



GEODYNAMIC MODEL OF THE INTERACTION OF THE SUBDUCTION ZONE WITH THE CONTINENTAL LITHOSPHERE IN THE AREA OF TRANSITION BETWEEN THE PACIFIC OCEAN AND EAST ASIA

L.I. Lobkovsky ^{1,2}, Y.V. Gabsatarov ^{2,3✉}, D.A. Alekseev ^{1,2}, I.S. Vladimirova ^{2,3},
M.M. Ramazanov ⁴, V.D. Kotelkin ⁵

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nahimovskiy Ave, Moscow 117997, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy Ln, Dolgoprudny 141701, Russia

³ Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, 189 Lenin Ave, Obninsk 249035, Russia

⁴ Institute for Geothermal Research and Renewable Energy, Branch of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 39a Shamil Ave, Makhachkala 367030, Republic of Dagestan, Russia

⁵ Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

ABSTRACT. East Asia is the vast region of Asia which is characterized by a complex geological structure and high activity of seismic and tectonic processes. Satellite geodetic data, reflecting the recent crustal movements in the region, demonstrate a considerable variability in magnitude and direction of motions both along the strike of island-arc margins and deep into the continent. To explain the anomalies in the Earth's surface displacement field, the paper proposes a geodynamic model of East Asia which involves the mechanism of interaction between the continental lithosphere of the region and the continent-to-ocean transition area along the Kuril-Kamchatka and Japanese island arcs. The proposed concept includes the model of the upper-mantle convective cell, developing beneath the continental lithosphere, in combination with the keyboard-block model explaining the regularities of seismic cycle in the island-arc margins. It has been shown that the consideration of interaction between the lithosphere and upper mantle in the continent-to-ocean transition area in the framework of the model of non-stationary convective cell allows us to explain the recent crustal movements observed up to a distance of 2000 km and the seismic tomography data without involving additional lithospheric blocks. The model contributes to the development of the physically grounded geodynamic approach to the analysis of recent tectonics and eliminates the inconsistencies between the observed data and classical plate tectonics in East Asia.

KEYWORDS: East Asia; geodynamic process; largest earthquake; mantle convection; subduction zone; seismic cycle; recent earth's surface displacements; satellite geodesy; numerical modeling

FUNDING: The study was conducted with the financial support of the Russian Science Foundation (project 20-17-00140).

RESEARCH ARTICLE

Received: December 29, 2021

Revised: June 13, 2022

Accepted: June 14, 2022

Correspondence: Yurii V. Gabsatarov, yuryg@gsras.ru

FOR CITATION: Lobkovsky L.I., Gabsatarov Y.V., Alekseev D.A., Vladimirova I.S., Ramazanov M.M., Kotelkin V.D., 2022. Geodynamic Model of the Interaction of the Subduction Zone with the Continental Lithosphere in the Area of Transition between the Pacific Ocean and East Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (5), 0675. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0675

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ С КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРОЙ В ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА ОТ ТИХОГО ОКЕАНА К ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

Л.И. Лобковский^{1,2}, Ю.В. Габсатаров^{2,3}, Д.А. Алексеев^{1,2}, И.С. Владимирова^{2,3},
М.М. Рамазанов⁴, В.Д. Котелкин⁵

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, пр-т Нахимовский, 36, Россия

² Московский физико-технический институт, 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9, Россия

³ ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», 249035, Обнинск, пр-т Ленина, 189, Россия

⁴ Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики, филиал Объединенного института высоких температур РАН, 367030, Махачкала, пр-т И. Шамиля, 39а, Республика Дагестан, Россия

⁵ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

АННОТАЦИЯ. Регион Восточной Азии характеризуется сложным геологическим строением и высокой сейсмической и тектонической активностью. Данные спутниковой геодезии, отражающие современные движения земной поверхности региона, демонстрируют существенную изменчивость по величине и направлению как вдоль простирающихся островодужных окраин, так и в глубь континента. В работе для объяснения аномалий поля смещений земной поверхности предлагается геодинамическая модель Восточной Азии, учитывающая механизм взаимодействия континентальной литосферы региона и переходной зоны континент – океан вдоль Курило-Камчатской и Японской островных дуг. Представленная концепция включает в себя модель верхнемантийной конвективной ячейки, развивающейся под континентальной литосферой, в сочетании с клавишно-блоковой моделью, объясняющей закономерности сейсмического цикла в островодужных окраинах. Показано, что учет взаимодействия литосферы и верхней мантии в зоне перехода континент – океан позволяет в рамках модели нестационарной конвективной ячейки объяснить наблюдающиеся на удалении до 2000 км современные движения земной поверхности и данные сейсмической томографии без привлечения дополнительных литосферных блоков. Модель способствует развитию физически обоснованного геодинамического подхода к анализу современной тектоники и позволяет устранить противоречия между наблюдаемыми данными и классической тектоникой плит в регионе Восточной Азии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточная Азия; геодинамический процесс; сильнейшее землетрясение; мантийная конвекция; субдукционная зона; сейсмический цикл; современные движения земной поверхности; спутниковая геодезия; численное моделирование

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-17-00140).

1. ВВЕДЕНИЕ

Восточная Азия является обширным высокоактивным регионом, включающим в себя как континентальные области, так и зоны перехода континент – океан. Сейсмическая и тектоническая активность Восточной Азии характеризуется значительной неоднородностью, что обусловлено сложным геодинамическим строением региона [Savostin et al., 1982; Levi et al., 2009; Seminsky et al., 2013; Imaeva et al., 2017]. Создание региональной структурно-динамической модели Восточной Азии необходимо для решения как фундаментальных, так и прикладных задач сейсмологии, геофизики и геодинамики, таких как прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмическое районирование.

Характер деформирования земной коры в тектонически активных регионах является одним из наиболее дискуссионных вопросов в геодинамике. Активное развитие региональных сетей станций регистрации сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) позволило накопить большой объем данных о современных движениях земной поверхности (СДЗП)

в различных областях Восточной Азии. Анализ таких данных служит в настоящее время одним из наиболее широко используемых методов изучения деформационных процессов, протекающих в земной коре и литосфере [Sankov, 2014]. Ключевой и потенциально уязвимой частью данного подхода является выбор геодинамической модели процессов, вызывающих деформирование земной поверхности. Неадекватный выбор исходной геодинамической модели может привести к искаженным результатам даже при условии получения математически корректного и статистически значимого решения.

Существенной сложностью, возникающей при построении структурно-динамической модели Восточной Азии, считается необходимость учета трехмерного характера действия эндогенных деформационных процессов и взаимосвязанного деформирования верхних оболочек Земли. Отдельной проблемой является необходимость рассмотрения зоны взаимодействия литосферы Восточной Азии с Курило-Камчатской и Японской островными дугами, в которой методами

спутниковой геодезии регистрируются разнонаправленные смещения соседних сегментов земной поверхности в ходе сейсмического цикла. Целью данной работы является разработка концептуальной структурно-динамической модели Восточной Азии, способной объяснить наблюдающиеся аномалии регионального поля скоростей СДЗП, наиболее выраженной из которых является наличие длительных (десятки и сотни лет) периодов противоположной направленности векторов смещений станций ГНСС-наблюдений в континентальной части Восточной Азии и на ее активной континентальной окраине.

2. АНАЛИЗ СДЗП ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

Развитие сетей станций ГНСС-наблюдений в Восточной Азии началось в 90-х гг. XX в. с установки опорных станций на Японских островах, п-ове Камчатка и в материковой части региона и с развертывания первых геодинамических полигонов [Shen et al., 2000; Sagiya et al., 2000; Steblov et al., 2003; Kogan et al., 2003]. Дальнейшими этапами развития региональных ГНСС-наблюдений стали постепенная смена станций периодических наблюдений на постоянные станции, развертывание новых геодинамических полигонов в тектонически активных зонах и дальнейшее сгущение сетей станций наблюдений [Levin et al., 2007; Timofeev et al., 2008, 2019; Shestakov et al., 2011; Vasilenko, Prytkov, 2012; Sankov, 2014; Wang, Shen, 2020].

