

ДЕТАЛИЗАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ РАМОК ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСТРОВЕ САХАЛИН В КАЙНОЗОЕ С ПОЗИЦИЙ МОДЕЛИ ВЕРХНЕМАНТИЙНОЙ ВОЗВРАТНОЙ ЯЧЕЙКИ

© 2025 В.А. Дегтярев, П.А. Каменев

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, 693022;
e-mail: degtyarevvladislav96@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20.12.2024; после доработки 18.08.2025; принята в печать 25.09.2025

Формирование геологической структуры о. Сахалин в кайнозое обусловлено подкоровыми мантийными потоками, описываемыми моделью верхнемантийной возвратной ячейки. Предложенный в работе механизм возвратной ячейки продолжает играть решающую роль в развитии структуры острова на современном этапе. Показано, что в настоящее время развитие острова происходит в транспрессионной обстановке. Такая обстановка является результатом вращения Охотской литосферной плиты против часовой стрелки (начавшейся в среднем эоцене) и коллизии между Амурской и Охотской литосферными плитами, которая началась в конце плиоцена — начале четвертичного периода. На основе корреляции тектонических событий Восточной Азии и Западной Пацифики, уточнено время заложения Хоккайдо-Сахалинской системы правых сдвигов. Оно оценивается ~45 млн лет назад (средний эоцен) и соответствует времени начала вращения Охотской литосферной плиты, которое обусловило их формирование. Уточнено время начала сахалинской фазы складчатости (~3 млн лет назад (поздний плиоцен)), которая является следствием коллизии Амурской и Охотской литосферных плит.

Ключевые слова: границы литосферных плит, разломы, геодинамическая модель, литосферная плита

ВВЕДЕНИЕ

С момента начала систематического геологического изучения Сахалина в начале XX в. (Тихонович, Полевой, 1915) представления о его строении и причинах тектогенеза неоднократно менялись. Высказывались мнения о складчатоблоковом (Пущаровский, 1964), мегаантиклинорном (Геология., 1970) и миогеосинклинально-эвгеосинклинальном (Сычев, 1966) его строении. На сегодняшний день большинство исследователей придерживается мнения о принадлежности Сахалина к аккреционным структурам, подобным современным активным континентальным окраинам островодужного и андийского типов развития (Голозубов и др., 2024; Гранник, 2002; Жаров, 2004; Мельников, 2010; Kozhurin, 2022). Впервые это мнение было высказано Л.М. Парфеновым с соавторами (Тектоническая..., 1981). Несмотря на то, что в настоящее время взгляды большинства исследователей на историю формирования геологической структуры Сахалина

схожи, вопросы, касающиеся причин тектогенеза, остаются дискуссионными.

В настоящей работе проведено обобщение, систематизация, а также критический анализ данных и заключений разных исследователей, занимающихся изучением геологического строения и истории тектонического развития Восточной Азии и Западной Пацифики. Сопоставлены времена тектонических событий, происходивших на Сахалине, со взаимосвязанными, по нашему мнению, тектоническими событиями региона, временные рамки которых относительно обоснованны. На основе данных различных авторов, были построены карты и схемы, поясняющие геолого-геофизическую интерпретацию, выполненную авторами настоящей работы.

Цель работы заключалась в обосновании и формировании непротиворечивой модели тектонической эволюции о. Сахалин и Охотоморского региона в целом, а также уточнении времени развития тектонических событий, происходивших на Сахалине.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

В современной структуре о. Сахалин выделяется несколько крупных элементов (рис. 1). Вдоль западного и восточного побережья протягиваются две системы поднятий субмеридионального простирания, которые разделены Центрально-Сахалинской системой низменностей (Тынь-Поронайской и Сусунайской). Северную часть острова занимает Северо-Сахалинская равнина с холмисто-увалистым рельефом. Наиболее отчетливо западное и восточное поднятия выражены в центральной и южной частях острова, однако прослеживаются и в пределах Северо-Сахалинской равнины (Кожурин, 2013). Западная система поднятий представлена почти непрерывной цепью сравнительно коротких, сближенных и почти параллельно вытянутых горных хребтов. Это относительно молодые образования, сформированные в результате сахалинской фазы альпийского тектогенеза, начавшейся в конце позднего плиоцена (~3 млн лет назад) (Кучай, 1987; Ломтев, Жердева, 2015; Мельников, 2010 и др.). Восточная система поднятий, в отличие от западной, не является непрерывной, а состоит из южного, центрального и северного сегментов.

Южный сегмент составляют Тонино-Анивский и Сусунайский хребты (рис. 1), центральный сегмент представлен сложной системой хребтов Восточно-Сахалинских гор. Северный сегмент представлен Западным и Восточным хребтами п-ова Шмидта. Восточная система поднятий значительно древнее западной. Она была сформирована в результате ларамийской фазы складчатости, которая датируется концом мела — началом палеогена (~66 млн лет назад). Структура восточной системы поднятий была обновлена и усложнена в сахалинскую фазу складчатости (Меланхолина, 1973; Мельников, 2010; Рихтер, 1986 и др.). Западно-Сахалинскую и Восточно-Сахалинскую складчатые системы разделяет Центрально-Сахалинский прогиб, в составе которого выделяются Тынь-Поронайская и

Сусунайская впадины. Эти впадины являются кайнозойскими наложенными асимметричными прогибами, западные борта которых имеют разломную природу (Новиков, 1969). Северную часть острова, соответствующую Северо-Сахалинской равнине, занимает Северо-Сахалинский кайнозойский прогиб сложного строения, в пределах которого выделяется 14 антиклинальных зон

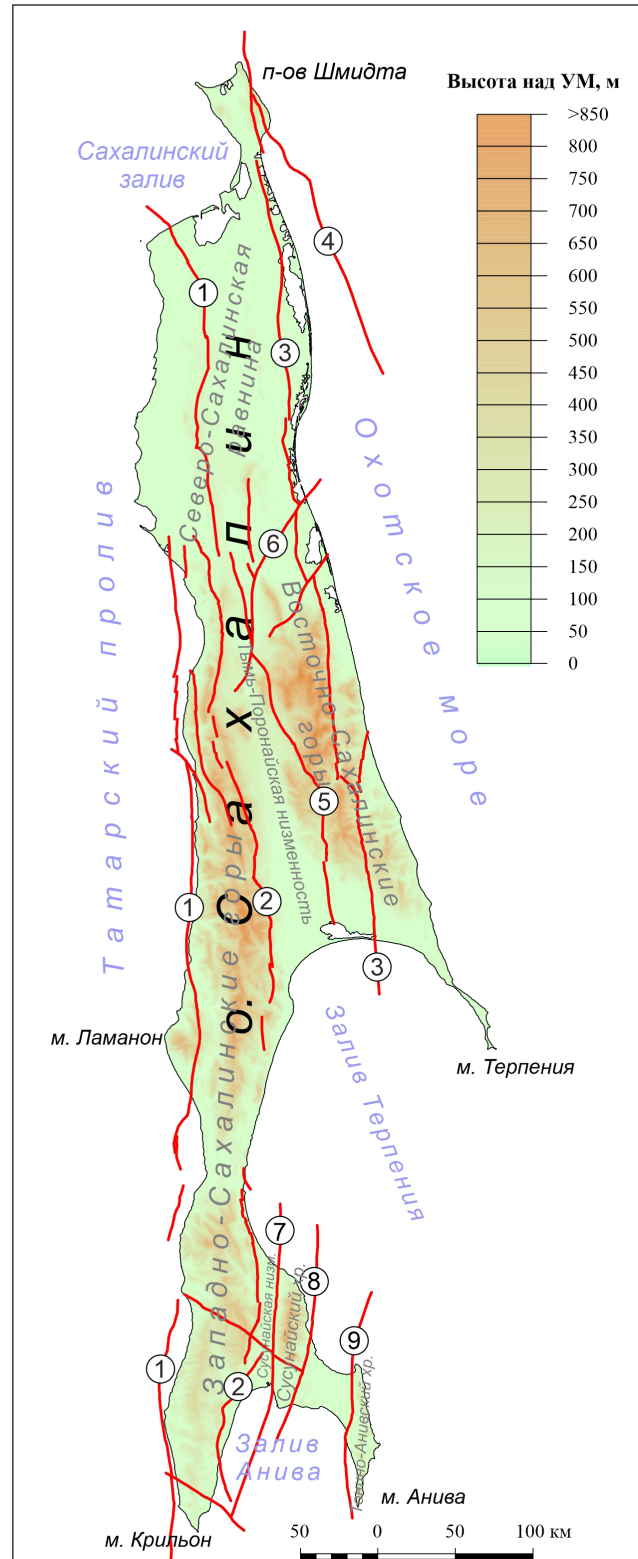


Рис. 1. Рельеф и основные разломы о. Сахалин. Составлено авторами с использованием материалов (Государственная..., 2016, 2019). Разломы: 1 — Западно-Сахалинский; 2 — Центрально-Сахалинский; 3 — Хоккайдо-Сахалинский; 4 — Восточно-Сахалинский; 5 — Срединно-Сахалинский; 6 — Тыньский; 7 — Сусунайский; 8 — Мерейский; 9 — Западно-Тонино-Анивский.

