# Дискуссии

УДК: 551.243.6:551.468(265)

DOI: 10.31431/1816-5524-2020-2-46-85-101

## ФОРМИРОВАНИЕ ОКРАИННЫХ МОРЕЙ ТИХОГО ОКЕАНА: СЛЕДСТВИЕ СДВИГОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И АСТЕНОСФЕРНОГО ДИАПИРИЗМА

# © 2020 Л.А. Изосов<sup>1</sup>, В.И. Чупрынин<sup>2</sup>, А.М. Петрищевский<sup>3</sup>, Т.А. Емельянова<sup>1</sup>, Ю.И. Мельниченко<sup>1</sup>, М.А. Васильева<sup>3</sup>, Н.С. Ли<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия, 690041; e-mail: donkifa@mail.ru <sup>2</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, 690046 <sup>3</sup>Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия, 6970163

На основе механизма неустойчивости зоны сдвига между движущимися литосферными плитами предложен новый вариант модели формирования окраинных морей Тихого океана в виде последовательного возникновения волновых напряжений и вихревых структур. Литосферные плиты в зоне их бокового взаимодействия обладают в значительной степени свойствами вязкой среды, где две слабо перемешивающиеся по горизонтали тектонические массы с высокими, но различными, вязкостями и разными плотностями, движутся с разной скоростью. Поэтому граница раздела начинает изгибаться, в результате чего формируются вихревые структуры в тектоносфере окра-инных морей и прилегающих континентальных районах. При резких и быстрых деформациях земная кора ведет себя как твердое тело, а при длительных — как вязкая среда. Такой механизм образования морей отражает начальный этап столкновения Тихоокеанской плиты с Евразией, когда сходящиеся плиты только начинают соприкасаться. В земной коре и верхах мантии окра-инных морей образуются сдвиговые дуплексы, в которых происходит вихревая циркуляция корово-мантийного вещества.

Ключевые слова: сдвиговая неустойчивость, окраинные моря, астеносферные диапиры, вихревые структуры.

Статья публикуется в разделе «Дискуссии» по предложению рецензентов.

#### введение

Ранее была разработана модель формирования окраинных морей Западно-Тихоокеанской зоны перехода континент — океан и рассмотрен механизм их возникновения, связанный с боковым взаимодействием литосферных плит, при наличии расхождения скорости смещения соприкасающихся плит: Тихоокеанской и Евразийской (Изосов, Чупрынин, 2012; Чупрынин, Изосов, 2017). Тектоносфера морей в этой модели вращается между плитами в зоне, ограниченной сдвигами.

Целью настоящей работы является дальнейшее развитие взглядов процитированных авторов на происхождение окраинных морей в рамках представлений о сдвиговом взаимодействии Евразийской и Тихоокеанской литосферных плит на основе механизма неустойчивости зоны сдвига. Рассматриваемый механизм образования морей отражает начальный этап становления Западно-Тихоокеанской зоны перехода континент – океан (досубдукционный), когда происходит схождение и в дальнейшем — субдукционно-коллизионные процессы в переходной зоне континент – океан. При этом субдукция нижней литосферы Тихоокеанской плиты сопровождается образованием складчатости, аккрецией турбидитовых комплексов и надвиганием тектонических покровов на континент в верхних слоях земной коры (Петрищевский, 2013).

Применительно к теме нашей статьи, наиболее значимыми исследованиями в проблеме происхождения окраинных морей на западе Тихого океана являются фундаментальные работы В.П. Уткина (Уткин, 1978, 1996, 2013, 2019), выделившего Восточно-Азиатскую глобальную сдвиговую систему, а также и других исследователей (Вихри..., 2004; Колосков, Аносов, 2005, 2006; Колосков, Федоров, 2009; Мелекесцев, 1979; Тверитинова, Викулин, 2005). В то же время, вопросы вращения тектоносферы окраинноморских бассейнов в разработках В.П. Уткина вообще не ставились, а другие исследователи рассматривали вихревые структуры, в основном, в связи с развитием вулканогенных процессов. Имеются также многочисленные данные о существовании пояса новейших сдвиговых деформаций вдоль северо-западной окраины Тихого океана (Кожурин, 2013; Мартынов и др., 2016; Трифонов, Кожурин, 1982, 2010; Уткин, 2019; Ханчук, 2016; Kozhurin, 2004). В их числе большой интерес представляет недавняя статья В.П. Уткина (2019), в которой выделяется Восточно-Азиатская глобальная сдвиговая зона. В ней определены два этапа сдвигового тектогенеза: орогенно-конструктивный (триас – ранний мел) и рифтогенно-деструктивный (поздний мел – кайнозой). Именно сдвиго-раздвиговая деструкция в конце мела – кайнозое привела к формированию эпиконтинентальных осадочных бассейнов и глубоководных рифтогенных впадин окраинных морей. В то же время вопросы механизма становления краевых морей — как вихревых образований — В.П. Уткиным в цитируемой статье и в других работах не поднимаются. Тем не менее, В.П. Уткин (2019) делает принципиально важное заключение: течение континентальной коры совпадает с направлением инерционнополюсобежных сил, что позволяет рассматривать геодинамику зоны перехода континент - океан как процесс, обусловленный ротацией неравномерно вращающейся Земли. Влияние ротационных сил вращающейся Земли на геологические процессы в тектонических оболочках Земли признают высокие авторитеты в отечественной науке (Хаин, 2007), а К.Ф. Тяпкин (2007) считает, что вращение Земли — это единственный источник энергии тектогенеза.

Точка зрения К.Ф. Тяпкина — крайняя в вопросе причин тектонических процессов, но мы поддержали ротационную концепцию тектогенеза на западной окраине Тихого океана (Изосов и др., 2018).

Рядом исследователей (Мирлин, Оганесян, 2015; Тверитинова, Викулин, 2005; Филатьев, 2005) большое внимание уделялось гипотезе взаимосвязи вихревых процессов в тектоносфере с волновыми движениями планетарного масштаба, связанными с ротацией Земли. При своем движении такие волны активизируют глубинные тектонические процессы, которые приводят к развитию магматической конвекции, мантийному апвеллингу и рифтоообразованию. Волновая тектоника отражена и в сейсмических процессах (Шерман, Горбунова, 2008). Авторы настоящей работы, развивая существующие взгляды, пришли к выводу, что процесс формирования Западно-Тихоокеанских окраинных морей обусловлен неустойчивостью зоны сдвига, в результате чего в ней возникают волновые и вихревые возмущения.

Западно-Тихоокеанская зона перехода включает не только окраинные моря и островные дуги, но и краевые части Северо-Китайского и Австралийских кратонов, а также плит Тихоокеанской, Амурской и Янцзы (рис. 1). На приведенном рисунке показаны нуклеары (Кац и др., 1989), как возможные древние центры вращения, и указаны направления вращения литосферы окраинных морей.

Основания островных дуг представлены либо блоками древней континентальной коры (энсиалический тип), либо — океанической корой (энсиматический тип) (Родников и др., 2014; Смирнов, 1963). Окраинные моря — это впадины, возникшие в процессе рифтогенеза (или окраинно-морского спрединга) над мантийными диапирами в тылу как энсиалических, так и энсиматических островных дуг в позднем мелу – кайнозое (Мартынов и др., 2016; Karig, 1971).

Земная кора переходной зоны имеет мощность от 10 до 40 км и отличается сложным рельефом поверхности Мохоровичича. Она подразделяется на континентальный, субконтинентальный, субокеанический, изначально океанический и новообразованный океанический типы (Берсенев и др., 1988; Кулинич, Валитов, 2011; Родников и др., 2014).

