

ТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ В МЕЗОЗОЕ

С.Д. Соколов¹, Л.И. Лобковский^{2,3}, В.А. Верниковский^{4,5}, М.И. Тучкова¹,
Н.О. Сорохтин², М.В. Кононов²

¹Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, 117997, Москва, Нахимовский просп., 36, Россия

³Московский физико-технический институт, 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9, Россия

⁴Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

⁵Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

Обсуждаются тектонические и геодинамические модели формирования Амеразийского бассейна. Представлены модели тектонической эволюции арктических окраин Чукотки и Северной Аляски в позднеюрско-раннемеловое время. Отмечаются общие особенности их формирования, начиная от образования океанических бассейнов Южно-Анюйского и Ангаючам в позднем палеозое, и до их закрытия в процессе субдукции южной вергентности и последующей коллизии в конце раннего мела. В результате коллизии были сформированы покровно-складчатые структуры северной вергентности в Чукотской складчатой области и в орогене хр. Брукса.

Предлагается субдукционно-конвективная геодинамическая модель формирования Амеразийского бассейна, которая основана на данных сейсмической томографии о существовании в верхней мантии под Арктикой и Восточной Азией циркуляции вещества в горизонтально вытянутой конвективной ячейке протяженностью в несколько тысяч километров. В эту циркуляцию вовлечена субдуцирующая Тихоокеанская литосфера, вещество которой движется вдоль подошвы верхней мантии в сторону континента от зоны субдукции, формируя нижнюю ветвь ячейки. Замыкающая верхняя ветвь ячейки образует обратное течение вещества под литосферой в сторону зоны субдукции, что является движущей силой, определяющей поверхностную кинематику и деформации блоков литосферы. В результате вязкого волочения Амеразийской литосферы горизонтальным потоком вещества верхней мантии в сторону Тихоокеана происходит отрыв системы блоков Аляски и Чукотки от Канадской арктической окраины. Возникающие при этом рассеянные деформации могут вызывать разномасштабное утонение континентальной коры до ее разрушения с последующим спредингом в Канадской котловине.

Тектоника, геодинамика, террейны, мезозой, Восточная Арктика, Амеразийский бассейн, Чукотка, Северная Аляска

LATE MESOZOIC–CENOZOIC TECTONICS AND GEODYNAMICS OF THE EAST ARCTIC REGION

S.D. Sokolov, L.I. Lobkovsky, V.A. Vernikovsky, M.I. Tuchkova, N.O. Sorokhtin, M.V. Kononov

Tectonic and geodynamic models of the formation of the Amerasian Basin are discussed. The Arctic margins of the Chukchi region and Northern Alaska have much in common in their Late Jurassic–Early Cretaceous tectonic evolution: (1) Both have a Neoproterozoic basement and a complexly deformed sedimentary cover, with the stage of Elsmere deformations recorded in their tectonic history; (2) the South Anyui and Angayucham ocean basins have a common geologic history from the beginning of formation in the late Paleozoic to the closure at the end of the Early Cretaceous, which allows us to consider them branches of the single Proto-Arctic Ocean, the northern margin of which was passive and the southern margin was active; (3) the dipping of the oceanic and, then, continental lithosphere took place in subduction zones southerly; (4) the collision of the passive and active margins of both basins occurred at the end of the Early Cretaceous and ended in Hauterivian–Barremian time; (5) the collision resulted in thrust–fold structures of northern vergence in the Chukchi fold belt and in the orogen of the Brooks Ridge.

A subduction-convective geodynamic model of the formation of the Amerasian Basin is proposed, which is based on seismic-tomography data on the existence of a circulation of matter in the upper mantle beneath the Arctic and East Asia in a horizontally elongated convective cell with a length of several thousand kilometers. This circulation involves the subducted Pacific lithosphere, the material of which moves along the bottom of the upper mantle from the subduction zone toward the continent, forming the lower branch of the cell, and the closing upper branch of the cell forms a reverse flow of matter beneath the lithosphere toward the subduction zone, which is the driving force determining the surface kinematics of crustal blocks and the deformation of the lithosphere. The viscous dragging of the Amerasian lithosphere by the horizontal flow of the upper mantle matter toward the Pacific leads to the separation of the system of blocks of Alaska and the Chukchi region from

the Canadian Arctic margin. The resulting scattered deformations can cause a different-scale thinning of the continental crust with the formation of a region of Central Arctic elevation and troughs or with a breakup of the continental crust with subsequent rifting and spreading in the Canadian Basin.

Tectonics, geodynamics, terranes, Mesozoic era, East Arctic, Amerasian basin, Chukotka, North Alaska

ВВЕДЕНИЕ

Арктическая область включает Северный Ледовитый океан и его континентальные окраины. Исходя из структурных особенностей и различий в геологической истории, принято выделять Западную и Восточную Арктику. Граница между ними обычно проводится по хр. Ломоносова, который разделяет два крупных осадочных бассейна: Евразийский расположен к западу от хребта, а Амеразийский — к востоку. Океаническая кора Евразийского бассейна образовалась в процессе спрединга, начавшегося 56 млн лет назад [Карасик, 1968; Vogt et al., 1979; Taylor et al., 1981; Brozena et al., 2003; Глебовский и др., 2006; Gaina et al., 2011]. Срединно-океанический хр. Гаккеля разделяет глубоководные впадины Нансена и Амундсена и представляет собой дивергентную границу между Северо-Американской и Евразийской плитами. Спрединговую модель формирования Евразийского бассейна можно считать общепринятой. Различия плейт-тектонических моделей заключаются в некоторых деталях: интерпретации наиболее древних магнитных аномалий, этапности спрединга, выделения рифтогенного этапа; характере взаимоотношения океанических структур с континентальной окраиной моря Лаптевых и пр. При интерпретации сейсмостратиграфических профилей Евразийского и Амеразийского бассейнов также имеются существенные различия, которые возрастают по мере удаления от скважин, пробуренных на арктической окраине Северной Аляски.

В отношении происхождения Амеразийского бассейна существуют самые разные точки зрения. Полный и детальный обзор представлений о его формировании был рассмотрен в работе [Lawver, Scotese, 1990]. За прошедшие годы было опубликовано много моделей, но они не несли принципиально новых подходов и решений. Исключением являются модели задугового происхождения Канадского бассейна [Miller et al., 2006, 2017; Pease, Coakley, 2018; Nikishin et al., 2021].

Все разнообразие представлений о формировании Амеразийского бассейна можно объединить в пять самостоятельных групп: океанизация континентальной коры; захваченная океаническая кора Пандифика; многостадийный спрединг; задуговой бассейн; ротационная гипотеза. Именно дискуссионность проблемы происхождения Амеразийского бассейна определяет направленность данной статьи, в которой обсуждаются различные гипотезы и тектонические модели образования и эволюции основных структур литосферы Восточной Арктики в период от поздней юры до конца раннего мела, и, в частности, возникновение Канадского бассейна, закрытие палеоокеанов Ангаючам и Южно-Анюйского, формирование коллизионных структур при движении континентальных блоков Аляски и Чукотки. Иными словами, цель статьи — разработка непротиворечивой тектонической и геодинамической моделей формирования основных типов структур Восточной Арктики.

ВОСТОЧНАЯ АРКТИКА И ГИПОТЕЗЫ ФОРМИРОВАНИЯ АМЕРАЗИЙСКОГО БАСЕЙНА

К востоку от хр. Ломоносова расположена область Центрально-Арктических поднятий и прогибов, в составе которой выделяются поднятие Альфа—Менделеева, Чукотское плато, хр. Нортвинд, котловины Подводников и Макарова (рис. 1). Восточнее находится Канадская котловина, включающая область коры океанического типа. Представления о типах коры области Центрально-Арктических поднятий и прогибов со временем значительно трансформировались. Континентальная природа хр. Ломоносова и Чукотского плато не вызывает сомнений [Weber, Sweeney, 1985; Jokat et al., 1992; Grantz et al., 1998; Petrov et al., 2016; Арктический бассейн..., 2017; Поселов и др., 2019; и др.]. Эволюция взглядов на происхождение поднятий Альфа и Менделеева изменилась от спрединговой модели [Hall, 1973] и океанического плато [Jackson et al., 1986; Forsyth et al., 1986; Lawver et al., 2002; Jokat, 2003; Grantz et al., 2011; и др.] до утоненной континентальной коры [Taylor et al., 1981; Зоненшайн и др., 1990; Lebedeva-Ivanova et al., 2006; Golonka, 2011; Лаверов и др., 2013; Арктический бассейн..., 2017; Поселов и др., 2019]. Подводное опробование поднятия Менделеева в рейсе «Арктика 2012» [Морозов и др., 2013; Верниковский и др., 2014] и с подводной лодки [Сколотнев и др., 2017; Skolotnev et al., 2019] подтвердили его континентальное происхождение.

К объектам Восточной Арктики в данной статье относятся Амеразийский бассейн, гигантский шельф с Новосибирскими островами, о. Врангеля, а также континентальная окраина морей Восточно-Сибирского, Чукотского, Лаптевых и Бофорта. Большая часть шельфа и континентальной окраины сложена Чукотской (Новосибирско-Чукотской) складчатой областью и структурами Северной Аляски.

