

Субдукция и рифтогенез – отражение колебательного тектогенеза на границах литосферных сегментов в вероятностно-детерминистских гравитационных моделях

А. М. Петрищевский

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, 679016, г. Биробиджан,
ул. Шолом-Алейхема, 4, e-mail: petris2010@mail.ru

Поступила в редакцию 06.09.2023 г., принята к печати 25.04.2024 г.

Объекты исследований. Конвергентные границы Евразийской, Северо-Американской, Тихоокеанской литосферных плит и протоокеанической плиты Южно-Китайского моря на Востоке Азии. **Цель исследований.** На основании тектонического анализа 3D реологических гравитационных моделей, сопоставляемых с существующими геолого-геофизическими данными, изучить глубинное строение зон сочленения литосферных плит и определить пространственно-временные взаимоотношения субдукционных и рифтогенных структур. **Материалы и методы.** Использованы наземные и морские гравиметрические наблюдения на территории РФ и мировой каталог гравиметрических данных Land Gravity Data.bgi.omp.obs-mip.fr, model: EGM08_CBA_global_2190_2.5m на территориях Юго-Восточного Китая и Японского моря. Основным методом исследований является гравитационный метод моделирования реологических свойств земной коры и верхней мантии по распределениям плотностной контрастности (дифференциации) геологических сред (авторский метод). **Результаты.** Выполнен анализ 3D распределений плотностных неоднородностей в тектоносфере Северо-Востока России, Япономорского региона, Сихотэ-Алиня и Юго-Восточного Китая, в результате которого в Восточной Азии выявлены одинаковые следы тектонических процессов на границах литосферных сегментов, отражающие их направленно-колебательный характер. Следы субдукционных процессов обнаружены в форме наклонных жестких тектонических пластин, отражаемых максимумами плотностной контрастности и пододвинутых под континентальную окраину и островные дуги. Однако они не были постоянными и периодически прерывались откатами, или разрывами, субдуцирующих слэбов под воздействием рифтогенных и трансформных сдвиговых процессов. По времени проявления рифты и сопряженные с ними сдвиги смещались по направлению от автохтонных сегментов к аллохтонным: на Северо-Востоке Азии – от Северо-Азиатского кратона к Северо-Американской плите, на востоке Азии – от континента к Тихому океану, а на юго-востоке – от протоокеанической плиты Южно-Китайского моря к плите Янцзы. **Выводы.** Установленные черты строения и геодинамической эволюции конвергентных зон являются универсальными характеристиками верхних твердых оболочек Земли (кора и нижняя литосфера), перемещающихся над подкоровым вязким слоем и астеносферой под влиянием колебательных напряжений, обусловленных, скорее всего, изменениями параметров вращения Земли. Во всех четырех регионах обнаружена одинаковая последовательность субдукционных и рифтогенных процессов: субдукция, сопровождаемая надвиганием верхнекорового слоя на автохтонные сегменты, неоднократно прерывалась разрывами коровых и литосферных пластин и образованием структур растяжения-сдвига. Субдукция не является главным и определяющим тектоническим процессом в зонах конвергенции литосферных плит, а представляет собой частный элемент колебательного тектогенеза.

Ключевые слова: гравитационные модели, земная кора, верхняя мантия, реология, субдукция, рифтогенез, Восточная Азия

Источник финансирования

Работа выполнена в соответствии с темой научных исследований, утвержденной государственным заданием Министерства науки и высшего образования “Дальний Восток России как часть Восточной Азии: закономерности и региональные особенности геологического строения и динамики геосистем” № FWUG-2024-0004 / 1021062311240-7-1.5.6;1.5.5.1

Subduction and rifting – reflect of oscillatory tectonic processes on boundaries of the lithosphere segments in the probable-deterministic gravity models

Для цитирования: Петрищевский А.М. (2024) Субдукция и рифтогенез – отражение колебательного тектогенеза на границах литосферных сегментов в вероятностно-детерминистских гравитационных моделях. *Литосфера*, 24(6), 943–961. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-6-943-961>

For citation: Petrishchevsky A.M. (2024) Subduction and rifting – reflect of oscillatory tectonic processes on boundaries of the lithosphere segments in the probable-deterministic gravity models. *Lithosphere (Russia)*, 24(6), 943–961. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-6-943-961>

Alex M. Petrishchevsky

*Institute of Complex Analysis of Regional Problems, FEB RAS, 4 Sholom Aleikhem st.,
Birobidzhan 679016, Russia, e-mail: petris2010@mail.ru*

Received 06.09.2023, accepted 05.04.2024

Research subject. Convergent boundaries of the Euroasian, North American, Pacific lithosphere plates and protooceanic plate of the South China Sea on the Eastern Asia. **Aim.** On the base of tectonic analysis of 3D rheological gravity models compared with another geologic-geophysical data to study deep structures in zones of joint of lithosphere plates and to define space-time relations between subduction and rift structures. **Material and Methods.** Land and seas gravity measurements on the Russian territory and Land Gravity Data.bgi.omp.obs-mip.fr, модель: EGM08_CBA_global_2190_2.5m on the territories of South East China and Sea of Japan were used. Main method of research is the gravity method for modeling of rheological properties of the crust and upper mantle by distributions of the density contrast (differentiation) of geological media (authors method). **Results.** Analysis of 3D distributions of density inhomogeneities in a tectonosphere of the North East Russia, Japan Sea Region, Sikhote Alin and South East China is carried out, as a result of which in the Eastern margin of Asia identical traces of tectonic processes on boundaries of the lithosphere plates, reflected their directed-oscillatory character are revealed. Traces of the subduction processes has been founded in a shape of inclined rigid sheets (slabs) reflected by maximums of the density contrast and moved under continental margin and island arcs. However the subduction was not constant in time and periodically was interrupted by kickbacks and gaps of subducting slabs under influence of rifting and transform-shift processes. In time the rifts and attendant their shifts have been displaced in a direction from autochthonous to allochthonous segments: in the North East Asia from North Asian Craton to North American plate, on the Eastern Asia – from the continent to Pacific, and on the South East Asia – from the South China Sea Plate to Yangtze plate. **Conclusions.** Revealed features of a structure and geodynamic evolution of convergent zones are universal characteristics of upper rigid layers of the Earth (crust and lower lithosphere) moved above subcrustal viscous layer and asthenosphere under influence of the oscillation tensions, caused, most likely, by deviation of the Earth rotation parameters. In all of four areas identical sequence of subductional and rifting processes has been revealed. A subduction accompanied by thrusting of the upper crust layer over autochthonous segments was repeatedly interrupted by gaps of crustal and lithosphere sheets and a formation of stretch-shift structures. Subduction is not main and defining process in the convergent boundaries of lithosphere plate, but represents a privet element of the oscillatory tectogenesis.

Keywords: gravity models, crust, upper mantle, rheology, subduction, rifts, Eastern

Funding information

The work carried out corresponding with the project of science research, affirmed by government task of the Science and High Education Ministry: “Far East Russia as a part of the Eastern Asia: conformities to nature laws and regional particularities of geological structures and dynamics of geo-systems” № FWUG-2024-0004 / 1021062311240-7-1.5.6;1.5.5.1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

По устоявшемуся мнению, главным тектоническим процессом на конвергентных границах литосферных плит является субдукция, к которой привязываются аккреция турбидитовых комплексов, складчатость, магматизм, тектонические покровы и металлогения. Субдукция, или пододвигание, нижней литосферы активных” (аллохтонных) сегментов под автохтонные проявлена в распределениях скорости сейсмических волн (Huang, Zhao, 2006; Кулаков и др., 2011) и гипоцентров землетрясений (Геодинамика..., 2006; Huang, Zhao, 2006). Время проявления субдукционных процессов определяется по возрасту надсубдукционных вулканических толщ (Liu et al., 2017; Емельянова и др., 2020).

Рифтогенные процессы, как правило, рассматриваются отдельно от субдукционных и подразделяются на активные и пассивные. Первые характеризуются разрывами или сокращениями мощности литосферы, сопровождающимися прогибанием верхнего слоя земной коры и заполнением прогибов мезозойско-кайнозойскими терригенными и вулканическими комплексами. Вторые ха-

рактеризуются гравитационным сползанием коровых пластин, или блоков, в сторону от автохтонных сегментов (Morley et al., 1989). По месту проявления рифты подразделяются на протоокеанические (спрединговые), задуговые и интраконтинентальные. Протоокеанические рифты сопровождаются симметричными относительно оси спрединга магнитными аномалиями, по которым определяется возраст рифтов (Quin et al., 2019). Время проявления других рифтогенных процессов определяется по возрасту заполняющих их терригенно-вулканических комплексов.

Геологическими доказательствами существования рифтов являются осадочные бассейны линейной формы в протяженных зонах того же простирания и сходство тектонических комплексов фундамента по обе стороны от этих зон. Так, например, определена рифтогенная природа Японского и Желтого морей.

Наши предшествующие исследования (Петрищевский и др., 2021) показали тесную пространственную связь субдукционных и рифтогенных процессов на восточной окраине Азии и привели к выводу, что оба эти процесса взаимосвязаны и яв-

ляются отражением двух сторон единого колебательно направленного тектогенеза на границах литосферных сегментов. В данной статье мы суммируем известные и приводим новые данные о реологии и глубинном строении конвергентных структур, основывающиеся на тектоническом анализе вероятностно-детерминистских гравитационных моделей. Такие модели априорно не связаны с предшествующими геолого-геофизическими моделями, однако их рассмотрение в комплексе со всеми имеющимися данными на завершающем этапе интерпретации гравитационных аномалий позволяет открывать новые черты и закономерности глубинного строения конвергентных структур.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Метод, результаты применения которого представлены ниже, обеспечивает локализацию плотностных неоднородностей 3D геологического пространства независимо от природы и относительно знака гравитационных возмущений. Этот метод диагностирует не относительную эффективную избыточную плотность геологических тел и структур, а плотностную дифференциацию геологического пространства, описываемую μ_z -параметром (Петрищевский, 2013а, 2020) – “плотностную контрастность” микститовой среды. Этот параметр отражает плотностную дифференциацию сложных систем геологических неоднородностей, аппроксимируемых эквивалентными сферическими источниками, на поверхность которых выметаются по Пуанкаре (Evans, 1933) аномальные массы объемных неоднородностей.

Опыт проведенных исследований (Петрищевский, 2008; 2013а, б; 2016а; Петрищевский, Юшманов, 2021) показывает, что плотностная контрастность (дифференциация) геологических сред связана с их реологическим состоянием. В более вязких (жестких) средах плотностная дифференциация выше, а в менее вязких (пластичных или текучих) – ниже. Поэтому высоким и повышенным значениям μ_z -параметра соответствуют древние жесткие метаморфические блоки кратонов и террейны кратонного типа, а низким и пониженным значениям – зоны дробления и трещиноватости, аккреционные призмы и турбидитовые террейны, а также зоны флюидно-гидротермальной проработки в разломах и апикальных частях структур центрального типа разного ранга. В разрезах земной коры максимальным значениям плотностной контрастности повсеместно соответствуют гранитно-метаморфический и нижнекоровый мафический слои земной коры, разделяемые тонким слоем пониженной вязкости. В верхней мантии высоким значениям μ_z -параметра соответствует нижний жесткий слой литосферы. В разрезах тектоносферы низкие значения μ_z -параметра повсеместно сов-

падают с зонами пониженных скоростей сейсмических волн и удельных электрических сопротивлений (Петрищевский, 2008; 2013а, б; 2016а).

Интерпретационная процедура относится к классу вероятностно-детерминированных (Балк и др., 2011). Вероятность заключается в том, что интерпретируются аномалии не от конкретных геологических тел или структур, а от областей источников с неизвестным распределением плотностных неоднородностей внутри них. Пересечения областей являются случайными. Детерминированность заключается в том, что центры этих областей и распределения плотностной контрастности между центрами и поверхностями эквивалентных сфер вычисляются однозначно при широких начальных условиях ($Z > 0.5D$, $5 < H/D < 0.15$) (Петрищевский, 2013а, 2020), где Z – глубина до поверхности источника гравитационной аномалии, D – его горизонтальные размеры, H – вертикальная мощность. Математические основы и технология построения вероятностно-детерминистских гравитационных реологических моделей приводятся в работах (Петрищевский, 2013а, 2020; Петрищевский, Юшманов, 2021).