Fig. 1. Topography and major faults of Sakhalin Island. Compiled by the authors using data of (State..., 2016, 2019). Faults: 1 — West Sakhalin; 2 — Central Sakhalin; 3 — Hokkaido-Sakhalin; 4 — East Sakhalin; 5 — Sredinno-Sakhalin; 6 — Tymsky; 7 — Susunaisky; 8 — Mereysky; 9 — West-Tonino-Anivsky.

и поднятий. Прогиб, вероятно, имеет сдвиго-раздвиговую природу (Государственная..., 2016).

Существенную роль в формировании современной геологической структуры о. Сахалин сыграла разрывная тектоника, особенно интенсивно проявившаяся в позднем кайнозое (Кожурин, 2013; Мельников, 2010). На территории острова широко развиты разрывные нарушения, которые по протяженности, глубине заложения и характеру проявления можно подразделить на региональные, контролируемые крупными тектоническими блоками, и локальные — отвечающие за формирование структур более высоких порядков (Рождественский, 1982; Сычев, 1966). К региональным относятся крупные субмеридиональные разломы: Западно-Сахалинский, Центрально-Сахалинский, Хоккайдо-Сахалинский, входящие в состав Хоккайдо-Сахалинской системы меридиональных сдвигов с правосдвиговой кинематикой (Уткин, 2019), а также относительно крупные Восточно-Сахалинский, Срединно-Сахалинский, Тымский, Сусунайский, Мерейский и Западно-Тонино-Анивский (рис. 1).

Впервые о существенной роли сдвигов в формировании структуры острова высказался В.С. Рождественский (1979, 1982). В настоящее время большинство исследователей (Голозубов и др., 2024; Уткин, 2019; Харахинов, 2010) признают существование системы региональных правых сдвигов субмеридионального простирания. Наличие правосдвиговых перемещений по ним в настоящее время подтверждается геологическими (Кожурин, 2013) и сейсмологическими (Каменев и др., 2024) данными, а также данными наблюдений Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) (Василенко, Прытков, 2019; Прытков, Василенко, 2018).

КИНЕМАТИКА ПЛИТ

Попытки объяснить тектонические движения на Сахалине уже почти традиционно опираются на представления о расположении острова на границе Амурской и Охотской литосферных плит (Зоненшайн, Савостин, 1979). Исходя из этого становится очевидным, что ключ к пониманию структурообразующих процессов лежит в изучении плитного взаимодействия.

Если посмотреть на строение северо-востока Азии, а также конфигурацию Гавайско-Императорского хребта, который отражает направление перемещения Тихоокеанской плиты в позднем мелу – кайнозое, то можно отметить ряд интересных особенностей (рис. 2).

Во-первых, в течение кайнозоя в северо-восточной части Азии формировались структуры, обусловленные растяжением земной коры (Голо-

зубов и др., 2024; Уткин, 2019; Ясныпша, 2004 и др.), при котором смещение масс происходило в юго-восточном направлении, противоположном направлению движения Тихоокеанской плиты (рис. 2). К ним относится впадина Японского моря, рифтогенный прогиб Татарского пролива, Южно-Курильская котловина и ряд более мелких структур. Это, скорее всего, исключает возможность давления со стороны Тихоокеанской плиты на восточную окраину Азиатского континента, по крайней мере, в районе развития этих структур.

Во-вторых, формирование Западно-Сахалинской складчатой системы началось ~3 млн лет назад в сахалинскую фазу альпийского тектогенеза. Начало этого процесса, очевидно, никак не связано с движением Тихоокеанской плиты, так как скорость (~7.1 мм/год) над Гавайской горячей точкой и северо-западное направление ее движения (рис. 2) оставались относительно постоянными примерно с ~47 млн лет назад (Кононов, 2019).

В-третьих, формирование Хоккайдо-Сахалинской системы правых сдвигов, которая активна и в настоящее время (Василенко, Прытков, 2019; Каменев и др., 2024; Кожурин, 2013; Прытков, Василенко, 2018), не может быть объяснено давлением Тихоокеанской и Амурской плит на расположенную между ними Охотскую плиту. Учитывая субмеридиональное положение Хоккайдо-Сахалинской системы разломов, правосдвиговая кинематика может возникнуть при ЮЗ-СВ ориентировке оси максимального сжатия. При этом, по данным ГНСС, фиксируется движение Тихоокеанской плиты в северо-западном направлении, а Амурской — в юго-восточном (рис. 2). То есть, направление сжатия, которое могут оказывать литосферные плиты, расположенные с запада и востока от Охотской плиты, исключает возможность формирования правых сдвигов.

Следовательно, причину формирования Хоккайдо-Сахалинской системы правых сдвигов, помимо плитного взаимодействия Амурской и Охотской плит, необходимо искать также в особенностях движений каждой плиты, выраженных в неравномерности распределения по площади плит скоростей и направлений перемещений коровых масс.

В этом смысле, для изучения особенностей современной геодинамики региона, большой интерес представляет определение современных движений Амурской и Охотской плит с помощью ГНСС. Однако на сегодняшний день, информация по относительным перемещениям Охотской плиты на основании данных ГНСС имеется в основном для южной ее части и лишь для единичных пунктов наблюдения в северной

(<https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>), так как основная часть плиты скрыта под водами Охотского моря (рис. 2). Дополнительную сложность создает неопределенность положения границы Охотской плиты, которая, за исключением сахалинского и тихоокеанского сегмен-

тов, остается в значительной степени спорной (Кожурин, 2013).

В работах, посвященных тектонической эволюции Охотоморского региона (Кровушкина, Жаров, 2003; Schellart et al., 2002), в результате анализа расположения и конфигурации