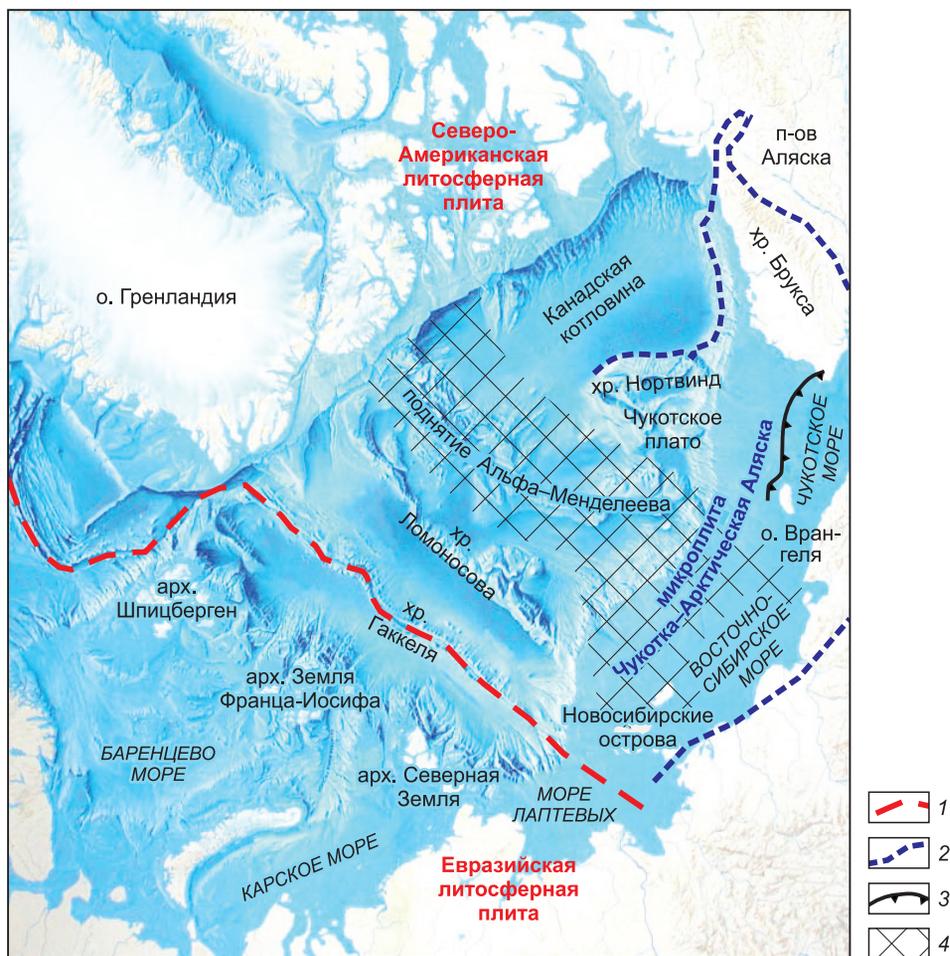


Рис. 1. Морфоструктуры Восточной Арктики.

1 — зона спрединга; 2 — граница микроплиты Арктическая Аляска—Чукотка; 3 — фронт мезозойских деформаций, наводни Врангеля—Геральда; 4 — зона рассеянных деформаций.

Гипотеза океанизации континентальной коры [Шатский, 1963; Пушаровский, 1976], модели захвата древней раннемезозойской [Churkin, Trexler, 1980; Карасик et al., 1980] или палеозойской океанической коры [Rowley, Lottes, 1988] и модели многостадийного спрединга [Гуревич и др., 2003; Gurevich et al., 2005; и др.] в настоящее время не имеют сторонников.

Модели, в которых Канадская котловина рассматривается как задуговой бассейн, несмотря на новые публикации [Miller et al., 2006, 2017; Gottlieb et al., 2017; Nikishin et al., 2021], по нашему мнению, не выдерживают критики по следующим причинам. Во-первых, расстояние между зоной субдукции островной дуги Коюкук (Северная Аляска) и Канадским бассейном в современной структуре составляет порядка 1000 км и это без учета сокращения за счет покровно-складчатых деформаций хр. Брукса. Подобного рода актуалистические модели неизвестны. Задуговые бассейны Японского и Южно-Китайского морей расположены на расстоянии 500—600 км от зоны субдукции. Во-вторых, отложения верхнего девона—юры террейна Арктической Аляски накапливались в обстановке пассивной окраины океана Ангаючам, что исключает северное погружение зоны субдукции в сторону Канадского бассейна. Наконец, в-третьих, по данным американских коллег, зона субдукции островной дуги Коюкук погружалась в южном направлении [The Geology..., 1994; Harris, 1995; Moore et al., 1997; Nokleberg et al., 2000; Lemonnier, 2015; и др.].

Наиболее популярной, поддерживаемой большинством исследователей Арктики является ротационная гипотеза, предложенная в 1955 г. С.У. Кэри [Cary, 1955], в рамках которой разработаны различные модели [Embry, 1990; Lawver et al., 2002; Grantz et al., 2011; и др.]. Согласно ротационной гипотезе, крупный континентальный блок Арктическая Аляска—Чукотка был оторван от Арктической Канады и с вращением против часовой стрелки причленился к Северной Америке и Евразии. Полюс вращения располагался в дельте р. Маккензи. В результате были закрыты океанические бассейны Южно-Анью-

ский, Ангаючам и образовалась Канадская котловина с океанической корой. В своих последних работах А. Грантц [Grantz et al., 2011] предложил двухстадийную ротационную модель: образование коры переходного типа между 195 и 131 млн лет и спрединг океанической коры между 131 и 127.5 млн лет.

Сравнительный анализ палеозойских и мезозойских комплексов Арктической Канады и Северной Аляски свидетельствовал в пользу ротационной гипотезы. Палеомагнитные данные [Halgedahl, Jarrard, 1987] были получены по кернам свиты Купарук берриас—валанжина (145.0—134.7 млн лет) из двух скважин на Северном склоне Аляски. Расчеты указывают на вращение плиты Арктическая Аляска против часовой стрелки примерно на 70°, что свидетельствует также в пользу ротационной гипотезы.

Кроме того, время открытия Канадского бассейна ограничено периодом от 130 до 100 млн лет [Halgedahl, Jarrard, 1987]. Действительно А. Эмбри и Дж. Диксон [Embry, Dixon, 1990] предполагали готеривский возраст (134.7—130.8 млн л. н.) открытия Канадского бассейна, а прекращение спрединга связывали с региональным сеноманским несогласием (100.5—93.9 млн лет). Обнаружение следов элмирских деформаций в Чукотской складчатой области [Natal'in et al., 1999; Вержбицкий и др., 2015; Лучицкая и др., 2015; Lane et al., 2015; Prokoriev et al., 2018] указывали на возможность отрыва структур Чукотки от Арктической Канады и тем самым снимали ряд возражений против ротационной гипотезы.

Вместе с тем ротационные модели сталкивались с пространственной проблемой [Lane, 1997; Miller et al., 2006, 2017; Kuzmichev, 2009], поэтому по-разному трактовали западную границу перемещавшейся с вращением микроплиты Арктическая Аляска—Чукотка. Одни исследователи считали, что перемещение происходило по трансформному разлому вдоль Амеразийского края хр. Ломоносова [Grantz et al., 1998, 2011; Embry, 1990; Embry, Dixon, 1990; Lawver et al., 2002; и др.], другие — вдоль восточного края поднятия Альфа—Менделеева [Лавров и др., 2013], а третьи — вдоль окраины хр. Нортвинд [Nikishin et al., 2021].

Представления об океанической природе поднятия и об океанической коре котловины Макарова как продолжения спрединга в Канадском бассейне соответствовали ротационной гипотезе. Однако обоснование континентальной коры поднятия Альфа—Менделеева и образование бассейна Макарова в мел—кайнозойе [Miller, Verzhbitsky, 2009] ограничили область океанической коры южной частью Канадского бассейна. В связи с этим модели с вращением микроплиты Арктическая Аляска—Чукотка стали несостоятельными.

Тектоническая история Амеразийского бассейна не может быть реконструирована без знания и учета региональной геологии прилегающих континентальных окраин Северо-Восточной Азии и Северной Америки.

АРКТИЧЕСКАЯ ОКРАИНА ЧУКОТКИ

Арктическая окраина Чукотки в географическом отношении занимает континентальную окраину и шельф Восточно-Сибирского и Чукотского морей от островов Новосибирских до Врангеля и Геральда. В тектоническом плане эта область сложена мезозойскими структурами Чукотской складчатой области, в составе которой выделяются Новосибирско-Врангелевская (Восточно-Арктическая), Анюйско-Чукотская и Южно-Анюйская складчатые системы (рис. 2).

Северная граница мезозойид Чукотки проходит по фронту надвига Врангеля—Геральда (см. рис. 1). К северу от надвига структуры микроплиты Арктическая Аляска—Чукотка не подверглись мезозойским деформациям [Pease, 2011; Pease et al., 2014], произошедшими в конце раннего мела во время Чукотской фазы складчатости (позднекимерийская орогения). Вдоль южной границы расположена Южно-Анюйская складчатая система, которая рассматривается в качестве сутуры [Парфенов, Натальин, 1977; Натальин, 1984; Парфенов и др., 1993; Sokolov et al., 2002].

Новосибирско-Врангелевская и Анюйско-Чукотская складчатые системы имеют довольно простое двухчленное строение: неопротерозойский (возможно, мезонеопротерозойский) [Natal'in et al., 1999; Косько, 2007; Кораго и др., 2014; Соколов и др., 2020] метаморфический фундамент и сложнодислоцированный палеозойско-мезозойский чехол [Kos'ko et al., 1993; Natal'in et al., 1999; Геодинамика..., 2006; Косько, 2007; Верниковский и др., 2013а; Данукалова и др., 2015]. Метаморфический фундамент обнажается на о. Врангеля [Каменева, Ильченко, 1978; Kos'ko et al., 1993; Соколов и др., 2015] и на Чукотке в Беринговском террейне [Жуланова, 1990; Natal'in et al., 1999; Геодинамика..., 2006] и Велиткинайском поднятии [Gottlieb et al., 2017]. В осадочном чехле отмечаются несогласия в основании верхнего девона на о. Котельный [Косько, 2007; Prokoriev et al., 2018], нижнего и среднего карбона на о. Врангеля [Kos'ko et al., 1993; Соколов и др., 2015]. Несогласия являются результатом различных фаз элмирского орогенеза, проявление которого на Чукотке подтверждается возрастом гранитов Киберовского и Кузквуньского массивов 352—359, 362 и 364 млн лет [Лучицкая и др., 2015; Lane et al., 2015] ортогнейсов метаморфического купола Коолень на Восточной Чукотке — 369, 375 млн лет, где также встречаются андезиты и туфы девона [Natal'in et al., 1999]. Продукты магматизма позднего девона—раннего карбона формировались в надсубдукционной, окраинно-континентальной геодинамической обстановке [Natal'in et al., 1999; Лучицкая и др., 2015].