ВЕРОЯТНОСТНО-ДЕТЕРМИНИСТСКИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ КОНВЕРГЕНТНЫХ СТРУКТУР

Северо-восточные границы Азии

Пограничной структурой между Азиатским континентом и Тихоокеанской литосферной плитой на северо-востоке Азии является Охотско-Чукотский вулканический пояс (рис. 1г). К западу от него располагаются структуры с архейско-протерозойским фундаментом складчатых толщ, а к востоку – Охотоморская субокеаническая плита и Корякская покровно-надвиговая система с фундаментом океанического типа. Между континентальными и окраинными структурами регистрируется резкое структурное несогласие, проявленное в складчатости и распределениях плотностных неоднородностей (см. рис. 1а–в).

Субдукция Охотоморской (разрез 2-2 на рис. 1) и Тихоокеанской (разрез 1-1 на рис. 1) плит под окраину континента выражена пододвиганием клиновидных жестких пластин под вулканический пояс и далее – под земную кору Евразийской плиты (разрез 2-2). На крайнем востоке также проявлено пододвигание тихоокеанской литосферы под Корякскую систему (разрез 1-1).

В распределениях плотностной контрастности Охотско-Чукотский вулканический пояс (ОЧВП) характеризуется типичными чертами рифтогенных структур (Петрищевский, 2019): верхний слой земной коры прогнут (см. рис. 1а), а нижний – выгнут (см. рис. 1б) относительно земной поверхности.

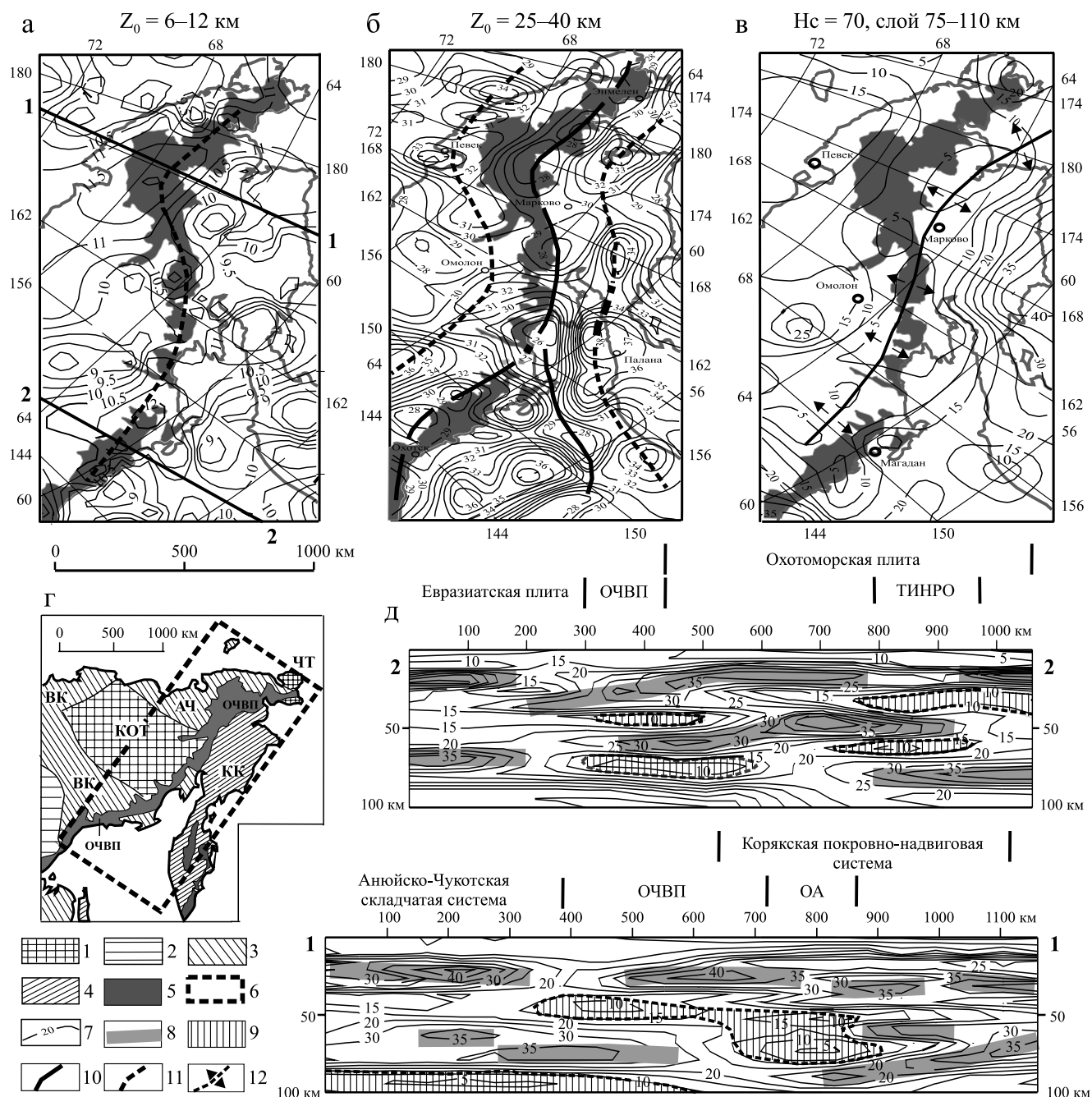


Рис. 1. Распределение центров плотностных неоднородностей (а, б) и плотностной контрастности (в, д) с обзорной схемой тектонических структур Северо-Восточной Азии (г).

1 – Колымо-Омолонский супертерреин; 2 – чехол Северо-Азиатского кратона; 3, 4 – складчатые системы мезозойские (3) и кайнозойские (4); 5 – Охотско-Чукотский вулканический пояс; 6 – контур гравитационной модели (а–в); 7 – изолинии глубин залегания центров плотностных неоднородностей (км) на схемах “а”, “б” и плотностной контрастности (1 ед. = 10^{-2} кг/м²/км) на схеме “в”; 8 – жесткие пластины в разрезах; 9 – зоны пониженной вязкости в разрезах; 10, 11 – оси зон поднятий (10) и прогибов (11); 12 – ось зоны растяжения на схеме “в”. Нс – глубина среза 3D модели плотностной контрастности. Обозначения тектонических структур: складчатые системы: ВК – Верхояно-Колымская, АЧ – Аньюиско-Чукотская, КК – Корякско-Камчатская; ОЧВП – Охотско-Чукотский вулканический пояс; ОА – Охотско-Анадырский рифт; ТИНРО – осадочный бассейн.

Fig. 1. Distributions of centers of density unhomogeneities (а, б) and density contrast (в, д) with the scheme of tectonic structures of Northeast Asia (г).

1 – Kolymo-Omolonsky superterrine; 2 – cover of the North Asian craton; 3, 4 – Mesozoic (3) and Cenozoic (4) folded systems; 5 – Okhotsk-Chukotka volcanic belt; 6 – contour of gravity model (а–в); 7 – isolines of the density unhomogeneity centers (km)

on schemes “a”, “б” and density contrast (1 unit = 10^{-2} kg/m²/km) on the scheme “в”; 8 – rigid plates in sections; 9 – zones of the lowered viscosity in sections; 10, 11 – axes of uplifts (10) and saggings (11); 12 – the stretch zone axis on the scheme “в”. Нс – depth of the map-slices of 3D model of density contrast. Designations of tectonic structures: folded systems: ВК – Verkhoyano-Kolymsky, АЧ – Anyuysko-Chukotsky, КК – Koryak and Kamchatka; ОЧВП – the Okhotsk-Chukchi volcanic belt; ОА – Okhotsk-Anadyr rift; ТИНРО – sedimentary basin.

Астеносфера, отображаемая минимумом плотностной контрастности, приближена до глубины 70 км (см. рис. 1в). Подтверждается версия Яншина–Хаина–Гатинского (Яншин и др., 1984), которые характеризовали ОЧВП как окраинно-материковую структуру растяжения на границе литосферных плит. В.Ф. Белый (1981) начало формирования ОЧВП относит к альбскому времени, а конец – к кампану. На протяжении этого периода вулканические излияния происходили неравномерно и, по разным оценкам (Стружков, Константинов, 2005; Акинин, 2012), здесь выделяют от четырех до семи пиков вулканической активности, максимум которой (более 20% общего объема вулканитов) приходится на период 84–88 млн лет, который соответствует средней толще вулканического разреза. S-образная форма ОЧВП объясняется левосторонним трансформным сдвигом (Ханчук, Иванов, 1999). В разрезах 3D μ_z -модели (см. рис. 1г) ОЧВП располагается в зоне разрывов коровой и нижней литосферной жестких пластин.

Вулканический пояс сопровождается вязкими линзами (минимумами плотностной контрастности) в подкоровом слое (см. рис. 1д) – вероятными магматическими источниками вулканических масс на поверхности Земли. Со стороны Охотского моря под ОЧВП пододвинуты клиновидные жесткие коровая и нижняя литосферная пластины (разрез 2-2 на рис. 1д), и это указывает на то, что охотоморская субдукция продолжалась после раскрытия Охотско-Чукотского вулканического рифта.

Следующая активизация рифтогенеза в этом регионе произошла в палеогене, и она сместилась к востоку на 200 км (рис. 2б). Кайнозойский Охотско-Анадырский рифт выражен поясом впадин: ТИНРО → Шелехова → Пенжинская → Марковская → Анадырская. Крупные впадины (ТИНРО и Анадырская) сопровождаются сокращением мощности нижнекорового слоя (см. рис. 1б) и разрывами жестких коровых пластин, а ниже регистрируются подкоровые и астеносферные зоны пониженной вязкости (см. рис. 1д), как и под ОЧВП. Это характеризует принадлежность этих впадин к рифтовой системе.

Таким образом, на окраине Северо-Восточной Азии наблюдается проявление двух рифтогенных процессов, чередующихся во времени с охотоморской на юге (K_2) и тихоокеанской на севере ($Pg-Q$) субдукциями литосферных плит.

История повторяется в зоне коллизии Тихоокеанской плиты с Камчатской композитной островной дугой (рис. 3). Здесь в распределениях плот-

ностной контрастности хорошо проявлена современная субдукция Тихоокеанской плиты (см. рис. 3б–д). Центрально-Камчатский вулканический пояс (ЦКВП) приурочен к широкой зоне минимума плотностной контрастности (см. рис. 3д), характерной для рифтов (Петрищевский, 2019).

Утолщение нижнекорового слоя (см. рис. 3б) и литосферы (см. рис. 3в) в западной части Камчатского полуострова связано с существованием в этом районе Западно-Камчатской островной дуги второго порядка (Коваленко, 2001; Богданов, Чехович, 2002), на которую позднее наложен ЦКВП. Островная дуга, как и большинство таких структур (Родников, 1979), характеризуется признаками сжатия: в верхнекоровом слое (см. рис. 3а) регистрируется поднятие, а в нижнекоровом (см. рис. 3б) – погружение плотностных неоднородностей.

Восточно-Камчатский вулканический пояс приурочен к фронтальной зоне тихоокеанского субдуцирующего слэба (см. рис. 3в, г) и неодинаково отображается в гравитационных моделях по простиранию пояса. В южной части наблюдаются инверсные соотношения верхнекоровых (поднятие на рис. 3а) и нижнекоровых (прогиб на рис. 3б) плотностных неоднородностей, характерные для структур сжатия, а в северной части, наоборот, – прогибание в среднекоровом слое и поднятие в нижней коре, что обычно для структур растяжения. Этот пояс находится в начальной стадии формирования.

В переходном слое литосфера-астеносфера структура сжатия (литосферное основание Западно-Камчатской островной дуги) смещена под Западно-Камчатский шельф (см. рис. 3в), а еще западнее в распределениях плотностных неоднородностей (см. рис. 3в) проявлен нижний ярус Охотско-Анадырского рифта.