Выполненные по траверсам геолого-геофизические исследования в западной части Тихого океана выявили астеносферную линзу с выступами аномальной мантии и рифтовыми структурами (Родников и др., 2014). Подъем астеносферного диапира, возможно, предшествовал, а затем и способствовал раскрытию окраинных морей (Берсенев и др., 1988; Емельянова, Леликов, 2016; Karig, 1971 и др.). Он оставил следы в виде проявлений адакитового вулканизма в Охотском море, в пределах Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса, на северо-востоке Китая, на о. Хонсю и п-ве Камчатка (Авдейко и др., 2011; Емельянова, Леликов, 2016; Колосков и др., 2014 и др.). Этот тип вулканизма сочетает известковощелочные свойства окраинно-континентальных



Рис. 1. Карта-схема Западной части Тихого океана, составленная с использованием данных: нуклеары — по (Кац и др., 1989); дешифрирования глобальной цифровой модели рельефа ЕТОРОІ: 1 — глубоководные желоба; 2 — островные дуги; 3 — фронтальные подводные хребты; 4 — нуклеары: АС — Алдано-Становой, А — Амурский, С — Синокорейский, СК — Северо-Китайский, ЮК — Южно-Китайский, Ик — Индокитайский, ИА — Индо-Австралийский, СА — Северо-Австралийский, И — Ийлгарийский, Ю — Юклинский; 5 — циклональные (Северное полушарие) и антициклональные (Южное полушарие) литосферные вихри (стрелки указывают направление их вращения); 6 — антициклональные (Северное полушарие) и циклональные (Южное полушарие) литосферные вихри (стрелки указывают направление вращения); 7 — циклональные вихри, связанные с нуклеарами (стрелки указывают направление вращения); 8 — антициклональные вихри, связанные с нуклеарами (стрелки указывают направление вращения); 9 — трансформные разломы (Расіfіс...). 1 — Мендосино, 2 — Мюррей, 3 — Молокай, 4 — Кларион, 5 — Клиппертон, 6 — Челленджер. I — Берингово, II — Охотское, III — Японское, IV — Желтое, V — Восточно-Китайское, VI — Филиппинское, XII — Южно-Китайское, XII — Сулу, IX — Сулавеси, X — Яванское, XI — Банда, XII — Тиморское, XVII — Южно-Фиджийское, XVII — Тасманово, XIX — Южно-Австралийское, XX — Перт).

вулканитов и толеитовые — океанических базальтов.

Становление астеносферного диапира сочеталось с горизонтальными (в том числе вихревыми) движения литосферных масс, обусловленными растяжениями литосферы и образованием рифтов в его купольной части (Рамберг, 1970).

По данным многих исследователей (Jolivet et al., 1994; Karig, 1971; Kojima, 1989; Tamaki, Honza, 1991 и др.) образование окраинных морей произошло в результате внутриплитных деформаций, вызванных взаимодействием Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит. Происхождение окраинных морей Тихого океана рассматривается также с позиции «вихревой» гипотезы (Вихри..., 2004; Мирлин, Оганесян, 2015). По мнению А.В. Викулина и И.В. Мелекесцева (1997), источником вихревых движений, в течение всех геологических эпох являются макромасштабные поля кручения. Но в цитируемых публикациях вихревые структуры не связываются с системами сдвигов или вращением Тихоокеанской литосферной плиты, как это показано в статьях (Изосов, Чупрынин, 2012; Чупрынин, 2008; Чупрынин, Изосов, 2017).

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве одного из основных методов исследований закономерностей тектонической эволюции Западно-Тихоокеанского региона нами осуществлялся линеаментный анализ (Hobbs, 1904; Sonder, 1938). В настоящее ввремя линеаменты рассматриваются как крупнейшие линейные, дугообразные или кольцевые элементы рельефа и геофизических полей, связанные с глубинными неоднородностями литосферы различной иерархии. Они зачастую являются сейсмоактивными (Изосов и др., 2017, 2018; Ли, 2013 и др.).

В процессе работы мы использовали комплекс геоморфологических и геофизических методов геологического картирования, включающий детальное структурное дешифрирование рельефа дна окраинных морей (база данных Earth Topography, ETOPO1). В качестве вспомогательного материала, дополняющего структурные и геодинамические особенности тектоносферы Япономорского региона, М.А. Васильевой была составлена модель распределений гипоцентров и магнитуд землетрясений (MLH — магнитуды землетрясений по волнам Релея).

Хорошо известно, что пространственные распределения гипоцентров и магнитуд землетрясений связаны со структурной неоднородностью среды, в которой протекают сейсмические процессы (Петрищевский, Васильева, 2017; Ребецкий, 2007; Шерман, 2016). При этом свойства среды прямо влияют на неоднородность ее напряженного состояния (Ребецкий, 2007). В общем случае магнитуды землетрясений зависят от следующих факторов:

– свойств геологических сред, в первую очередь, от степени их вязкости: жесткие среды способны длительное время накапливать тектонические напряжения и при достижении предела их прочности разряжать тектонические нагрузки в форме землетрясений; менее вязкие среды реагируют на тектонические напряжения изменениями объема, либо могут перемещаться под их воздействием, поэтому магнитуды землетрясений в средах с низкой вязкостью понижены (Петрищевский, Васильева, 2017);

– величин и направлений тектонических напряжений, которые опосредованно выражены в векторах увеличения (градиентах) средних, в пределах окна 100–100 км, магнитуд землетрясений (Петрищевский, Васильева, 2017).

При проведении исследования связи сейсмичности с геологическим строением и тектоническими напряжениями в тектоносфере Японского моря мы основывались на анализе 3D-распределений магнитуд (М) и гипоцентров ( $Z_m$ ) землетрясений (Петрищевский, Васильева, 2017). Цифровые массивы М (х,у,z) были сформированы по сводным каталогам землетрясений ФИЦ ЕГС РАН (г. Обнинск) за 2001–2013 гг., которые по территории Японского моря поддерживаются пятью сейсмическими станциями: Южно-Курильской, Терней, Владивосток, Инчхон и Мацусиро (рис. 2). В расчеты включены

**Fig. 1.** The schematic map of the Western Pacific ocean based on data by Katz et al., 1989 for nuclears, and interpretation of global relief model ETOPO1: 1 - trenches; 2 - island arcs; 3 - frontal underwater ridges; 4 - nuclears: AS - Aldano-Stanovoy, A - Amur, C - China-Korean, NC - North China, SC - South China, Ic - Indochina, IA - Indo-Australian, NA - North-Australian, E - Elgarissi, Yu - Uklinski; 5 - cyclonic (Northern hemisphere) and anticyclonic (Southern hemisphere) lithospheric vortices; 6 - anticyclonic (Northern hemisphere) lithospheric vortexes (arrows indicate the direction of rotation); 7 - cyclonic vortexes associated with nuclears (arrows indicate the direction of rotation); 9 - transform faults (Pacific...). 1 - Mendocino, 2 - Murray, 3 - Molokai, 4 - Clarion, 5 - Clipperton, 6 - Challenger. I - Bering, II - Okhotsk , III - Japanese, IV - Yellow, V - East China, VI - Philippine, VII - South China, VIII - Sulu, IX - Sulawesi, X - Java, XI - Banda, XII - Timor-Leste, XIII - Arafura, XIV - New Guinea (Bismarck), XV - Coral, XVI - North-Fijian, XVII - South-Fijian, XVII - South-Australian, XX - Perth).

землетрясения только с большими магнитудами (M > 4.0), поскольку оценить представительность магнитуд меньшей интенсивности по данным ФИЦ ЕГС РАН на большей части Японского моря невозможно. В северной части представительными являются магнитуды M = 2.8 (Васильева, 2017).

Земная кора и верхняя мантия до глубины 450 км были разделены на слои так, чтобы в каждом слое количество и равномерность пространственного распределения землетрясений позволяли строить схемы-срезы и разрезы М(x,y,z)-модели. Глубина каждого горизонтального среза модели отнесена к средней глубине соответствующего слоя. Мы полагаем,



что схемы распределений гипоцентров землетрясений (рис. 3) отражают дизъюнктивную тектонику изучаемых сред, а магнитуд землетрясений — преимущественно реологическтие свойства геологических сред (рис. 4*a*), что подтверждается анализом сейсмологических моделей по другим регионам (Петрищевский, Васильева, 2015; 2017). Схемы распределений векторов увеличения магнитуд (рис. 4 $\delta$ ), опосредованно связаны с направлениями тектонического стресса.

## МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ОКРАИННЫХ МОРЕЙ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

В ранее разработанной модели (Изосов, Чупрынин, 2012; Чупрынин, Изосов, 2017) предполагается, что литосферные плиты в зоне их бокового взаимодействия обладают в значительной степени свойствами вязкой среды, при этом ее вязкость с глубиной понижается. Поэтому модель для зоны сочленения океанической и континентальной плит можно формулировать как гидродинамическую, в которой вязкие слои с высокими, но различными

**Рис. 2.** Схема расположения сейсмических станций, поддерживающих каталог ФИЦ ЕГС РАН: *1* — сейсмические станции.

Fig. 2. Map of seismograph stations of the Federal Centre of Geophysical Service of the Russian Academy Sciences (FCGS RAS): 1 - seismic stations.



**Рис. 3.** Признаки трансформного дуплекса на границе Тихоокеанской плиты с Японской островной дугой: 1 - гипоцентры землетрясений в проекции на среднюю плоскость на глубине 80 км (*a*), на глубинах 111–200 км в проекции на среднюю плоскость на глубине 155 км ( $\delta$ ), на глубинах 200–450 км в проекции на среднюю плоскость на глубине 325 км ( $\theta$ ); 2 - зоны высокой и повышенной концентрации гипоцентров землетрясений.