В палеотектоническом отношении Новосибирско-Врангелевская и Анюйско-Чукотская складчатые системы представляли собой Чукотский микроконтинент, который входил в состав микроплиты Арктическая Аляска—Чукотка [Churkin, Trexler, 1981; Till, 2016; Miller et al., 2017], или был частью Арктиды [Зоненшайн, Натапов, 1987; Верниковский и др., 2013б; Metelkin et al., 2015], или континентального блока Беннет—Боровия [Natal'in et al., 1999]. Последние геохронологические данные для Новосибирских островов [Akinin et al., 2015; Ershova et al., 2016; Metelkin et al., 2016] и результаты подводного опробования [Морозов и др., 2013; Skolotnev et al., 2019] позволяют включить поднятие Менделеева в состав микроплиты Арктическая Аляска — Чукотка [Соколов и др., 2020]

Южно-Анюйская складчатая система (ЮАСС) в структурном плане рассматривается как сутура, которая разделяет структуры Верхояно-Колымской и Чукотской складчатых областей (см. рис. 2). Она образовалась на месте закрывшегося в результате раннемеловой коллизии палеоокеана. Вдоль ее южной границы расположены структуры Алазейско-Олойской складчатой системы, сложенной в основном островодужными террейнами широкого возрастного диапазона от девона до конца раннего мела [Парфенов и др., 1993; Тектоника..., 2001; Геодинамика..., 2006]. На западе комплексы ЮАСС обнажаются на о. Большой Ляховский и заканчиваются на континенте в виде «Хромской» петли, которая фиксируется магнитными аномалиями под кайнозойским чехлом [Хаин и др., 2009; Kuzmichev, 2009]. Восточным продолжением являются комплексы Вельмайского террейна Восточной Чукотки [Соколов и др., 2015; Леднева и др., 2016] и сутура Кобук на Аляске (см. рис. 2) [The Geology..., 1994].

ЮАСС сложена океаническими и островодужными комплексами, турбидитами и офиолитами. Они образовались в палеозойско-мезозойском океане. В тектонической эволюции палеоокеана выделяются два этапа: поздний палеозой—ранний мезозой и поздняя юра—ранний мел [Соколов и др., 2015; Ганелин, 2017].

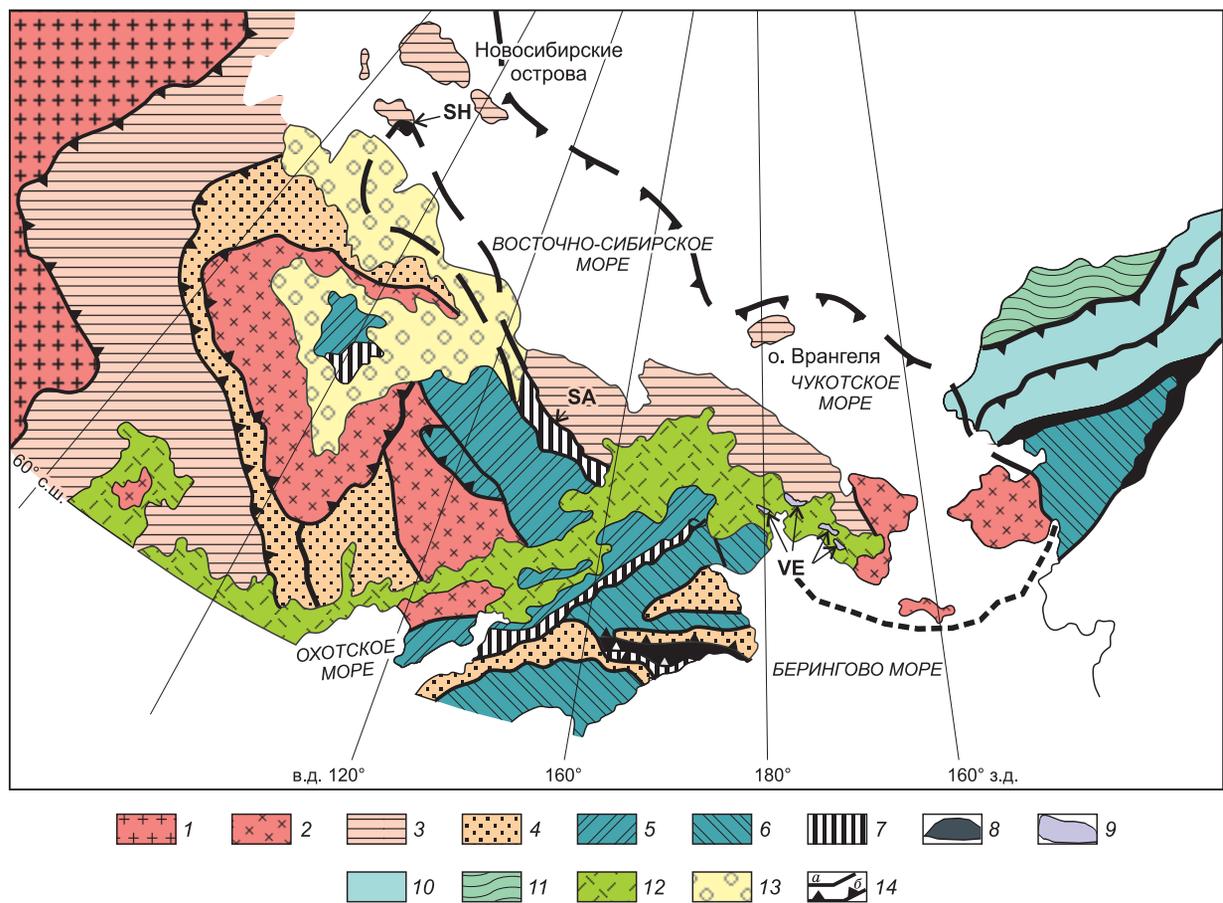


Рис. 2. Тектоническая схема Северо-Востока Азии и Северной Аляски.

1 — Сибирский кратон; 2—8 — террейны: 2 — кратонные, 3 — пассивных окраин, 4 — существенно турбидитовые, 5 — островных дуг, 6 — островных дуг и задуговых бассейнов, 7 — аккреционных призм, 8 — офиолитовые и океанические; 9 — террейн Вельмай; 10 — супертеррейн Арктическая Аляска; 11 — бассейн Колвилл; 12, 13 — перекрывающие комплексы: 12 — Охотско-Чукотский вулканогенный пояс, 13 — кайнозойские отложения; 14 — разрывные нарушения: а — разломы, б — надвиги. Террейны: SH — Шалауровский, SA — Южно-Анюйский, VE — Вельмайский.

В позднем палеозое—раннем мезозое Прото-Арктический океан располагался между континентальными массами Сибири и Лаврентии. Это был обширный палеоокеан, состоящий из двух бассейнов Южно-Анжуйского и Ангаучам. В позднем палеозое до коллизии Карского микроконтинента с Сибирью он соединял Палео-Пацифик с Уральским палеоокеаном [Зоненшайн, Натапов, 1987; Верниковский, 1996; Верниковский и др., 2013б; Соколов и др., 2015]. После коллизии Прото-Арктический океан превратился в залив Палео-Пацифика с системой островных дуг и окраинных морей вдоль южной, сибирской границы. История палеоокеана и его конвергентной границы наиболее полно рассмотрена в работах [Соколов и др., 2015, 2021; Ганелин, 2017]. Время завершения спрединга в Южно-Анжуйской ветви Прото-Арктического океана датируется оксфордско-кимериджскими ярусами на основании возраста наиболее молодой океанической базальт-кремнистой ассоциации и интраокеанической Кульпольнейской островной дуги.

В волжское время начинается новый этап в истории ЮАСС, который завершился коллизией Чукотского микроконтинента со структурами активной окраины Сибири в конце раннего мела (готеривский—барремский ярусы). Началу этапа предшествовала эпоха тектонической перестройки, охватившая как палеоокеан, так и его континентальные окраины. Прото-Арктический океан превратился в остаточный Южно-Анжуйский бассейн с реликтовой океанической корой, который стал заполняться турбидитами.

Южная, Сибирская окраина палеоокеана была активной. В средней юре произошла амальгамация Хетачанского, Алазейского, Олойского, Яракваамского островодужных и Приколымского, Омулеского, Омолонского и Авековского кратонных террейнов с образованием Колымо-Омолонского супертеррейна [Парфенов и др., 1993; Тектоника., 2001]. На краю этого супертеррейна с Южно-Анжуйским океаническим бассейном возник Олойский, или Анжуйско-Святоносский вулканический пояс [Зоненшайн и др., 1990; Горячев, 2006]. Позднепалеозойско-раннемезозойская конвергентная граница западно-тихоокеанского типа с островными дугами и окраинными морями сменилась в поздней юре—раннем мелу на активную окраину со зрелой континентальной корой и с отсутствием задуговых бассейнов с океанической корой. От окраин андийского типа ее отличало накопление островодужных комплексов преимущественно в морской обстановке.

Со стороны Южно-Анжуйского бассейна с океанической корой вдоль вулканического пояса формировалась аккреционная призма, фрагменты которой установлены в ЮАСС [Sokolov et al., 2002; Соколов и др., 2015, 2021]. Призма сложена турбидитами, туфотерригенными породами, подводно-оползновыми горизонтами и терригенным меланжем, в котором содержатся включения океанической коры: базальты, кремни, плагиограниты, габбро. Здесь же встречаются тектонические пластины базальт-кремнистой ассоциации мощностью до 800 м. Терригенные породы содержат фауну волжского и берриас-валанжинского возраста, а кремнистые породы — радиолярии байос-келловейского и оксфорд-кимериджского.

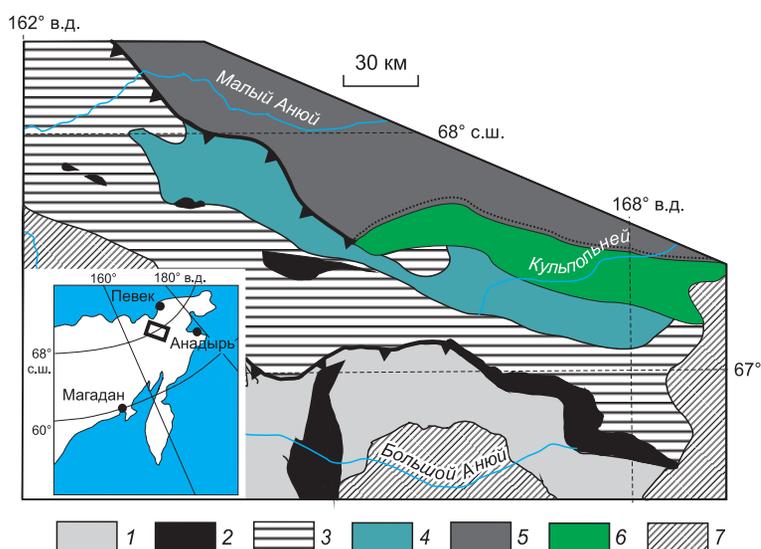
На северной, Чукотской окраине Прото-Арктического океана в позднем палеозое существовала карбонатная платформа, а в конце перми—триасе сформировалась пассивная окраина Чукотского микроконтинента с терригенной седиментацией. Относительно природы северной границы в позднеюрско—раннемеловое время существуют разные точки зрения. В работах [Наталин, 1984; Зоненшайн и др., 1990; Nokleberg et al., 2000; Amato et al., 2015; и др.] развиваются представления о Нутесынской островной дуге (поздняя юра—ранний мел), формировавшейся на краю Чукотского микроконтинента. Эти представления можно назвать двухполярной моделью, поскольку Южно-Анжуйский океанический бассейн в поздней юре—раннем мелу на юге (Олойский вулканический пояс) и на севере (Нутесынская дуга) имел активные окраины. Океаническая литосфера субдуцировала в южном и северном направлениях.