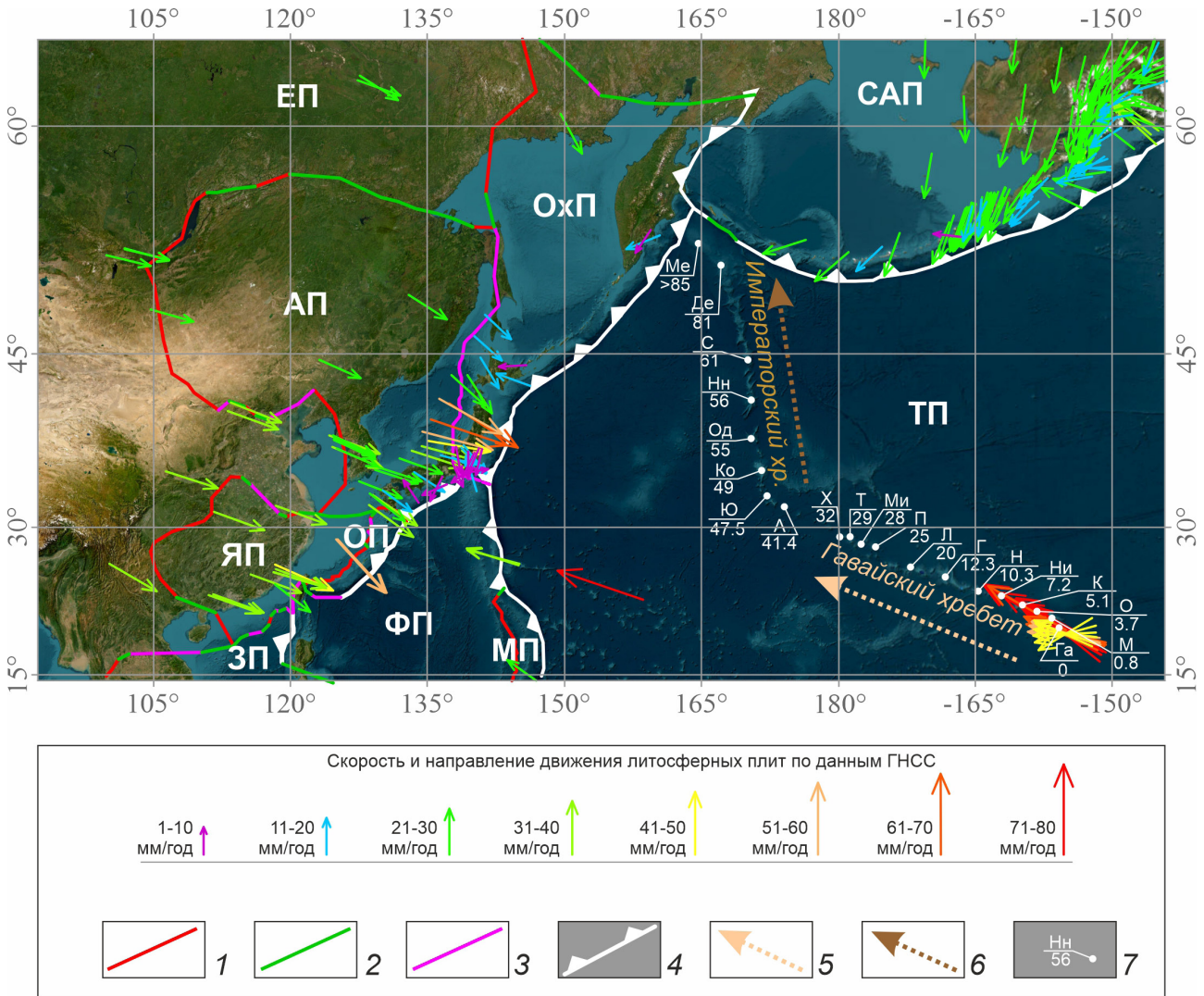


Рис. 2. Границы литосферных плит по П. Берду (Bird, 2003) с направлениями относительных перемещений по данным ГНСС (<https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>). Границы литосферных плит: 1 — дивергентного типа; 2 — трансформного типа; 3 — конвергентного типа; 4 — зона субдукции; 5 — направления относительного перемещения Тихоокеанской плиты в интервале времени 0–47.5 млн лет назад; 6 — направления относительного перемещения Тихоокеанской плиты в интервале времени 47.5 — 85 млн лет назад; 7 — название (над чертой) и абсолютный возраст (под чертой) подводных гор — гайотов: Ме — Мэйджи, Де — Детройт, С — Суйко, Нн — Нинтоку, Од — Оджин, Ко — Коко, Ю — Юриаку, А — Аббот, Х — Хэйсли, Т — Тарниф, Ми — Мидвей, П — Перл, Г — Гарднер, Н — Неккер, Ни — Ниhoa и островов: Л — Лэйсан, К — Кауаи, О — Оаху, М — Мауи, Га — Гавайи. Литосферные плиты: АП — Амурская, ЕП — Евразийская, МП — Марианская, ОП — Окинавская, ОхП — Охотская, САП — Северо-Американская, ЗП — Зондская, ТП — Тихоокеанская, ФП — Филиппинская, ЯП — Янцзы.

Fig. 2. Tectonic plates boundaries according to (Bird, 2003) with directions of relative movements according to GNSS data (<https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>). Boundaries of lithospheric plates: 1 — divergent type; 2 — transform type; 3 — convergent type; 4 — subduction zone; 5 — directions of relative movement of the Pacific Plate in the time range of 0–47.5 million years ago; 6 — directions of relative movement of the Pacific Plate in the time range from 47.5 to 85 million years ago; 7 — the name (above the line) and the absolute age (below the line) of the guyot seamounts: Me — Magee, Де — Detroit, С — Suiko, Нн — Nintoku, Од — Ojin, Ко — Coco, Ю — Yuriaku, А — Abbott, Х — Haisley, Т — Tarnif, Ми — Midway, П — Pearl, Г — Gardner, Н — Necker, Ни — Nihoa and Islands: Л — Laysan, К — Kauai, О — Oahu, М — Maui, Га — Hawaii. Lithospheric plates: АП — Amur, ЕП — Eurasian, МП — Mariana, ОП — Okinawan, ОхП — Okhotsk, САП — North American, ЗП — Sunda, ТП — Pacific, ФП — Filipino, ЯП — Yangtze.

крупных структур Охотоморского региона, сделаны выводы о том, что в кайнозое, имело место вращение Охотской плиты против часовой стрелки.

Идея о вращении Охотской плиты против часовой стрелки, как ведущей роли в формировании современного тектонического плана Охотоморского региона, вдохновила авторов работы (Schellart et al., 2002) на проведение ряда физических экспериментов с целью моделирования тектонической эволюции региона (рис. 3). По представлениям цитируемых авторов, вращение Охотской плиты было обусловлено отступанием погруженной части субдуцирующей Тихоокеанской плиты в сторону океана. Полюс вращения Охотской плиты располагается в районе северной оконечности п-ова Камчатка (рис. 4).

В качестве сходства модели с реальным природным объектом, цитируемые авторы (Schellart et al., 2002) приводят клинообразную геометрию крупной структуры растяжения, примыкающей к отступающей стенке установки, сходной по геометрии с Курильской котловиной, которая раскрывается на юго-запад (рис. 4). Также, при моделировании коллективу авторов (Schellart et al., 2002) удалось получить разломы с чисто сдвиговой правосторонней кинематикой. Эти разломы сконцентрированы вблизи подвижного края отступающей стенки установки, что сходно со структурами Хоккайдо-Сахалинской системы разломов (рис. 4)

Кроме того, моделирование в работе (Schellart et al., 2002) показывает появление сети разломов со сбросовой кинематикой, веерообразно

сходящихся в точке поворота. В структуре Охотского моря наблюдается похожая конфигурация относительно крупных сбросов, которые, если мысленно их продлить, сойдутся в точке, расположенной в районе южной оконечности полуострова Камчатка (рис. 4). В.П. Шелларт с соавторами (Schellart et al., 2002) считают, что полюс вращения Охотской плиты расположен в районе северной оконечности п-ова Камчатка. По нашему мнению, это отклонение может указывать на то, что положение полюса вращения Охотской плиты начиная с эоцена по настоящее время не было постоянным. Также при моделировании сформировались крупные линейные рифтоподобные структуры, расположенные практически на противоположной стороне от отступающей границы, и наиболее крупная рифтоподобная структура, расположенная выше и левее полюса вращения (рис. 3б). Аналогией им может составить пояс рифтогенных впадин, расположенный вдоль северной части Охотского моря и крупнейший рифтогенный прогиб Охотского моря – впадина ТИНРО (рис. 4), формирование которой в работе (Кровушкина, Жаров, 2003) связывается с вращением Охотской плиты против часовой стрелки.

МЕХАНИЗМ СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

В качестве механизма, обуславливающего вращение Охотской плиты, В.П. Шелларт с соавторами (Schellart et al., 2002), рассматривают

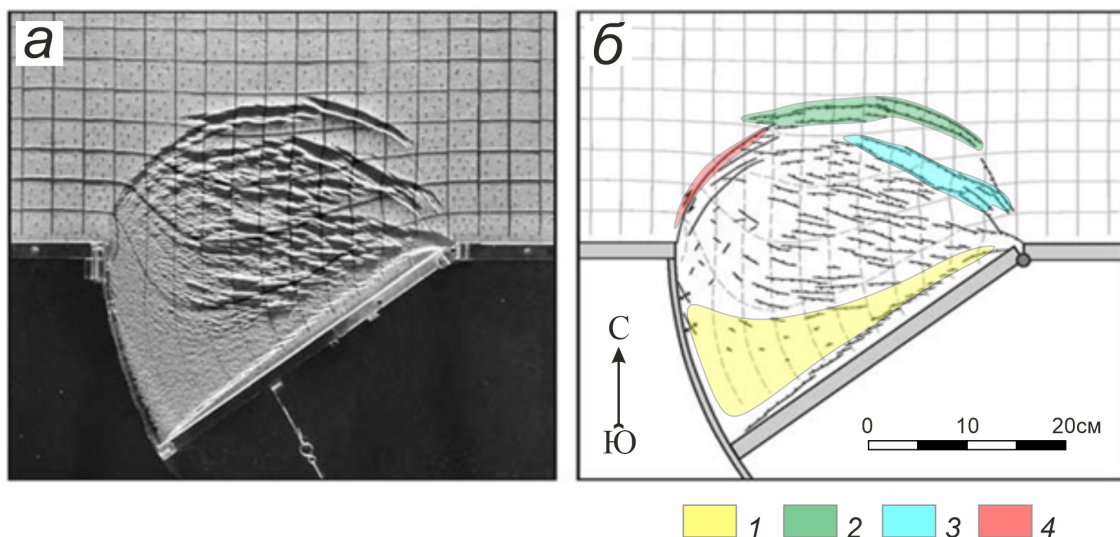


Рис. 3. Результаты физического моделирования вращения Охотской плиты по (Schellart et al., 2002) (а) и схема их интерпретации (б) с дополнениями авторов. 1 — клинообразная структура растяжения; 2 — линейные рифтоподобные структуры; 3 — крупная рифтоподобная структура; 4 — зона развития правых сдвигов.

Fig. 3. The results of physical modeling of the Okhotsk Plate rotation according to (Schellart et al., 2002) (a), and their interpretation (b) with additions by the authors. 1 — wedge-shaped depression; 2 — linear rift-like structures; 3 — large rift-like structure; 4 — zone of dextral strike-slips.

откат шарнира субдуцирующей Тихоокеанской плиты в направлении от островной дуги. Этот механизм и заключается в погружении древней, а, следовательно, более холодной, мощной и тяжелой литосферы вследствие отрицательной плавучести (Flower, Dilek, 2003).