По совокупности рассмотренных моделей (см. рис. 2, 3) предполагается следующая схема эволюция процессов субдукции, сжатия и растяжения в этом районе переходной зоны континент–океан:

- меловая субдукция Тихоокеанской плиты под континент, сопровождаемая сжатием и утолщением коры (см. рис. 1б);

- позднемеловой откат субдуцирующих слэбов, обусловивший растяжение и образование в ее зоне рифтогенного ОЧВП;

- кратковременное возобновление субдукции в начале палеогена с частичным проникновением жестких пластин в зону ОЧВП (см. рис. 1д);

- образование структур растяжения второго порядка на меловой границе континента (Татарский

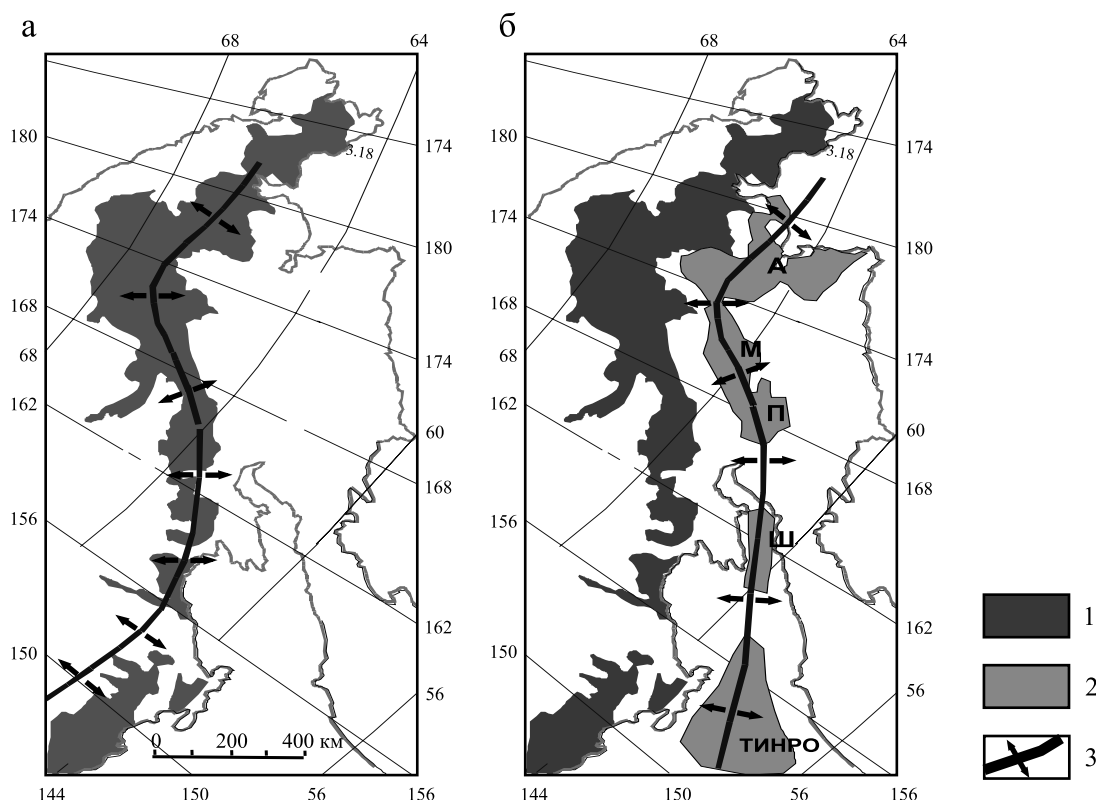


Рис. 2. Миграция рифтогенных процессов на северо-восточной окраине Азии.

1 – Охотско-Чукотский вулканический пояс, 2 – Охотско-Анадырский рифт, 3 – оси зон растяжения.
а – K₂, б – Pg–N.

Fig. 2. Migration of rifting processes on the Northeast Asian margin.

1 – Okhotsk-Chukotsky volcanic belt, 2 – Okhotsk-Anadyr rift, 3 – axes of stretching zones.
a – K₂, б – Pg–N.

и Северо-Охотский рифты) (Петрищевский и др., 2021);

– формирование новой региональной Охотско-Анадырской зоны растяжения, сопровождавшейся образованием цепи кайнозойских наложенных впадин (см. рис. 2) и Дерюгинского рифта западнее о-ва Сахалин (Петрищевский, 2016б);

– кайнозойская субдукция Тихоокеанской плиты под Камчатскую композитную островную дугу (см. рис. 3б) и далее – под Охотоморскую плиту (см. рис. 3д);

– неоген-олигоценовый рифтогенез в Центральной Камчатке и на западной границе Тихоокеанской плиты, обусловивший образование Центрально-Камчатского вулканического пояса (см. рис. 3а) и Южно-Охотского рифта;

– четвертичная (современная) субдукция Тихоокеанской плиты, сопровождаемая интенсивной сейсмичностью (Геодинамика..., 2006).

Закономерное чередование субдукционных и рифтогенных процессов в течение короткого геологического времени (100–120 млн лет) является

признаком направленно-колебательного тектогенеза на границах литосферных сегментов, и эти процессы смещаются во времени и пространстве. При этом субдукционные процессы носят прерывисто-направленный характер, а рифтогенные – связаны с периодическими реактивными откатами субдирирующих слэбов. Колебательный тектогенез, вероятно, инициируется колебанием ротационных напряжений в литосферной оболочке, вызванных вариациями параметров вращения Земли.

Конвергенция Евразийской и Северо-Американской плит

В среднем палеозое и вплоть до юрского времени между Евразийской и Северо-Американской плитами существовал Оймяконский (Геодинамика..., 2006, или Южно-Анюйский (Тектоника..., 2001), океанический бассейн, а с начала мела на его территории началось приращение к Евразии микротеррейнов, в основном островодужного происхождения. Эта территория получи-

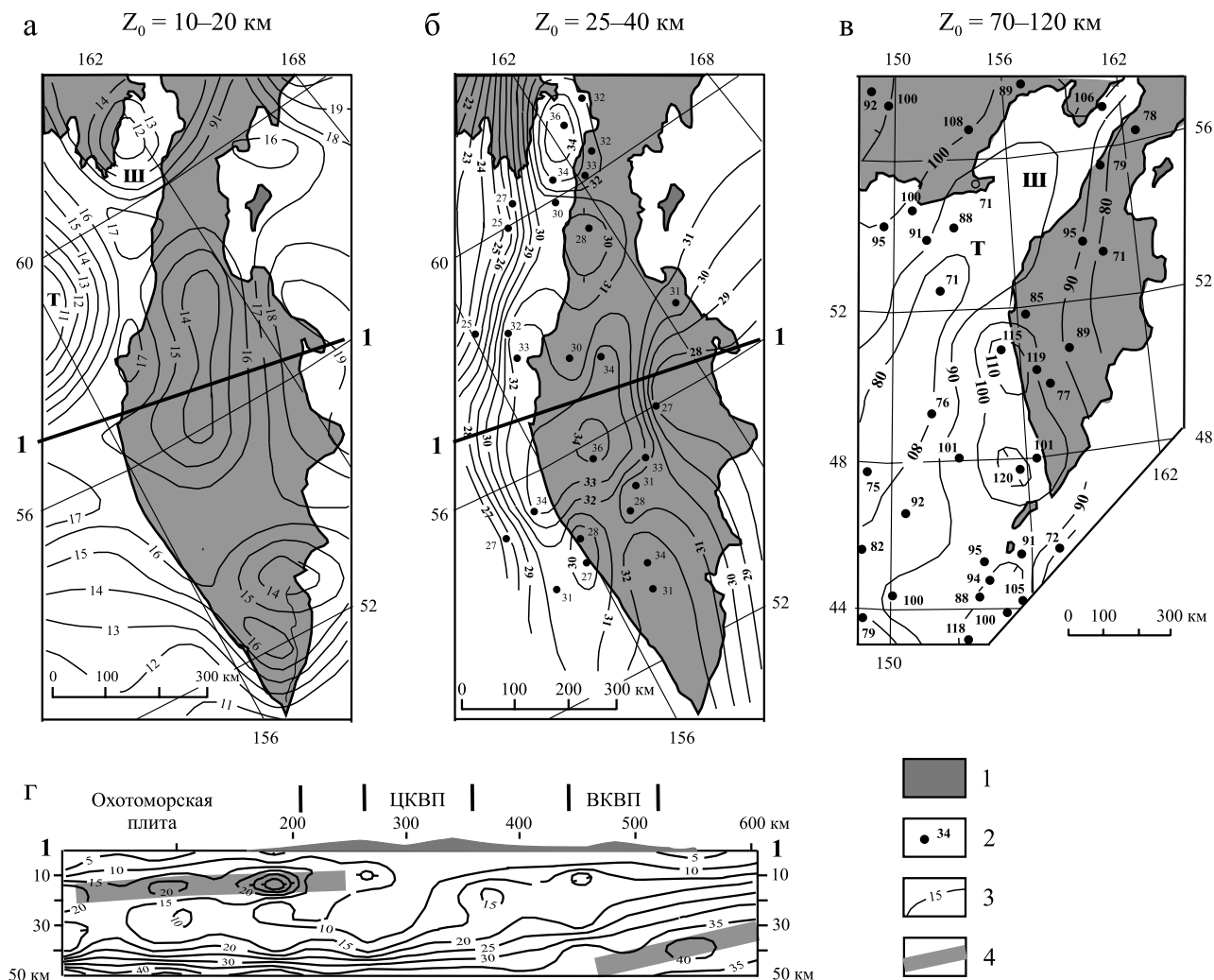


Рис. 3. Распределение центров плотностных неоднородностей в земной коре Камчатского полуострова (а, б) и переходном слое “литосфера-астеносфера” в северном районе Охотского моря (в) с разрезом μ_z -модели (г).

1 – суша; 2 – глубина центра масс, км, в точках расчета; 3 – изолинии плотностной контрастности (1 ед. = 10^{-2} кг/м²/км) в разрезе 1-1; 4 – оси жестких пластин. Вулканические пояса: ЦКВП – Центрально-Камчатский, ВКВП – Восточно-Камчатский; осадочные бассейны: Т – ТИНРО, Ш – Шелихова.

Fig. 3. Distributions of the density unhomogeneity centers into the crust of the Kamchatka peninsula (a, б) and transitional layer “lithosphere-asthenosphere” in the northern region of the Sea of Okhotsk (в) with the section of μ_z -model (г).

1 – land; 2 – depth of the mass centers, km, in the calculation points; 3 – isolines of density contrast (1 unit = 10^{-2} kg/m²/km) in the section 1-1; 4 – axes of rigid plates. Volcanic belts: ЦКВП – Central Kamchatka, ВКВП – East Kamchatka; basins: Т – ТИНРО, Ш – Shelikhova.

ла название Колымо-Омолонского супертеррейна (КОТ) и включена в состав Северо-Американской плиты (САП) на основании сходства тектонических комплексов. Нашими предшествующими исследованиями (Ханчук, Петрищевский, 2007) обнаружены признаки литосферной целостности этой структуры и ее обособленности от окружающих литосферных сегментов. Установлены общие черты глубинного строения КОТ, Охотоморской и Амурской литосферных плит второго поряд-

ка. От Северо-Азиатского кратона, Охотоморской и Северо-Американской плит КОТ отделен глубинными зонами растяжения – разрывами нижнего слоя литосферы (рис. 4а). По этим признакам территории КОТ отнесена нами к одноименной литосферной буферной плите окраинно-морского происхождения.