Позднее была предложена альтернативная однополярная модель с активной окраиной на юге и пассивной на севере [Шеховцов, Глотов, 2001; Sokolov et al., 2002; Соколов и др., 2015, 2021]. Это было вызвано тем, что при геолого-съёмочных работах [Шеховцов, Глотов, 2001] было установлено, что вулканогенная коранвеемская толща, относимая предшественниками к Нутесынской островной дуге, имеет более древний оксфорд-кимериджский возраст и не имеет стратиграфических контактов с триасовыми и более древними отложениями Чукотского микроконтинента. Кроме того, к Нутесынской дуге были ошибочно отнесены вулканогенно-осадочные отложения нутесынской и других нижнемеловых свит. Выяснилось, что они залегают несогласно с конгломератами в основании и содержат растительные остатки и флору аптского (?)—альбского ярусов. Эти континентальные отложения выполняют Нутесынскую межгорную впадину. Тектоническая позиция и взаимоотношения этих образований показаны на рис. 3 [Моисеев и др., 2021].

В бассейне р. Коранвеем нижний контакт коранвеемской толщи с терригенными породами ЮАСС стратиграфический с постепенным переходом от осадочных пород к вулканогенным [Шеховцов, Глотов, 2001; Sokolov et al., 2002; Соколов и др., 2015, 2021]. Переходные слои содержат фауну оксфордского—кимериджского ярусов. Вулканисты имеют известково-щелочную и субщелочную тенденцию и могли образоваться в островодужной обстановке.

Рис. 3. Схема основных структурных элементов северо-восточной части Южно-Ануйской сутуры и ее обрамления по [Моисееву и др., 2021] с изменениями.

1 — палеозой-мезозойские вулканогенно-осадочные отложения Алазейско-Олойской складчатой системы; 2 — офиолиты; 3, 4 — Южно-Ануйская сutura: 3 — осадочные, вулканогенно-осадочные комплексы, палеозой-мезозой, 4 — вулканогенно-осадочные породы, оксфорд-кимеридж (кульпольнейский комплекс); 5 — триасовые турбидиты пассивной окраины Чукотского микроконтинента, входят в состав Чукотской складчатой области; 6 — апт-меловая постколлизивная Нутесынская впадина; 7 — Охотско-Чукотский вулканогенный пояс.



На западе, в районе Поляринского поднятия, породы оксфорд-кимериджского вулканогенного комплекса залегают структурно выше вулканогенно-карбонатных отложений нижнего карбона, турбидитов триаса и песчаников волжского яруса Ануйско-Чукотской складчатой системы. Тектоническая природа контакта выражена зонами окварцованных милонитов, интенсивно деформированными терригенными породами, зелеными сланцами и серпентинитами. Ar-Ar возраст зеленосланцевого метаморфизма составляет 158.1 ± 4.0 млн лет и, вероятно, был связан субдукцией в Кульпольнейской островной дуге [Соколов и др., 2015].

На основании результатов этих исследований в Прото-Арктическом океане была выделена энзиматическая Кораньвеевская [Шеховцов, Глотов, 2001], или Кульпольнейская дуга [Sokolov et al., 2002; Соколов и др., 2015, 2021]. Последующие структурные и геохимические исследования подтвердили интраокеаническую позицию (см. рис. 3) и энзиматическую природу Кульпольнейской дуги [Моисеев и др., 2021].

При детальном изучении литологии волжско-валанжинских терригенных отложений Чукотского террейна были обнаружены примеси пеплового материала и цирконы с возрастом 150—140 млн лет [Ватрушкина, 2021]. Кроме того, в ряде мест на Восточной Чукотке были установлены единичные тела игнимбритов и риолитовых туфов с возрастом 146—140 млн лет [Тихомиров, 2020]. Обнаружение продуктов синхронного магматизма позволило предложить решение, которое, казалось бы, сближало позиции сторонников Нутесынской и Кульпольнейской дуг [Ватрушкина, 2021]. Согласно этой модели, реконструируются две разновозрастные островные дуги. В оксфорд-кимериджское время существовала интраокеаническая Кульпольнейская островная дуга. После аккреции дуги к Чукотскому микроконтиненту произошла инверсия зоны субдукции, и на его окраине образовалась новая Нутесынская эпиконтинентальная дуга. Вместе с тем такая модель предполагает широкое развитие вулканических образований, столь характерных для энсиалических дуг или окраинно-континентальных поясов. Однако указанных выше единичных выходов кислых вулканитов, обломочных зерен циркона и присутствия пепловых частиц недостаточно для признания такой модели. К этому надо добавить, что дайки кварцевых диоритов и плагиигранит-порфиров, которые прорывают вулканиты кульпольнейского комплекса имеют возраст 143 ± 1 и 140 ± 1 млн лет (циркон, U-Pb, SHRIMP-2) [Ватрушкина, 2021]. Сходство их возраста с кислыми вулканитами Ануйско-Чукотской складчатой системы позволяет рассматривать их, согласно террейновому анализу, в качестве сшивающих образований.

Следовательно, вопрос о существовании Нутесынской энсиалической дуги требует дополнительного обоснования, поэтому мы отдаем предпочтение однополярной модели. Более того, при любой точке зрения: однополярной или двухполярной субдукции основное поглощение океанической коры Южно-Ануйского бассейна как в позднем палеозое—раннем мезозое, так и в поздней юре—раннем мелу происходило вдоль конвергентной границы Сибири и Прото-Арктического океана, где формировалась аккреционная призма с фрагментами океанической коры [Sokolov et al., 2002; Соколов и др., 2015].

На рисунке 4 показана тектоническая модель для позднеюрско-раннемелового времени. Именно эта модель выбрана для дальнейшего обсуждения глубинных механизмов, обеспечивших формирование латерального ряда палеоструктур: активная окраина Омолонского микроконтинента—Южно-Ануйский океанический бассейн—Чукотский микроконтинент—Канадский бассейн с океанической корой—Северо-Американский континент. Активная окраина Омолонка представлена Олойским вулканическим поясом с разновозрастной аккреционной призмой. Коллизия Кульпольнейской энзиматической остров-

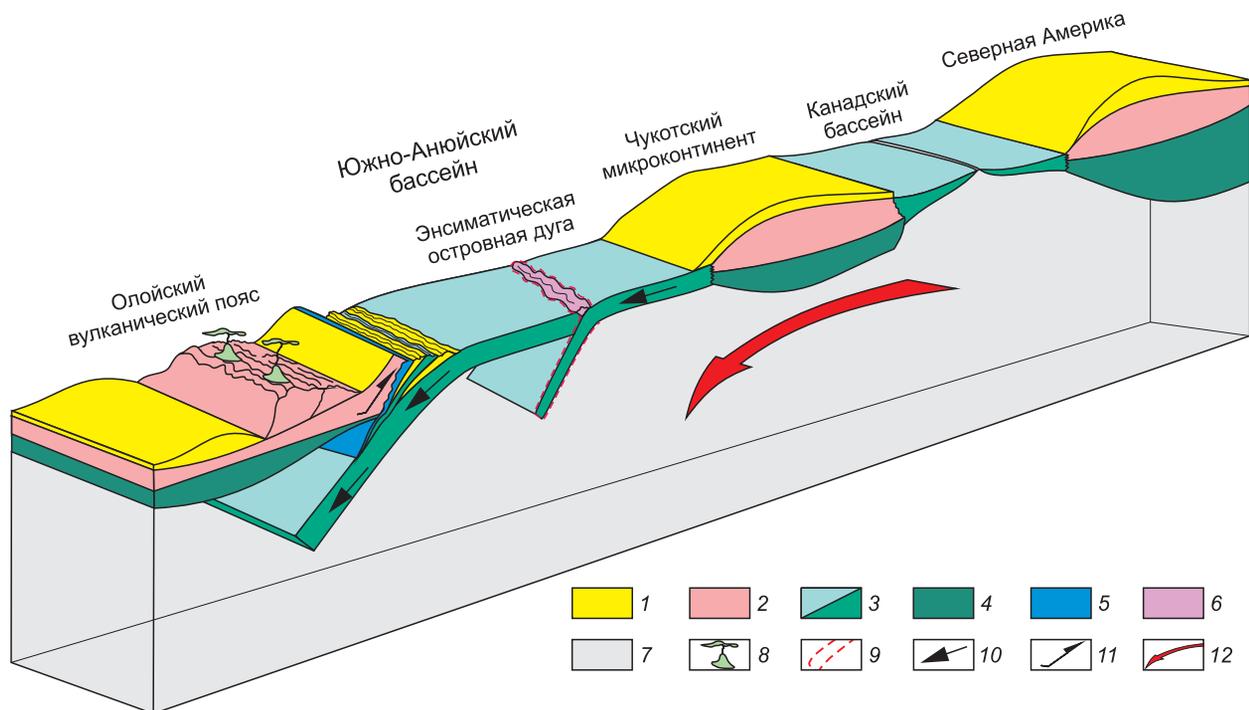


Рис. 4. Тектоническая модель формирования арктической окраины Чукотки.

1 — комплексы осадочного чехла и аккреционных призм; 2 — континентальная кора; 3 — океаническая литосфера; 4 — литосферная мантия; 5 — метаморфические, в том числе глаукофановые сланцы; 6 — энсиматическая Кульпольнейская дуга; 7 — верхняя мантия; 8 — вулканы; 9 — отмершая зона субдукции Кульпольнейской дуги; 10 — направление дрейфа океанической литосферы; 11 — вектор тектонических деформаций; 12 — направление мантийной конвекции.

ной дуги с пассивной окраиной Чукотского микроконтинента имела место в начале раннего мела (143—140 млн л. н.). Отмирание интраокеанической субдукции произошло до полного поглощения океанической литосферы Южно-Анхойского бассейна во фронте Олойского вулканического пояса и завершающей коллизии Чукотского микроконтинента с активной окраиной Сибири.