Л.И. Лобковский с соавторами (Кононов, Лобковский, 2019; Лобковский и др., 2013) на

основании гидродинамической интерпретации данных сейсмической томографии глубинного строения мантии в зонах субдукции, разработали геодинамическую модель верхнемантийной возвратной ячейки, которая впоследствии была адаптирована (рис. 5) В.В. Голозубовым с коллегами для Япономорского региона (Голозубов и др., 2024).

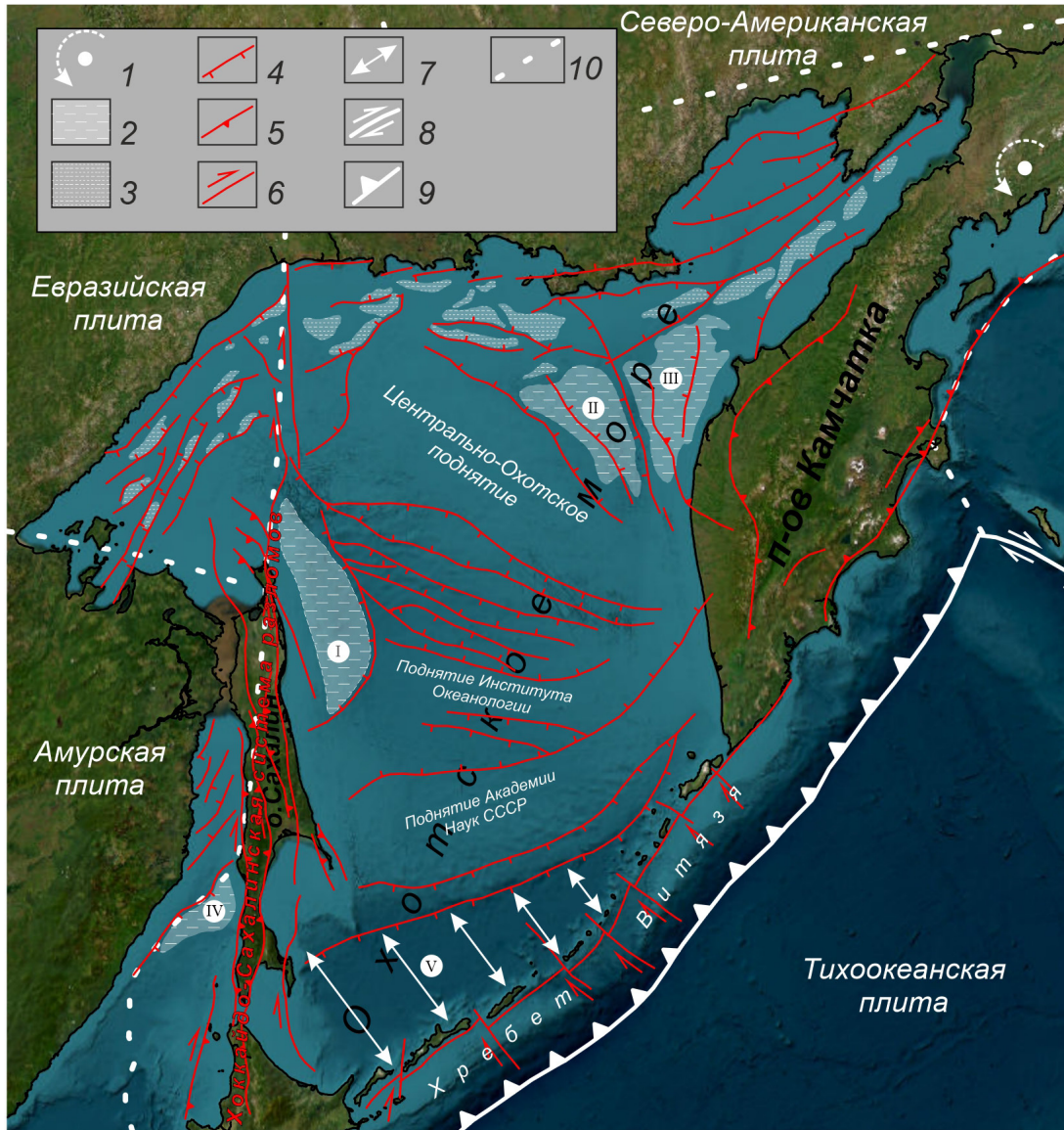


Рис. 4. Тектоническая схема Охотоморского региона. Составлена авторами на основе материалов (Маргулис, 2009; Харахинов, 2018; Schellart et al., 2002). Основа рисунка — спутниковый снимок ESRI. 1 — предполагаемое положение полюса вращения Охотской плиты; 2 — крупные прогибы: I — Дерюгинский, II — впадина ТИНРО, III — Шелиховский, IV — Южно-Татарский, V — Курильская котловина; 3 — пояс рифтогенных прогибов ранне-среднеэоценового возраста; 4 — сбросы; 5 — взбросы/надвиги; 6 — сдвиги; 7 — зона предполагаемого растяжения и утонения земной коры; 8 — сдвиг (Алеутский трансформный разлом); 9 — зона субдукции; 10 — граница литосферных плит.

Fig. 4. Tectonic scheme of the Okhotsk Sea region compiled on the basis of materials of (Margulis, 2009; Kharakhinov, 2018; Schellart et al., 2002). The basis of the drawing is an ESRI satellite image. 1 — the assumed position of the Okhotsk plate rotation pole; 2 — large troughs: I — Deryugin'sky, II — TINRO depression, III — Shelikhov'sky, IV — Yuzhno-Tatarsky, V — Kuril basin; 3 — belt of riftogenic troughs of early-Middle Eocene age; 4 — normal faults; 5 — reverse-thrust faults; 6 — strike-slips faults; 7 — zone of probable extension and thinning of the Earth's crust; 8 — strike-slip fault (Aleutian transform fault); 9 — subduction zone; 10 — lithospheric plate boundaries.

ДЕТАЛИЗАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ РАМОК

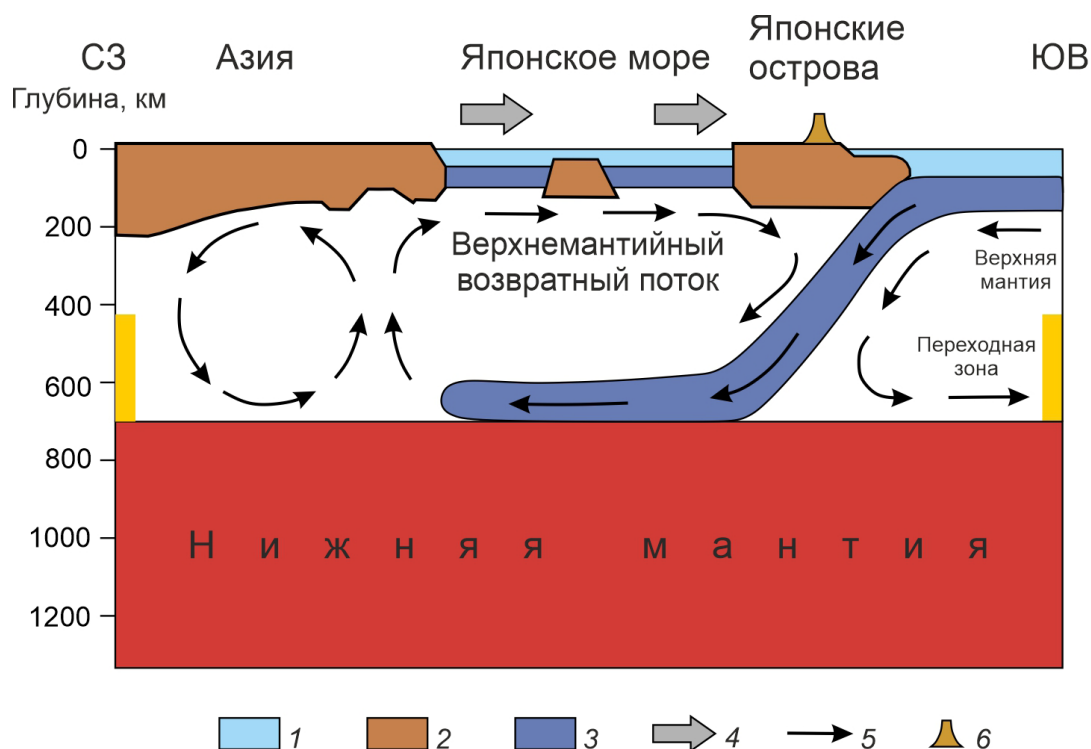


Рис. 5. Модель формирования конвекционной ячейки и верхнемантийного встречного потока в процессе субдукции литосферы Пацифики по (Голозубов и др., 2024) с дополнениями. 1 — водная толща океана; 2 — континентальная литосфера; 3 — океаническая литосфера; 4 — направление перемещения континентальных блоков в сторону тихоокеанской зоны субдукции под воздействием активной возвратной ячейки верхнемантийной конвекции; 5 — направления потоков в верхней мантии и переходной зоне; 6 — проявления магматизма.