В разрезах 3D μ_z -модели (рис. 4б) ясно проявлена субдукция САП под Колымо-Омолонский супертеррейн, и это значит, что литосфера КОТ бы-

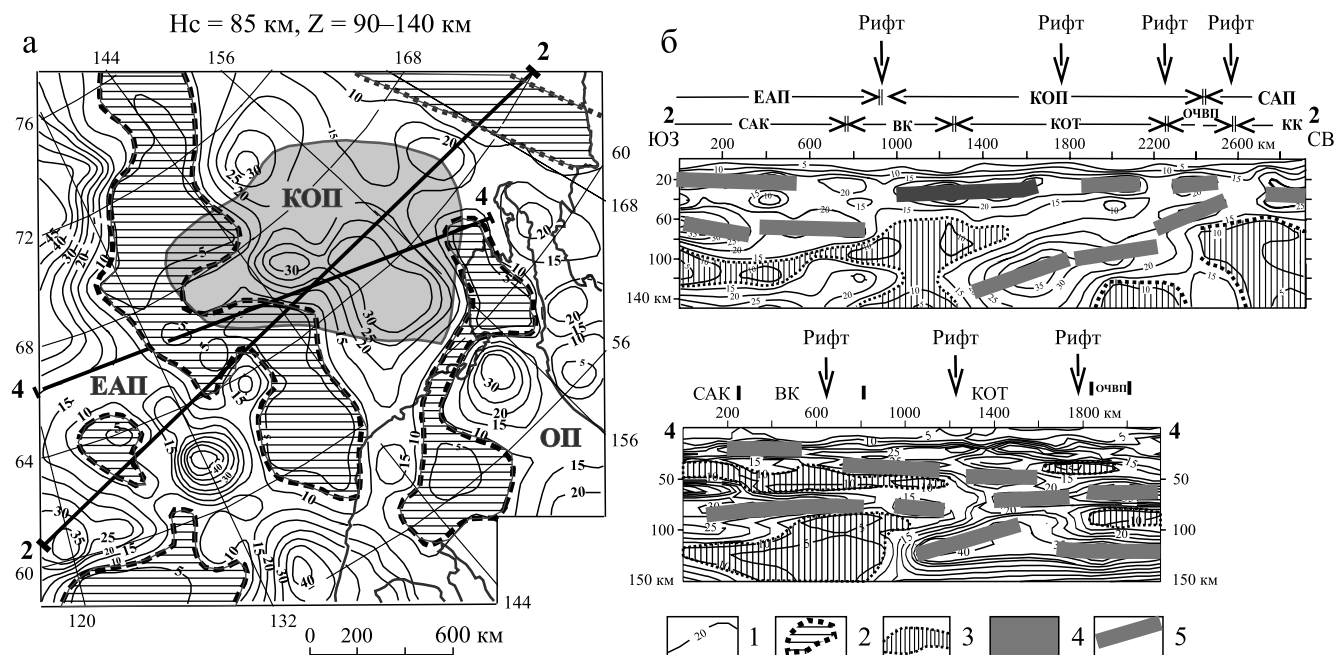


Рис. 4. Плотностная контрастность в плане (а) и разрезах (б) тектоносферы Северо-Восточной Азии.

1 – изолинии плотностной контрастности; 2, 3 – зоны пониженной вязкости в плане (2) и разрезах (3); 4 – Колымо-Омолонский супертеррейн; 5 – жесткие пластины. Плиты: ЕАП – Евразийская, САП – Северо-Американская, КОП – Колымо-Омолонская, ОП – Охотоморская; САК – Северо-Азиатский кратон; ВК – Верхояно-Колымская складчато-надвиговая система, КОТ – Колымо-Омолонский супертеррейн, КК – Корякско-Камчатская покровно-надвиговая система, ОЧВП – Охотско-Чукотский вулканический пояс.

Fig. 4. The tectonosphere density contrast between North American and Eurasian plates in the lithosphere-asthenosphere depth interval (a) with sections of 3D μ_z -model (b).

1 – isolines of density contrast; 2, 3 – zones of the lowered viscosity in map-slices (2) and sections (3); 4 – Kolymo-Omolonsky superterraine; 5 – rigid plates in sections. Plates: EAP – Eurasian, SAP – North American, KOP – Kolymo-Omolonsky, OP – Sea of Okhotsk; SAK – North Asian craton, VK – Verkhoyano-Kolymsky thrust-folded system, KOT – Kolymo-Omolonsky superterraine, KK – Koryak-Kamchatka napp-thrust system, OCHVP – the Okhotsk-Chukchi volcanic belt.

ла жесткой до начала субдукции. Субдуцирующий слэб изменяет свое положение в пространстве по мере погружения в мантию, и эти смещения сопровождаются разрывами нижнего слоя земной коры (см. рис. 4б), что характерно для рифтогенных структур. Распределение плотностной контрастности показывают, что субдукция САП не является непрерывной и одноактной, а чередуется с рифтогенными процессами.

Детализация 3D μ_z -модели плотностной контрастности литосферы Верхояно-Колымского региона, построенной по двум перпендикулярным системам расчетных профилей (рис. 5б), иллюстрирует распределения плотностных неоднородностей в земной коре (см. рис. 5а, б). Здесь в зонах разрыва литосферы на границах сегментов (см. рис. 4) проявлены коровые зоны растяжения (линейные минимумы плотностной контрастности), одна из которых – Верхояно-Колымская – известна также под названием зоны Адыча-Тенькинского (Тенькинского) глубинного разлома (Шахтыров, 1997). По полученным данным, зона растяжения занимает наклонное поло-

жение и по ней происходит надвигание земной коры Северо-Американской плиты на Колымо-Омолонский супертеррейн (см. рис. 5в). Соответственно, в плане зона растяжения изменяет свое положение в разных глубинных срезах (см. рис. 5а, б).

Существование многочисленных растяжений в зоне субдукции САП свидетельствует о том, что субдукция часто прерывалась рифтогенными растяжениями и эти процессы носили колебательный характер: усиления субдукции сопровождались аккрецией приповерхностных турбидитовых комплексов и формированием складчатых зон (Иньяли-Дебинской, Илин-Тасской, Олойской, Березовской), причленением к континенту микроконтинентов (Омолонского, Приколымского) и геоантиклинальных поднятий (Омулевского, Уяндинского, Улахан-Тасского), а периоды растяжений – образованием рифтогенных структур (Момский рифт), офиолитовых и андезитово-базальтовых поясов (Южно-Анхойского, Алазейского) в раздвиговых зонах (Тильман, Богданов, 1992; Тектоника..., 2001).

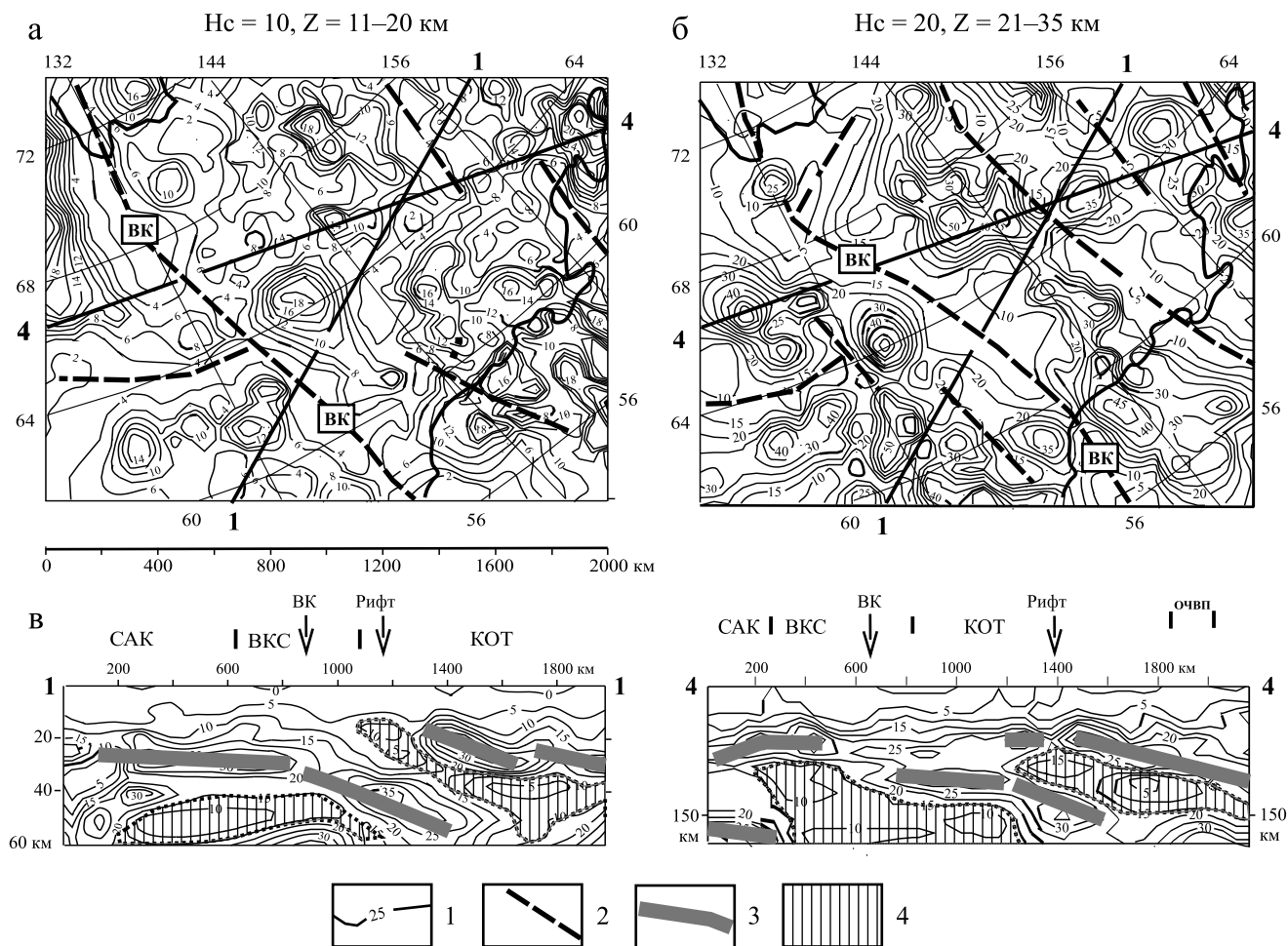


Рис. 5. Карты-срезы (а, б) и разрезы (в) 3D модели плотностной контрастности земной коры Индигиро-Колымского региона.

1 – изолинии плотностной контрастности, 2 – оси зон растяжения, 3 – жесткие пластины в разрезах, 4 – зоны пониженной вязкости. ВКС – Верхояно-Колымская складчато-надвиговая система, ВК – Верхояно-Колымская зона растяжения, САК – Северо-Азиатский кратон, КОТ – Колымо-Омолонский супертеррейн, ОЧВП – Охотско-Чукотский вулканический пояс.

Fig. 5. Nap-slices (a, б) and sections (в) of 3D model of density contrast into the crust the Indigiro-Kolymsky region.

1 – isolines of density contrast, 2 – axes of stretching zones, 3 – rigid plates in sections, 4 – zones of lowered viscosity. BKC – Verkhoyano-Kolymsky thrust-folded system, BK – the Verkhoyano-Kolymsky stretching zone, CAK – North Asian Craton, KOT – Colima-Omolon super terraine, ОЧВП – Okhotsk-Chukotskiy volcanic belt.

Юго-восточная граница Азиатского континента

В Юго-Восточной Азии центральное место занимает плита Янцзы (рис. 6), которая на севере граничит с Северо-Китайским кратоном (СКК), а на юге – с Катазиатским блоком. Последний граничит с Южно-Китайским морем, литосфера которого, по разным предположениям, является либо фрагментом древней плиты Гондваны (Shu et al., 2011), либо – фрагментом протоокеанической плиты (Wu, Suppre, 2015). Северная граница характеризуется северо-восточным вектором тектонических напряжений, а южная – северо-западным. На границе

плиты Янцзы с Северо-Китайским кратоном располагается коллизийный (компрессионный) ороген Кунлинь-Даби, выраженный максимумами плотностной контрастности в нижнем слое земной коры (см. рис. 6а) и нижней литосфере (см. рис. 6б). В его пределах сопряжены архейско-протерозойские, палеозойские и мезозойские структуры, в сильной степени деформированные, метаморфизованные и пронизанные палеозойскими и мезозойскими гранитоидами, диоритами, габбро и эглогитами (Hacker et al., 2004; Wu, Zheng, 2013).

Как и на всей территории Восточной Азии (Петрищевский, 2008), земная кора и нижний слой литосферы в рассматриваемом регионе разделены

1 – изолинии плотностной контрастности; 2 – разломы (Ren et al., 2002; Wang et al., 2010; Liu et al., 2015): Т – Танлу, Ш – Шаньдан, Д – Дахоньшан, ЧЛ – Ченжоу-Линву; 3 – зоны растяжения: 1 – Катазиатская, 2 – Ордос-Сычуань-Нанпаньянг, 3 – Северо-Кунлинская; 4 – жесткие пластины в разрезах; 5 – зоны пониженной вязкости в разрезах. СКК – Северо-Китайский кратон, КД – коллизионный пояс Кунлин-Даби, КА – Катазиатский блок, КСЦТ – Катазиатская структура центрального типа (Петрищевский и др., 2021), Б-ТХ – осадочные бассейны Бохайвань и Тайкань-Хефей.

