393
- *Todrani A., Speranza F., D'Agostino N., Zhang B.* Post-50 Ma Evolution of India-Asia Collision Zone from Paleomagnetic and GPS Data: Greater India Indentation to Eastward Tibet Flow // Geophysical Research Letters. 2021. V.49. e2021GL096623. P.1–16.
- *Toyokuni G., Zhao D., Kurata K.* Whole-Mantle Tomography of Southeast Asia: New Insight Into Plumes and Slabs // Journal of Geophysical Research. SolidEarth. 2022.V.127. e2022JB024298. P. 1–29.
- *Van der Meer D.G., Van Hinsbergen D.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. V. 723. P. 309–448.

Wang L., Barbot S. Three-dimensional kinematics of the India–Eurasia collision // Nature communications.Earth & Environment. 2023. 4:164. doi: 10.1038/s43247-023-00815-4

Wang M., Shen Z.K. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived From GPS and Its Tectonic Implications // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2020. V.125. e2019JB018774.