АРКТИЧЕСКАЯ ОКРАИНА АЛЯСКИ

Основные тектонические единицы Северной Аляски с севера на юг следующие: бассейн Колвилл; супертеррейн Арктическая Аляска, сутура Кобук, террейны Ангаючам и Коююк, бассейн Коююк [The Geology..., 1994; Moore et al., 1994, 1997; Nokleberg et al., 2000; Demoulin et al., 2002, 2018; Till, 2016; и др.]

Бассейн Колвилл (см. рис. 2) рассматривается как передовой прогиб во фронте орогена хр. Брукса. Он выполнен морскими, шельфовыми, прибрежно морскими и континентальными осадочными породами (мощностью до 10 км), перекрывающими автохтон. Эти отложения имеют аптско-поздне меловой возраст, и они моложе, чем синорогенные (синколлиззионные) отложения бассейна Прото-Колвилл, который сложен аллохтонными пластинами верхнеюрско-нижнемелового флиша и олистостромами окпикруакской свиты, сохранившимися в террейнах Де Лонг Маунтинс и Эндикотт Маунтинс.

Супертеррейн Арктическая Аляска (см. рис. 2). Ороген хр. Брукса состоит из пакета тектонических пластин и покровов северной вергентности, образовавшихся в юрско-меловое время (брукская орогения). Эти пластины (покровы) объединяются в террейны (субтеррейны) в составе супертеррейна (террейна) Арктическая Аляска (рис. 5). Нижнее структурное положение занимает террейн Северного Склона (North Slope), который является параавтохтоном для вышележащих террейнов, а также фундаментом бассейна Колвилл.

Неопротерозойские метаморфические комплексы являются фундаментом для карбонатной платформы нижнего палеозоя. Возраст метаморфизма амфиболитовой фации составляет около 680 млн лет [Dusel-Bacon et al., 1989; O'Brien, Grove, 2020], а ортогнейсов п-ова Сьюард — 670—680 млн лет [Amato et al., 2009].

Отложения нижнего палеозоя (кембрий—нижний девон) представляют собой карбонатную платформу, деформированную в элсмирскую фазу орогенеза. Элсмирские складчатые структуры прослеживаются от Северной Гренландии и Арктической Канады до о. Врангеля, Чукотки и Северной Аляски.

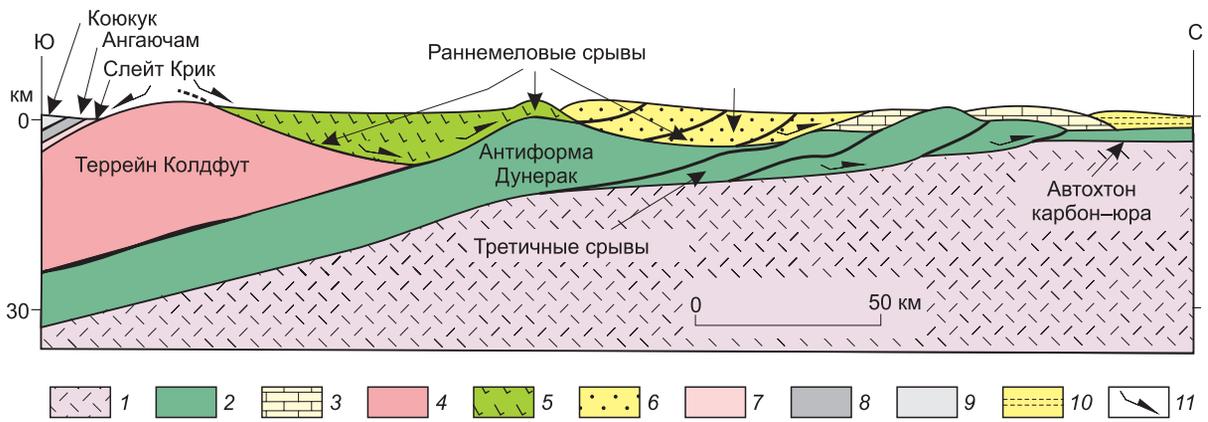


Рис. 5. Структуры Северной Аляски, по [Moore et al., 1994, 1997] с изменениями.

Арктическая платформа: 1 — метаморфический фундамент; 2, 3 — деформированные отложения чехла террейна Северного Склона; 2 — кембрий—девон; 3 — параавтохтон, карбон—юра; 4—9 — террейны: 4 — Колдфут, метаморфические сланцы с ортогнейсами 381—391 млн лет (U-Pb, циркон); 5 — Хаммонд, метаморфизованные породы, верхний протерозой—девон; 6 — Эндикотт Маунтинс, верхний девон—нижний карбон; 7 — Слейт Крик, метаморфические сланцы высоких давлений с телами метабазитов и зонами меланжа; 8 — Ангаючам, офиолиты и океанические комплексы, девон—юра; 9 — Коюкук, энсиматическая островная дуга; 10 — форланд, бассейн Колвилл; 11 — направление тектонического транспорта.

Кембрийская и ордовикская фауна террейна Северного Склона имеет лаврентийское, а террейнов Хаммонд и Колдфут — сибирское происхождение [Dumoulin et al., 2002, 2018]. В раннем девоне внедрились большие объемы магм кислого состава (395, 390, 380—375 млн лет [McClelland et al., 2006; Amato et al., 2009] надсубдукционного генезиса, за которыми последовал рифтогенез в среднем и позднем девоне [Moore et al., 1994, 1997; Lane et al., 2015].

Севернее супертеррейна на месте современного Канадского бассейна располагалось континентальное нагорье — Борровия, или Арктическая платформа, которая служила источником сноса для элсмйрского комплекса от позднего палеозоя до позднего мезозоя. Отложения верхнего девона—юры супертеррейна Арктическая Аляска накапливались в обстановке погружающейся пассивной окраины континента с более глубоководными фациями на юге в направлении океанического бассейна Ангаючам. Континентальные флювиально-дельтовые отложения позднего девона сменялись карбонатно-платформенными отложениями каменноугольного периода и обломочными породами, кремнистыми сланцами, пелагическими известняками в период от перми до юры. Обломочные породы верхнего девона и более молодые образования содержат большую популяцию обломочных цирконов с возрастом 440—420 млн лет, характерную для Северо-Западной Лаврентии [Beranek et al., 2010]. Позднедевонские и каменноугольные биоты имеют наибольшее сходство с канадскими сообществами [Dumoulin et al., 2002, 2018]. Эти данные свидетельствуют о принадлежности супертеррейна Арктическая Аляска континенту Лаврентия.

Вдоль северной окраины Арктической Аляски, в пределах акватории, на сейсмических профилях юрские и нижнемеловые отложения (берриас—валанжинский ярусы) демонстрируют сложную картину продвигающегося на юг мелководья и склоновых отложений. Эти мелкозернистые проградационные отложения указывают на формирование поднятия, сложенного элсмйрским комплексом. Вблизи растущего орогена хр. Брукса накапливались конденсированные осадки террейнов Эндикотт Маунтинс и Северного Склона. Южнее в поздней юре—раннем мелу накапливался флиш.

В середине раннего мела осадконакопление на севере происходило в обстановке рифтогенеза, который завершился разрушением континентальной коры и образованием океанической коры Канадского бассейна. Таким образом, на севере был рифтогенный режим, а на юге — начало брукского тектогенеза и становление аллохтонов.

Террейн Ангаючам (см. рис. 5) сложен пиллоу-базальтами, диабазами, туфами, кремнистыми породами, известняками и телами серпентинитов [Pallister et al., 1989; Patton et al., 1994; Harris, 1995]. Тектоническая мощность террейна около 10 км. Вулканические породы сходны по составу с океаническими плато. Известняки и радиоляриты содержат микрофауны девон — юрского периодов.

Северное перемещение аллохтонов во время ранней фазы брукской складчатости в поздней юре и раннем мелу связывается с конвергенцией между океаническим террейном Ангаючам и континентальной окраиной террейна Арктическая Аляска. Начало брукских деформаций датируется возрастом метаморфизма амфиболитов (169—163 млн лет) в основании офиолитового аллохтона горы Мишегук (тер-

рейн Ангаючам), которые образовались в результате обдукции молодой горячей океанической коры. Перидотиты и габбро аллохтона Мишегук образуют структурно самый верхний аллохтон и надвинуты на подушечные базальты и диабазы аллохтона Пик Коптер (террейн Ангаючам) [Patton et al., 1994; Moore et al., 1994]. Офиолитовый аллохтон перекрывает супертеррейн Арктическая Аляска (см. рис. 5).

Океанические породы террейна Ангаючам, как и пассивная окраина супертеррейна Арктическая Аляска (Арктическая платформа), имеют девонско-юрский возраст. Такие взаимоотношения предполагают, что открытие океанического бассейна Ангаючам произошло в среднем [Grantz et al., 1998] или позднем [Moore et al., 1994] палеозое в результате рифтогенеза.

Террейн Коюкук. На южной окраине бассейна Ангаючам существовала среднеюрская-раннемиоценовая дуга Коюкук [Vox, 1985; Vox, Patton, 1989; The Geology..., 1994]. Вулканические и плутонические породы террейна Коюкук обнажаются к югу от хр. Брукса и к востоку от п-ова Сьюард. Самые древние комплексы относятся к средней юре и несогласно перекрыты вулканическими и вулканокластическими породами основной фазы островодужной активности в период около 145—130 млн лет. Террейны Ангаючам и вышележащий Коюкук перекрываются альбскими и более молодыми отложениями бассейна Коюкук.

Верхние в структурном плане террейны Арктической Аляски (Де Лонг Маунтинс, Эндикотт Маунтинс) деформированы на неглубоких структурных уровнях, тогда как более низко расположенные террейны Хаммонд (Hammond) и Колдфут (Coldfoot) подверглись пластичным деформациям на больших глубинах [Oldow и др., 1987; Till и др., 1988]. Минеральные ассоциации в пластически деформированных террейнах в южной части хр. Брукса указывают на метаморфизм высоких давлений и низких температур (~515°C и 10—13 кбар). Метаморфизм Ангаючамского террейна и структурно наиболее верхних террейнов Арктической Аляски происходил при более низких температурах и давлениях [Dusel-Bacon и др., 1989; O'Brien, Grove, 2020].