В работе анализируются опубликованные данные о смещениях земной поверхности за период с 1997 по 2016 г., полученные на более чем 5500 пунктах ГНСС-наблюдений, покрывающих большую часть территории Восточной Азии [Kogan et al., 2003; Apel et al., 2006; Lobkovsky et al., 2018; Vladimirova et al., 2020; Wang, Shen, 2020]. На предварительном этапе работы все опубликованные данные были приведены к единой общеземной системе отсчета ITRF2014 [Altamimi et al., 2016] с использованием опубликованных параметров трансформации и параметров движения плит из модели NNR-MORVEL56 [Argus et al., 2011]. Система отсчета ITRF2014 представляет собой физическую реализацию декартовой геоцентрической системы координат, оси которой вращаются вместе с Землей. Данные о скоростях смещений пунктов ГНСС-наблюдений в данной работе рассматриваются в немодифицированной отсчетной основе ITRF2014 без фиксации какой-либо литосферной плиты в качестве неподвижной, для того чтобы не вносить искажений, связанных с выбором той или иной региональной конфигурации тектонических блоков. В этом случае в рамках тектоники плит данные о смещениях содержат составляющую, связанную с перемещением подлежащих литосферных блоков как жесткого целого, и составляющую, связанную с деформированием этих блоков, вызванным краевыми и внутриплитными деформационными процессами.

Сети станций ГНСС-наблюдений в Восточной Азии, рассматриваемые в данной работе, были развернуты

в рамках проектов по изучению региональной и глобальной геодинамики; при их установке было обеспечено стабильное закрепление постаментов относительно подстилающих слоев земной коры. Таким образом, ГНСС-измерения могут корректно использоваться для исследования современных тектонических движений.

На рис. 1 показано существенно прореженное для наглядности поле горизонтальных компонент скоростей смещений пунктов ГНСС-наблюдений и его значимые вариации. Процесс прореживания был выполнен с сохранением общих закономерностей поля скоростей.

Анализ поля горизонтальных компонент скоростей смещений земной поверхности Восточной Азии (рис. 1) выявил ряд его специфических особенностей. На всей континентальной части Восточной Азии, включая территории материкового Китая, а также Дальневосточного и Арктического регионов России, в том числе на о. Сахалин, наблюдается согласованное перемещение пунктов наблюдений на юго-восток, в направлении Тихого океана. В то же время вдоль активной континентальной окраины Восточной Азии поле смещений крайне неоднородно как вдоль простирающегося океанического желоба, так и в направлении в глубь континента. Особенно заметно эти неоднородности проявляются в ГНСС-данных на п-ове Камчатка: западное побережье и центральная часть полуострова смещаются на юго-восток согласованно с общей направленностью регионального поля смещений, в то время как восточное побережье демонстрирует существенный разворот векторов смещений к юго-западу. Кроме того, наблюдается постепенное уменьшение абсолютных величин смещений при движении с запада на восток Камчатки.

Такая картина смещений объяснима, если представить наблюдаемые смещения в виде векторной суммы регионального вектора смещения на юго-восток и вектора деформирования, обусловленного сжатием нависающего континентального края вследствие субдукции Тихоокеанской плиты. Вектор деформирования быстро убывает по величине в глубь континента и сонаправлен вектору конвергенции плит, который в районе п-ва Камчатка перпендикулярен оси океанического желоба и направлен на северо-запад (рис. 1, а). Таким образом, картина смещений земной поверхности на Камчатке отражает прохождение межсейсмической стадии накопления упругих напряжений в субдукционной зоне. В предположении о сплошной среде такой режим деформирования, сопровождающийся существенной изменчивостью (вплоть до противоположной направленности) направлений и величин смещений близких точек земной поверхности, должен вызывать значительные градиенты в полях величин, характеризующих деформацию региональной литосферы.

Полученные ГНСС-смещения на Курильских и Японских островах существенно отличаются от характерного для всего региона режима смещений и позволяют изучить реакцию континентальной окраины на процесс

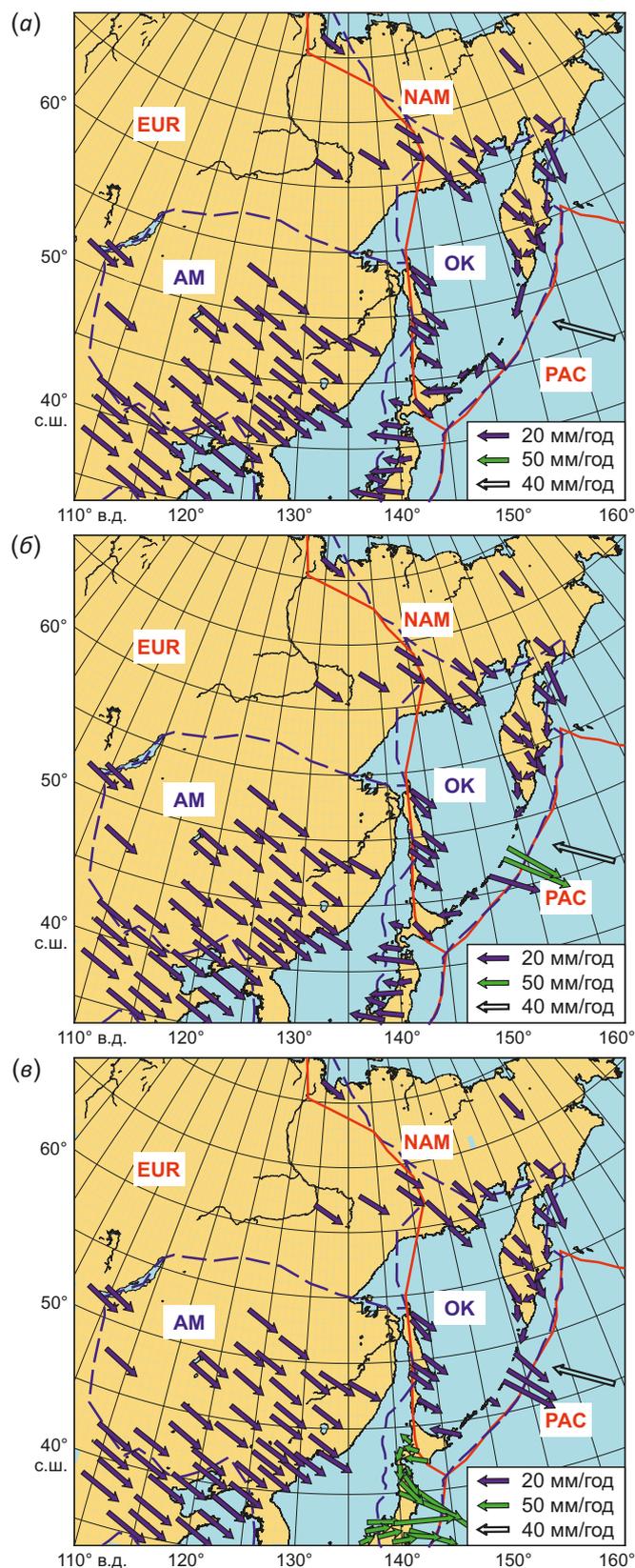


Рис. 1. Вариации во времени горизонтальных перемещений пунктов ГНСС-наблюдений на территории Восточной Азии. (а) – скорости смещений для Курильских островов, оцененные до Симуширского землетрясения 2006 г.; (б) – скорости смещений для Курильских островов, оцененные в течение первого года после Симуширского землетрясения 2006 г.; (в) – скорости смещений для Курильских и Японских островов

оценены в течение первого года после землетрясения Тохоку 2011 г. Сплошной линией красного цвета показаны границы литосферных плит по модели NUVEL-1A [DeMets et al., 1994]. Штриховой линией синего цвета показаны границы литосферных плит по модели NNR-MORVEL56 [Argus et al., 2011]. PAC – Тихоокеанская плита, EUR – Евразийская плита, NAM – Североамериканская плита, ОК – Охотская микроплита, АМ – Амурская микроплита. Направление и величина вектора конвергенции Тихоокеанской и Североамериканской плит [Argus et al., 2011] показаны белой стрелкой.

Fig. 1. Temporal variations of the horizontal motions of GNSS stations in East Asia.