**Fig. 3.** Signs of transform duplex on the border of the Pacific plate with the Japanese island arc: 1 -earthquakes in the depth interval of 61 to 90 km projected onto a plane at 80-km depth (*a*), 1 earthquakes in the 111 to 200 km depth interval projected onto a plane at 155-km depth ( $\delta$ ), earthquakes at depths of 250 to 400 km projected onto a plane at 325-km depth ( $\theta$ ); 2 - zones of higher density of earthquakes hypocenters.





**Рис. 4.** Распределения магнитуд землетрясений в нижнекоровом слое (*a*) и градиентов магнитуд в астеносфере (б) Японского моря: 1 — изолинии средних магнитуд землетрясений; 2 — контур структуры центрального типа в нижнекоровом срезе; 3 — локальные векторы увеличения магнитуд; 4 — региональные векторы предполагаемых тектонических напряжений.

Fig. 4. Distribution of earthquake magnitudes in the lower crust (a) and magnitude gradients in the asthenosphere ( $\delta$ ) of the Sea of Japan: 1 – isolines of average earthquake magnitudes; 2 – border of the central type structure in the lower crust section; 3 – local vectors of magnitudes increase; 4 – regional vectors of supposed tectonic stresses.

вязкостями и разными плотностями, движутся с разной скоростью, взаимодействуя между собой через боковые поверхности. Перепад скорости  $\Delta U = U_E - U_T$ , где  $U_E$ ,  $U_T$ — движения Евразийской и Тихоокеанской плит. Вязкость по горизонтали увеличивается по мере удаления от зоны взаимодействия плит.

Процесс возникновения окраинных морей в результате вихревых процессов в тектоносфере, можно рассматривать как следствие неустойчивости зоны сдвига, в результате которой при определенных условиях в этой зоне развиваются волновые возмущения (рис. 5, А), со временем нарастающие по величине. В результате взаимодействия нелинейных возмущений разной силы, направления и масштабов проявления происходит перераспределение энергии возмущений, которые нарастают во времени. Возмущения могут разрастаться настолько, что границы раздела начинают искривляться (рис. 5, Б), а в последствие — испытывать разрывы (рис. 5, В).



**Рис. 5.** Принципиальная схема развития тектоносферы Западно-Тихоокеанских окраинных морей: область волновых возмущений (А), зона искривления геологических границ (Б), зона разрыва тектонических масс и формирования литосферных вихрей (В).

**Fig. 5.** The development scheme of the Western Pacific tectonosphere under marginal seas: zone of the wave disturbance (A), bending zone of geological boundaries (B), break-off zone of tectonic masses and formation of the lithospheric vortexes (B).

#### ФОРМИРОВАНИЕ ОКРАИННЫХ МОРЕЙ

Мы предполагаем, что в отличие от предыдущей модели (Изосов, Чупрынин, 2012; Чупрынин, Изосов, 2017), здесь может возникать иная ситуация. Вращающиеся блоки литосферы образуются не между литосферными плитами, а в процессе искривления и сворачивания границ раздела в структуры, подобные рингам, возникающим, например, при сворачивании струй в течениях Куросио или Гольфстрима.

Искривляющиеся границы раздела тектонических сред (блоков, слоев) образует систему вихрей с чередующимся направлением вращения (циклон-антициклон) (рис. 5, В). Возможно, это связано с взаимодействием их между собой сцеплением по типу «шестеренок». В этом случае вероятно одновременное возникновение двух разнонаправленно вращающихся вихрей с сохранением общего количества энергии вращательного движения (Коган, 2012). Такими структурами, например, являются кайнозойские разноранговые нисходящие и восходящие тектоносферные воронки (Абрамов, Осипова, 2009) в пределах Беринговоморского, Охотоморского и Япономорского геоблоков, а также смежных континентальных территорий, которые имеют геометрическую форму прямых и перевернутых конусов.

Использованные в процессе настоящего исследования данные космической альтиметрии позволили составить подробные схемы линеаментов Японского моря (рис. 6) и его континентального обрамления, а также Филиппинского моря (рис. 7), на которых выделены сложные кольцевые и вихревые структуры.



**Рис. 6.** Схема кольцевых, дуговых и линейных линеаментов Японского моря и прилегающих территорий: 1 — контуры региональных континентальных вихревых структур (I — Нижнеамурской и II — Сунляо).

Fig. 6. Circular, arched and linear lineaments of the Sea of Japan and adjacent territories: 1 - borders of regional continental vortex structures (I - Nizhneamurskaya and II - Sunlyao).

ИЗОСОВ и др.



**Рис.** 7. Схема кольцевых, дуговых и линейных линеаментов Филиппинского моря и прилегающих акваторий. **Fig.** 7. Circular, arched and linear lineaments of the Philippine Sea and adjacent water areas.

Хотя преобладающее вращение Западно-Тихоокеанских морей направлено против часовой стрелки, можно наметить следующие пары (рис. 1). Так, Филиппинское море, сформировавшееся на океанической коре (Васильев, 2009) и закрученное, в основном, по часовой стрелке, с трех сторон окружено морями, литосфера под которыми имеет противоположное направление вращения. На севере — это Японское море, на западе — Восточно-Китайское и Южно-Китайское, а на юго-западе — Сулу и Сулавеси (Целебесское). Кроме того, к таким парам можно отнести моря Коралловое – Северо-Фиджийское и Тасманово – Северо-Фиджийское. То есть, такие сочетания являются закономерными.

При искривлениях глубинных границ и возникновении вихрей фрагменты океанической коры проникают в континентальную кору и наоборот. В результате таких процессов происходит своеобразное перемешивание вещества океанической и континентальной плит в зоне их взаимодействия и формируется так называемая окраинноморская кора (Чехов, Сидоров, 2011). Признаком перемешивания вещества в переходной зоне континент - океан является пространственная сопряженность магматических масс разного петрографического состава: от риолитов и гранитов до габбро, андезитов и базальтов (Авдейко и др., 2011; Емельянова, Леликов, 2016; Колосков и др., 2014). Иногда перемешивание бывает столь частым, что делает невозможным расчленение базальт-риолитовых ассоциаций (Тектоническая..., 2005).

В Северо-Западном континентальном обрамлении Японского моря нами выделена пара противоположно закрученных вихрей Нижнеамурского и Сунляо (рис. 6), которые будут охарактеризованы далее. Здесь только следует отметить, что на заложение и развитие Нижнеамурского вихря, по предположению авторов, решающее значение оказала Амурская плита (центр древнего вращения) (рис. 1). С другим, Южно-Китайским кратоном (его иногда называют Катазиатским и объединяют с плитой Янцзы), связана континентальная вихревая структура. Она закручена по часовой стрелке и составляет пару с вихрем Южно-Китайского моря, закрученном в обратном направлении (литоантициклон). Кроме того, от последнего на юг отходит ветвь, которая включает моря Яванское и Банда (антилитоциклоны) и фиксируется глубоководным желобом Сунда (рис. 1).

Характерно, что окраинные моря обрамляются линейными полями концентрации эпицентров землетрясений и вулканов центрального типа (Викулин, Мелекесцев, 1997), что свидетельствует об их современной тектонической активности. В зависимости от вариаций скорости  $(\Delta U)$  могут возникать различные ситуации. При небольших изменениях скорости будут формироваться волны небольшой амплитуды, которые при увеличении скорости должны возрастать, а при больших изменениях — искривляться и отрываться от искривлений с образованием вихрей. Так как вариации скорости в разных точках соприкосновения плит могут быть различным, то в переходной зоне между плитами должны возникать концентрические и вихревые структуры размеров: от небольших, неглубоко вдающихся в сушу (или океан), до крупных заливов и окраинных морей, что и наблюдается в Западно-Тихоокеанской зоне перехода континент – океан. Вариантов вариаций скорости много, причем не только по модулю, но и по направлению.

В Япономорском регионе признаки глобального трансформного сдвига (Мартынов и др., 2016; Khanchuk, 2001) проявлены в поперечных ориентировках осей линейных зон повышенной сейсмичности на границе Тихоокеанской плиты с Японской островной дугой (рис. 3). Такое расположение осей сейсмичности, как и разломов, типично для структур, образующихся в сдвиговых дуплексах (Уткин, 2013; Woodcock, Fisher, 1986) на границах крупных коровых или литосферных сегментов. Судя по расположению линейных зон повышенной сейсмичности, сдвиговые процессы проявлены в широкой полосе и характеризуются большим вертикальным диапазоном, охватывающим литосферу (рис. 3а), подастеноферный слой (рис. 36) и более глубокие слои мантии (рис. 3в).