Основной этап деформаций и формирования покровно-складчатой структуры супертеррейна связывают с формированием в поздней юре—раннем мелу (валанжинский ярус) свиты Окпикруак (Okpikruak formation), содержащей обломки и олистостромы офиолитовых аллохтонов [Moore et al., 1994, 1997]. Позднебрукские (постнеокомские) деформации фиксируются возрастом эксгумации и охлаждения террейнов около 120—90 млн лет (белые слюды, K-Ar и Ar-Ar методы [Dusel-Bacon et al., 1989; The Geology..., 1994; Moore et al., 1997]). Эрозия растущего поднятия вызвала накопление огромных масс осадков в апт-(?), альб-сенманское время в бассейнах Колвилл и Коюкук. Общее сокращение орогена хр. Брукса оценивается в 250—700 км.

Тектоническая модель формирования основных структур Северной Аляски

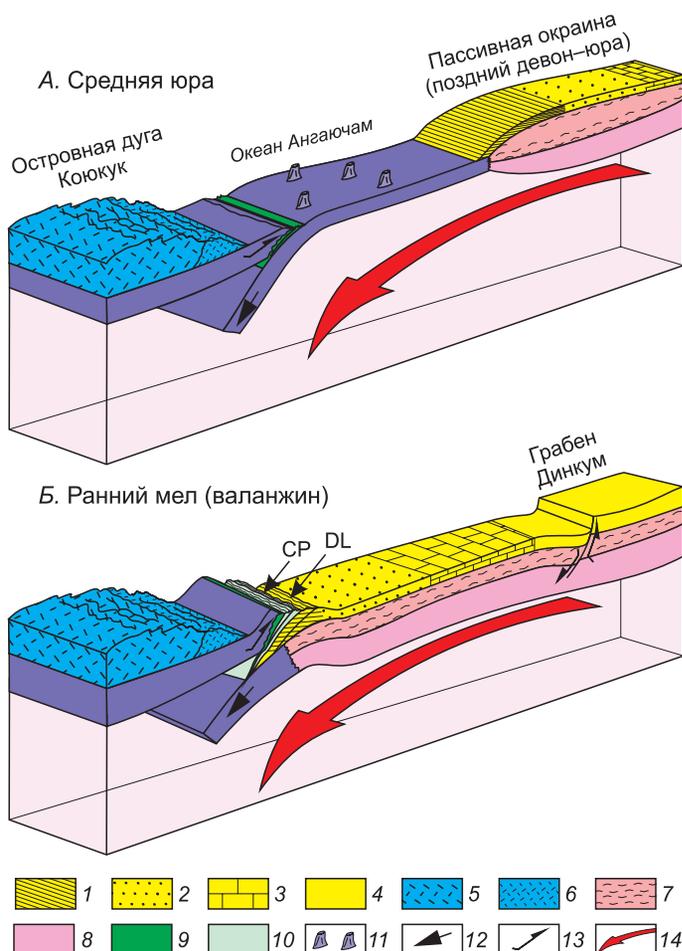


Рис. 6. Тектоническая модель формирования арктической окраины Северной Аляски (составлена по материалам [Vox, 1985; Vox, Patton, 1989; Moore et al., 1994, 1997; Patton et al., 1994; Lemonnier, 2015; и др.]).

1 — террейн Де Лонг Маунтинс, дистальные отложения; 2 — Эндикотт Маунтинс террейн, проксимальные отложения; 3 — террейн Хаммонд карбон—нижний мел; 4 — террейн Северного Склона, девон—нижний мел; 5, 6 — террейн Коюкук: 5 — энсиматическая дуга, 6 — преддуговая часть; 7 — метаморфические комплексы, неопротерозой—нижний палеозой; 8 — нижняя континентальная кора; 9 — амфиболиты; 10 — глаукофановые сланцы; 11 — симаунты и океанические плато; 12 — направление субдукции; 13 — тектонические нарушения; 14 — направление мантийного потока.

CP — сорванные фрагменты океанической коры; DL — сорванные со своего основания и сдвинутые комплексы субтеррейна Эндикотт-Маунтинс.

показана на рис. 6. В средней юре в энсиматической дуге Коюкук на юге океана Ангаючам формировался древний островодужный комплекс [Vox, 1985; Moore et al., 1994, 1997]. Севернее в океаническом бассейне располагались подводные возвышенности и гайоты с внутриплитными базальтами (см. рис. 6, А).

Океаническая кора была полностью поглощена в зоне субдукции около 145—140 млн лет и затем (130—125 млн лет) произошла коллизия островной дуги с пассивной окраиной континента (см. рис. 6, Б). Субдукция пассивной окраины сопровождалась формированием покровно-складчатой структуры на верхнем коровом уровне в Северном Бруксе и андерплейтингом в Южном Бруксе [The Geology..., 1994]. Неопротерозойский фундамент и его осадочный чехол нижнего палеозоя были субдуцированы до глубин около 35—45 км. Чешуйчатая структура базальт-кремнистых пород предполагает существование аккреционной призмы [Pallister et al., 1989]. Прекращение брукских деформаций ограничивается валанжинским (140—133 млн лет) и готеривским (130 млн лет) ярусами как наиболее молодыми слоями, затронутыми деформациями.

Очевидно общее сходство тектонических моделей арктических окраин Чукотки и Северной Аляски, которые заключаются в следующем:

1. Арктические окраины Чукотки и Аляски имеют неопротерозойский фундамент и сложнодислоцированный осадочный чехол, в тектонической истории которого фиксируется этап элсмирских деформаций.

2. Океанические бассейны Южно-Аньюский и Ангаючам имеют общую геологическую историю от начала образования в позднем палеозое и до закрытия в конце раннего мела, что позволяет рассматривать их как ветви единого Прото-Арктического океана, северная окраина которого была пассивной, а южная — активной.

3. Поглощение океанической и затем континентальной литосферы происходило в южном направлении.

4. Южная вергентность зон субдукции в Южно-Аньюском и Ангаючамском океанических бассейнах вызвала обстановку растяжения на краю Северо-Американского континента.

5. Коллизия структур пассивной и активной окраин обоих бассейнов произошла одновременно в конце раннего мела и завершилась в готерив-барремское время.

6. В результате коллизии были сформированы покровно-складчатые структуры северной вергентности в Чукотской складчатой области и в орогене хр. Брукса.

Эти базовые положения тектонических моделей Чукотки и Аляски необходимо учитывать при разработке геодинамической модели формирования Амеразийского бассейна.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХЪЯРУСНОЙ СУБДУКЦИИ — ФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЛИТОСФЕРЫ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ В ПОЗДНЕЙ ЮРЕ—РАННЕМ МЕЛУ

Основной проблемой известных из литературы кинематических реконструкций происхождения тектонических структур Амеразийского бассейна, включая ротационную гипотезу или схемы задугового спрединга, является отсутствие ответа на вопрос о физическом механизме, обеспечивающем реализацию предлагаемых кинематических схем движения блоков литосферы, например, отрыв и последующее отодвигание блоков Арктической Аляски и Чукотки от Канадской арктической континентальной окраины. Большое разнообразие опубликованных кинематических моделей позднемезозойской эволюции литосферы Амеразийского бассейна свидетельствует о серьезном кризисе в понимании этой эволюции, так как выбрать из множества представленных моделей наиболее реалистичную и физически обоснованную не представляется возможным в рамках чисто кинематического подхода. При таком подходе каждый автор, исходя из доступных ему геолого-геофизических материалов, пытается путем кинематических схем перемещения блоков литосферы, сопровождаемых областями расширения, сжатия или сдвига, нарисовать свою картину тектонической эволюции региона, практически отвлекаясь от анализа причин рассматриваемых движений и, в лучшем случае, ограничиваясь упоминанием таких общих геодинамических понятий, как мантийный плюм или задуговое растяжение. Для преодоления данного кризиса необходимо выйти за рамки чисто кинематического подхода и представить количественную геодинамическую модель, включающую течение вещества в верхней мантии, которая была бы способна объяснять кинематические перемещения блоков литосферы и их деформации. Такая геодинамическая модель эволюции литосферы Арктики для позднего мела и кайнозоя была предложена российскими учеными в последние годы в связи с необходимостью научного обоснования заявки РФ в ООН на расширение континентального шельфа Северного Ледовитого океана [Лобковский и др., 2011, 2013; Лавров и др., 2013].

Модель основана на представлении о существовании в верхней мантии под Арктикой и Северо-Восточной Азией циркуляции вещества в горизонтально вытянутой конвективной ячейке протяженностью в несколько тысяч километров. В эту циркуляцию вовлечена субдуцируемая Тихоокеанская лито-

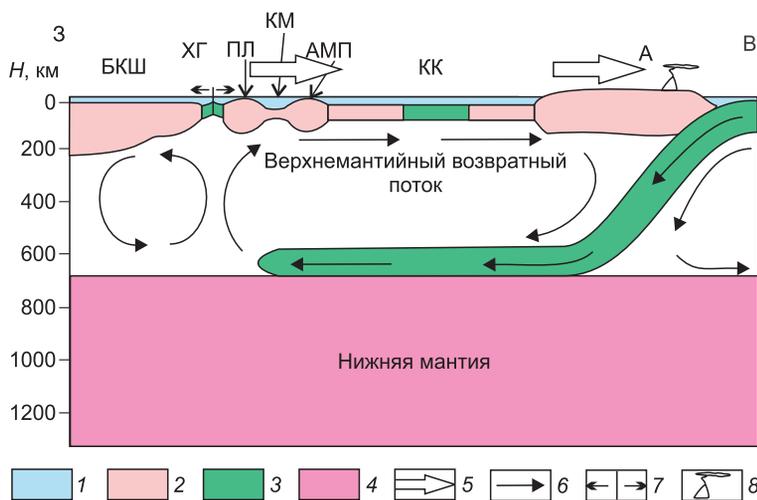


Рис. 7. Геодинамическая модель верхнемантийной конвективной ячейки, сопряженной с Тихоокеанской зоной субдукции, объясняющей раскрытие Евразийского бассейна [Лобковский и др., 2013].

1 — осадочный чехол и водный слой; 2 — континентальная литосфера; 3 — океаническая литосфера; 4 — нижняя мантия; 5 — направление движения Американо-Евразийской микроплиты; 6 — векторы перемещения верхнемантийных потоков; 7 — осевая зона спрединга Евразийского бассейна; 8 — островодужный вулканизм. БКШ — Баренцево-Карский шельф, ХГ — хр. Гаккеля, ПЛ — поднятие Ломоносова, КМ — котловина Макарова, АМП — поднятия Альфа-Менделеева, КК — Канадская котловина, А — Аляска.

сфера, вещество которой движется вдоль подошвы верхней мантии в сторону континента от зоны субдукции, формируя нижнюю ветвь ячейки, а замыкающая верхняя ветвь ячейки образует обратное течение вещества под литосферой в сторону зоны субдукции, что, собственно, и является движущей силой, определяющей поверхностную кинематику блоков коры и деформации литосферы (рис. 7).