(а) – displacement rates for the Kuril Islands estimated prior to the 2006 Simushir earthquake; (б) – displacement rates for the Kuril Islands estimated during the first year after the 2006 Simushir earthquake; (в) – displacement rates for the Kuril and Japanese islands estimated during the first year after the 2011 Tohoku earthquake. The solid red line shows the boundaries of the lithospheric plates according to the NUVEL-1A model [DeMets et al., 1994]. The blue dashed line shows the boundaries of lithospheric plates according to the NNR-MORVEL56 [Argus et al., 2011] model. PAC – Pacific plate, EUR – Eurasian plate, NAM – North American plate, ОК – Okhotsk microplate, АМ – Amur microplate. The direction and magnitude of the convergence vector of the Pacific and North American plates [Argus et al., 2011] are shown by a white arrow.

высвобождения упругих напряжений в очаге сильнейшего субдукционного землетрясения. Детальное исследование влияния сейсмического цикла этих землетрясений на поле смещений континентальной окраины Восточной Азии проведено авторами ранее в работах [Lobkovsky et al., 2018; Vladimirova et al., 2020].

Северный фланг Курильской островной дуги до Симуширских землетрясений (рис. 1, а) смещался согласованно с общим направлением смещений восточного побережья п-ова Камчатка, что свидетельствует о стабильности межсейсмической стадии в этом регионе. В это же время для смещений на южном фланге Курильской дуги были характерны неоднородность направлений вдоль желоба и постепенное изменение от юго-восточного направления к западному, сопровождающееся ростом величины смещения. К сожалению, данные скорости были оценены по очень небольшим временным интервалам (до полугода), что не позволяет исключить локальные вариации и действия сезонных процессов. В то же время схожая картина смещений наблюдается в этом регионе и через несколько лет после Симуширских землетрясений (рис. 1, в), что позволяет рассматривать эти векторы как характеризующие межсейсмическую стадию сейсмического цикла. Различия в направлении смещений на южном фланге дуги могут быть обусловлены как особенностями процесса деформирования (вариации механического сцепления поверхностей сближающихся плит), так и процессом подготовки будущего Симуширского землетрясения 2006 г.

На постсейсмической стадии сейсмического цикла, связанного с Симуширскими землетрясениями, смещения на южном и северном флангах Курильской

островной дуги не меняют своего направления, но уменьшаются по величине в первый год после события (рис. 1, б) и практически восстанавливают свою величину через шесть лет после землетрясения (рис. 1, в). В то же время измерения в центральной части дуги, вблизи эпицентра, демонстрируют длительные и интенсивные смещения этой части субдукционной зоны в сторону океана, постепенно уменьшающиеся со временем (рис. 1, б, в). В целом, такой характер смещений резко контрастирует с характером смещений в соседних частях островной дуги и показывает, что разгрузка накопленных упругих напряжений произошла только локально вблизи эпицентра землетрясения. Подобный характер смещений должен приводить к накоплению существенных сдвиговых напряжений между разнонаправленно движущимися сегментами субдукционной зоны в случае предположения о сплошности литосферы Курильской островной дуги.

ГНСС-смещения на Японских островах демонстрируют схожий с остальными областями активной континентальной окраины характер. На межсейсмической стадии (рис. 1, а, б) векторы смещений направлены к западу, что согласуется с направлением вектора конвергенции литосферных плит, и уменьшаются по величине при движении от восточного побережья к западному. Таким образом, наблюдаемые смещения согласуются с предположением о доминировании в векторах смещений компоненты, связанной с деформированием континентального края вследствие субдукции Тихоокеанской плиты. В первый год после землетрясения Тохоку векторы смещений резко меняют свое направление на юго-восточное, противоположное межсейсмическому, и вблизи эпицентра сохраняют эту направленность в течение как минимум четырех лет, постепенно уменьшаясь по величине [Lobkovsky et al., 2018].

В целом, анализ поля горизонтальных компонент СДЗП показал, что в течение почти всего сейсмического цикла, достигающего для этого региона ста лет и более [Fedotov, 1968], направления смещений на континентальной окраине не соответствуют направлению смещений на большей части Восточной Азии, вплоть до противоположной направленности. Такой характер смещений создает парадокс аномально больших величин деформации земной поверхности в пределах задуговых бассейнов, которые не находят подтверждения в данных региональной сейсмичности и тектонических особенностях строения региона. Возникновение подобных парадоксов может объясняться неучетом динамики активных региональных разломов [Kuzmin, 2013].

3. ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

Для объяснения высокой внутриплитной тектонической активности, наблюдаемой в Восточной Азии, было предложено два принципиально различных подхода: плитно-тектонический и деформационный.

В рамках классического плитно-тектонического подхода рядом авторов было высказано предположение о существовании в Восточной Азии широкой пограничной зоны, представленной набором независимо вращающихся тектонических блоков, крупнейшими из которых являются Амурская и Охотская микроплиты (рис. 2) [Savostin et al., 1982; Seno et al., 1996; Apel et al., 2006; Timofeev et al., 2008; Ashurkov et al., 2011, 2016; Sankov, 2014]. Выявление границ взаимодействующих региональных тектонических блоков проводилось на основе выделения основных сейсмогенерирующих разломов Восточной Азии с привлечением геолого-геофизических и геодезических данных [Seno et al., 1996; Shestakov et al., 2011; Seminsky et al., 2013; Sankov, 2014; Imaeva et al., 2017]. Дальнейший деформационный анализ большого объема ГНСС-измерений в материковой части региона и на Японских островах выявил большую тектоническую раздробленность предполагаемых Охотской и Амурской микроплит с выделением дополнительных тектонических блоков [Loveless, Meade, 2010; Seminsky et al., 2013; Wang, Shen, 2020].

С другой точки зрения, наблюдающаяся в Восточной Азии тектоническая активность может быть объяснена распределенными по большой площади макропластическими деформациями, возникшими вследствие действия двух основных процессов: 1) коллизии Индо-Австралийской и Евразийской литосферных плит, в частности в результате внедрения жесткого выступа-индентора Индостана в более податливую упруго-пластическую среду Евразийской литосферы [Molnar, Tapponnier, 1978; England, Molnar, 2005; Schellart et al., 2019], 2) взаимодействия слэба Тихоокеанской плиты и верхнемантийного вещества, приводящего к возникновению внутриплитного магматизма и регионального растяжения литосферы Восточной Азии, сопровождающегося отступлением глубоководного желоба в океан [Zorin et al., 2009; Tang et al., 2014; Lobkovsky, 2016; Chuvashova et al., 2017].

Геодинамическая модель Восточной Азии должна наиболее полно описывать действие эндогенных деформационных процессов, вызывающих СДЗП, а также корректно учитывать взаимодействие континентальной литосферы с зоной перехода континент – океан, обладающей собственной динамикой с другим характерным временным масштабом. Проведенный в предыдущем разделе анализ региональных смещений земной поверхности показал, что характерные изменения направлений и величин векторов смещений могут быть объяснены в рамках разложения суммарного смещения на отдельные компоненты, обусловленные действием долгопериодного движения в сторону океана и короткопериодного периодически меняющего направление и интенсивность процесса краевого деформирования. Таким образом, результирующая геодинамическая модель Восточной Азии может быть получена суммированием действия моделей деформирования континентальной части региона и модели деформирования