Fig. 6. Density contrast of tectonosphere in the Southeast of the Asian continent: map-slices (a–г) and section (д) of 3D model of the density contrast.

1 – isolines of density contrast; 2 – faults (Ren et al., 2002; Wang et al., 2010; Liu et al., 2015): Т – Tanlu, Ш – Shandang, Д – Da-khonshan, ЧЛ – Chenzhou-Linvu; 3 – stretching zones: 1 – Katasian, 2 – Ordos-Sichuan-Nanpaniang, 3 – North Kunlin; 4 – rigid plates in sections. 5 – zones of lowered viscosity. СКК – the North China craton, КД – collision belt Kunlin-Dabi, КА – Katasian block, КСЦТ – Katasian structure of the central type (Petrishchevsky et al., 2021), Б-ТХ – Bohai and Taykan-Hefei.

слоем пониженной вязкости (минимумом плотностной контрастности), который в плане укладывается в границы плиты Янцзы (см. рис. 6в). Большинство исследователей этого региона (Hacker et al., 2004; Wu et al., 2013; Liu et al., 2015) предполагают субдукцию плиты Янцзы под кратон, что находит отражение в размещении жестких пластин на границе этих структур (разрез 3-3 на рис. 6д). Установлены признаки сочетания процессов субдукции (Liu et al., 2015; Li et al., 2015) и надвигания (обдукции) верхнего слоя земной коры плиты Янцзы на Амурскую плиту (Liu et al., 2015; Fu et al., 2018).

Разрывы нижнего слоя земной коры в разрезе 3-3 (см. рис. 6д) совпадают с расположением разлома Ченжоу-Линву и рифтогенной впадины Янхань. На северном отрезке разреза 3-3 поднятие подкорового вязкого слоя и разрыв нижнего слоя литосферы совпадают с осадочными бассейнами Бохайвань-Тайкань-Хефей. Эти бассейны прилегают с запада к зоне растяжения-сдвига Танлу.

Сочленение плиты Янцзы с СКК напоминает сочленение Охотоморской плиты с Северо-Азиатским кратоном (разрез 2-2 на рис. 1д), где тонкая литосфера Охотоморской плиты поддвигается не под континентальную литосферу, а под земную кору, т. е. внедряется в подкоровый вязкий слой (Петрищевский, 2008).

Во фронте коллизионного орогена Кунлин-Даби в нижнем слое коры проявлена Северо-Кунлинская зона растяжения (см. рис. 6а), указывающая на пространственную сопряженность субдукции с рифтогенезом.

Коллизионный ороген Кунлин-Даби имеет много общего с Солонкерским и Монголо-Охотским складчатыми поясами, также располагающимися на границах крупных литосферных сегментов. Монголо-Охотский пояс характеризуется как типичная коллизионная складчато-надвиговая структура, сопряженная с рифтогенезом (Gordienko, 1994) и сдвигами (Khanchuk et al., 2015). Коллизионные и субдукционные процессы на границах Северо-Азиатского, Амурского и Северо-Китайского сегментов в позднем палеозое и раннем мезозое протекали похожим образом и были определены тектоническими стрессами, обусловленны-

ми конвергенцией Индийской и Евразийской литосферных плит первого порядка.

Такая же сопряженность коллизионных, субдукционных и рифтогенных процессов проявлена в южных прибрежных районах континентальной окраины, где океанические коровые пластины со стороны Южно-Китайского моря проникают под Катазиатский блок, а жесткие пластины в нижней литосфере поддвигаются еще дальше – под плиту Янцзы (см. рис. 6в–д). В нижней коре (см. рис. 6а) и нижней литосфере (см. рис. 6б) во фронте субдуцирующих слэбов картируются протяженные зоны растяжения, субпараллельные континентальной окраине. В разрезе (4-4 на рис. 6) зоны растяжения Танлу и Ченжоу-Линву сопровождаются разрывами нижнего жесткого слоя земной коры.

Ряд исследователей (Wu, Suppe, 2015; Cai et al., 2019) связывает субдукцию на южной окраине Азиатского континента с протоокеаническим спредингом в центре Южно-Китайского моря, и это находит подтверждение в распределении плотностной контрастности (см. рис. 6в, г), которое характеризуется северо-западным вектором увеличения μ_z -параметра, перпендикулярным к оси спрединга.

Растяжения, обусловленные субширотными векторами тектонических напряжений, проявились не только на восточной границе континентальной окраины, но и во внутренних районах континента. Наиболее крупная континентальная зона растяжения протягивается в меридиональном направлении на западе рассматриваемого региона (см. рис. 6а), где она контролирует расположение осадочных бассейнов Ордос, Сычуань и Нанпаньянг.

Субдукция и рифтогенез в Япономорском регионе

Япономорская впадина располагается в зоне взаимодействия Тихоокеанской литосферной плиты с Амурской плитой второго порядка, входящей в состав Евразийской плиты (Геодинамика..., 2006). Острова Японского архипелага отгораживают впадину Японского моря от Тихого океана. На основании идентичности юрских и нижнемеловых аккреционных комплексов Японских остро-

вов (пояса Мино, Тамба, Ашио, Чичibu, Симанто) и Сихотэ-Алиня (Самаркинский и Таухинский террейны) (Мартынов, 2016), а также сходства метаморфических комплексов в допалеозойском фундаменте массивов Хида (о-в Хонсю) и Ханкайского (Приморье) (Изосов и др., 2000) общепризнанным является предположение, что Японские острова представляют собой фрагменты, отделившиеся от Амурской плиты второго порядка в результате миоцен-эоценовых процессов растяжения и сдвига на ее трансформной окраине (Ханчук, Мартынов, 2011; Мартынов и др., 2016).

В разное время в Япономорском регионе проявились два этапа субдукции Тихоокеанской пли-

ты: дорифтовый (домиоценовый) на границе континента (Мартынов, Ханчук, 2013, Мартынов и др., 2016) и позднекайнозойский – на восточной границе Японской островной дуги. Оба этапа проявились в распределениях плотностной контрастности (рис. 7в), где они выражены в наклоне жестких пластин под континент и о-в Хонсю.

В подкоровом слое верхней мантии (см. рис. 7а) в центральной части Японского моря наблюдается контрастный минимум μ_z -параметра, совпадающий с максимумом теплового потока (см. рис. 7а, б). Для большинства вулканитов Японского моря, слагающих вулканические постройки и хребты в котловинах, характерна их постспрединговая (или пост-

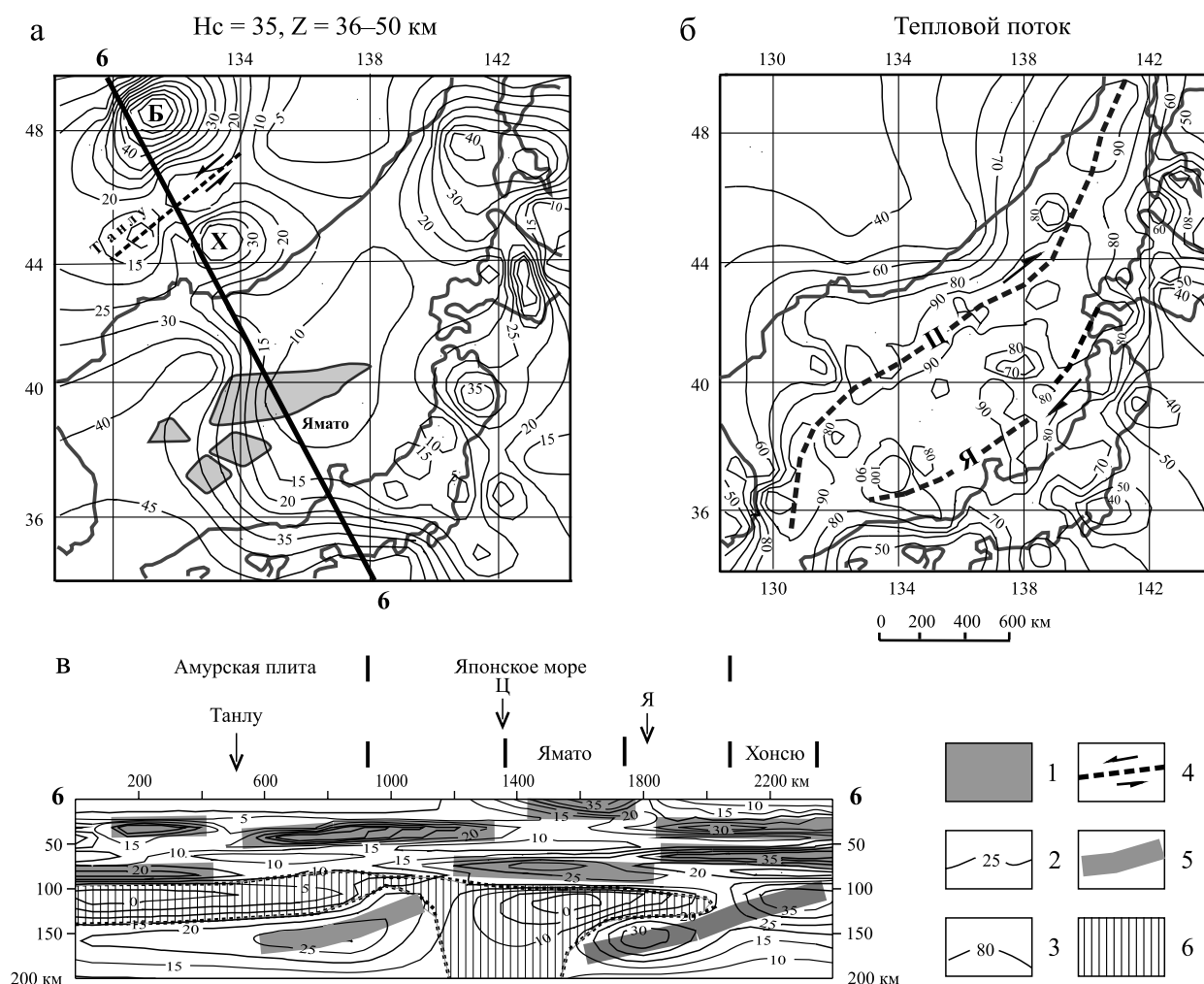


Рис. 7. Плотностная контрастность подкоровой мантии (а, в) и тепловой поток (б) в Япономорском регионе.

1 – подводные возвышенности; 2, 3 – изолинии плотностной контрастности (2) и теплового потока (3); 4 – зоны растяжения-сдвига в Японском море: Ц – Центральная, Я – Ямато; 5 – жесткие пластины в разрезах; 6 – зоны пониженной вязкости в разрезах. Обозначения блоков кратонного типа на схеме “а”: Б – Буреинский, Х – Ханкайский.

Fig. 7. Density contrast of subcrustal mantle (а, в) and heat flow (б) in the Sea of Japan region.

1 – underwater rises; 2, 3 – isolines of density contrast (2) and heat flow (3); 4 – stretch-shift zones in the Sea of Japan: C – Central, Yamato; 5 – rigid plates in sections; 6 – zones of lowered viscosity. Designations of the craton type blocks on the scheme “а”: B – Bureinsky, X – Hankaysky.

Таблица 1. Возраст, млн лет, и тектоническая позиция вулканических формаций в Западно-Тихоокеанской переходной зоне (Петрищевский и др., 2021)

Table 1. Age, Ma, and tectonic states of volcanic formations in the Western Pacific Transition Zone (Petrishchevskii et al., 2021)

Тектоническая позиция (Tectonic state)	Юго-Восточный Китай (South East China)	Охотоморский регион (Sea of Okhotsk Region)	Япономорский регион (Japan Sea Region)
Субдукция (subduction)	160–195	140–84, 76–125	60–75
Рифтогенез (rifting)	125–138, 80–100	45–57, 25, 1–4	45, 3.0–3.5

рифтовая) плюмовая геохимия, а абсолютный возраст колеблется в интервале 4–14 млн лет (Емельянова, Леликов, 2010, 2016), на основании чего сделан вывод, что при формировании Японского моря значительный вклад внесла структура центрального типа плюмового происхождения. В распределениях плотностной контрастности (см. рис. 7в) астеносфера имеет грибовидную форму, характерную для этого типа структур.