В распределениях векторов увеличения средних (от окна к окну) магнитуд землетрясений намечается вихревая структура в верхней мантии на глубине 180–200 км (рис. 4), центр которой расположен на северной оконечности о. Хонсю. В нижнем слое земной коры структура центрального типа проявлена в распределении модулей магнитуд землетрясений, которая смещена к юго-западу от мантийного вихря.

Судя по векторам увеличения магнитуд землетрясений, вихри зарождаются в астеносфере, существуют длительное время, и следы их периодически отпечатываются в верхних слоях земной коры. С течением времени на них накладываются другие тектонические процессы (Мартынов и др., 2016), связанные с конвергенцией и трансформными перемещениями литосферных плит. В частности смещение корового контура структуры центрального типа (рис. 4а) относительно мантийного (рис.  $4\delta$ ), объясняется смещением земной коры Японских островов вдоль границы Тихоокеанской плиты (Мартынов и др., 2016), а астеносферный центр структуры вращения располагается ниже поверхности тектонического срыва.

Возникновение неустойчивости границ раздела тектонических сред, скорее всего, происходит после перехода расхождения скорости на границах сред через некоторое ненулевое критическое значение  $\Delta U_k$ . В результате неустойчивость возникает только при определенной разности скоростей движения плит  $\Delta U = U_E - U_T > \Delta U_k$ . При этом в зоне образования морей сдвиг максимален. Неустойчивы возмущения не всех пространственных масштабов, а только выборочные, соответствующие некоторым длинам волн. Таким образом, рост возмущений при определенных условиях приводит к нелинейному процессу искажения тектонических напряжений.

Развивая представление о неустойчивости границы раздела литосферных плит и их внутренних слоев, можно предположить, что наиболее неустойчивыми являются волны с длинами, соответствующими средним размерам (диаметрам) окраинных морей, порядка тысячи или несколько более километров. Можно ожидать появления и второй гармоники с характерным размером в два раза меньшим, то есть, около пятисот километров.

Например, Японское море имеет диаметр около 1000 км, а Сулавеси — около 500 км (рис. 1). В то же время, здесь существуют моря с диаметром порядка 3000 км: Берингово, Охотское, Филиппинское и Тасманово. Возможно, это связано с тем, что они отражают начальный этап формирования окраинно-морских бассейнов, часть из которых в ходе дальнейшей тектонической эволюции претерпели усложнение внутренней структуры и разделились на ряд более мелких глубоководных впадин. По-видимому, именно они возникли в конечную стадию неустойчивости границы раздела океанической и континентальной литосферы. Можно предположить, что реликты таких бассейнов диаметром около 3000 км представляют моря: Желтое и Восточно-Китайское; Восточно-Китайское, Сулу и Сулавеси.

В Япономорском регионе геофизические данные указывают на то, что земная кора самой обширной Центральной котловины Японского моря имеет океаническое происхождение (Карп, 2002; Кулинич, Валитов, 2011; Hirata et al., 1992;). Согласно сейсмоакустическим данным (Карп, 2002), ее мощность без осадочного слоя составляет 6-8 км. Эти параметры соответствуют океаническим, и позволяют отнести кору данной котловины к новообразованной океанической. Как отмечалось, под Японским морем имеется мощная астеносфера и выделяется фокальная зона (Родников и др., 2014), вдоль которой гипоцентры землетрясений фиксируют сейсмически активный слой, падающий под углом около 50°. При этом основное количество очагов приходятся на первые десятки километров (до 50-70 км). Переходная зона отличается повышенным тепловым потоком (Веселов, 2005; Туезов и др., 1984), в связи с чем здесь в кайнозое интенсивно проявились многочисленные вспышки тектономагматической активизации. В частности, сейсмической томографией под Японским морем и западной частью о. Хонсю в верхней мантии на глубине 40 км выделяется астеносферный диапир, контролирующий кайнозойскую магматическую деятельность (Hasegawa et al., 1991). Эти данные подчеркивают исключительно высокую

тектономагматическую и сейсмическую активность Япономорского региона. Характерно, что в Северо-Западной котловине Тихого океана магматическая деятельность (излияния толеитовых базальтов) происходила, в основном, после 100 млн лет назад. Таким образом, формирование переходной зоны (в понимании названных выше авторов) здесь началось еще в позднем мелу, когда, по-видимому, происходило зарождение макромасштабных процессов кручения (Викулин, Мелекесцев, 1997). Литовихри отчетливо проявляются в упорядоченности рельефа Тихоокеанской окраины Евразии, выделенной в виде инь-ян-систем с особым типом симметрииантисимметрии, которые рассматриваются как ячейки земной коры (Казанский, 1997).

В континентальном обрамлении Японского моря с помощью линеаментного анализа выделены региональные Нижнеамурская и Сунляо вихревые структуры антициклонального и циклонального типа. То есть, восходящая и нисходящая тектоносферные воронки, которые образуют, таким образом, геодинамическую пару. Внутри этих региональных структур наблюдаются более мелкие вихри, зачастую противоположного направления вращения (рис. 6). По некоторым признакам, рифтогенная структура Сунляо, так же как Япономорская впадина, совмещается со структурой центрального типа плюмовой природы (Сахно, 2008; He et al., 2013) и она имеет сложные взаимные перекрытия с Нижнеамурской структурой.

Филиппинское море разделяется хребтом Кюсю-Палау на две части — западную (Западно-Филиппинская котловина) и восточную (котловины Паресе-Вела и Сикоку), для которых предполагается рифтогенно-спрединговая модель формирования. Большинство исследователей (Геология..., 1980; Karig, 1971) рассматривает хребет Кюсю-Палау как остаточную островную дугу. Очень важную роль в геотектонической эволюции Филиппинского моря играли разнонаправленные горизонтальные движения в тектоносфере (Шараськин, 1992).

В пределах Филиппинского моря (рис. 7) выделяются многочисленные вихревые структуры, из которых наиболее ярко выражены глубоководные желоба и подводные хребты, закрученные по часовой стрелке. Необходимо отметить, что, в целом, морфоструктура Филиппинского моря близка к S-образному типу (Изосов, Чупрынин, 2012), что свидетельствует о наличии здесь мощной широтной левосдвиговой зоны, к которой оно приурочено. По-видимому, вихревая структура Филиппинского моря в начальный этап развития формировалась именно под воздействием левосдвиговых дислокаций, а в дальнейшем усложнилась в связи с отмеченными выше вращательными знакопеременными движениями Тихоокеанской плиты. Например, в результате модельных экспериментов установлено (Пржиялговский, Басанин, 1989), что при правом сдвиге максимумы касательных напряжений приобретают Z-образную, а при левом — S-образную формы. При этом происходит вращение таких структур без изменения их формы. Они огибаются разломами и осевыми поверхностями мелких складок, образуя структуры облекания, которые, по нашему мнению, и представляют собой вихревые структуры.

Заложение рассматриваемой тектонической зоны, вероятно, связано с ротационными процессами (Изосов и др., 2018; Филатьев, 2005) и тектоническими волнами, определяющими развитие горизонтальных движений в литосфере. Кроме того, океанические и континентальные плиты имеют различную плотность (3.3 г/см<sup>3</sup> и 2.7 г/см<sup>3</sup>, соответственно), поэтому первые оказывают огромное давление на вторые, генерируя мощную тектоническую энергию (Летников, 1997). Можно предположить, что сдвиговые перемещения происходили в мезозое - кайнозое по известным трансформным разломам Мендосино на севере и Клиппертон на юге. Эти разломы, вероятно, простираются и в Западную часть Тихого океана (Pacific...).

Моря Сулавеси и Сулу (рис. 1) расположены в регионе, тектоника которого определяется конергенцией Евразийской, Тихоокеанской и Австралийской литосферных плит, которая в кайнозое сопровождалась извержениями вулканов и катастрофическими землетрясениями. Таким образом, данный регион, как и Япономорский, отличается интенсивной тектономагматической и сейсмической активностью (Родников и др., 2014). Формирование границ плит здесь происходило 25 млн лет назад, что было обусловлено движением преимущественно Тихоокеанской плиты. В последующем, движение Австралийского континента на север привело к вращению блоков и аккреции микроконтинентов в Юго-Восточной Азии. По данным (Родников и др., 2014) астеносфера занимает высокое положение под глубоководными котловинами окраинных морей — рифтовыми структурами с толеитовым магматизмом. Моря Сулавеси и Сулу (рис. 1), представляющие собой литоциклональные вихревые структуры, четко выделяются по данным космической альтиметрии (рис. 7).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предлааемая в настоящей статье модель формирования окраинных морей Западно-Тихоокеанской зоны перехода не имеет аналогов. Наиболее близкими к ней являются некоторые положения известных геодинамических моделей литосферных вихрей (Вихри..., 2004; Мелекесцев, 1979; Мирлин, Оганесян, 2015; Тверитинова, Викулин, 2005) и синсдвиговой модели (Филатова, 2008). Однако, в первой из них возникновение вихрей не рассматривается как результат взаимодействия литосферных плит, а во второй вопросы вращения синсдвиговых и окраинноморских бассейнов вообще не ставятся.