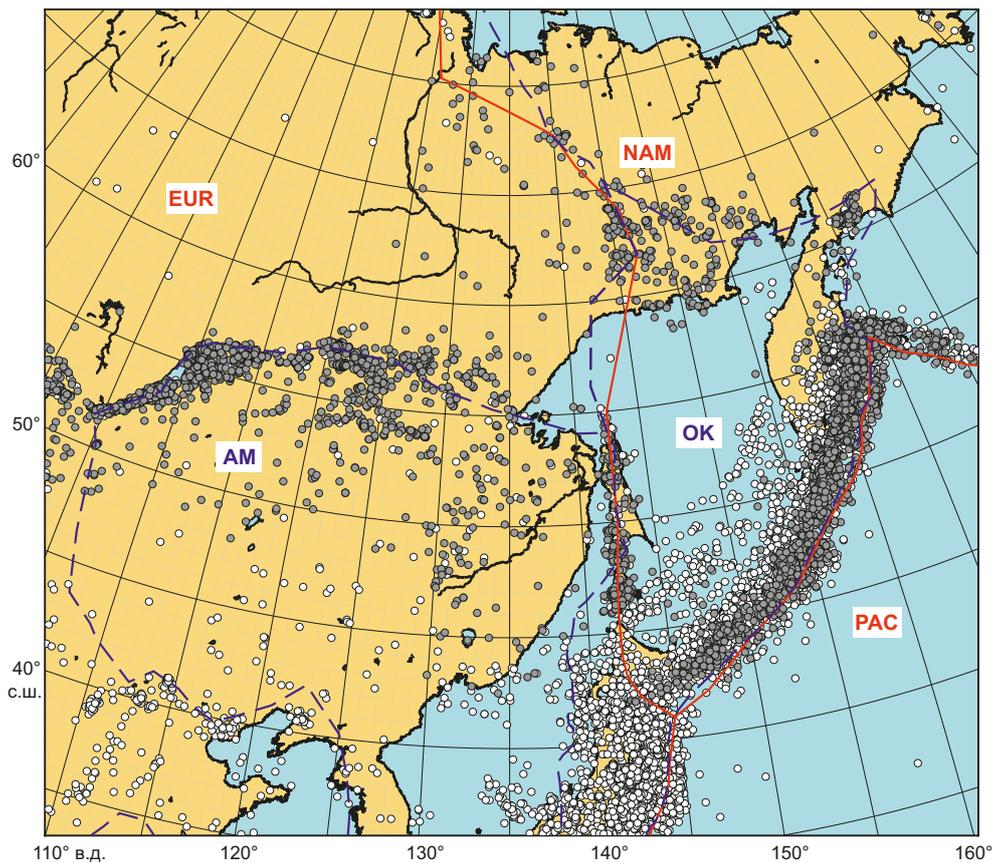


Рис. 2. Региональная сейсмичность Восточной Азии по данным каталогов Геофизической службы РАН (серые кружки) [Earthquakes..., 2021] и Международного сейсмологического центра (белые кружки) [Bulletin..., 2021]. Названия плит и их границы соответствуют рис. 1.

Fig. 2. Regional seismicity of East Asia according to the GS RAS (grey circles) and ISC (white circles) data catalogs [Earthquakes..., 2021; Bulletin..., 2021]. The names of the blocks and their boundaries correspond to those in Fig. 1.

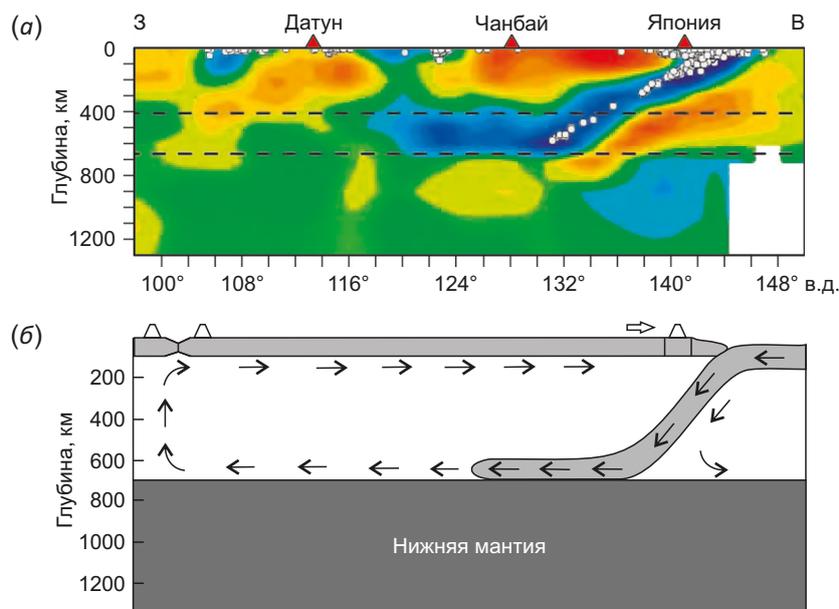


Рис. 3. Исходные данные для построения модели горизонтально расширяющейся конвективной ячейки. (а) – сейсмо-томографический разрез верхней мантии [Zhao et al., 2010]; (б) – эскиз мантийной конвективной ячейки с зоной субдукции [Lobkovsky, 2016].

Fig. 3. Initial material for constructing a model of a horizontally-expanding convective cell. (a) – upper mantle seismic tomography image [Zhao et al., 2010]; (б) – sketch of a mantle convection cell coupled with a subduction zone [Lobkovsky, 2016].

края континентальной плиты, имеющих единый энергетический источник.

Анализ данных по сейсмической томографии верхней мантии в переходной зоне от Тихого океана к Азиатскому континенту выявил сейсмическое изображение высокоскоростного горизонтального участка, однородного по толщине слоя (рис. 3, а), расположенного на подошве верхней мантии, который является непрерывным продолжением погружающегося в зоне субдукции слоя океанической литосферы [Zhao et al., 2010]. Такая геометрия слоя свидетельствует в пользу его равномерного распространения в сторону континента со скоростью, сопоставимой с погружением литосферы в зоне субдукции. В этом случае, исходя из гидродинамики несжимаемой жидкости, естественно предположить, что движущееся в сторону континента вдоль подошвы верхней мантии бывшее литосферное вещество вовлечено в циркуляционную конвективную ячейку, у которой существует верхняя возвратная ветвь движения мантийного вещества, текущего в сторону Тихоокеанской зоны субдукции (рис. 3, б). Такая модель конвективной верхнемантийной ячейки, сопряженной с зоной субдукции, была предложена Л.И. Лобковским с соавторами при геодинамическом анализе эволюции литосферы Арктики для верхнего мела и кайнозоя [Lobkovsky et al., 2013; Laverov et al., 2013] и использовалась для объяснения различных особенностей строения и геодинамики Восточной и Северо-Восточной Азии [Lobkovsky, 2016].

Совокупность имеющихся на сегодня сейсмографических данных о строении мантии в зоне перехода от Тихого океана к Восточной и Северо-Восточной Азии, а также теоретических моделей развития горизонтальных конвективных ячеек в верхней мантии под окраинно-континентальной областью литосферы, примыкающей к зоне субдукции, позволяет авторам сформулировать постановку математической задачи о мантийной конвекции под регионом Восточной Азии, сопряженной с Тихоокеанской субдукцией.

Рассматриваемая термогидродинамическая задача о течении жидкости с постоянной вязкостью в слое верхней мантии в приближениях Стокса и Буссинеска подчиняется следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned}
 -\nabla p + \mu \Delta v + \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]g &= 0, \\
 \nabla v &= 0, \quad \rho_0 = const, \quad v \nabla T = \chi \Delta T, \quad \chi = \frac{\lambda}{\rho_0 C_p}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь v – поле скоростей; T – температура; μ – динамическая вязкость; β – коэффициент теплового расширения; g – ускорение свободного падения; λ – коэффициент теплопроводности; C_p – удельная изобарическая теплоемкость; χ – температуропроводность.

Численное решение системы (1) с граничными условиями, указанными на рис. 4, получено ранее авторами в работах [Lobkovskii, Ramazanov, 2021; Lobkovsky et al., 2021a].

Результаты 3D-моделирования [Lobkovsky et al., 2021a] показывают, что холодный фронт на подошве верхней мантии (погружающийся слэб Тихоокеанской плиты) неуклонно движется влево и проходит более 2000 км. Распределение скоростей показывает, что синхронно с продвижением нижнего холодного фронта влево под континент увеличивается и длина конвективной ячейки, охватывая все большие области возвратного поверхностного течения вправо к зоне субдукции, при этом скорость фронта внизу постепенно уменьшается. Зарегистрированные методами спутниковой геодезии СДЗП в материковой части Восточной Азии (см. рис. 1) векторы смещений имеют величину 2.5–3.0 см/год и направлены в сторону океана, что согласуется по величине и направлению с модельными смещениями, обусловленными растяжением литосферы под действием возвратной ветви конвективной ячейки в верхней мантии [Lobkovsky et al., 2021a].