Fig. 5. Model of formation of convection cell and of the upper mantle counterflow during subduction of the Pacific lithosphere according to (Golozubov et al., 2024) with additions. 1 — ocean waters; 2 — continental lithosphere; 3 — oceanic lithosphere; 4 — direction of movement of continental blocks towards the Pacific subduction zone under the influence of the active return cell in the upper mantle; 5 — flow directions in the upper mantle and transition zone; 6 — volcanoes.

Модель верхнемантийной возвратной ячейки подразумевает, что нижняя относительно холодная горизонтальная ветвь мантийного потока течет под континент вдоль переходной зоны между нижней и верхней мантией, а верхняя разогретая ветвь образует возвратный поток вещества под литосферой в сторону зоны субдукции (рис. 5). Возвратный поток вещества определяет распределение сил вязкого сцепления, непосредственно воздействующих на литосферные плиты (Кононов, Лобковский, 2019). В результате, в тыловой зоне континента формируются структуры растяжения земной коры, аналогичные наблюдаемым в структуре восточной окраины Азии.

На основании томографических исследований Охотоморского региона (Кулаков и др., 2011) установлено, что форма слэбов в зоне субдукции под Курило-Камчатской островной дугой неодинакова. В южных участках этой дуги слэб принимает субгоризонтальное положение в переходной зоне между глубинами 600 и 700 км и не проникает в нижнюю мантию. Под Северными

Курилами и Южной Камчаткой наблюдается погружение слэба до глубины 900 км (рис. 6).

По нашему мнению, это указывает на то, что описанный процесс верхнемантийной конвекции должен усиливаться в юго-западном направлении. То есть юго-западная часть Охотской плиты должна двигаться быстрее северо-восточной части в юго-восточном направлении. Учитывая форму и размеры Охотской плиты, которая является вытянутой в ЮЗ-СВ направлении почти на 3500 км, разница в скоростях движения противоположных концов, по нашему мнению, должна проявляться в виде вращения плиты против часовой стрелки. На сегодняшний день, однозначно подтвердить это предположение по данным наблюдений ГНСС не представляется возможным, ввиду неравномерного размещения редкой сети пунктов измерений относительно предполагаемых границ Охотской плиты (рис. 2). А также, как отмечено в работе (Кожурин, 2013), края Охотской плиты, особенно северо-восточный (к северу от Охотского моря), возможно, не жесткие, а деформируемые,

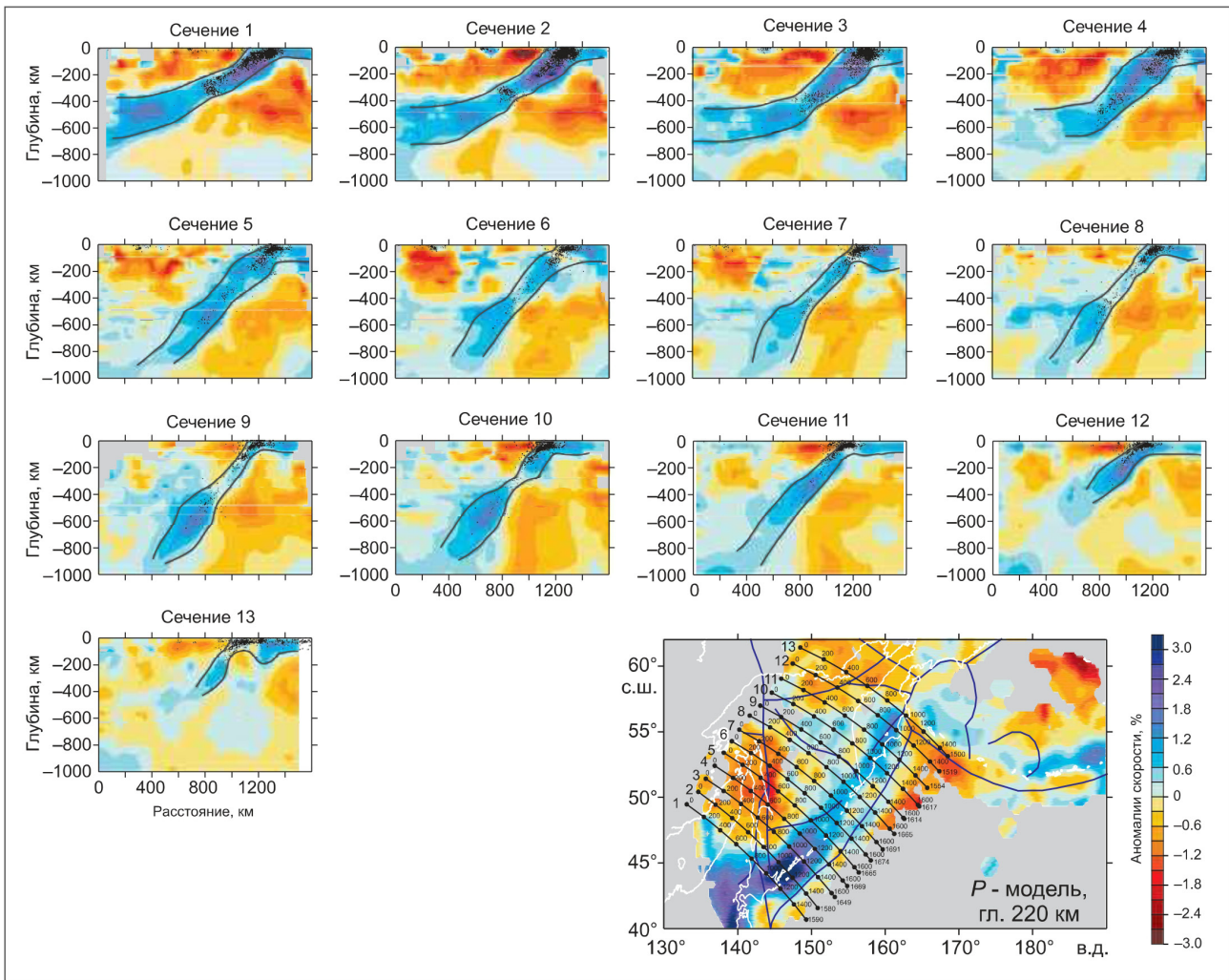


Рис. 6. Охотоморский регион. Результаты томографической инверсии с интерпретацией по (Кулаков и др., 2011). Шкала отображает аномалии скоростей P-волн.

Fig. 6. Okhotsk Sea region. The results of tomographic inversion with interpretation by (Kulakov et al., 2011). The scale shows anomalies of P-wave velocities.

что привносит дополнительную неопределенность в интерпретацию данных ГНСС измерений. Однако тренд на увеличение скоростей относительных перемещений по данным ГНСС, при приближении к юго-западному краю плиты все-таки прослеживается (рис. 2). В районе Южного Сахалина, скорости перемещения пунктов наблюдения в юго-восточном направлении составляют порядка 20 мм/год, а в районе центральной Японии приближаются к 70 мм/год (<https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>).

КОРРЕЛЯЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СОБЫТИЙ

В настоящее время на Сахалине продолжается сахалинская фаза складчатости и формирование Хоккайдо-Сахалинской системы правых сдвигов. Это фиксируется по относительно недавним смещениям долин ручьев и рек

(Кожурин, 2013; Рождественский, 1982). На это указывают высокая сейсмическая активность региона и преимущественно взбросовый и сдвиговый тип дислокаций в очагах землетрясений (Каменев и др., 2024), а также данные скоростей и направлений относительных перемещений участков земной коры по данным ГНСС (Василенко, Прытков, 2019; Прытков, Василенко, 2018). Временем начала сахалинской фазы складчатости многие исследователи считают конец неогенового – начало четвертичного периодов (Кучай, 1987; Ломтев, Жердева, 2015; Мельников, 2010 и др.). Более точное время начала этого процесса, вероятно, позднеплиоценовое (~3 млн лет назад). На это указывает тот факт, что наиболее древние поверхности выравнивания и террасы западной части острова выработаны на дислоцированных отложениях верхних частей маруямской и нутовской свит, которые имеют позднеплиоценовый возраст (Кучай, 1987).