Остановимся на главных моментах предложенного механизма формирования и эволюции окраинных морей. На начальном и длительном этапе соприкосновения литосферных плит, вследствие действия силы трения при скольжении, происходит разогрев и размягчение их краев. Между литосферными плитами имеется разница в скоростях движения и, вероятнее всего, существует критическое значение этой разницы (DUK), выше которого возникают неустойчивость и возмущения в виде волнового искривления границы раздела литосферных плит и соответственно — тектонических масс в зоне перехода континент – океан.

При больших значениях сдвига эти возмущения могут вызывать искривления, а часть структур, отрываясь, преобразуются в литосферные вихри. В западной части Тихого океана эти вихри идентифицируются под окраинными морями. Процесс формирования окраинных морей сопровождается проявлениями сейсмической активности (Изосов и др., 2017; Ли, 2013). Векторы изменчивости магнитуд землетрясений, указывают на то, что вихри зарождаются в астеносфере и существуют длительное время.

Важной особенностью глубинного строения Западно-Тихоокеанской зоны перехода является наличие астеносферного слоя, от которого ответвляются диапиры аномальной мантии. Они и определяют процессы формирования структур земной коры (Родников и др., 2014). Установлено увеличение мощности астеносферы под всеми глубоководными котловинами, причем в молодых и активных спрединговых бассейнах ее кровля наиболее близко подходит к подошве земной коры.

Направление вращения вдоль переходной зоны в литосферных вихрях чередуются по типу циклон-антициклон, в зависимости от характера движения взаимодействующих литосферных плит (Изосов, Чупрынин, 2012; Чупрынин, Изосов, 2017) (рис. 5В). В Тихоокеанской депрессии, являющейся одной из глобальных вихревых структур (Викулин, Мелекесцев, 1997; Маслов, 1996; Таkeuchi, 1986), с середины олигоцена по настоящее время произошло пять перестроек регионального поля тектонических напряжений. При этом движения океанической плиты испытывали периодические повороты по часовой стрелке и против нее с амплитудами смещений до нескольких сотен километров. Судя по данным (Jakson et al., 1975), Тихоокеанская плита совершает знакопеременное вращение с центром в Гавайской «горячей точке».

Имеются многочисленные примеры вращательных и вихревых движений тектонических плит, платформ и других более мелких блоков земной коры в течение разных геологических эпох, затрагивающих практически всю верхнюю мантию (Тверитинова, Викулин, 2005). С этих позиций Тихоокеанский подвижный пояс, охватывающий Западно-Тихоокеанскую зону перехода, можно рассматривать как глобальную сдвиговую зону с относительным латеральным перемещением Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит, в которой на разных этапах развития левосторонние перемещения сменялись правосторонними. Можно полагать, что глобальные левосдвиговые и правосдвиговые зоны по западному и восточному обрамлению Тихого океана представляют собой лишь элементы гигантской вихревой структуры. Эти процессы были обусловлены как изменениями скорости вращения Земли, так и смещениями ее оси (Филатьев, 2005). При сильном меридиональном сжатии, связанном с полюсобежными силами, с увеличением скорости вращения Земли, развиваются преимущественно левые сдвиги; при уменьшении скорости вращения меридиональное сжатие может смениться широтным — тогда будут характерны правосторонние сдвиги. Все это свидетельствует о сложном гетерогенном развитии как самой Западно-Тихоокеанской зоны перехода, так и расположенных в ней окраинных морей.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены различные вопросы происхождения Западно-Тихоокеанских окраинных морей на основе механизма неустойчивости зоны сдвига между движущимися литосферными плитами, когда в вихревое движение вовлекаются прилегающие части континента и океана. Литосферные плиты в зоне их бокового взаимодействия обладают в значительной степени свойствами вязких сред, в связи с чем предлагаемая модель образования морей можно формулировать как гидродинамическую систему, в которой две слабо перемешивающиеся по горизонтали вязкие среды с различными вязкостями и разными плотностями движутся с разной скоростью. Развивающиеся при этом волновые возмущения, нарастающие по величине, могут разрастаться настолько, что границы раздела тектонических сред начинают искривляться, а затем разрываться, в результате чего формируются вихри в тектоносфере морей и прилегающих районах континента. Этот процесс сопровождается проявлениями сейсмической активности, на что указывают распределения эпицентров землетрясений в разных глубинных срезах и векторы изменчивости их магнитуд.

Предложенный в данной работе вариант модели взаимодействия литосферных плит и возникновения концентрических структур позволяет непротиворечиво рассмотреть некоторые аспекты мобилизма и фиксизма в геотектонике, в частности, проблему соотношения горизонтальных и вертикальных тектонических движений. Вероятно, астеносферные и литосферные вихри являются теми структурами, в которых естественным образом сочетаются оба эти движения. Первичными, на взгляд авторов, являются все-таки структуры, связанные с вращением Земли (структуры ротационного типа). Можно полагать, что при изменении скорости и наклона оси вращения планеты возникают мощные горизонтальные и провоцируемые ими вертикальные напряжения; создаются условия для активизации магматизма и формирования различных тектоно-магматических структур.

Вихревые структуры формируются под воздействием внешних (горизонтальное движение крупных тектонических масс) и внутренних (динамика верхней мантии) факторов. Первые могут быть вызваны вариациями параметров вращения Земли, а вторые — приливными силами, вызванными воздействием на нее Луны и Солнца (волновые движения), а также разогревом литосферы под воздействием всплывающих «магматических пузырей» — астеносферных диапиров и нижнемантийных плюмов.

Западно-Тихоокеанские окраинные моря возникли в результате неустойчивости зоны сдвига между движущимися Евразийской и Австралийской литосферными плитами, с одной стороны, и Тихоокеанской плитой, с другой. При этом в вихревое движение были вовлечены прилегающие части континента и океана. При скручивании тектонических масс и возникновении вихрей фрагменты океанической коры проникают в континентальную и наоборот, что приводило к своеобразному перемешиванию вещества в зоне взаимодействия плит.

Работа выполнена в рамках тем Государственного задания Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН (Рег. №№ АААА-А17-117030110033-0, АААА-А17-117030110035-4, АААА-А19-119122090009-2) и гранта «Дальний Восток» № 18-1-008.

#### Список литературы [References]

Абрамов В.А., Осипова Е.Б. Нефтегазоносные и рудоносные инверсогенные тектоносферные воронки окраинных морей и переходных зон Азиатско-Тихоокеанского пояса // Геология морей и океанов. Матер. докл. XVIII междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. Т. 2. М.: ГЕОС, 2009. С. 77-82 [Abramov V.A., Osipova E.B. Oil and gas and ore-bearing interagency tectonosphere funnels of the marginal seas and the transition zones of the Asia-Pacific belt // Geology of seas and oceans. Proceedings of XVIII Intern. Conference in Marine Geology. V. 2. M.: GEOS, 2009. P. 77–82 (in Russian)].