В качестве модели, объясняющей динамику активной континентальной окраины Восточной Азии, в данной работе рассматривается клавишная модель возникновения сильнейших землетрясений в современных зонах субдукции [Lobkovsky et al., 1991]. В рамках клавишной модели фронтальные части островных дуг и активных континентальных окраин разделены поперечными вертикальными разломами на отдельные клиновидные блоки-клавиши, характерный размер которых составляет ~100 км (рис. 5). С внешней стороны блоки ограничены глубоководным желобом, а с внутренней – системой продольных разломов, отделяющих их от более массивных частей островной дуги/активной континентальной окраины. Блоки расположены на пологом участке поверхности подвигаемой плиты.

Нагружение сейсмогенных блоков, характеризуемое в основном их горизонтальным сжатием вкрест простирающейся дуги, осуществляется благодаря сильному сцеплению подошвы блоков с поверхностью движущейся

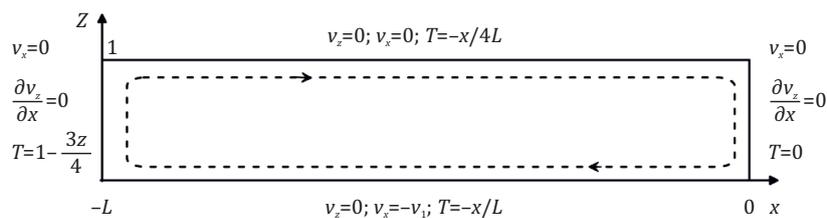


Рис. 4. Граничные условия, используемые для модели конвективной ячейки [Lobkovsky et al., 2021a].
 Fig. 4. Boundary conditions used for the convective cell model [Lobkovsky et al., 2021a].

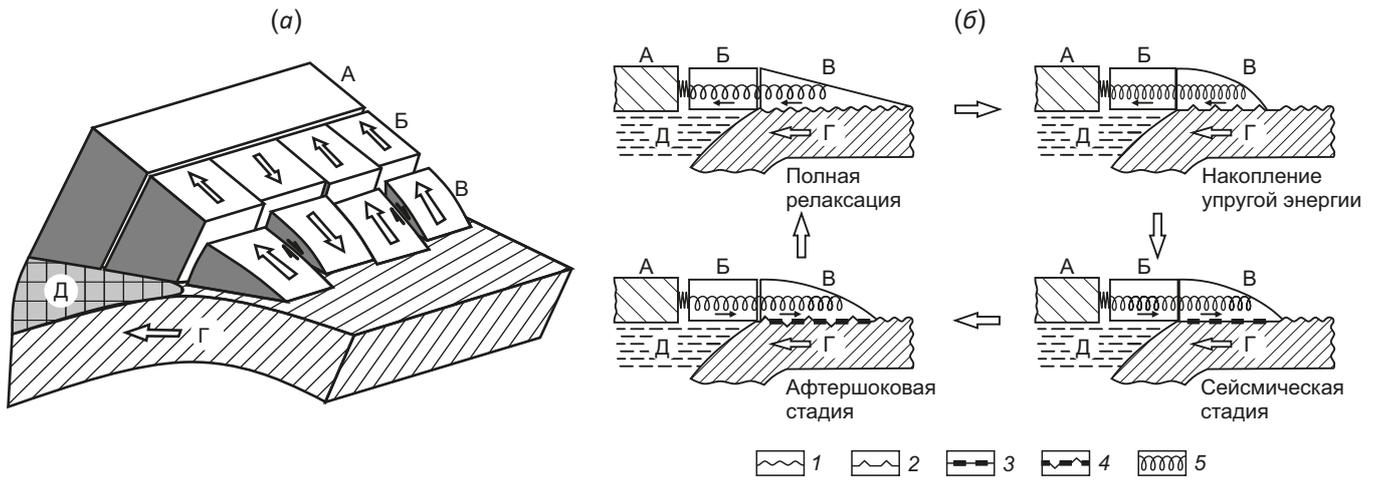


Рис. 5. Клавишная модель фронтальной части островной дуги (а) и схема последовательных этапов деформирования (нагрузки и разгрузки) блоков и соответствующих стадий сейсмического цикла (б).

А – недеформированная часть литосферной плиты; Б – тыловой блок; В – фронтальный блок; Г – подводимая плита; Д – астеносфера. 1 – ненарушенная «шероховатая» структура контактной зоны (СКЗ) (стабильная стадия цикла); 2 – пластически «выровненная» СКЗ (предсейсмическая стадия цикла); 3 – сильно раздробленная и неоднородная СКЗ (стадия сейсмического вспарывания); 4 – частично восстановленная СКЗ (афтершоковая стадия цикла); 5 – пружина, имитирующая упругое взаимодействие блоков и недеформированной части континентальной плиты [Lobkovsky et al., 2021b].

Fig. 5. Three-dimensional geometry of the two-segment keyboard-block model (a), and seismic deformation cycle phases, showing block loading-unloading sequence (b).

А – fixed undeformable continental margin; Б – rear-segment block; В – frontal-segment block; Г – subducting plate; Д – crustal asthenosphere. 1 – intact "rough" contact zone structure (CZS) (stable stage of the cycle); 2 – plastically smoothed CZS (preseismic stage of the cycle); 3 – highly fragmented and heterogeneous CZS (seismic rupturing stage); 4 – partially recovered CZS (aftershock stage of the cycle); 5 – a spring simulating the elastic interaction between blocks and an undeformed part of the continental plate [Lobkovsky et al., 2021b].

плиты. В момент землетрясения происходит разрушение контактной зоны, сопровождаемое падением касательных напряжений, и разгружающийся сейсмогенный блок практически мгновенно смещается в сторону океана, в то время как соседние блоки остаются на месте. Однако во время быстрой сейсмической стадии происходит лишь частичный сброс накопленных напряжений [Lobkovsky et al., 1991]. На афтершоковой стадии сейсмического цикла сместившийся блок продолжает выдвигаться в сторону океана по разупроченной контактной поверхности за счет оставшейся части запасенной в нем упругой энергии.

В работе [Lobkovsky et al., 1991] предложена численная схема для моделирования перемещений фронтальных сейсмогенных блоков на разных стадиях сейсмического цикла. В то же время данные натурных ГНСС-наблюдений в сочетании с результатами геологических и сейсмологических изысканий явно свидетельствуют в пользу того, что тыловая часть дуги также имеет сложную структуру и разделена на отдельные независимо деформирующиеся сегменты крупными разломами, уходящими корнями в зону контакта взаимодействующих литосферных плит [Lobkovsky et al., 2018; Vladimirova et al., 2020].

Результирующая численная схема для моделирования смещений блоков континентальной окраины в ходе сейсмического цикла основана на решении уравнений равновесия для фронтальных и тыловых блоков:

$$\frac{\partial(H_{\sigma i})}{\partial x} = \left[\tau_0^{(i)} + \frac{H}{d_i}(\tau_{i-1} + \tau_{i+1}) \right], \tag{2}$$

где $\tau_0^{(i)}$ – касательные напряжения, действующие на подошве i -го блока со стороны вязкого контактного слоя; τ_{i-1} и τ_{i+1} – касательные напряжения, возникающие вследствие взаимодействия с соседними блоками; d_i – ширина блока вдоль азимута простираения океанического желоба; H – высота блока в сечении.

Численное моделирование процесса деформирования континентальной окраины Восточной Азии с учетом ее двухэлементной структуры с фронтальными и тыловыми блоками (рис. 5) показало согласие модельных смещений с геолого-геофизическими и спутниковыми геодезическими данными [Lobkovsky et al., 2021b].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Описанные выше модели деформирования материковой и окраинной части Восточной Азии имеют единый энергетический источник – процесс субдукции Тихоокеанской плиты, что дает возможность в дальнейшем объединить их в единую геодинамическую модель Восточной Азии (рис. 6). Показано, что учет взаимодействия литосферы и верхней мантии в зоне перехода континент – океан позволяет в рамках модели верхнемантийной конвективной ячейки, сопряженной с субдукцией Тихоокеанской плиты, объяснить

наблюдающиеся на удалении до 2000 км СДЗП и данные сейсмической томографии без привлечения дополнительных литосферных блоков. Процесс растяжения континентальной литосферы продолжается десятки миллионов лет и при интерпретации данных спутниковой геодезии может рассматриваться как стационарный. Фронтальная часть континентальной окраины в рамках представленной двухэлементной клавишно-

блоковой модели испытывает быстрые сейсмотектонические деформации, связанные с циклами сильнейших землетрясений с характерным периодом порядка 100 лет.