При этом характер движения расположенной к востоку субдуцирующей Тихоокеанской литосферной плиты за последние ~47 млн лет оставался относительно постоянным (рис. 2) (Кононов, 2019). С запада Охотская плита граничит с Амурской плитой, западная граница которой проходит по Байкальскому рифту. Учитывая, что описанный механизм конвекционной ячейки и верхнемантийного встречного потока обуславливает движение Амурской и Охотской плит в юго-восточном направлении, навстречу направлению движения субдуцирующей Тихоокеанской плиты, напряжения сжатия на их границе могут возникнуть при условии, что скорость движения Амурской плиты выше скорости движения Охотской плиты. Это подтверждается данными наблюдений ГНСС (рис. 2). Байкальский рифт достаточно хорошо изучен. Начало его формирования приходится на эоцен. Однако на ранней стадии преобладал медленный рифтогенез (от эоцена до среднего плиоцена). В позднем плиоцене медленный рифтогенез сменился быстрым (~3 млн лет назад) (Леви и др., 1997), который, сохраняется и в настоящее время (Середкина, 2021). Таким образом, начало сахалинской фазы складчатости, обусловившей формирование Западно-Сахалинской складчатой системы, достаточно уверенно коррелирует с началом быстрой фазы байкальского рифтогенеза.

В настоящее время, на Сахалине продолжается формирование Хоккайдо-Сахалинской системы правых сдвигов, которое, как сказано выше, тесно связано с процессом растяжения земной коры в тыловой зоне континента, за счет возникновения верхнемантийного встречного потока в результате субдукции Тихоокеанской плиты под восточную окраину Азии. Ряд фактов указывает на то, что процесс растяжения восточной окраины Азии начался в эоцене. В эоценовое время произошло возобновление кайнозойского этапа вулканической активности Восточного Сихотэ-Алиня. Если мезозойский вулканизм Восточного Сихотэ-Алиня считается типичным субдукционным, то Ю.А. Мартынов и А.И. Ханчук (2013) на основании геологических и изотопно-геохимических данных установили, что формирование вулканитов Восточного Сихотэ-Алиня, начиная с эоценового времени, происходило в сложной геодинамической обстановке. В основании кайнозойского разреза Восточного Сихотэ-Алиня, наряду с базальтами, находятся риолитовые эффузивы, высокая объемная доля которых позволяет выделять бимодальную базальт-риолитовую ассоциацию, считающуюся индикатором начальных этапов континентального рифтогенеза (Мартынов, Ханчук, 2013). Крупнейшей структурой растяжения восточной окраины Азии в кайнозойе является котловина

Японского моря. По результатам глубоководного бурения и по возрасту осадочных и вулканогенных пород во впадинах, обрамляющих Японское море, установлено, что процесс раскрытия Японского моря начался в эоцене (~45 млн лет назад) (Павлюткин, Голозубов, 2010).

Также в раннем эоцене (~47.5 млн лет назад) произошло изменение направления движения Тихоокеанской плиты по отношению к Евразии с северо-северо-западного на запад-северо-западное, устанавливаемое по коленообразному изгибу Гавайско-Императорского хребта (рис. 2). Учитывая конфигурацию границы континент-океан, в эоцене субдукция Тихоокеанской плиты под Азиатский континент сменилась с косо направленной на ортогональную, что повлекло за собой увеличение объема поступающего океанического литосферного материала в зону субдукции, вследствие чего интенсивность верхнемантийной конвекции под сопряженной с субдукцией литосферой увеличилась. Это обусловило начало процесса растяжения восточной окраины Азии.

В пределах Охотоморского региона в эоцене начинают формироваться структуры, обусловленные вращением Охотской плиты. Наиболее крупной из них является Курильская котловина. Время начала ее формирования в значительной мере остается спорным в связи с тем, что нижние слои осадочного чехла нигде не выходят на дно и не доступны для драгирования. Однако, на основании возрастной корреляция геологических комплексов пород хребта Витязя (рис. 4) и соответствующих им сейсмокомплексов, возраст нижней части кайнозойского осадочного чехла Курильской котловины, оценивается палеоэоценом-эоценом (Терехов, Харченко, 2020). Время формирования рифтогенных впадин, составляющих протянувшуюся в северо-восточном направлении Северо-Охотскую рифтогенную зону, также оценивается средним эоценом (Кровушкина, Жаров, 2003). Также следует отметить, что в восточной и северной частях Сахалина в эоцене началось накопление пресноводно-континентальных угленосных и прибрежно-морских толщ мачигарской и люкаминской свит, залегающих с угловым несогласием на мезозойских образованиях. Отложения этих свит имеют локальное распространение и приурочены к присдвиговым прогибам (Государственная..., 2016). Все это указывает на то, что процессы растяжения восточной окраины Азии и вращения Охотской плиты, обусловившей начало формирования Хоккайдо-Сахалинской системы правых сдвигов, начались в одно и то же время, в среднем эоцене (~45 млн лет назад). Стоит отметить, что, по нашему мнению, система субмеридиональных разломов Сахалина могла быть заложена значительно раньше, как часть Восточно-Азиатской

глобальной сдвиговой зоны с левосдвиговой кинематикой. Признаки изменения кинематики разломов с левой на правую обнаруживаются в ряде районов острова, в частности в районе Сусунайского хребта (Жаров, 2004).

Следует также отметить, что имеются данные, указывающие на то, что формирование системы правых сдвигов произошло позднее, в миоцене. Например, по геологическим данным правые сдвиги в структуре Сахалина впервые отчетливо фиксируются в среднем миоцене (Рождественский, 1976, 1982). Заложение впадины ТИПРО (рис. 4), которое связывается с вращением Охотской плиты против часовой стрелки, датируется поздним олигоценом – ранним миоценом (Кровушкина, Жаров, 2003). Японскими геологами по палеомагнитным данным установлено, что северная часть Японии, которая входит в состав Охотской плиты, начиная с миоцена, вращалась против часовой стрелки, в то время как южная часть вращалась по часовой (Kawai et al., 1962; Otofujii, 1996; Otofujii et al., 1985).

Возможно, это является результатом более интенсивного развития процесса растяжения и вращения Охотской плиты в раннем миоцене. В начале миоцена (~18–15 млн лет) фиксируется резкое увеличение скорости растяжения котловины Японского моря. В течение этой относительно короткой (до 3 млн лет) фазы растяжение палеобассейна имело «взрывной» характер (Голозубов и др., 2024). Причиной, обусловившей интенсификацию процесса растяжения, вероятно, является переход рифтогенеза от пассивной стадии в активную. Модель такого перехода подробно изложена в статье (Гончаров, 2011) и подразумевает, что в процессе эволюции пассивного рифтогенеза создаются благоприятные условия для перехода его в активную форму, а затем обратно. По мнению В.В. Голозубова с соавторами (Голозубов и др., 2024) во время стадии активного рифтогенеза в пределах котловины Японского моря происходило внедрение мантийных диапиров, что создавало дополнительное давление в юго-западной части линейно вытянутого фрагмента континентальной литосферы Охотской плиты и обусловило начало его более быстрого вращения против часовой стрелки. До этого момента вращение, вероятно, происходило гораздо медленнее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структурообразующие процессы в Северо-Восточной Азии в целом и на острове Сахалин описываются геодинамической моделью верхнемантийной возвратной ячейки, которая подразумевает, что нижняя относительно холодная горизонтальная ветвь течет под континент вдоль

переходной зоны между нижней и верхней мантией, а верхняя разогретая ветвь образует возвратный поток вещества под литосферой в сторону зоны субдукции. В результате создаваемых верхней ветвью сил вязкого сцепления, воздействующих на литосферные плиты, в тыловой зоне континента формируются области растяжения земной коры, наблюдаемые в структуре восточной окраины Азии.

Вращение Охотской плиты против часовой стрелки, начавшееся в эоцене на фоне общего растяжения восточной окраины Азии и смещении коровых масс в юго-восточном направлении, обусловило развитие Хоккайдо-Сахалинской системы правых сдвигов в условиях трансформационного геодинамического режима, существовавшего на границе Амурской и Охотской плит. На основании корреляции времени начала развития крупных геологических структур Японского и Охотского регионов, а также происшедших в течение их развития важных геологических событий, время начала развития Хоккайдо-Сахалинской системы правых сдвигов оценивается нами как среднеэоценовое (~45 млн лет) с относительно коротким периодом интенсификации движений в раннем миоцене (~18–15 млн лет), соответствующим весьма непродолжительной фазе активного рифтогенеза в Японском море.

В позднем плиоцене на границе Амурской и Охотской плит произошло изменение трансформационного геодинамического режима на транспрессионный, что проявилось в начале сахалинской фазы складчатости (~3 млн лет назад), а также приостановке раскрытия Японского моря. Такие выводы достаточно уверенно коррелируют с началом быстрой фазы байкальского рифтогенеза, в результате которой скорость движения Амурской плиты в юго-восточном направлении стала выше скорости движения Охотской плиты в том же направлении, что обусловило их коллизию. Знание точного времени начала геодинамических процессов может быть использовано при проведении дальнейшего моделирования истории развития региона.

Исследования проведены в рамках госзадания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM-2021-0001).

Список литературы [References]

- Василенко Н.Ф., Прытков А.С.* Современная геодинамика Гаромайского активного разлома (остров Сахалин) // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 2. С. 561–567. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0426> [*Vasilenko N.F., Prytkov A.S.* Contemporary geodynamics of the Garomai active fault (Sakhalin Island) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2019. V. 10. № 2. P. 561–567 (in Russian)].