- Авдейко Г.П., Палуева А.А., Кувикас О.В. Адакиты в зонах субдукции Тихоокеанского кольца: обзор и анализ геодинамических условий образования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. C. 45-60 [Avdeiko G.P., Paluyeva A.A., Kuvikas O.V. Adakites in subduction zones of the Pacific ring: a review and analysis of geodynamic genesis conditions // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2011. № 1 (17). P. 45-60 (in Russian)].
- Берсенев И.И., Безверхний В.Л., Леликов Е.П. Строение и развитие дна Японского моря // Геодинамические исследования. М.: Межведомственный геофизический комитет АН СССР, 1988. № 11. C. 60-67 [Bersenev I.I., Bezverkhny V.L., Lelikov E.P. Structure and development of the bottom of the sea of Japan // Geodinamicheskie issledovaniya. M.: Mezhvedomstvennyj geofizi-cheskij komitet AN SSSR, 1988. № 11. P. 60-67 (in Russian)].
- Васильев Б.И. Геологическое строение и происхождение Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2009. 560 c. [Vasilyev B.I. Geological structure and origin of the Pacific ocean. Vladivostok: Dalnauka, 2009. 560 p. (in Russian)].
- Васильева М.А. Трехмерный анализ сейсмичности Японских островов и прилегающих акваторий // Региональные проблемы. 2017. Т. 20. № 2. С. 34-44 [Vasilyeva M.A. 3D-analysis of a seismicity of the Japan Islands and adjacent sea areas // Regionalnie problemi. 2017. V. 20. № 2. P. 33-44 (in Russian)].
- Веселов О.В. Геотермия тектоносферы Японо-Охотоморского региона. Автореф. канд. дисс. Хабаровск, 2005. 28 с. [Veselov O.V. The tectonosphere geothermy of the Japan-Okhotsk Seas region. Ref. diss. Khabarovsk, 2005. 28 p. (in Russian)].
- Викулин А.В., Мелекесцев И.В. Сейсмичность, вулканизм Тихого океана и вращение планеты // Българско Геофизично списание. 1997. Т. XXIII. № 1. C. 62–68 [Vikulin A.V., Melekestsev I.V. Seismicity, volcanism of the Pacific Ocean and the planets' rotation // B`lgarsko Geofizichno spisanie. 1997. V. XXIII. № 1. P. 62–68 (in Russian)].
- Вихри в геологических процессах / А.В. Викулин (ред.). Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2004. 297 c. [Vortex-related events of the geological processes / A.V. Vikulin ed. Petropavlovsk-Kamchatskij: Kamchatskij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet, 2004. 297 p. (in Russian)].
- Геология Филиппинского моря / Под ред. академика А.В. Пейве. М.: Наука, 1980. 261 с. [Geology of the Philippine Sea / Ed. Academician A.V. Peive. M.: Nauka, 1980. 261 p. (in Russian)].
- Емельянова Т.А., Леликов Е.П. Геохимия и петрогенезис позднемезозойско-раннекайнозойских вулканитов Охотского и Японского окраинных морей // Геохимия. 2016. № 6. С. 522-535 [Emelyanova T.A., Lelikov E.P. Geochemistry and Petrogenesis of the Late Mesozoic - Early Cenozoic Volcanic rocks of

the Okhotsk and Japan Marginal Seas // Geochemistry International. 2016. V. 54. № 6. P. 509-521].

- Изосов Л.А., Чупрынин В.И. О механизме формирования геологических структур центрального типа Западно-Тихоокеанской зоны перехода континент – океан // Геотектоника. 2012. № 3. С. 70-91 [Izosov L.A., Chuprynin V.I. Formation mechanism of central-type structures in the West Pacific continentocean transition zone // Geotectonics. 2012. V. 46. № 3. P. 232–250].
- Изосов Л.А., Чупрынин В.И., Ли Н.С. Япономорская сейсмоактивная вихревая структура // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 3 Вып. 35. C. 26-35 [Izosov L.A., Chuprynin V.I., Lee N.S. Seismically active vortex structure in the Sea of Japan // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2017. № 3 (35). P. 26-35 (in Russian)].
- Изосов Л.А., Чупрынин В.И., Ли Н.С. Ротационные процессы в эволюции Тихого океана: Асимметрия и переходные зоны Пацифики // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2018. № 2. С. 45-57 [Izosov L.A., Chuprynin V.I., Lee N.S. Rotational processes in the evolution of the Pacific ocean: Asymmetry and transition zones of the Pacific // Vestnik SVNCz DVO RAN. 2018. № 2. P. 45-57 (in Russian)].
- Казанский Б.А. Упорядоченность рельефа Тихоокеанской окраины Азии // Тихоокеанская геология. 1997. Т. 16. № 3. С. 29-33 [Kazansky B.A. Orderliness of the relief of the Pacific margin of Asia // Tikhookeanskaya geologiya. 1997. V. 16. № 3. P. 29-33 (in Russian)].
- Карп Б.Я. Строение земной коры дна Японского моря по сейсмическим данным моря // Геология и полезные ископаемые шельфов России / М.Н. Алексеев (ред.). М.: ГЕОС, 2002. С. 352-354 [Karp B.Ya. Structure of the crust of the bottom of the Japanese sea according to seismic data of the sea // Geology and Mineral Resources of the Russian Shelf Areas / M.N. Alekseev (ed.). M.: GEOS, 2002. P. 352-354 (in Russian)].
- Кац Я.Г., Козлов В.В., Полетаев А.И., Сулиди-Кондратьев Е.Д. Кольцевые структуры Земли: миф или реальность? М.: Наука, 1989. 190 с. [Katz Y.G., Kozlov V.V., Poletaev A.I., Solidi-Kondratyev E.D. The ring structures of the Earth: myth or reality? M: Nauka, 1989. 190 p. (in Russian)].
- Коган И.Ш. Энергия как основная физическая величина // Законодательная и прикладная метрология. 2012. № 1. С. 48-53 [Kogan J.S. The energy as a base physical quantity // Zakonodatel `naya i prikladnaya metrologiya. 2012. № 1. P. 48-53 (in Russian)].
- Кожурин А.И. Активная геодинамика северо-западного сектора Тихоокеанского тектонического пояса (по данным изучения активных разломов): дисс. докт. геол.-мин. наук. Объединенный институт физики земли РАН. Москва, 2013. 131 с. [Kozhurin A.I. Active geodynamics of the north-west sector of the Pacific tectonic belt (according to the study of active faults): thesis... doctors of geological and mineralogical sciences. Joint Institute of Earth Physics of RAS. Moscow, 2013. 131 p. (in Russian)].
- Колосков А.В., Аносов Г.И. Некоторые аспекты геологического строения и особенности проявления вулканизма на активных окраинах Тихого океана как

ВЕСТНИК КРАУНЦ. НАУКИ О ЗЕМЛЕ. 2020. № 2. ВЫПУСК 46

следствие концепции мантийной вихревой геодинамики // Проблемы источников глубинного магматизма и плюмы. Труды V Международного семинара. Иркутск-Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИГСО РАН, 2005. С. 272–288 [Koloskov A.V., Anosov G.I. Some aspects of the geological structure and features of the manifestation of volcanism on the active margins of the Pacific Ocean as a consequence of the concept of mantle vortex geodynamics // Problems of sources of deep magmatism and plumes. Proceedings of the V International Seminar. Irkutsk-Petropavlovsk-Kamchatsky: Publ. IGSO RAS, 2005. P. 272–288 (in Russian)].

- Колосков А.В., Аносов Г.И. Особенности геологического строения и позднекайнозойский вулканизм Восточно-Азиатской окраины в рамках концепции вихревой геодинамики // Фундаментальные исследования морей и океанов. М.: Наука, 2006. Кн. 1. С. 278–291 [Koloskov A.V., Anosov G.I. Features of geological structure and Late Cenozoic vulcanism of the East Asian margin within the framework of the concept of vortex geodynamics // Fundamental research of seas and oceans. M.: Nauka, 2006. Pr. 1. P. 278–291 (in Russian)].
- Колосков А.В., Гонтовая Л.И., Попруженко С.В. Верхняя мантия Камчатки в изотопно-геохимических и геофизических аномалиях. Роль астеносферного диапиризма // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 3. С. 3–13 [Koloskov A.V., Gontovaya L.I., Popruzhenko S.V. The upper mantle of Kamchatka in isotopic-geochemical and geophysical anomalies: The role of asthenospheric diapirism // Russian Journal of Pacific Geology. 2014. V. 8. № 3. С. 151–162].
- Колосков А.В., Федоров П.И. Базальты окраинных бассейнов Азиатско-Австралийского региона в рамках концепции глубинной вихревой геодинамики // Вулканизм и геодинамика. Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. Т. 1. С. 177–180 [Koloskov A.V., Fedorov P.I. Basalts of marginal basins of the Asian-Australian region in the framework of the concept of deep eddy geodynamics // Volcanism and geodynamics. Materials of the IV All-Russian Symposium on Volcanology and Paleovolcanology. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVIS FEB RAS, 2009. V. 1. P. 177–180 (in Russian)].
- Кулинич Р.Г., Валитов М.Г. Мощность и типы земной коры Японского моря по данным морской и спутниковой гравиметрии // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30. № 6. С. 3–13 [Kulinich R.G., Valitov M.G. Thicknesses and types of the crust beneath the Sea of Japan inferred from marine and satellite gravimetric investigations // Russian Journal of Pacific Geology. 2011. V. 5. № 6. Р. 481–491].
- Летников Ф.А. Процессы самоорганизации при формировании магматогенных и гидротермальных рудных месторождений // Геология рудных месторождений. 1997. № 4. С. 307–322 [Letnikov F.A. Self-organization processes in the formation of magmatogenic and hydrothermal ore deposits // Geologiya rudny`kh mestorozhdenij. 1997. № 4. P. 307–322 (in Russian)].
- Ли Н.С. О связи землетрясений с глубинным строением Япономорского звена Западно-Тихоокеанской

зоны перехода континент – океан // Региональные проблемы. 2013. Т. 16. № 2. С. 25–29 [*Lee N.S.* About the connection of earthquakes with the deep structure of the Japan sea link of the Western-Pacific continent – ocean transition zone // Regionalniye problemy. 2013. T. 16. № 2. P. 25–29 (in Russian)].