В рамках данного подхода находят естественное объяснение наблюдающиеся аномалии поля современных движений вдоль субдукционной границы Восточной Азии: существенные латеральные неоднородности

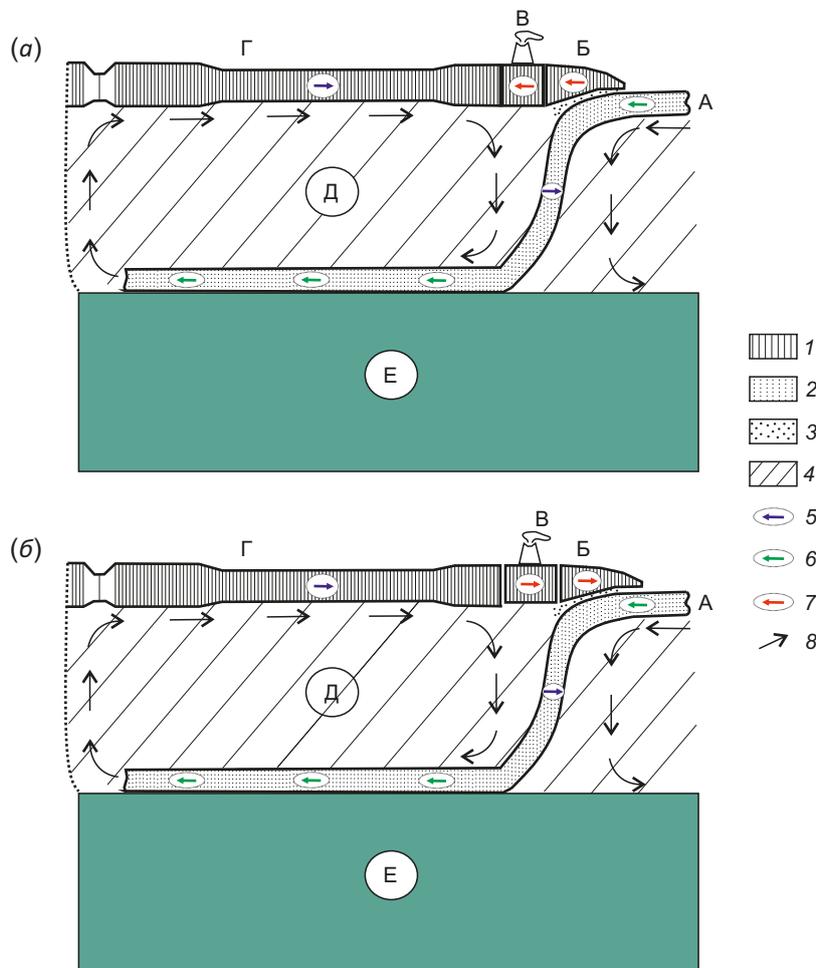


Рис. 6. Схематическая геодинамическая модель зоны взаимодействия континент – океан с возникновением горизонтально расширяющейся конвективной ячейки в астеносфере и верхней мантии.

(а) – длительная межсейсмическая стадия накопления упругих напряжений; (б) – постсейсмическая стадия, сопровождающаяся релаксацией накопленных упругих напряжений. А – погружающаяся океаническая плита; Б – фронтальный сейсмогенный блок; В – островодужный (тыловой) блок; Г – континентальная плита; Д – горизонтально расширяющаяся конвективная ячейка в верхней мантии; Е – нижняя мантия. 1 – континентальная литосфера; 2 – океаническая литосфера; 3 – вязкий межплитовый контактный слой; 4 – вязкоупругая астеносфера и верхняя мантия; 5 – направление растяжения континентальной литосферы и смещения субдукционной зоны; 6 – направление погружения океанической плиты; 7 – направления смещений блоков континентальной окраины; 8 – направление движения вещества в конвективной ячейке. Скорости смещений и размеры основных структурных элементов показаны не в реальном масштабе.

Fig. 6. Schematic geodynamic model of the continent-ocean interaction zone with the emergence of a horizontally expanding convective cell in the asthenosphere and upper mantle.

(а) – a long interseismic stage of accumulation of elastic stresses; (б) – postseismic stage, accompanied by relaxation of accumulated elastic stresses. А – subsiding oceanic plate; Б – frontal seismogenic block; В – island-arc (rear) block; Г – continental plate; Д – horizontally widening convective cell in the upper mantle; Е – lower mantle. 1 – continental lithosphere; 2 – oceanic lithosphere; 3 – viscous interplate contact layer; 4 – viscoelastic asthenosphere and upper mantle; 5 – direction of extension of the continental lithosphere and displacement of the subduction zone; 6 – direction of subsidence of the oceanic plate; 7 – directions of displacement of blocks of the continental margin; 8 – direction of movement of matter in the convective cell. Displacement rates and sizes of major structural elements are non-real scale.

поля скоростей смещений вдоль простираания океанических желобов, которые обусловлены нахождением различных сегментов островной дуги на разных стадиях сейсмического цикла, а также быстрые развороты векторов скоростей смещений в окрестности очагов крупных субдукционных землетрясений, вызванные эффективным выдвиганием сейсмогенных блоков в океан на сейсмической и постсейсмической стадии. В ходе сейсмического цикла упругие напряжения накапливаются локально в пределах сейсмогенных блоков континентальной окраины, которые разгружаются в моменты возникновения крупнейших субдукционных землетрясений. Основное смещение сейсмогенных блоков в сторону континента на межсейсмической стадии (длительность порядка 100 лет) за счет сильного сцепления подошвы этих блоков с поверхностью поддвигающейся плиты чередуется с их быстрым возвратным «отскоком» и последующим выдвиганием в сторону океана в ходе сейсмической и постсейсмической стадии сейсмического цикла, при этом результирующее смещение всей континентальной окраины происходит в соответствии с направлением циркуляции верхнемантийной конвективной ячейки в сторону океана.

Детальные исследования региона Восточной Азии, проведенные в последнее десятилетие российскими и зарубежными геологами и геофизиками [Yarmolyuk et al., 1995; Timofeev et al., 2008; Zorin et al., 2009; Levi et al., 2009; Seminsky et al., 2013; Sankov, 2014; Tang et al., 2014; Lobkovsky, 2016; Imaeva et al., 2017; Chuvashova et al., 2017; Schellart et al., 2019; Wang, Shen, 2020], позволили существенно продвинуться в установлении основных региональных закономерностей развития тектонически активных областей и создать ряд региональных структурно-динамических моделей.

В частности, неоднократно предпринимались попытки распространить удобный и простой математический подход классической тектоники плит, не требующий учета динамики нижележащих оболочек Земли, для описания более сложных по тектоническому строению регионов, к которым можно отнести и Восточную Азию [Seno et al., 1996; Sella et al., 2002; Apel et al., 2006; Loveless, Meade, 2010; Ashurkov et al., 2011; Wang, Shen, 2020]. Построенные в данных работах кинематические модели обособленных Охотской и Амурской плит, а также более мелких блоков характеризуются малыми скоростями собственного вращения, существенно различным положением полюсов Эйлера и сильно различающимися трассами границ, обособляющих эти блоки. Кроме того, наличие в Восточной Азии рассеянных поясов сейсмичности, достигающих в ширину 600 км (см. рис. 2), и отсутствие асейсмических областей, окруженных поясами сейсмичности, сильно затрудняют определение границ предполагаемых дополнительных литосферных блоков и подтверждение наличия их замыкания.