- Геология СССР. Остров Сахалин. Геологическое описание / ред. В.Н. Верещагин. М.: Недра, 1970. Т. XXXIII. 432 с. [Geology of the USSR. Sakhalin Island. Geological description / ed. by V.N. Vereshchagin, Moscow: Nedra Publ., 1970. V. XXXIII. 432 p. (in Russian)].
- Голозубов В.В., Фунг Ван Фатъ, Ле Дык Ань Рифтогенез в окраинных морях Западной Пацифики // Тихоокеанская геология. 2024. № 1. С. 3–26 [Golozubov V.V., Van Phach P., Anh L.D. Rifting in the Western Pacific Marginal Seas. Russian Journal of Pacific Geology. 2024. V. 18. P. 1–22. <https://doi.org/10.1134/S1819714024010032>]
- Гончаров М.А. Пассивный и активный рифтогенез: не противопоставление, а эволюционный переход от одного к другому // Тектоника, рудные месторождения и глубинное строение земной коры. Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 2011. С. 54–57 [Goncharov M.A. Passive and active rifting: not an opposition, but an evolutionary transition from one to the other // Tectonics, ore deposits and the deep structure of the Earth's crust. Yekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the RAS, 2011. P. 54–57 (in Russian)].
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000. Третье поколение. Серия Дальневосточная. Лист М-54 (Александровск-Сахалинский): объяснительная записка / СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 599 с. [State Geological Map of the Russian Federation 1:1000000 scale. The third generation. The Far Eastern series. Sheet M-54 (Alexandrovsk-Sakhalinsky): explanatory note / St. Petersburg: Kartogr. fabrika VSEGEI, 2016. 599 p. (in Russian)].
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000. Третье поколение. Серия Дальневосточная. Лист L-(53). 54 (Южно-Сахалинск): объяснительная записка / СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ, 2019. 536 с. [State Geological Map of the Russian Federation 1:1000000 scale. The third generation. The Far Eastern series. Sheet L-(53). 54 (Yuzhno-Sakhalinsk): explanatory note / St. Petersburg: Kartogr. fabrika VSEGEI, 2019. 536 p. (in Russian)].
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000. Третье поколение. Серия Дальневосточная. Лист N-54 (Николаевск-на-Амуре): объяснительная записка / СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 477 с. [State Geological Map of the Russian Federation 1:1000000 scale. The third generation. The Far Eastern series. Sheet N-54 (Nikolaevsk-on-Amur): explanatory note / St. Petersburg: Kartogr. fabrika VSEGEI, 2016. 477 p. (in Russian)].
- Гранник В.М. Палеосейсмофокальные зоны Сахалина // Тихоокеанская геология. 2002. Т. 21. № 3. С. 50–65 [Grannik V.M. Paleoseismofocal zones of sakhalin // Russian Journal of Pacific Geology. 2002. V. 21. № 3. P. 50–65 (in Russian)].
- Жаров А.Э. Геологическое строение и мел-палеогеновая геодинамика Юго-Восточного Сахалина. Южно-Сахалинск, 2004. 192 с. [Zharov A.E. Geological structure and Cretaceous-Paleogene geodynamics of Southeastern Sakhalin. Yuzhno-Sakhalinsk, 2004. 192 p. (in Russian)].
- Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. Введение в геодинамику. М.: Недра, 1979. 312 с. [Zonenshain L.P., Savostin L.A. Introduction to geodynamics. Moscow: Nedra, 1979. 312 p. (in Russian)].
- Каменев П.А., Дегтярев В.А., Жердева О.А., Костров Ю.В. Кинематика разрывных нарушений Сахалина на основе геологических и сейсмологических методов // Геосистемы переходных зон. 2024. Т. 8. № 1. С. 37–46 [Kamenev P.A., Degtyarev V.A., Zherdeva O.A., Kostrov Yu.V. Fault kinematics of Sakhalin Island based on geological and seismological data // Geosystems of Transition Zones. 2024. V. 8. № 1. P. 37–46. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.8.1.037-046>].
- Кожурин А.И. Активная геодинамика северо-западного сектора Тихоокеанского тектонического пояса (по данным изучения активных разломов): дис. д-ра геол.-минер. наук. М.: ГИН РАН, 2013. 207 с. [Kozhurin A.I. Active geodynamics of the northwestern sector of the Pacific tectonic belt (based on the data of the study of active faults): Dissertation. Dr. Geol.-Miner. nauk. Moscow: GIN RAS, 2013. 207 p. (in Russian)].
- Кононов М.В., Лобковский Л.И. Влияние верхнемантийной конвективной ячейки и связанной с ней субдукции Тихоокеанской плиты на тектонику Арктики в позднем мелу-кайнозое // Геотектоника. 2019. № 6. С. 27–45 [Kononov M.V., Lobkovsky L.I. Influence of the upper-mantle convective cell and related Pacific plate subduction on Arctic tectonics in the late Cretaceous–Cenozoic // Geotectonics. 2019. T. 53. № 6. P. 658–674. <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019627-45>].
- Кровушкина О.А., Жаров А.Э. Тектоническая эволюция и строение осадочных бассейнов северной части Охотского моря // Геология нефти и газа. 2003. № 2. С. 2–11 [Krovushkina O.A., Zharov A.E. Tectonic evolution and structure of sedimentary basins of the northern part of Okhotsk Sea // Oil and gas geology. 2003. № 2. С. 2–11 (in Russian)].
- Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 6. С. 830–851 [Koulakov I.Y., Dobretsov N.L., Bushenkova N.A., Yakovlev A.V. Slab shape in subduction zones beneath the Kurile–Kamchatka and Aleutian arcs based on regional tomography results // Russian Geology and Geophysics. 2011. V. 52. № 6. P. 650–667. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.05.008>].
- Кучай В.К. Современная орогенная структура южной части острова Сахалин // Тихоокеанская геология. 1987. № 1. С. 50–57 [Kuchai V.K. Modern orogenic structure of the southern part of Sakhalin Island // Russian Journal of Pacific Geology. 1987. № 1. P. 50–57 (in Russian)].
- Леви К.Г., Аржанникова А.В., Буддо В.Ю. и др. Современная геодинамика Байкальского рифта // Разведка и охрана недр. 1997. № 1. С. 10–20 [Levi K.G., Arzhannikova A.V., Buddo V.Yu. et al. Modern geodynamics of the Baikal rift // Exploration