- Мартынов Ю.А., Голозубов В.В., Ханчук А.И. Мантийный диапиризм в зонах конвергенции литосферных плит (Японское море) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 5. С. 947–961 [Martynov Y.A., Golozubov V.V., Khanchuk A.I. Mantle diapirism at convergent boundaries (Sea of Japan) // Russian geology and geophysics. 2016. V. 57. № 5. Р. 745–755].
- *Маслов Л.А.* Геодинамика литосферы Тихоокеанского подвижного пояса. Хабаровск Владивосток: Дальнаука, 1996. 200 с. [*Maslov L.A.* Geodynamics of the lithosphere of the Pacific mobile belt. Khabarovsk-Vladivostok: Dalnauka, 1996. 200 р. (in Russian)].
- *Мелекесцев И.В.* Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Проблемы глубинного вулканизма. М.: Наука, 1979. С. 125–155 [*Melekestsev I.V.* Vortex volcanic hypothesis and some prospects of its application // Problems of deep volcanism. M.: Nauka, 1979. P. 125–155 (in Russian)].
- Мирлин Е.Г., Оганесян Л.В. Вихри в литосфере. М.: ВНИИгеосистем, 2015. 148 с. [Mirlin E.G., Oganesyan L.V. Vortexes in the lithosphere. M.: VNIIgeosistem, 2015. 148 p. (in Russian)].
- Петрищевский А.М. Гравитационные модели двухъярусной коллизии литосферных плит на Северо-Востоке Азии // Геотектоника. 2013. № 6. С. 60–83 [*Petrishchevsky A.M.* Gravity models of two-level collision of lithospheric plates in Northeast Asia // Geotectonics. 2013. V. 47. № 6. Р. 424–443].
- Петрищевский А.М., Васильева М.А. 3D-тектонический анализ полей сейсмичности в южных районах Дальнего Востока России // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 3. С. 25–39 [*Petrushchevsky A.M., Vasilyeva M.A.* 3D-tectionic analysis of seismic fields in the South East Regions of the Far East of Russia // Bulletin of the Tomsk Polytechnic university. Geo Assets Engineering. 2015. V. 326. № 3. P. 25–39 (in Russian)].
- Петрищевский А.М., Васильева М.А. Нетрадиционные способы оценки реологических состояний тектонических сред в земной коре и верхней мантии Западно-Тихоокеанских континентальных окраин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 4. Вып. 36. С. 39–55 [Petrushchevsky A.M., Vasilyeva M.A. Alternative methods for estimation of rheological conditions of tectonic media in the crust and upper mantle of the western Pacific margins // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2017. № 4 (36). P. 39–55 (in Russian)].
- Пржиялговский Е.С., Басанин А.К. О механизме формирования структур вращения в зонах сдвига // Изв. высш. учебных заведений: Геология и разведка. 1989. № 6. С. 12–20 [*Przhiyalgovsky E.S.*, *Basanin A.K.* Mechanism of the formation of structures rotations in the shift zones // Izv. vysch. uchebnykh zavedenniy: Geologiya i razvedka. 1989. № 6. Р. 12–20 (in Russian)].
- *Рамберг Х.* Моделирование деформаций земной коры с применением центрифуги. М.: Мир, 1970. 400 с.

[*Ramberg Kh.* Modeling of crustal deformations using a centrifuge. M.: Mir, 1970. 400 p. (in Russian)].

- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ Академкнига, 2007. 406 с. [*Rebetsky Yu. L.* Tectonic stress and strength of nature rock. М.: IKCz Akademkniga, 2007. 406 p. (in Russian)].
- Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. М.: Научный мир, 2014. 172 с. [Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Rashidov V.A., Sergeyeva N.A. Geodynamic models of the deep structure beneath the natural disaster regions of active continental margins. M.: Scientific World, 2014. 172 p. (in Russian)].
- *Сахно В.Г.* Новейший и современный вулканизм юга Дальнего Востока Владивосток: Дальнаука, 2008. 128 с. [*Sakhno V.G.* The newest and recent volcanism of the South Far East. Vladivostok: Dalnauka, 2008. 128 p. (in Russian)].
- Смирнов А.М. Сочленение Китайской платформы с Тихоокеанским складчатым поясом. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 157 с. [Smirnov A.M. Junction of the Chinese platform with the Pacific folded belt. M.: Academy of Sciences of the USSR, 1963. 157 p. (in Russian)].
- Тверитинова Т.Ю., Викулин А.В. Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестник КРАУНЦ. Сер. науки о Земле. 2005. № 5. С. 59–76 [*Tveritinova T.Yu., Vikulin A.V.* Geological and geophysical signs of vortex structures in geological medium // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2005. № 5. Р. 59–76 (in Russian)].
- Тектоническая карта области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов масштаба 1:1500 000 / Ред. Л.П. Карсаков, Чжао Чуньцзинь. С объяснительной запиской 262 с. Владивосток-Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2005 [Tectonic map of the Joint Area of the Central Asia and Pacific belts with explanatory note, 262 p. / Ed. Karsakov K.P. and Jao Chungtzing. Vladivostok-Khabarovsk. Institute of Tectonics and Geophysics. 2005].
- Трифонов В.Г., Кожурин А.И. Молодые сдвиги обрамления Тихого океана // Геотектоника. 1982. № 2. С. 3–18 [*Trifonov V.G., Kozhurin A.I.* Young shifts of Pacific Ocean framing // Geotectonics. 1982. № 2. P. 3–18 (in Russian)].
- Трифонов В.Г., Кожурин А.И. Проблемы изучения активных разломов // Геотектоника. 2010. № 6. С. 79–98 [*Trifonov V.G., Kozhurin A.I.* Study of active faults: Theoretical and applied implications // Geotectonics. 2010. V. 44. № 6. Р. 510-528].
- *Туезов И.К., Веселов О.В., Липина Е.Н.* Тепловой поток запада Тихого океана, Востока Азии и Австралии. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. 149 с. [*Tuezov I.K., Veselov O.V., Lipina E.N.* Heat flow of the West Pacific ocean, East Asia and Australia. Vladivostok: FEBRAS USSR, 1984. 149 p. (in Russian)].
- Тяпкин К.Ф., Довбнич М.М. Вращение Земли единственный источник энергии ее тектогенеза // Фундаментальные проблемы тектоники. Материалы тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2007. С. 295–301 [Tyapkin K.F., Dovbnich

ВЕСТНИК КРАУНЦ. НАУКИ О ЗЕМЛЕ. 2020. № 2. ВЫПУСК 46

*M.M.* Roation of the Earth – the only sole energy source of it tectonogeneous // Fundamental problems of the tectonics. Data of the tectonic conference. V. 2. Moscow: GEOS, 2007. P. 295–301(in Russian)].