Также был предложен ряд моделей, объясняющих тектоническую активность Восточной Азии в кайнозой

распространением макропластических деформаций, обусловленных коллизией Индостана и Евразии [Molnar, Tapponnier, 1978; England, Molnar, 2005], в том числе связь этого процесса с динамикой тихоокеанских субдукционных зон [Schellart et al., 2019]. Другой точкой зрения является доминирование в формировании особенностей региональной геодинамики процесса субдукции Тихоокеанской плиты и взаимодействие слэба с литосферой Восточной Азии и подлежащей верхней мантией [Yarmolyuk et al., 1995, 2013; Zorin et al., 2009; Tang et al., 2014; Chuvashova et al., 2017]. Разработанные в рамках данного подхода модели описывают кайнозойскую эволюцию строения и динамики Восточной Азии, обусловленную взаимодействием стагнирующего слэба с верхнемантийным веществом, что является причиной внутриплитного магматизма и пассивного растяжения литосферы. В работе [Sankov, 2014] сделан вывод о том, что одним из главных движущих механизмов неотектонических и современных деформаций региона Восточной Азии является длительно действующий крупномасштабный поток вещества верхней мантии в направлении с северо-запада на юго-восток. Этот вывод соответствует лежащей в основе предлагаемой модели концепции, базирующейся на представлении о верхнемантийной циркуляции, сопряженной с процессом продолжающегося равномерного распространения слэба в сторону континента [Laverov et al., 2013; Lobkovsky et al., 2013, 2021a; Lobkovsky, 2016].

В сравнении со схожими моделями, описывающими взаимодействие Тихоокеанского слэба и верхнемантийного вещества, новизна предлагаемой в данной работе модели состоит в возможности объяснения новейшей геодинамики зоны перехода континент – океан, характеризующейся наложением быстрых сейсмо-тектонических знакопеременных движений активной континентальной окраины на длительный процесс пассивного растяжения литосферы, обусловленного верхнемантийной конвекцией под литосферой Восточной Азии.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена геодинамическая модель Восточной Азии, основанная на геомеханическом моделировании взаимодействия континентальной литосферы региона и переходной зоны континент – океан, проходящей вдоль Курило-Камчатской и Японской островных дуг. Представленная модель позволяет объяснить наблюдаемые методами спутниковой геодезии кажущиеся парадоксальными особенности регионального поля скоростей СДЗП, связанные с существенными вариациями скоростей движения вдоль континентальной окраины и резкими изменениями направлений движений в ходе сейсмического цикла, а также значительными градиентами поля скоростей в задуговых бассейнах. Модель развивает аппарат современной геодинамики, позволяющий преодолеть наблюдаемые в регионе Восточной Азии трудности и противоречия классической плитно-тектонической парадигмы.

Представленная в работе модель находится на концептуальном этапе разработки, при этом ее основные составляющие реализованы авторами на количественном уровне. Следующим этапом развития геодинамической модели Восточной Азии будет установление взаимного влияния отдельных компонент модели, а также уточнение параметров результирующей модели на основе имеющихся ГНСС- и геолого-геофизических данных.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Altamimi Z., Reischung P., Métivier L., Collilieux X., 2016. ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121 (8), 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>.

Apel E.V., Bürgmann R., Steblov G., Vasilenko N., King R., Prytkov A., 2006. Independent Active Microplate Tectonics of Northeast Asia from GPS Velocities and Block Modeling. *Geophysical Research Letters* 33 (11). <https://doi.org/10.1029/2006GL026077>.

Argus D.F., Gordon R.G., DeMets C., 2011. Geologically Current Motion of 56 Plates Relative to the No-Net-Rotation Reference Frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 12 (11). <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>.

Ashurkov S.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Lukhnev A.V., Sorokin A.P., Serov M.A., Byzov L.M., 2011. GPS Geodetic Constraints on the Kinematics of the Amurian Plate. *Russian Geology and Geophysics* 52 (2), 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.017>.

Ashurkov S.V., Sankov V.A., Serov M.A., Lukyanov P.Y., Bordonskii G.S., Grib N.N., Dembelov M.G., 2016. Evaluation of Present-Day Deformations in the Amurian Plate and Its Surroundings, Based on GPS Data. *Russian Geology and Geophysics* 57 (11), 1626–1634. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.008>.

Bulletin of the International Seismological Centre Catalog Search, 2021. Available from: http://www.isc.ac.uk/isc_bulletin/search (Last Accessed December 20, 2021).

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Yi-min Sun, 2017. The Latest Geodynamics in Central Asia: Primary and Secondary Mantle Melting Anomalies in the Context of Orogenesis, Rifting, and Lithospheric Plate Motions and Interactions. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (1), 45–80 (in Russian)

[Чувашова И.С., Рассказов С.В., Йи-минь Сунь. Новейшая геодинамика Центральной Азии: первичные и вторичные мантийные расплавные аномалии в контексте орогенеза, рифтогенеза и движения-взаимодействия литосферных плит // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 1. С. 45–80]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0232>.

DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S., 1994. Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions. *Geophysical Research Letters* 21 (20), 2191–2194. <https://doi.org/10.1029/94GL02118>.

Earthquakes of Russia, 2021. Database (in Russian) [Землетрясения России: База данных]. Available from: <http://eqru.gsras.ru> (Last Accessed December 20, 2021).

England P., Molnar P., 2005. Late Quaternary to Decadal Velocity Fields in Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 110 (B12). <https://doi.org/10.1029/2004JB003541>.

Fedotov S.A., 1968. On the Seismic Cycle, the Possibility of Quantitative Seismic Zoning and Long-Term Seismicity Forecasting. In: S.V. Medvedev (Ed.), *Seismic Zoning of the USSR*. Nauka, Moscow, p. 121–150 (in Russian) [Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР / Ред. С.В. Медведев. М.: Наука, 1968. С. 121–150].

Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S., Ashurkov S.V., Melnikova V.I., Serezhkina A.I., 2017. Geodynamic Activity of Modern Structures and Tectonic Stress Fields in Northeast Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 737–768 (in Russian) [Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С., Ашурков С.В., Мельникова В.И., Середкина А.И. Геодинамическая активность новейших структур и поля тектонических напряжений северо-востока Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 737–768]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0315>.

Kogan M.G., Bürgmann R., Vasilenko N.F., Scholz C.H., King R.W., Ivashchenko A.I., Frolov D.I., Steblov G.M., Kim Ch.U., Egorov S.G., 2003. The 2000 Mw 6.8 Uglegorsk Earthquake and Regional Plate Boundary Deformation of Sakhalin from Geodetic Data. *Geophysical Research Letters* 30 (3). <http://doi.org/10.1029/2002GL016399>.

Kuzmin Yu.O., 2013. Recent Geodynamics of the Faults and Paradoxes of the Rates of Deformation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 49, 626–642. <https://doi.org/10.1134/S1069351313050029>.

Laverov N.P., Lobkovsky L.I., Kononov M.V., Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A., Sokolov S.D., Shipilov E.V., 2013. A Geodynamic Model of the Evolution of the Arctic Basin and Adjacent Territories in the Mesozoic and Cenozoic and the Outer Limit of the Russian Continental Shelf. *Geotectonics* 47, 1–30. <http://doi.org/10.1134/S0016852113010044>.

Levi K.G., Sherman S.I., Sankov V.A., 2009. Recent Geodynamics of Asia: Map, Principles of Its Compilation, and Geodynamic Analysis. *Geotectonics* 43 (2), 152–165. <https://doi.org/10.1134/S001685210902006X>.

Levin B.V., Fitzhugh B., Burgeois D., Rybin A.V., Razzhigaeva N.G., Belousov A.B., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Nyushko T.I., Kharlamov A.A., Koroteev I.G., 2007. Complex Expedition to the Kuril Islands in 2006 (I Stage). *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences* 1, 144–148 (in Russian) [Левин Б.В., Фитцхью Б., Бурджуа Д., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г., Белоусов А.Б., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И., Ньюшко Т.И., Харламов А.А., Коротеев И.Г. Комплексная экспедиция на Курильские острова в 2006 г. (I этап) // Вестник ДВО РАН. 2007. № 1. С. 144–148].

Lobkovskii L.I., Ramazanov M.M., 2021. Investigation of Convection in the Upper Mantle Connected Thermomechanically with the Subduction Zone and Its Geodynamic Application to the Arctic Region and North East Asia. *Fluid Dynamics* 56, 433–444. <https://doi.org/10.1134/S001546282103006X>.

Lobkovsky L.I., 2016. Deformable Plate Tectonics and Regional Geodynamic Model of the Arctic Region and Northeastern Asia. *Russian Geology and Geophysics* 57 (3), 371–386. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.03.002>.

Lobkovsky L.I., Kerchman V.I., Baranov B.V., Pristavakina E.I., 1991. Analysis of Seismotectonic Processes in Subduction Zones from the Standpoint of a Keyboard Model of Great Earthquakes. *Tectonophysics* 199 (2–4), 211–236. [https://www.doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90173-P](https://www.doi.org/10.1016/0040-1951(91)90173-P).