- and protection of the subsoil. 1997. № 1. P. 10–20 (in Russian).
- Лобковский Л.И., Шипилов Э.В., Кононов М.В.* Верхнемантийная конвекция и механизм образования геоструктур Арктического региона // ДАН. 2013. Т. 449. № 1. С. 65–70 [*Lobkovskii L.I., Shipilov E.V., Kononov, M.V.* Upper mantle convection and the mechanism of formation of geostructures of the arctic region // *Doklady Earth Sciences*. 2013. V. 449. P. 270–274. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13030045>]
- Ломтев В.Л., Жердева О.А.* К сейсмотектонике Сахалина: новые подходы // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2015. Т. 41. № 3. С. 56–68 [*Lomtev V.L., Zherdeva O.A.* To the seismotectonics of Sakhalin: new approaches // *Geology and minerals of the World Ocean*. 2015. V. 41. № 3. P. 56–68 (in Russian)].
- Маргулис Л.С.* Нефтегеологическое районирование и оценка нефтегазовых ресурсов дальневосточных морей // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2009. Т. 4. № 2 [*Margulis L.S.* Oil and geological zoning and assessment of oil and gas resources of the Far Eastern seas // *Oil and Gas Geology. Theory and practice*. 2009. V. 4. № 2 (in Russian)].
- Мартьянов Ю.А., Ханчук А.И.* Кайнозойский вулканизм Восточного Сихотэ-Алиня: результаты и перспективы петрологических исследований // Петрология. 2013. Т. 21. № 1. С. 94–108 [*Martynov Yu.A., Khanchuk A.I.* Cenozoic volcanism of the eastern Sikhote Alin: Petrological studies and outlooks // *Petrology*. 2013. V. 21. № 1. С. 85–99 <https://doi.org/10.7868/S0869590313010068>].
- Меланхолина Е.Н.* Западно-Сахалинский геосинклинальный прогиб и его гомологи в Тихоокеанском поясе. Тр. ГИН; вып. 224. М.: Наука, 1973. 174 с. [*Melancholina E.N.* The West Sakhalin geosynclinal trough and its homologues in the Pacific Belt. Tr. GIN; issue 224. Moscow: Nauka, 1973. 174 p. (in Russian)].
- Мельников О.А.* Остров Сахалин: его геологическое прошлое, настоящее и вероятное будущее // Вестник Сахалинского музея. 2010. № Т. 17. № 1. С. 262–273 [*Melnikov O.A.* Sakhalin Island: its geological past, present and probable future // *Bulletin of the Sakhalin Museum*. 2010. V. 17. № 1. P. 262–273 (in Russian)].
- Новиков Г.Н.* Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Поронайской низменности // Результаты исследований по геологии и нефтегазоносности Сахалина. Тр. ВНИГРИ. Вып. 255. 1969. С. 82–91 [*Novikov G.N.* Geological structure and prospects of oil and gas potential of the Poronai lowland // *Results of research on the geology and oil and gas potential of Sakhalin*. Tr. VNIGRI; Issue 255. 1969. P. 82–91 (in Russian)].
- Павлюткин Б.И., Голозубов В.В.* Палеоботанические свидетельства времени возникновения Японского моря // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. Т. 16. № 2. С. 19–26 [*Pavlyutkin B.I., Golozubov V.V.* Paleobotanical evidence of the origin of the Sea of Japan // *Vestnik KRAUNTs. Earth Sciences*. 2010. № 2 (16). P. 19–26 (in Russian)].
- Парфенов Л.М., Натальин Б.А., Войнова И.П., Попеко Л.И.* Тектоническая эволюция активных континентальных окраин на северо-западе Тихоокеанского обрамления // Геотектоника. 1981. № 1. С. 85–104. [*Parfenov L.M., Natalin B.A., Voynova I.P., Popeko L.I.* Tectonic evolution of active continental margins in the Northwest Pacific rim // *Geotectonics*. 1981. № 1. P. 85–104 (in Russian)].
- Прытков А.С., Василенко Н.Ф.* Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 2. С. 503–514 [*Prytkov A.S., Vasilenko N.F.* Earth surface deformation of the Sakhalin Island from GPS data. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018. V. 9. № 2. P. 503–514. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0358> (in Russian)].
- Пушчаровский Ю.М.* О тектонике Сахалина // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1964. № 12. С. 42–61 [*Pushcharovsky Yu.M.* On Sakhalin tectonics // *Izv. AN SSSR. Ser. geol.* 1964. № 12. P. 42–61 (in Russian)].
- Рихтер А.В.* Структура и тектоническое развитие Сахалина в мезозое. Тр. ГИН; Вып. 411. М.: Наука, 1986. 93 с. [*Richter A.V.* The structure and tectonic development of Sakhalin in the Mesozoic. Tr. GIN; Iss. 411. Moscow: Nauka, 1986. 93 p. (in Russian)].
- Рождественский В.С.* О сдвиговых перемещениях вдоль зоны Тымь-Поронайского разлома на о. Сахалин // ДАН СССР. 1976. Т. 230. № 3. С. 678–680 [*Rozhdestvensky V.S.* On shear movements along the zone of the Tym-Poronai fault on Sakhalin Island // *DAN USSR*. 1976. V. 230. № 3. P. 678–680 (in Russian)].
- Рождественский В.С.* Роль сдвигов в формировании структуры о. Сахалин // Геотектоника. 1982. № 4. С. 99–111 [*Rozhdestvensky V.S.* The role of strike-slip in the structure of Sakhalin // *Geotectonics*. 1982. № 4. P. 99–111 (in Russian)].
- Середкина А.И.* Современное состояние исследований глубинного строения земной коры и мантии Байкальского рифта по сейсмологическим данным // Физика Земли. 2021. № 2. С. 46–70 [*Seredkina A.I.* The State of the Art in Studying the Deep Structure of the Earth's Crust and Upper Mantle beneath the Baikal Rift from Seismological Data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2021. V. 57. P. 180–202. <https://doi.org/10.1134/S1069351321020117>]
- Сычев П.М.* Особенности строения и развития земной коры Сахалина и прилегающих к нему акваторий. М.: Наука, 1966. 124 с. [*Sychev P.M.* Features of the structure and development of the Earth's crust of Sakhalin and adjacent water areas. Moscow: Nauka, 1966. 124 p. (in Russian)].
- Терехов Е.П., Харченко Т.А.* О возможности возрастной корреляции геологических комплексов в регионе Курильской островодужной системы с использованием сейсмоакустических характеристик // Тихоокеанская геология. 2020. Т. 39. № 3. С. 89–103 [*Terekhov E., Kharchenko T.A.* On the Possibility of Age Correlation of the Geological Complexes in the area of the Kuril Island Arc System from Seismoacoustic Parameters. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2020. V. 14. P. 277–291. <https://doi.org/10.1134/S1819714020030069>]
- Тихонович Н.Н., Полевой П.И.* Геоморфологический очерк Русского Сахалина / труды Геологического комитета. Вып. 120. 1915. 77 с. [*Tikhonovich N.N., Polevoy P.I.* Geomorphological sketch of Russian

- Sakhalin / Proceedings of the Geological Committee. Iss. 120. 1915. 77 p. (in Russian)].
- Уткин В.П. Сдвиговый тектогенез и структурообразующее течение коровых масс Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода // Литосфера. 2019. Т. 19. № 5. С. 780–799 [Utkin V.P. Strike-slip related tectogenesis and structure-forming flow of crustal masses of the Asia-Pacific transition zone // Lithosphere. 2019. V. 19. № 5. P. 780–799. <https://doi.org/110.24930/1681-9004-2019-19-5-780-799> (in Russian)].
- Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 275 с. [Kharakhinov V.V. Oil and gas geology of the Sakhalin region. M.: Scientific World, 2010. 275 p. (in Russian)].
- Харахинов В.В. Геодинамические условия нефтегазоносности Охотоморского региона // Геология нефти и газа. 2018. № 2. С. 25–39 [Kharakhinov V.V. Sedimentary (oil and gas bearing and potentially oil and gas bearing) systems of the Sea of Okhotsk region: geodynamic arrangement // Russian Oil and Gas Geology. 2018. № 2. P. 25–39 (in Russian)].
- Ясныпша Т.А. Источники магматизма континентальных окраин в средне-позднекайнозойских структурах растяжения Японского моря и Рио-Гранде по геохимическим данным: автореф. дис. кан. геол.-минер. наук. Иркутск, 2004. 20 с. [Yasnyupsha T.A. Sources of magmatism of continental margins in the Middle and Late Cenozoic extension structures of the Sea of Japan and the Rio Grande according to geochemical data: abstract of the dissertation. Irkutsk, 2004. 20 p. (in Russian)].
- Bird P. An updated digital model of plate boundaries // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. V. 4. № 3. P. 1027. <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- Flower M.F.J., Dilek Y. Arc-trench rollback and forearc accretion: 1. A collision-induced mantle flow model for Tethyan ophiolites // Geological Society, London, Special Publications. 2003. V. 218. P. 21–41.
- Kawai N., Kume S., Ito H. Study on the magnetisation of the Japanese rocks // Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. 1962. V. 13. P. 150–203.
- Kozhurin A. Active Faults in Sakhalin and North of the Sea of Okhotsk: Does the Okhotsk Plate Really Exist? // Journal of Asian Earth Sciences. 2022. V. 230. № 35. P. 105219. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105219>
- Otofuji Y. Large tectonic movement of the Japan Arc in Late Cenozoic times inferred from paleomagnetism: review and synthesis // The Island Arc. 1996. V. 5. P. 229–249.
- Otofuji Y., Matsuda T., Nohda S. Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism of the Japan arc // Nature. 1985. V. 317. P. 603–604.
- Schellart W.P., Jessell M.W., Lister G.S. Asymmetric deformation in the backarc region of the Kuril arc, northwest Pacific: New insights from analogue modeling // Tectonics. 2003. V. 22. № 5. P. 1047. <https://doi.org/10.1029/2002TC001473>

DETAILING THE TIME FRAME OF GEODYNAMIC PROCESSES ON SAKHALIN ISLAND IN THE CENOZOIC

V.A. Degtyarev, P.A. Kamenev

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Received December 20, 2024; revised August 18, 2025; accepted September 25, 2025

Forming of the geological structure of Sakhalin Island in the Cenozoic is caused by subsurface mantle flows described by the upper mantle return cell model. The proposed mechanism of the return cell continues to play a crucial role in the development of the island structure at the present stage. It is shown that the island's development is currently taking place in a transpressive environment. This situation is the result of the rotation of the Okhotsk lithospheric plate counterclockwise (which began in the Middle Eocene) and the collision between the Amur and Okhotsk lithospheric plates, which began in the Late Pliocene — Early Quaternary period. Based on the correlation of tectonic events in East Asia and Western Pacific, the time of the Hokkaido-Sakhalin system of dextral strike-slips was clarified. It is estimated to be ~45 million years ago (Middle Eocene) and corresponds to the time of the beginning of rotation of the Okhotsk lithospheric plate, which caused their creation. The time of the beginning of the Sakhalin folding phase (~3 million years ago (Late Pliocene), which is a consequence of the collision of the Amur and Okhotsk lithospheric plates, has been clarified.

Keywords: tectonic plate boundaries, faults, geodynamic model, lithospheric plate.