- Уткин В.П. Восточно-Азиатская глобальная сдвиговая система, вулканический пояс и окраинные моря // ДАН СССР. 1978. Т. 240. № 2. С. 400–403 [Utkin V.P. East Asian global shear zone, volcanic belt, and marginal seas // Doklady Earth Sciences. 1978. V. 240. № 2. P. 400–403 (in Russian)].
- Уткин В.П. Горст-аккреционнные системы, рифтограбены и вулканические пояса Дальнего Востока России // Тихоокеанская геология. 1996. Т. 15. № 6. С. 44–72 [*Utkin V.P.* Horst-accretion systems, rift-grabens and volcanic belts of the Far East of Russia // Russian Journal of Pacific Geology. 1996. V. 15. № 6. P. 44–72 (in Russian)].
- Уткин В.П. Сдвиговый структурный парагенез и его роль в континентальном рифтогенезе восточной окраины Азии // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 3. С. 21–43 [*Utkin V.P.* Shear structural paragenesis and its role in continental rifting of the East Asian margin // Russian Journal of Pacific Geology. 2013. V. 7. № 3. С. 167–188].
- Уткин В.П. Сдвиговый тектогенез и структурообразующее течение коровых масс Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода // Литосфера. 2019. Т. 19. № 5. С. 780–799 [*Utkin V.P.* Shear tectogenesis and structure-forming flow of core masses of the Asia-Pacific transition zone // Lithosphere. 2019. V. 19 № 5. P. 780–799 (in Russian)].
- Филатова Н.И. Специфика магматизма окраинноконтинентальных и окраинно-морских бассейнов синсдвиговой природы, западная периферия Тихого океана // Петрология. 2008. Т. 16. № 5. С. 480–500 [Filatova N.I. Specifics of magmatism in marginal continental and marginal-sea pull-apart basins: Western periphery of the Pacific Ocean // Petrology. 2008. V. 16. № 5. С. 448–467].
- Филатьев В.П. Механизм формирования зоны перехода между Азиатским континентом и северозападной Пацификой (с позиций ротационной тектоники). Владивосток: Дальнаука, 2005. 273 с. [*Filatyev V.P.* The Mechanism of Formig the Transitional zone between the asian continent and North-West Pacific. Vladivostok: Dalnauka, 2005. 273 p. (in Russian)].
- Хаин В.Е. Главные противоречия современной тектоники и геодинамики и возможные пути их преодоления // Фундаментальные проблемы тектоники. Материалы тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2007. С. 324–329 [Khain V.E. Main contradictions of the modern tectonics and geodynamics and probable ways of its overcoming // Fundamental problems of the tectonics. Data of the tectonic conference. V. 2. Moscow: GEOS, 2007. P. 324–329 (in Russian)].
- Ханчук А.И. Тектоника, магматизм и рудообразование в обстановке трансформного скольжения литосферных плит // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Матер. Третьей Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 100–101 [Khanchuk A.I. Tectonics, magmatism and ore formation in the setting

of transform sliding of lithospheric plates // Geological processes in the lithospheric plates subduction, collision, and slide environments. Proceedings of Third Russian scientific conference with foreign participants. Vladivostok: Dalnauka, 2016. P. 100–101 (in Russian)].

- Чехов А.Д., Сидоров А.А. К проблеме типизации литосферы Земли // Современное состояние наук о Земле. Матер. Междунар. науч. конф., посвященной памяти В.Е. Хаина. М.: Изд-во геологического факультета МГУ, 2011. С. 2018–2022 [Chekhov A.D., Sidorov A.A. On the problem of typification of the Earth's lithosphere. Modern state of Earth Sciences. Proceedings of Intern. Conference, dedicated to the memory of V.E. Hain. M.: Izd-vo geologicheskogo fakul'teta MGU, 2011. P. 2018–2022 (in Russian)].
- Чупрынин В.И. Нелинейные явления в геосистемах. M.: Наука, 2008. 197 с. [*Chuprynin V.I.* Nonlinear phenomena in geosystems. M.: Nauka, 2008. 197 p. (in Russian)].
- Чупрынин В.И., Изосов Л.А., Модель формирования краевых морей западной части Тихого океана // ДАН. 2017. Т. 472. № 1. С. 68–71 [*Chuprynin V.I.*, *Izosov L.A.* Model of the formation of marginal seas in the western Pacific Ocean // Doklady Earth Sciences. 2017. V. 472. № 1. Р. 16–19].
- Шараськин А.Я. Тектоника и магматизм окраинных морей в связи с проблемами эволюции коры и мантии. М.: Наука, 1992. 163 с. (Труды ГИН РАН; Вып. 472) [Sharaskin A.Ya. Tectonics and magmatism of marginal seas in relation to the problems of crust and mantle evolution. M.: Nauka, 1992. 163 p. (in Russian)]
- Шерман С.И. Тектонофизические признаки формирования очагов сильных землетрясений в сейсмических зонах Центральной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 4. С. 495–512 [Sherman S.I. Tectonophysical signs of the formation of strong earthquake foci in seismic zones of Central Asia // Geodynamics and tectonophysics. 2016. V. 7. № 4. P. 495–512 (in Russian)].
- Шерман С.И., Горбунова Е.А. Волновая природа активизации разломов Центральной Азии на базе сейсмического мониторинга // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 115–122 [Sherman S.I. The wave nature of the fracture activity in the Central Asia on the base of seismic monitoring // Physical mechanics. 2008. V. 11. № 1. Р. 115–122 (in Russian)].

- Hasegawa A., Zhao D., Hori S. et al. Deep structure of the northeastern Japan arc and its relationship to seismic and volcanic activity // Nature. 1991. V. 352. № 6337. P. 683–689.
- He C., Dong S.W., Chen X., Santosh M., Niu S. Seismic evidence for plume-induced rifting in the Songliao Basin of Northeast China // Tectonophysics. 2013. V. 627. P. 171–181.
- *Hirata N., Karp B.Ya., Yamaguchi T. et al.* Oceanic crust in the Japan basin of the Japan sea the 1990 Japan USSR expedition // Geophysical Research Letters. 1992. V. 19. Iss. 20. P. 2027–2030.
- *Hobbs W.H.* Lineaments of the Atlantic border region // Bulletin of the Geological Society of America 1904. V. 15. P. 483–506.
- Jakson E.D., Shaw H.R., Bargar K.E. Calculated geochronology and stress field orientations along the Hawaiian chain // Earth and Planetary Science Letters. 1975. V. 26. P. 145–155.
- *Jolivet L., Tamaki K., Fournier M.* Japan Sea: opening history and mechanism: a synthesis // JGR. 1994. V. 99. P. 22237–22259.
- *Karig D.E.* Original and development of marginal basins in Western Pacific // JGR. 1971. V. 76. P. 2542–2561.
- Khanchuk A.I. Pre-Neogene tectonics of the Sea-of-Japan region: a view from Russian side // Earth Science. 2001. V. 5. № 5. P. 275–291.
- *Kojima S.* Mesozoic Terrane accretion in North-East China, Sikhote-Alin and Japan regions // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 1989. V. 69. P. 213–232.
- *Kozhurin A.I.* Active faulting at the Eurasian, North American and Pacific plates junction // Tectonophysics. 2004. V. 380. № 3–4. P. 273–285.
- Pacific ocean map [electronic resource] // Free World Maps. UPL: http://www.freeworldmaps.net/ocean/pacific.
- Sonder R.A. Die Lineament tectonic und ihre problem // Ed. Geol. Helv. 1938. V. 31. № 1. P. 199–238.
- Takeuchi A. Pacific swing: Cenozoic episodicity of tectonism and volcanism in Northeastern Japan // Memoir of the Geol. Soc. of China. 1986. № 7. P. 233–248.
- Tamaki K., Honza E. Global tectonics and formation of marginal basins: role of the western Pacific // Episodes. 1991. V. 14. № 3. P. 224–230.
- Woodcock N.H., Fisher M. Strike-slip duplex // Journal of Structural Geology. 1986. V. 8. № 7. P. 725–735.

# ФОРМИРОВАНИЕ ОКРАИННЫХ МОРЕЙ FORMATION OF MARGINAL SEAS OF THE PACIFIC OCEAN: A CONSEQUENCE OF SHEAR INSTABILITY AND ASTHENOSPHERIC DIAPIRISM

## L.A. Izosov<sup>1</sup>, V.I. Chuprynin<sup>2</sup>, A.M. Petrishchevsky<sup>3</sup>, T.A. Emelyanova<sup>1</sup>, Yu.I. Melnichenko<sup>1</sup>, M.A. Vasilyeva<sup>3</sup>, N.S. Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostook, Russia, 690041; e-mail: donkifa@mail.ru <sup>2</sup>Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia <sup>3</sup>Institute of Complex Analysis of Regional Problems, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Birobidzhan, Russia

On the basis of the mechanism of instability of the shear zone between moving lithospheric plates, a new version of the model for the formation of marginal seas of the Pacific Ocean in the form of successive occurrence of wave stresses and vortex structures has been proposed. The lithospheric plates in their lateral interaction zone possess to a great extent the properties of a viscous medium, where two tectonic masses with high but different viscosity and different densities weakly intermixing horizontally are moving at different velocities. Therefore, the interface begins to bend, resulting in vortex structures in the tectonosphere of marginal seas and adjacent continental areas. At sharp and rapid deformations, the Earth's crust behaves like a solid body, and at long time deformations — like a viscous medium. This mechanism of formation of the seas reflects the initial stage of the collision of the Pacific plate with Eurasia, when the converging plates are just beginning to contact. Duplex zones are formed in the Earth's crust and the upper mantle of marginal seas, where the crust-mantle substance is undergoing vortex circulation.

Keywords: shear instability, marginal seas, lithospheric plates, asthenospheric diapers.

Поступила в редакцию 03.10.2019 г.