Lobkovsky L.I., Ramazanov M.M., Kotelkin V.D., 2021a. Upper Mantle Convection Related to Subduction Zone and Application of the Model to Investigate the Cretaceous-Cenozoic Geodynamics of Central East Asia and the Arctic. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3), 455–470 (in Russian) [Лобковский Л.И., Рамазанов М.М., Котелкин В.Д. Развитие модели верхнемантийной конвекции, сопряженной с зоной субдукции, с приложениями к мел-кайнозойской геодинамике Центрально-Восточной Азии и Арктики // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3. С. 455–470]. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0533>.

Lobkovsky L.I., Shipilov E.V., Kononov M.V., 2013. Geodynamic Model of Upper Mantle Convection and Transformations of the Arctic Lithosphere in the Mesozoic and Cenozoic. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 49, 767–785. <https://doi.org/10.1134/S1069351313060104>.

Lobkovsky L.I., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Alekseev D.A., 2021b. Keyboard Model of Seismic Cycle of Great Earthquakes in Subduction Zones: Simulation Results and Further Generalization. *Applied Sciences* 11 (9), 9350. <https://doi.org/10.3390/app11199350>.

Lobkovsky L.I., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Steblov G.M., 2018. Seismotectonic Deformations Related to the 2011 Tohoku Earthquake at Different Stages of the Seismic Cycle on the Basis of Satellite Geodetic Observations. *Doklady Earth Sciences* 481, 1060–1065. <http://doi.org/10.1134/S1028334X18080159>.

Loveless J.P., Meade B.J., 2010. Geodetic Imaging of Plate Motions, Slip Rates, and Partitioning of Deformation in Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 115 (B2). <https://doi.org/10.1029/2008JB006248>.

Molnar P., Tapponnier P., 1978. Active Tectonics of Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 83 (B11), 5361–5375. <https://doi.org/10.1029/JB083iB11p05361>.

Sagiya T., Miyazaki S., Tada T., 2000. Continuous GPS Array and Present-Day Crustal Deformation of Japan. *Pure and Applied Geophysics* 157, 2303–2322. <https://doi.org/10.1007/PL00022507>.

Sankov V.A., 2014. Recent Geodynamics of Intracontinental Areas: Instrumental and Geomorphological Assessment of Crustal Movements and Deformation in Central Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 159–182 (in Russian) [Саньков В.А. Современная геодинамика внутриматериковых областей: инструментальные и геолого-геоморфологические оценки движений и деформаций земной коры Центральной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 1. С. 159–182]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0122>.

Savostin L.A., Verzhbitskaya A.I., Baranov B.V., 1982. Recent Plate Tectonics of the Sea of Okhotsk Region. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 266 (4), 961–965 (in Russian) [Савостин Л.А., Вержбицкая А.И., Баранов Б.В. Современная тектоника плит Охотоморского региона // Доклады АН СССР. 1982. Т. 266. № 4. С. 961–965].

Schellart W.P., Chen Z., Strak V., Duarte J.C., Rosas F.M., 2019. Pacific Subduction Control on Asian Continental Deformation Including Tibetan Extension and Eastward Extrusion Tectonics. *Nature Communications* 10, 4480. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12337-9>.

Sella G.F., Dixon T.H., Mao A., 2002. REVEL: A Model for Recent Plate Velocities from Space Geodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107 (B4), ETG 11-1–ETG 11-30. <https://doi.org/10.1029/2000JB000033>.

Seminsky K.Zh., Kozhevnikov N.O., Cheremnykh A.V., Pospееva E.V., Bobrov A.A., Olenchenko V.V., Tugarina M.A., Potapov V.V., Zaripov R.M., Cheremnykh A.S., 2013. Interblock Zones in the Crust of the Southern Regions of East Siberia: Tectonophysical Interpretation of Geological and Geophysical Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (3), 203–278 (in Russian) [Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.С., Поспеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потапов В.В., Зарипов Р.М., Черемных А.С. Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 3. С. 203–278]. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-3-0099>.

Seno T., Sakurai T., Stein S., 1996. Can the Okhotsk Plate Be Discriminated from the North American Plate? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 101 (B5), 11305–11315. <https://doi.org/10.1029/96JB00532>.

Shen Z.K., Zhao C., Yin A., Li Y., Jackson D.D., Fang P., Dong D., 2000. Contemporary Crustal Deformation in East Asia Constrained by Global Positioning System Measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105 (B3), 5721–5734. <https://doi.org/10.1029/1999JB900391>.

Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Kolomiets A.G., Gerasimov G.N., Takahashi H., Kasahara M., Bormotov V.A., Bykov V.G., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Timofeev V.Y., Ardyukov D.G., Kato T., 2011. Present Tectonics of the Southeast

of Russia as Seen from GPS Observations. *Geophysical Journal International* 184 (2), 529–540. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04871.x>.

Steblov G.M., Kogan M.G., King R.W., Scholz C.H., Burgmann R., Frolov D.I., 2003. Imprint of the North American Plate in Siberia Revealed by GPS. *Geophysical Research Letters* 30 (18). <https://doi.org/10.1029/2003GL017805>.

Tang Y., Obayashi M., Niu F., Grand S.P., Chen Y.J., Kawakatsu H., Tanaka S., Ning J., Ni J.F., 2014. Changbaishan Volcanism in Northeast China Linked to Subduction-Induced Mantle Upwelling. *Nature Geoscience* 7, 470–475. <https://doi.org/10.1038/ngeo2166>.

Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V., Boiko E.V., 2019. Modern Movements of the Crust Surface in Gorny Altai from GPS Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (1), 123–146 (in Russian) [Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В. Современные движения земной поверхности Горного Алтая по GPS-наблюдениям // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 1. С. 123–146]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-1-0407>.

Timofeev V.Yu., Gornov P.Yu., Ardyukov D.G., Malyshev Yu.F., Boiko E.V., 2008. GPS Measurements (2003–2006) in the Sikhote Alin Network, the Far East. *Russian Journal of Pacific Geology* 2, 314–324. <https://doi.org/10.1134/S1819714008040040>.

Vasilenko N.F., Prytkov A.S., 2012. GPS-Based Modeling of the Interaction between the Lithospheric Plates in Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology* 6, 35–41. <https://doi.org/10.1134/S1819714012010137>.

Vladimirova I.S., Lobkovsky L.I., Gabsatarov Y.V., Steblov G.M., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I., 2020. Patterns

of the Seismic Cycle in the Kuril Island Arc from GPS Observations. *Pure and Applied Geophysics* 177, 3599–3617. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02495-z>.

Wang M., Shen Z.-K., 2020. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived from GPS and Its Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125 (2), e2019JB018774. <https://doi.org/10.1029/2019JB018774>.

Yarmolyuk V.V., Kovalenko I.I., Ivanov V.G., 1995. Intraplate Late Mesozoic-Cenozoic Volcanic Province of Central-East Asia – Projection of the Hot Mantle Field. *Geotectonics* 5, 41–67 (in Russian) [Ярмолюк В.В., Коваленко И.И., Иванов В.Г. Внутриплитная позднемезозойская – кайнозойская вулканическая провинция Центрально-Восточной Азии – проекция горячего поля мантии // Геотектоника. 1995. № 5. С. 41–67].

Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Vorontsov A.A., 2013. West Pacific-Type Convergent Boundaries and Their Role in the Formation of the Central Asian Fold Belt. *Russian Geology and Geophysics* 54 (12), 1427–1441. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.012>.

Zhao D., Pirajno F., Dobretsov N.L., Liu L., 2010. Mantle Structure and Dynamics under East Russia and Adjacent Regions. *Russian Geology and Geophysics* 51 (9), 925–938. <https://doi.org/10.1016/J.RGG.2010.08.003>.

Zorin Yu.A., Sklyarov E.V., Belichenko V.G., Mazukabzov A.M., 2009. Island Arc-Back-Arc Basin Evolution: Implications for Late Riphean – Early Paleozoic Geodynamic History of the Sayan-Baikal Folded Area. *Russian Geology and Geophysics* 50 (3), 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.06.022>.