В земной коре и подкоровой мантии наблюдаются разрывы жестких пластин, совпадающие с зонами растяжения-сдвига второго порядка в котловинах Центральной и Ямато, а также Танлу в приконтинентальном районе (см. рис. 7а, в). В Японском море они сопровождаются сокращением мощности земной коры (Кулинич, Валитов, 2011) и локальными максимумами теплового потока (см. рис. 7б). То же самое имеет место и в зоне Танлу (Диденко и др., 2010; Петрищевский и др., 2021). Центральная и Ямато зоны растяжения образуют сдвиговый дуплекс, усиливающий поперечное расширение Япономорской впадины. Некоторые исследователи (Филатова, 2008) придают этому главное значение в происхождении Японского моря.

Таким образом, рассмотренные данные доказывают существование двух этапов субдукции Тихоокеанской плиты и как минимум трех периодов активизации рифтогенных растяжений в Япономорском регионе в короткий отрезок геологического времени. Это подтверждают результаты петрохимического анализа вулканитов, драгированных со дна Японского моря (табл. 1).

Сравнение результатов петрохимического опробования вулканитов в трех районах Западно-Тихоокеанской переходной зоны (см. табл. 1) показывает близкий характер проявления субдукционных и рифтогенных процессов на всей этой территории несмотря на различия в их абсолютном возрасте.

Южный Сихотэ-Алинь

В Южном Сихотэ-Алине юрско-меловая субдукция Тихоокеанской плиты завершилась растяжением со сдвигом в зоне Самаркинского турбидитового террейна (рис. 8), а позднее растяжения повторились в прибрежном районе (Юшманов, Петрищевский, 2004) и Японском море (см. рис. 7).

Широкий минимум плотностной контрастности, совпадающий с положением юрского Самаркинского турбидитового террейна, разделяет области с разным типом фундамента аккреционно-складчатых комплексов: гранитно-метаморфическим на западе и андезитобазальтовым островодужным на востоке (Петрищевский, 2011). В составе Самаркинского террейна различается матрикс, сложенный чередующимися турбидитовыми и меланжевыми (олистоострововыми) толщами, и конседиментационные тектонические включения разновозрастных образований преимущественно палеоокеанического происхождения. Полный разрез Самаркинского террейна представляет собой тектоностратиграфическую последовательность общей мощностью не менее 15 км (Ханчук и др., 1995), включающую карбон-пермские офиолиты, девонские, пермские и триасовые базальты с кремнями. В этом разрезе присутствуют также верхнепермские и триасово-юрские песчаники, верхнеюрские пикриты и базальты – фрагменты Сергеевского аллохтонного (Изосов и др., 2000; Петрищевский, 2011) метаморфического террейна, пододвинутого с юга под Самаркинский террейн. Присутствие Сергеевского террейна под Самаркинским подтверждается максимумом плотностной контрастности в интервале глубин 20–35 км (см. рис. 8, разрез 4-4).

Судя по распределениям плотностной контрастности (см. рис. 7), Самаркинский террейн представляет собой широкую зону вязкого сдвига. Сдвиговая составляющая зоны растяжения выражена S-образным изгибом среднекорового слоя (см. рис. 8), характерным для большинства подобных структур: Охотско-Чукотского (Ханчук, Иванов, 1999), Байкальского (Семинский, 2009), Шанси (Xu et al., 1993), Кенийского (Morley et al., 1992) и других рифтов.

Второй, позднемеловой, сдвиг с растяжением произошел на границах Кемского и Таухинского террейнов (Колумбинский и Прибрежный разломы), где в дуплексах растяжения формировались прогибы, заполненные надсубдукционными (Ханчук и др., 1995) вулканитами светловодненской и богопольской свит. Зоны растяжения контролируют размещение вулканотектонических депрессий и интрузивно-купольных структур (Юшманов, Петрищевский, 2004).

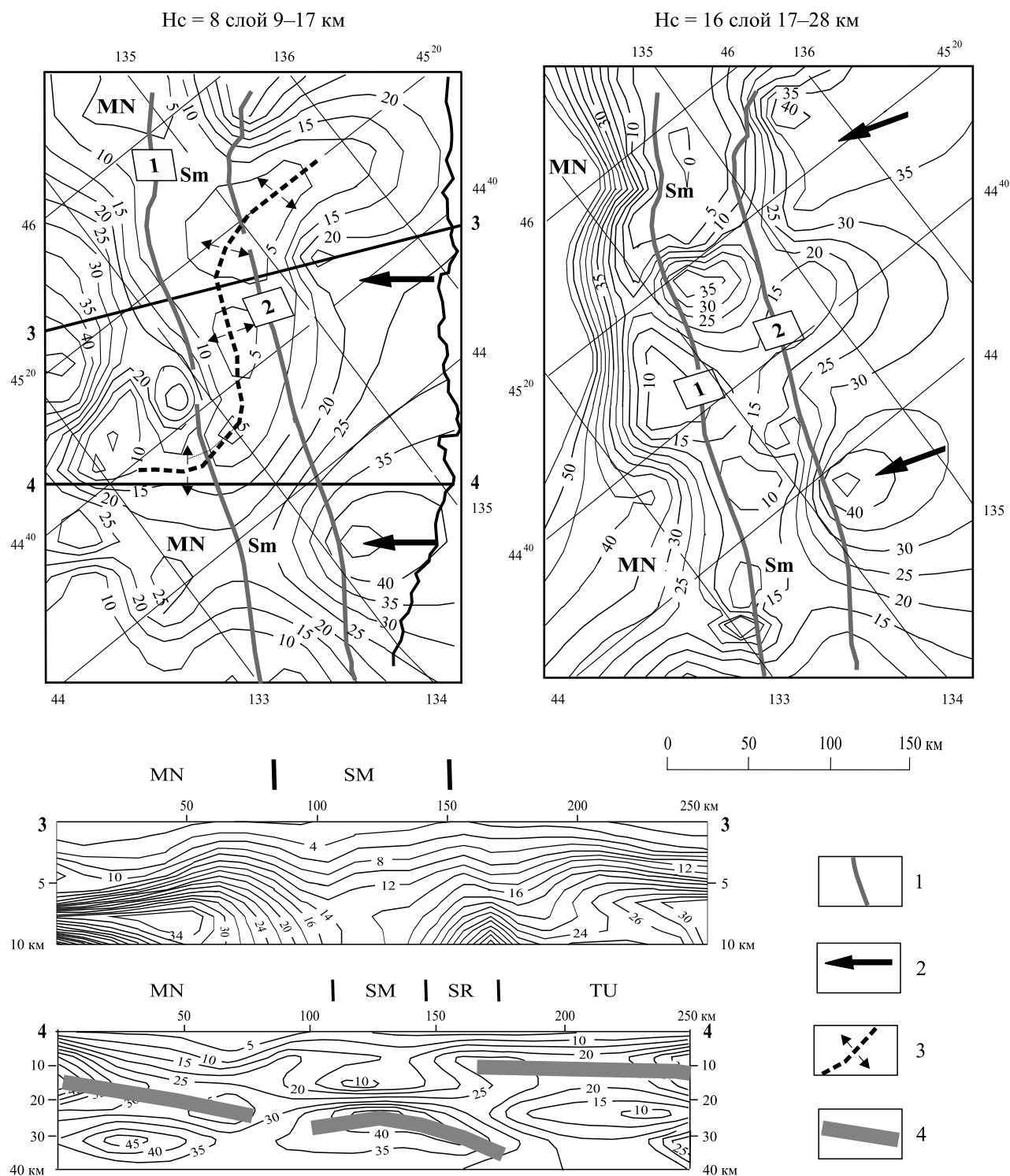


Рис. 8. Плотностная контрастность земной коры Южного Сихотэ-Алиня.

1 – разломы: 1 – Арсеньевский, 2 – Центральный; 2 – векторы надвигания островодужных пластин; 3 – ось зоны растяжения-сдвига; 4 – жесткие пластины в разрезах.

Fig. 8. The crust density contrast of the South Sikhote-Alin.

1 – faults: 1 – Arsenyevskiy, 2 – Central; 2 – vectors of thrusting of islands sheets; 3 – axis of stretch-shift zone; 4 – rigid sheets in sections.

По представлениям предшественников, субдукционные, надвиговые, рифтогенные и сдвиговые процессы в Южном Сихотэ-Алине были пространственно сопряжены. Надвиги, олистостромы и тектонические покровы были совмещены с пододвиганием субокеанических (островодужных) клиньев под континентальную окраину (см. рис. 8), а растяжения и сдвиги – связаны с разрывами субдукционных пластин (слэб-виндоуз структурами) (Ханчук, Мартынов, 2011).

Судя по распределениям плотностной контрастности, тектонические процессы в литосфере Японского моря (K_2 -Q) повторяют процессы, произошедшие ранее в Южном Сихотэ-Алине (J- K_2). Все они характеризуются пространственной сопряженностью субдукционных, надвиговых и рифтогенных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тектонический анализ вероятно-детерминистских гравитационных моделей в четырех регионах Восточной Азии выявил общие черты глубинного строения – следы тектонических процессов на границах литосферных сегментов.

Начальные этапы субдукционных процессов проявлены в пододвигании жестких тектонических пластин, отображаемых максимумами плотностной контрастности, под разновозрастные границы Азиатского континента со стороны Северо-Американской и Тихоокеанской плит.

Субдукционные процессы не были постоянными во времени и периодически прерывались откатами, или разрывами, субдуцирующих слэбов (слэб-виндоуз-структурами (Ханчук, Мартынов, 2011)) под воздействием рифтогенных и трансформных сдвиговых процессов. По времени проявления рифты и сдвиги смещались по направлению от автохтонных сегментов к аллохтонным: на Северо-Востоке Азии – от Северо-Азиатского кратона к Северо-Американской плите, на востоке Азии – от континента к Тихому океану, а на юго-востоке – от протоокеанической плиты Южно-Китайского моря к плите Янцзы.

В юго-восточных районах Азиатско-Тихоокеанской переходной зоны субдукционные и связанные с ними рифтогенные процессы подчинялись двум векторам тектонического стресса: северо-восточному и северо-западному. Первый обусловлен конвергенцией Индийской плиты с Евразией, а второй – Евразии с Тихоокеанской плитой и протоокеанической плитой Южно-Китайского моря.

Охарактеризованные черты строения и геодинамической эволюции конвергентных структур являются фундаментальными характеристиками верхних твердых оболочек Земли (кора и нижняя литосфера), перемещающихся над подкоровым вязким слоем и астеносферой под влиянием колебательных

ротационных напряжений, обусловленных, вероятнее всего, изменениями параметров вращения Земли. Прерывисто-направленное проявление рифтогенных процессов наблюдается и в других районах Восточной Азии. В Забайкалье, например на границе Амурской плиты с Северо-Азиатским кратоном, процессы сжатия и растяжения чередовались не менее шести раз на протяжении 120 млн лет (Лунина и др., 2009), а непосредственно в Байкальском рифте проявлены два последних этапа растяжения, выраженные в асимметричном рельефе дна оз. Байкал (Мац и др., 2001). В Восточно-Китайском море конвергенция континентальной (Янцзы) и океанической (Тихоокеанской) плит в период от позднего мела до среднего миоцена (на протяжении 70–80 млн лет) тоже происходила циклично в обстановке знакопеременных тектонических напряжений. В периоды сжатия здесь формировались поднятия (Же Мин, Дияюдао, Тайбей, Рюкю), а в периоды растяжений – осадочные бассейны (Джиньянь, Оуянь, Килунь) и трог Окинава (Xuan et al., 2020; Yang et al., 2020). Возраст структур омолаживается в направлении от Азиатского континента к Тихому океану.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акинин В.В. (2012) Позднемезозойский и кайнозойский магматизм и преобразование нижней коры в северном обрамлении Пацифики. Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 35 с.
- Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В. (2011) Смешанный вероятностно-детерминистский подход к интерпретации данных гравиразведки, магниторазведки и электроразведки. *Докл. РАН*, **438**(4), 532–537.
- Белый В.Ф. (1981) Структурно-формационная карта Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. М-Б 1 : 1 500 000. Объяснит. записка. Магадан, 57 с.
- Богданов Н.А., Чехович В.Д. (2002) О коллизии Западно-Камчатской и Охотоморской плит. *Геотектоника*, (1), 72–85.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. (2006) (Ред. А.И. Ханчук). Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 572 с.
- Диденко А.Н., Каплун В.Б., Малышев Ю.Ф. и др. (2010) Глубинное строение и металлогения Восточной Азии. Владивосток: Дальнаука, 332 с.
- Емельянова Т.А., Леликов Е.П. (2010) Миоцен-плейстоценовый вулканизм глубоководных котловин Японского и Охотского морей. *Тихоокеан. геол.*, **29**(2), 58–69.
- Емельянова Т.А., Леликов Е.П. (2016) Геохимия и петрогенезис позднемезозойско-раннекайнозойских вулканитов Охотского и Японского окраинных морей. *Геохимия*, (6), 522–535.
- Емельянова Т.А., Петрищевский А.М., Изосов Л.А., Ли Н.С., Пугачев А.А. (2020) Позднемезозойско-кайнозойские этапы вулканизма и геодинамика Японского и Охотского морей. *Петрология*, **28**(5), 468–481.
- Изосов Л.А., Коновалов Ю.И., Емельянова Т.А. (2000) Проблемы геологии и алмазности зоны перехода