Модель базируется на данных сейсмической томографии верхней мантии в области перехода от Тихого океана к Восточной Азии и Арктике [Zhao, 2004, 2009]. Предложенная модель недавно получила важное подтверждение по результатам детальных геохимических исследований состава образцов пород из хр. Гаккеля, которые, как оказалось, несут следы и метки пород коры, погружаемой в зоне субдукции, находящейся на расстоянии в несколько тысяч километров, что хорошо вписывается в модель циркуляции вещества в верхней мантии [Richter et al., 2020]. Необходимо отметить, что в недавней работе [Лобковский, Рамазанов, 2021] рассматриваемая геодинамическая модель получила строгое количественное обоснование на основе аналитического и численного решений уравнений гидродинамики вязкой жидкости в рамках соответствующей постановки математической задачи о развитии конвекции в длинном горизонтальном слое верхней мантии, примыкающем к зоне субдукции. Поскольку новая геодинамическая модель имеет универсальный характер, ее можно применить при анализе более ранних юрско-меловых этапов эволюции Восточной Арктики, когда образовывалась Канадская котловина и закрывались Южно-Анжуйский и Ангаючамский палеоокеаны.

Исходя из базовой геодинамической модели [Лобковский и др., 2011, 2013; Лаверов и др., 2013], естественно предполагать, что механизм отрыва блоков Аляски и Чукотки от Канадской арктической окраины обусловлен вязким волочением Американо-Евразийской литосферы горизонтальным потоком вещества, направленным от этой окраины в сторону Тихого океана. Этот горизонтальный подлитосферный поток является частью замкнутой верхнемантийной циркуляционной ячейки, которая связывает нисходящий поток вещества в крупномасштабной Тихоокеанской зоне субдукции (к которой приурочены островные дуги Удско-Мургальская, Гравино-Нутзотин, Врангелия и др.) (рис. 8) с восходящим потоком под Канадской окраиной. Эта ячейка объединяет в одну гидродинамическую систему верхний и нижний горизонтальные потоки течения вещества, движущиеся в противоположных направлениях: нижний поток, включающий субдуцируемую литосферу, горизонтально течет вдоль границы верхней и нижней мантии от Тихоокеанской зоны субдукции к Канадской окраине, а верхний поток, расположенный под литосферой, течет от края континента в сторону Тихого океана, вызывая за счет вязкого сцепления с подошвой литосферы развитие деформаций и смещения последней, что приводит к отрыву блоков коры от окраины континента (см. рис. 7, 8).

В силу «выпуклой» геометрии Тихоокеанской зоны субдукции возвратное течение под литосферой от Канадской окраины в сторону Тихого океана имеет двумерную в плане расходящуюся структуру, в которой линии тока вблизи восточной аляскинской части отрывающейся полосы блоков, направлены на юго-восток, а линии тока в центральной чукотской части отрывающегося сегмента окраины идут на юг, что приводит к «верному» расхождению Аляски и Чукотки в процессе движения, сопровождаемого образованием в их тылу Канадского бассейна и закрытием смежных палеоокеанов Ангаючам и Южно-Анжуйского (см. рис. 8—10).

Следует подчеркнуть, что рассматриваемая здесь модель отрыва блоков литосферы от континентальной окраины и образование Канадского бассейна принципиальным образом отличается от известного задугового механизма раскрытия окраинных бассейнов, поскольку субдукция Тихоокеанской лито-

сферы, вовлеченная в верхнемантийную циркуляцию вещества, особенно ее южная часть, расположенная напротив Чукотского блока, находится на расстоянии нескольких тысяч километров от края континента. Предлагаемый механизм отрыва литосферы можно назвать **субдукционно-конвективным**, делая акцент на развитие конвекции в верхней мантии, сопряженной с процессом субдукции.

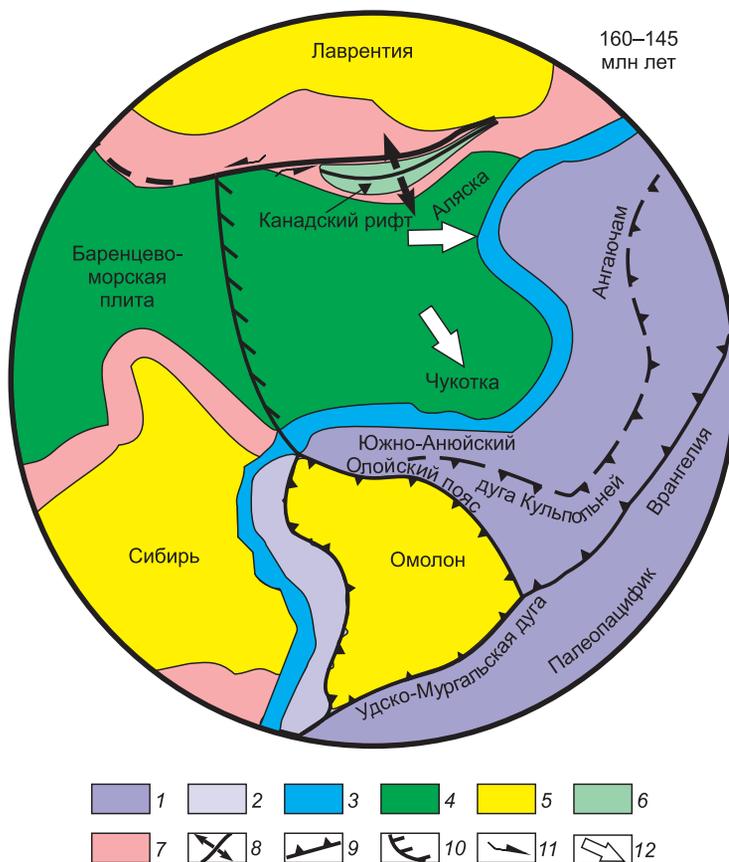
Одним из важных следствий модели является предполагаемый рассеянный характер формирования литосферы к западу от движущегося на юг Чукотского блока при закрытии Южно-Аньюского океана [Лобковский и др., 2021]. Такая картина рассеянных деформаций Американо-Аньюской литосферы обусловлена ее вязким сцеплением с подлитосферными течениями в широкой области верхней мантии. Как отмечалось выше, чисто кинематические схемы [Казмин и др., 2014; Nikishin et al., 2021; и др.], оторванные от физического механизма движения и деформаций Американо-Аньюской литосферы, обусловленных ее вязким сцеплением с верхнемантийным возвратным течением, не в состоянии объяснить непротиворечивым образом цельную картину эволюции региона.

Предлагаемая нами модель развития рассеянных деформаций в западной части Американо-Аньюской литосферы, сопровождающих раскрытие Канадской котловины и одновременное закрытие Южно-Аньюского океана, естественным образом решает проблему пространства, так как, в отличие от ротационной модели, не требует образования значительных площадей океанской литосферы при раскрытии Канадской котловины. В этой модели рассеянные деформации области Американо-Аньюской литосферы, вызванные подлитосферным вязким течением возвратного потока верхнемантийной ячейки, приводят к закрытию Южно-Аньюского океана и приращению всех тектонических структур континентальной коры Американо-Аньюского бассейна к Сибирской континентальной окраине по всей длине образующейся Южно-Аньюской сутуры от Новосибирских островов до восточного края Чукотки (см. рис. 8, 9). При этом величины деформаций Американо-Аньюской литосферы в нашей модели должны уменьшаться в западном направлении в соответствии с уменьшением величины закрытия площади Южно-Аньюского океана, имеющего форму клина, сходящегося в районе Новосибирских островов. Отметим, что рассеянные по большой площади Американо-Аньюского бассейна деформации литосферы в определенные периоды сопровождались мощными магматическими проявлениями. Здесь прежде всего имеются в виду крупные магматические события, происходившие в раннем (130 млн лет) и позднем (80 млн лет) мелу в западной части Американо-Аньюской плиты (события HALIP) [Grantz et al., 1998; Buchan, Ernst, 2006; Добрецов и др., 2013].

Перейдем теперь к вопросам, связанным с закрытием океанов Ангаючам и Южно-Аньюского и с процессами коллизии континентальных блоков Аляски и Чукотки с энзиматическими дугами, микроконтинентами (террейны Юкон-Танана, Руби) и Сибирской окраиной (Кольмо-Омолонский супертеррейн). Как было отмечено выше, в ходе закрытия океана Ангаючам произошла конвергенция пассивной окраины блока Аляска с энзиматической дугой Коюкук в раннем мелу (см. рис. 6). При этом субдукция, обеспечивающая закрытие океана Ангаючам, имела падение на юго-восток. В рамках рассматриваемой нами общей геодина-

Рис. 8. Схема структур как результат субдукционно-конвективной модели раскрытия Канадского бассейна, движения блоков Аляски и Чукотки и закрытия палеоокеанов Ангаючам и Южно-Аньюского.

1 — океаническая литосфера; 2 — зоны перехода континент—океан, включая островные дуги и задуговые бассейны; 3 — пассивные окраины; 4 — эпиконтинентальные моря; 5 — кратоны и микроконтиненты; 6 — утоненная рифтогенная континентальная кора; 7 — палеозойские и раннемезозойские складчатые области; 8 — направление раскрытия Канадского бассейна; 9 — субдукция; 10 — западная граница Восточной Арктики; 11 — сдвиговое смещение; 12 — направления смещений блоков Аляски и Чукотки.