- континент – океан (Япономорский и Желтоморский регионы). Владивосток: Дальнаука, 326 с.
- Коваленко Д.В. (2001) Модель тектонической аккреции островодужных террейнов Камчатки и юга Корякии. *Геотектоника*, (5), 76-91.
- Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. (2011) Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии. *Геология и геофизика*, **52**(6), 830-851.
- Кулинич Р.Г., Валитов М.Г. (2011) Мощность и типы земной коры Японского моря по данным морской и спутниковой гравиметрии. *Тихоокеан. геол.*, **30**(6), 3-13.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Неведова Н.Н. (2009) Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Гео, 164 с.
- Мартынов Ю.А., Голозубов В.В., Ханчук А.И. (2016) Мантийный диапиризм в зонах конвергенции литосферных плит (Японское море). *Геология и геофизика*, **57**(5), 947-961.
- Мартынов Ю.А., Ханчук А.И. (2013) Кайнозойский вулканизм Восточного Сихотэ-Алиня: результаты и перспективы петрологических исследований. *Петрология*, **21**(1), 94-108.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. (2001) Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск, Гео, 251 с.
- Петрищевский А.М. (2008) Вязкий слой на границе кора-мантия на Дальнем Востоке. *Геотектоника*, (5), 37-48.
- Петрищевский А.М. (2013а) Гравитационные модели двухъярусной коллизии литосферных плит на Северо-Востоке Азии. *Геотектоника*, (6), 60-83.
- Петрищевский А.М. (2013б) Гравитационный метод оценки реологических свойств земной коры и верхней мантии (в конвергентных и плюмовых структурах Северо-Восточной Азии). М.: Наука, 192 с.
- Петрищевский А.М. (2021) Земная кора и верхняя мантия в области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского складчатых поясов. *Тихоокеан. геол.*, **40**(5), 16-32.
- Петрищевский А.М. (2016а) Общие черты глубинного строения тектоносферы западно-тихоокеанских окраин (Северо-Восточная Азия и Австралия). *Геотектоника*, (6), 87-104.
- Петрищевский А.М. (2020) Одно практическое следствие теорем единственности и эквивалентности обратных задач гравитационного потенциала. *Геофизика*, (4), 98-111.
- Петрищевский А.М. (2016б) Реологическая и геотермическая характеристики Охотоморского плюма. *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*, **327**(2), 65-76.
- Петрищевский А.М. (2011) Реологическая модель земной коры Южного Сихотэ-Алиня (по гравиметрическим данным). *Тихоокеан. геол.*, **30**(3), 50-65.
- Петрищевский А.М. (2019) Рифтогенные структуры и нефтегазаносность в реологических гравитационных моделях земной коры. *Геофизика*, (4), 42-51.
- Петрищевский А.М., Емельянова Т.А., Изосов Л.А. (2021) Возрастные взаимоотношения рифтогенеза, субдукции и плюмовых процессов на восточной окраине Азии. *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*, (4), **52**, 22-45.
- Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. (2021) Плотностная контрастность, глубинное строение, реология и металлогения земной коры и верхней мантии Верхояно-Колымского региона. *Литосфера*, **21**(4), 491-516.
- Родников А.Г. (1979) Островные дуги западной части Тихого океана. *Результаты исследований по международным геофизическим проектам*. М.: Наука, 152 с.
- Семинский К.Ж. (2009) Главные факторы развития впадин и разломов Байкальской рифтовой зоны: тектонофизический анализ. *Геотектоника*, (6), 52-69.
- Стружков С.Ф., Константинов М.М. (2005). Металлогения золота и серебра Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. М.: Науч. мир, 320 с.
- Тектоника и геодинамика и металлогения территории республики Саха (Якутия). (2001) М.: Наука / Интерпериодика, 571 с.
- Тильман С.М., Богданов Н.А. (1992) Тектоническая карта северо-востока Азии. М-б 1 : 1 500 000. М.: Комитет по геодезии и картографии МПР РФ.
- Тихомиров П.Л. (2018) Меловой окраинно-континентальный магматизм Северо-Востока Азии и вопросы генезиса крупнейших фанерозойских провинций кремнекислого вулканизма. Дисс. ...докт. геол.-мин. наук. М.: МГУ. 43 с.
- Филатова Н.И. (2008) Специфика магматизма окраинно-континентальных и окраинно-морских бассейнов синсдвиговой природы, западная периферия Тихого океана. *Петрология*, **16**(5), 480-500.
- Ханчук А.И., Иванов В.В. (1999) Мезокайнозойские геодинамические обстановки и золотое оруднение Дальнего Востока России. *Геология и геофизика*, **40**(9), 1635-1645.
- Ханчук А.И., Мартынов Ю.А. (2011) Тектоника и магматизм границ скольжения океанических и континентальных литосферных плит. *Геологические процессы в зонах субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит*. Мат-лы Всерос. конф. с междунар. участием. Владивосток: Дальнаука, 45-49.
- Ханчук А.И., Петрищевский А.М. (2007) Астеносфера и плиты Северо-Восточной Азии. *Докл. РАН*, **412**(5), 689-693.
- Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д., Голозубов В.В., Гонохова Н.Г. (1995) Геология и полезные ископаемые Приморского края: очерк. Владивосток: Дальнаука, 66 с.
- Шахтыров В.Г. (1997) Тенькинский глубинный разлом: тектоническая позиция, инфраструктура, рудоносность. *Геологическое строение, магматизм и полезные ископаемые Северо-Восточной Азии*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 62-64.
- Юшманов Ю.П., Петрищевский А.М. (2004) Тектоника, глубинное строение и металлогения Прибрежной зоны Южного Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 111 с.
- Яншин А.Л., Хаин В.Е., Гатинский Ю.Г. (1984) Основные проблемы тектоники Азии. *Тектоника Азии. 27-й МК. Доклады*, **5**. М.: Наука, 3-10.

- Cai G., Wan Zh., Yao Y., Zhong L., Zheng H., Kapsiotis A., Zhang C. (2019) Mesozoic Northward Subduction Along the SE Asian Continental Margin Inferred from Magmatic Records in the South China Sea. *Minerals*, **598**(9), 2-25.
- Evans G.C. Application of Poincare's sweeping-out process. (1933) *Mathematic*, **19**, 457-461.
- Fu D., Huang B., Timothy M., Kusky T.M., Li G., Wilde A.S., Zhou W.X., Yu Y. (2018) A Middle Permian Ophiolitic Mélange Belt in the Solonker Suture Zone, Western Inner Mongolia, China: Implications for the Evolution of the Paleo Asian Ocean. *Tectonics*, **37**(5), 1292-1320.
- Gordienko I.V. (1994). Paleozoic geodynamic evolution of the Mongol-Okhotsk fold belt. *J. Southeast Asian Earth Sci.*, **9**(4), 429-433.
- Hacker B., Ratschbacher, L., Liou J. (2004) Subduction, collision and exhumation in the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen. London. *Geol. Soc., Spec. Publ.*, (1), 157-175.
- Huang J., Zhao D. (2006) High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J. Geophys. Res.*, **111**, B09305, 1-21. <https://doi.org/10.1029/2005JB004066>
- Khanchuk A.I., Didenko A.N., Popeko L.I., Sorokin A.A., Shevchenko B.F. (2015) Structure and evolution of the Mongolo-Okhotsk orogenic belt. The Central Asian orogenic belt. Geology, evolution, tectonics and models. (Ed. A. Kröner). Stuttgart: Borntraeger Sci. Publ., 211-234.
- Li B., Atakan K., Sorensen M.B., Havskov J. (2015) Stress pattern of the Shanxi rift system, North China, inferred from the inversion of new focal mechanisms. *Geophys. J. Int.*, **201**(2), 505-527.
- Liu X.C., Li S.Z., Bor-Ming J. (2015) Tectonic evolution of the Tongbai-Hong'an orogen in central China: From oceanic subduction/accretion to continent-continent collision. *Sci. China. Earth Sci.*, **58**(9), 1477-1496.
- Liu X., Zhao D., Li S., Wei W. (2017) Age of the subducting Pacific slab beneath East Asia and its geodynamic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **464**, 166-174.
- Morley C.K. (1989) Extension, Detachments, and Sedimentation in Continental Rifts (with particular reference to East Africa). *Tectonics*, **8**(6), 1175-1192.
- Morley C.K., Wescott W.A., Stone D.M., Happer R.M., Wigger S.T., Karanja F.M. (1992) Tectonic evolution of the northern Kenyan Rift. *J. Geol. Soc.*, **149**, 333-348.
- Quin X., Zhao B., Lia F., Zhang B., Wang H., Zhang R., He J., Chen X. (2019) Deep structural research of the South China Sea: Progresses and directions. *China Geol.*, (4), 530-540.
- Ren J., Tamaki K., Li. S., Junxia Z. (2002) Late Mesozoic and Cretaceous rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, **344**, 175-205
- Shu L.S., Faure M., Yu J.H., Jahn B.M. (2011) Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia. *Precamb. Res.*, **187**(3-4), 263-276.
- Wang Y., Zhang F., Fan W., Zhang G., Chen S., Cawood P.A., Zhang A. (2010) Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology. *Tectonics*, **29**, TC6020, 1-16.
- Wu J., Suppe J. (2015) Proto-South China Sea Plate Tectonics Using Subducted Slab Constraints from Tomography. *J. Earth Sci.*, **29**(6), 1304-1318.
- Wu Y.B., Zheng Y.F. (2013). Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China. *Gondw. Res.*, **23**, 1402-1428.
- Xu X.-W., Ma X.-Y., Deng Q.-D. (1993) Neotectonic activity along the Shanxi rift system, China. *Tectonophysics*, **219**, 305-325.
- Xuan S., Jin S., Chen Y. (2020) Determination of the isostatic and gravity Moho in the East China Sea and its implications. *J. Asian Earth Sci.*, **187**, 104098, 1-11.
- Yang C., Han D., Yang C., Yang Y., Sun J., Yu F. (2020) Mesozoic basin evolution of the East China Sea Shelf and tectonic system transition in Southeast China. *Geol. J.*, **55**, 239-252.

REFERENCES

- Akinin V.V. (2012) Late Mesozoic and Cenozoic magmatism, and reformation of the low crust in the Northern margin of Pacific. *Diss. ... doct. geol.-min. sci.* Moscow, IGEM RAN Publ., 35 p. (In Russ.)
- Balk P.I., Dolgal' A.S., Michurin A.V. (2011) Common probabilistic-deterministic approach to interpreting of gravimetrics, magnetic and geo-electric data. *Dokl. RAN*, **438**(4), 532-537. (In Russ.)
- Belyi V.F. (1981) Structural-formational map of the Okhotsk-Chukotskiy volcanic belt. Scale 1 : 1 500 000. Explanatory note. Magadan, 57 p. (In Russ.)
- Bogdanov N.A., Chekhovich V.D. (2002) About collision of the West-Kamchatka and Sea of Okhotsk plate. *Geotektonika*, (1), 72-85. (In Russ.)
- Cai G., Wan Zh., Yao Y., Zhong L., Zheng H., Kapsiotis A., Zhang C. (2019) Mesozoic Northward Subduction Along the SE Asian Continental Margin Inferred from Magmatic Records in the South China Sea. *Minerals*, **598**(9), 2-25.
- Didenko A.N., Kaplun V.B., Malyshev Yu.F. et al. (2010) Deep structure and metallogeny of the Eastern Asia. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 332 p. (In Russ.)
- Emel'yanova T.A., Lelikov E.P. (2010) Miocene-Pleistocene volcanism of deep-water hollows of the Japan and Sea of Okhotsk seas. *Tikhookean. Geol.*, **29**(2), 58-69. (In Russ.)
- Emel'yanova T.A., Lelikov E.P. (2016) Geochemistry and petro-origin of Early Mesozoic-Late Cenozoic volcanics of the Sea of Okhotsk and Japan seas. *Geokhimiya*, (6), 522-535. (In Russ.)
- Emel'yanova T.A., Petrishchevskii A.M., Izosov L.A., Li N.S., Pugachev A.A. (2020) Late Mesozoic-Cenozoic Stages of Volcanism and Geodynamics of the Sea of Japan and Sea of Okhotsk. *Petrology*, **28**(5), 418-430 (translated from *Petrologiya*, **28**(5), 468-481). <https://doi.org/10.1134/S0869591120050021>
- Evans G.C. (1933) Application of Poincare's sweeping-out process. *Mathematic*, **19**, 457-461.
- Filatova N.I. (2008) Specifics of a magmatism of marginal-seas basins of shear nature, Western periphery of Pacific. *Petrologiya*, **16**(5), 480-500. (In Russ.)
- Fu D., Huang B., Timothy M., Kusky T.M., Li G., Wilde A.S., Zhou W.X., Yu Y. (2018) A Middle Permian Ophiolitic Mélange Belt in the Solonker Suture Zone, Western Inner Mongolia, China: Implications for the Evolution of the Paleo-Asian Ocean. *Tectonics*, **37**(5), 1292-1320.

- Geodynamics, magmatism, and metallogeny of the Eastern Russia. (2006) (Ed. A.I. Khanchuk). B. 1. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 572 p. (In Russ.)
- Gordienko I.V. (1994) Paleozoic geodynamic evolution of the Mongol-Okhotsk fold belt. *J. Southeast Asian Earth Sci.*, **9**(4), 429-433.
- Hacker B., Ratschbacher L., Liou J. (2004) Subduction, collision and exhumation in the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen. London. *Geol. Soc., Spec. Publ.*, (1), 157-175.
- Huang J., Zhao D. (2006) High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J. Geophys. Res.*, **111**, B09305, 1-21. <https://doi.org/10.1029/2005JB004066>
- Izotov L.A., Konovalov Yu.I., Emel'yanova T.A. (2000) Problems of geology and diamond bearing of the continent-ocean transition zone (Japan and Yellow Seas Region). Vladivostok, Dal'nauka Publ., 326 p. (In Russ.)
- Khanchuk A.I., Didenko A.N., Popeko L.I., Sorokin A.A., Shevchenko B.F. (2015) Structure and evolution of the Mongolo-Okhotsk orogenic belt. *The Central Asian orogenic belt. Geology, evolution, tectonics and models.* (Ed. A. Kröner). Stuttgart, Borntraeger Sci. Publ., 211-234.
- Khanchuk A.I., Ivanov V.V. (1999) Mesozoic-Cenozoic geodynamic states and gold ore-bearing of the Russian Far East. *Geol. Geofiz.*, **40**(9), 1635-1645. (In Russ.)
- Khanchuk A.I., Martynov Yu.A. (2011) Tectonics and magmatism on the boundaries of sliding of oceanic and continental plates. *Geological processes in the subduction, collision and sliding zones.* Data of Russian conference with international participation. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 45-49. (In Russ.)
- Khanchuk A.I., Petrishchevskii A.M. (2007) Asthenosphere and plates of the North-East Asia. *Dokl. RAN*, **412**(5), 689-693. (In Russ.)
- Khanchuk A.I., Ratkin V.V., Ryazantseva M.D., Golozubov V.V., Gonokhova N.G. (1995) Geology and useful deposits of the Primorsky area: Sketch. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 66 p. (In Russ.)
- Kovalenko D.V. (2001) Model of tectonic accretion of the island terrains of Kamchatka and Southern Koryakia. *Geotektonika*, (5), 76-91. (In Russ.)
- Kulakov I.Yu., Dobretsov N.L., Bushenkova N.F., Yakovlev A.V. (2011) The shape of slabs in subduction zones beneath the Kuril-Kamchatka and Aleut arcs from regional tomography data. *Geol. Geofiz.*, **52**(6), 830-851. (In Russ.)
- Kulinich R.G., Valitov M.G. (2011). Depth and types of the Japan Sea crust from the marine and satellite gravimetrics. *Tikhookean. Geol.*, **30**(6), 3-13. (In Russ.)
- Li B., Atakan K., Sorensen M.B., Havskov J. (2015) Stress pattern of the Shanxi rift system, North China, inferred from the inversion of new focal mechanisms. *Geophys. J. Int.*, **201**(2), 505-527.
- Liu X.C., Li S.Z., Bor-Ming J. (2015) Tectonic evolution of the Tongbai-Hong'an orogen in central China: From oceanic subduction/accretion to continent-continent collision. *Sci. China. Earth Sci.*, **58**(9), 1477-1496.
- Liu X., Zhao D., Li S., Wei W. (2017) Age of the subducting Pacific slab beneath East Asia and its geodynamic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **464**, 166-174.
- Lunina O.V., Gladkov A.C., Nevedova N.N. (2009) Rift basins of the Near Baikal Area: Tectonic structure and the history evolution. Novosibirsk, Geo Publ., 164 p.
- Martinov Yu.A., Golozubov V.V., Khanchuk A.I. (2016) Mantle diapirism in zones of lithospheric-plate convergence (Sea of Japan). *Geol. Geofiz.*, **57**(5), 947-961. (In Russ.)
- Martinov Yu.A., Khanchuk A.I. (2013) Cenozoic volcanism of the East Sikhote-Alin: Results and perspectives of petrologic researches. *Petrologiya*, **21**(1), 94-108. (In Russ.)
- Mats V.D., Ufimtsev G.F., Nandelbaum V.V., Alakshin A.M., Pospeev A.V. (2001) Cenozoic of the Baikal rift basin. Novosibirsk, Geo Publ., 251 p.
- Morley C.K. (1989) Extension, Detachments, and Sedimentation in Continental Rifts (with particular reference to East Africa). *Tectonics*, **8**(6), 1175-1192.
- Morley C.K., Wescott W.A., Stone D.M., Happer R.M., Wigger S.T., Karanja F.M. (1992) Tectonic evolution of the northern Kenyan Rift. *J. Geol. Soc.*, **149**, 333-348.
- Petrishchevskii A.M. (2016a) Common features of deep structure of the Western Pacific margins (North-East Asia and Australia). *Geotektonika*, (6), 87-104. (In Russ.)
- Petrishchevskii A.M. (2013a) Gravity method for evaluation of rheological properties of the crust and uppermost mantle (in convergent and plume structures of the North-East Asia). Moscow, Nauka Publ., 192 p. (In Russ.)
- Petrishchevskii A.M. (2013b) Gravity models of double-layer collision of the lithosphere plates on the North-East Asia. *Geotektonika*, (6), 60-83. (In Russ.)
- Petrishchevskii A.M. (2016b) Rheological and geothermic characteristics of the Sea of Okhotsk plume. *Izv. Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring Georesursov*, **327**(2), 65-76. (In Russ.)
- Petrishchevskii A.M. (2011) Rheological model of the South Sikhote-Alin crust (from gravimetric data). *Tikhookean. Geol.*, **30**(3), 50-65. (In Russ.)
- Petrishchevskii A.M. (2019) Rift structures and oil-gas bearing in rheological gravity models of the crust. *Geofizika*, (4), 42-51. (In Russ.)
- Petrishchevskii A.M. (2008) Viscous layer on the crust-mantle boundary on the Far East. *Geotektonika*, (5), 37-48. (In Russ.)
- Petrishchevskii A.M. (2020). On practical consequence from theorems of uniqueness and equivalence of the invert problems of gravity potential. *Geofizika*, (4), 98-111. (In Russ.)
- Petrishchevskii A.M. (2021) Crust and upper mantle in the convergent area of the Central Asia and Pacific folded belt. *Tikhookean. Geol.*, **40**(5), 16-32. (In Russ.)
- Petrishchevskii A.M., Emel'yanova T.A., Izotov L.A. (2021) Age relations between the rifting, subduction and plume processes on the Eastern margin of Asia. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, (4), **52**, 22-45. (In Russ.)
- Petrishchevskii A.M., Yushmanov Yu.P. (2021) Density contrast, deep structure, rheology and metallogeny of the crust and upper mantle of Verkhoyano-Kolimskit Region. *Lithosphere (Russia)*, **21**(4), 491-516.
- Quin X., Zhao B., Lia F., Zhang B., Wang H., Zhang R., He J., Chen X. (2019) Deep structural research of the South China Sea: Progresses and directions. *China Geol.*, (4), 530-540.
- Ren J., Tamaki K., Li S., Junxia Z. (2002) Late Mesozoic and Cretaceous rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, **344**, 175-205.
- Rodnikov A.G. (1979) Island arcs of the western part of Pacific. *Results of researches on international geophysical projects.* Moscow, Nauka Publ., 152 p. (In Russ.)

- Seminskii K.Zh. (2009) Main factors of the basins and fractures evolution of the Baikal Rift Zone. *Geotektonika*, (6), 52-69. (In Russ.)
- Shakhtirov V.G. (1997) Tenkinskiy deep fault: tectonic position, infrastructure, ore bearing. *Geological structure, magmatism and useful deposits of the North East Asia*. Magadan, SVKNII DVO RAN Publ., 62-64. (In Russ.)
- Shu L.S., Faure M., Yu J.H., Jahn B.M. (2011) Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia. *Precamb. Res.*, **187**(3-4), 263-276.
- Struzhkov S.F., Konstantinov M.M. (2005) Metallogeny of gold and silver of the Okhotsk-Chukotskiy volcanic belt. Moscow, Nauchnyi Mir Publ., 320 p. (In Russ.)
- Tectonics, geodynamics, and metallogeny of the Sakha republic (Yakutiya). (2001) Moscow, Nauka / Interperiodika Publ., 571 p. (In Russ.)
- Tikhomirov P.L. (2018) Cretaceous continent-marginal magmatism of the North East Asia and the nature questions of the giant Phanerozoic provinces of silica-acid volcanism. *Diss. ... doct. geol.-min. nauk*. Moscow, MGU Publ., 43 p. (In Russ.)
- Til'man S.M., Bogdanov N.A. (1992) Tectonic map of the North-East Asia. Scale 1 : 1 500 000. Moscow, Geodesy and survey committee MPR RF Publ. (In Russ.)
- Wang Y., Zhang F., Fan W., Zhang G., Chen S., Cawood P.A., Zhang A. (2010) Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology. *Tectonics*, **29**, TC6020, 1-16.
- Wu J., Suppe J. (2015) Proto-South China Sea Plate Tectonics Using Subducted Slab Constraints from Tomography. *J. Earth Sci.*, **29**(6), 1304-1318.
- Wu Y.B., Zheng Y.F. (2013) Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling–Tongbai–Hong'an–Dabie–Sulu orogenic belt in central China. *Gondw. Res.*, **23**, 1402-1428.
- Xu X.-W., Ma X.-Y., Deng Q.-D. (1993) Neotectonic activity along the Shanxi rift system, China. *Tectonophysics*, **219**, 305-325.
- Xuan S., Jin S., Chen Y. (2020) Determination of the isostatic and gravity Moho in the East China Sea and its implications. *J. Asian Earth Sci.*, **187**, 104098, 1-11.
- Yang C., Han D., Yang C., Yang Y., Sun J., Yu F. (2020) Mesozoic basin evolution of the East China Sea Shelf and tectonic system transition in Southeast China. *Geol. J.*, **55**, 239-252.
- Yanshin A.L., Khain V.E., Gatinskii Yu.G. (1984) Main problems of the Asian tectonics. *27 MGK. Doklady*, **5**. Moscow, Nauka Publ., 3-10.
- Yushmanov Yu.P., Petrishchevskii A.M. (2004) Tectonics, deep structure and metallogeny of the coastal zone of Southern Sikhote Alin. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 111 p. (In Russ.)