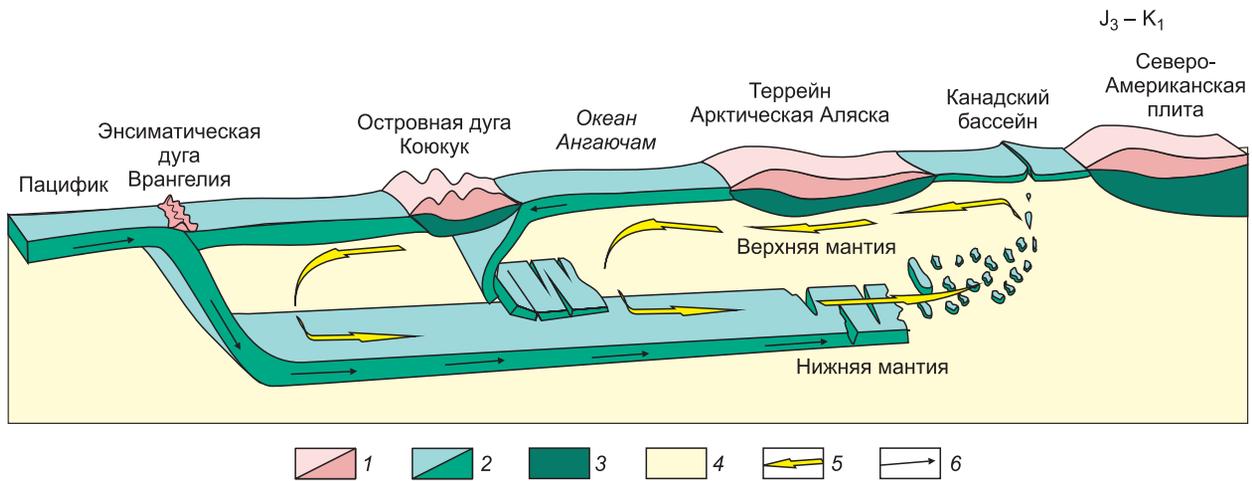


Рис. 9. Геодинамическая модель закрытия палеоокеана Ангаючам.

1 — континентальная кора; 2 — океаническая литосфера; 3 — литосферная мантия; 4 — верхняя мантия; 5 — направление конвективных течений мантии; 6 — направление движения океанической литосферы.

мической модели крупномасштабная субдукция Тихоокеанской литосферы с падением на север, достигая низов верхней мантии, переходит в горизонтальный слой, текущий вдоль подошвы верхней мантии в сторону Канадской окраины, образуя устойчивый нижний ярус субдукционно-конвективной системы. Процесс закрытия палеоокеана Ангаючам (см. рис. 6, 8, 10), сопровождаемый коллизией блока Аляска с дугой Коюкук, развивается благодаря встречной субдукции литосферы с падением на юго-восток, происходящей на верхнем ярусе системы под действием возвратного течения верхнемантийного вещества.

Субдуцируемая плита верхнего яруса, достигая глубины, где доминирует устойчивое нижнее течение, поворачивает и вливается в этот поток. Таким образом, возникает двухъярусная система субдукции (см. рис. 10), которая естественным образом объясняет феномен встречной вергентности «внешней» Тихоокеанской зоны субдукции и «внутренней» зоны субдукции, расположенной внутри океана Ангаючам, что обеспечивает закрытие этого палеоокеана и последующие коллизионные процессы. Аналогичным образом функционирует двухъярусная система субдукции при закрытии Южно-Анжуйского океана и коллизии Чукотского блока с Сибирской окраиной (см. рис. 4, 10), представленной Колымо-Омолонским блоком коры, для периода поздней юры—раннего мела.

При анализе рассматриваемой геодинамической модели следует обратить внимание на геометрические соотношения между направлениями зон субдукции, указывающими направления подлитосферных течений, и простираемостью Канадской арктической окраины, а также формирующейся окраины Вос-

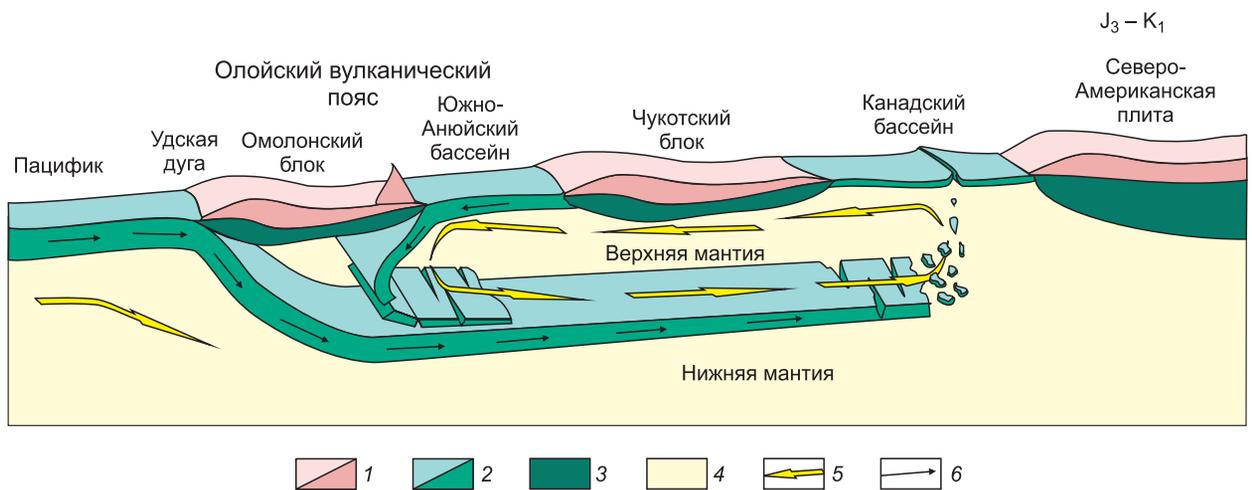


Рис. 10. Геодинамическая модель формирования структур Арктической Чукотки.

1 — континентальная кора; 2 — океаническая литосфера; 3 — литосферная мантия; 4 — верхняя мантия; 5 — направление конвективных течений мантии; 6 — направление движения океанической литосферы.

точной Сибири. Как видно из рис. 8, основная Тихоокеанская зона субдукции, определяющая направление течения вещества в верхнемантийной ячейке, ориентирована под углом к Канадской окраине. Поэтому возвратное подлитосферное течение будет иметь как ортогональную, так и сдвиговую компоненты относительно окраины, приводя, наряду с развитием рифтогенеза и формированием Канадской котловины, к возникновению крупномасштабной зоны левостороннего сдвига вдоль Канадской окраины и одновременно формируя аналогичную трансформную зону правостороннего сдвига [Соколов и др., 2015] вдоль закрывающейся линейной области Южно-Анюйского океана. Наличие таких окраинно-континентальных мегасдвиговых зон в Арктике полностью подтверждается геологическими данными [Sokolov et al., 2002; Лобковский и др., 2013; Соколов и др., 2015; Шипилов, 2016; McClelland et al., 2021].

Выше отмечалось, что описанная базовая геодинамическая модель имеет универсальный характер. Напомним, что в первоначальном варианте (см. рис. 7) она была использована для объяснения процессов растяжения, происходивших в Евразийском и Амеразийском бассейнах Арктики в позднем мелу—кайнозое [Лобковский и др., 2011, 2013; Лаверов и др., 2013]. В последующих работах [Лобковский и др., 2021], включая настоящую статью, обобщенный вариант этой модели использован для анализа более ранней стадии эволюции Амеразийского бассейна для периода поздней юры—раннего мела.

По мнению авторов, описанная модель может быть применима как для других субдукционно-коллизийных структур с учетом региональных особенностей, так и для иных временных интервалов. В частности, она вполне подходит для описания позднекайнозойских тектоновулканических процессов, развивающихся в области литосферы, расположенной между восточной окраиной Австралии и Новой Зеландией [Mather et al., 2020].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование арктических окраин Чукотки и Северной Аляски происходило по близкому сценарию как в структурном, так и во временном отношении: коллизийный этап в поздней юре—раннем мелу, покровно-складчатые структуры северной вергентности, образовавшиеся в чукотскую (брукскую) фазу орогенеза в конце раннего мела.

Арктическая окраина Чукотки образовалась в процессе закрытия Южно-Анюйского океанического бассейна и последующей коллизии Чукотского микроконтинента со структурами активной окраины Сибири. Поглощение океанической литосферы происходило в южном направлении в зонах субдукции Кульпольнейской энсиматической дуги (оксфорд—кимеридж) и Олойского вулканического пояса (поздняя юра—ранний мел) на краю Колымо-Омолонского супертеррейна.

Формирование арктической окраины Аляски происходило в процессе закрытия океана Ангаючам в обстановке субдукции южной вергентности океанической коры под энсиматическую дугу Коюкук и последующей обдукции океанических и островодужных комплексов на пассивную окраину Арктической платформы (супертеррейн Арктическая Аляска).

Океанические бассейны Южно-Анюйский и Ангаючам имеют общую геологическую историю от начала образования в позднем палеозое и до закрытия в конце раннего мела, что позволяет рассматривать их как ветви единого Прото-Арктического океана, северная окраина которого была пассивной, а южная — активной.

Для объяснения тектонических сценариев формирования арктических окраин Чукотки и Аляски предлагается субдукционно-конвективная геодинамическая модель формирования Амеразийского бассейна в позднеюрско-раннемеловое время.

Океаническая литосфера, погружаясь в Тихоокеанскую зону субдукции, движется в горизонтальном направлении вдоль подошвы верхней мантии в сторону континента, формируя нижнюю ветвь ячейки, а замыкающая верхняя ветвь ячейки образует обратное течение вещества под литосферой в сторону зоны субдукции, что является движущей силой, определяющей поверхностную кинематику блоков литосферы. В результате вязкого волочения Амеразийской литосферы горизонтальным потоком вещества верхней мантии в сторону Пацифика происходил отрыв системы блоков Аляски и Чукотки от Канадской арктической окраины. При этом возникали рассеянные деформации, которые вызывали образование структур с утоненной континентальной корой в западной части Амеразийского бассейна и океанической корой в Канадской котловине.

Авторы признательны рецензентам М.К. Косьюко и А.И. Ханчуку за внимательное прочтение статьи и сделанные замечания и рекомендации, которые позволили улучшить рукопись.

Исследования выполнены при финансовой поддержке грантов РФФИ: проекты 19-17-00091 (разработка представлений о тектонике западного обрамления Амеразийского бассейна и поднятия Менделеева) и 20-17-00197 (разработка тектонических моделей Чукотки и Аляски). Базовое финансирование по темам 0135-2019-0078 и 0128-2021-0004.

ЛИТЕРАТУРА

Арктический бассейн (геология и морфология) / Ред. В.Д. Каминский. СПб, ВНИИОкеангеология, 2017, 291 с.

Ватрушкина Е.В. Верхнеюрско-нижнемеловые осадочные отложения Западной Чукотки. М., ГЕОС, 2021, 170 с. (Труды ГИН РАН, вып. 625).

Вержицкий В.Е., Соколов С.Д., Тучкова М.И. Современная структура и этапы тектонической эволюции острова Врангеля (Российская Восточная Арктика) // Геотектоника, 2015, № 3, с. 3—35.

Верниковский В.А. Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996, 203 с.

Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Толмачева Т.Ю., Малышев Н.А., Петров О.В., Соболев Н.Н., Матушкин Н.Ю. К проблеме палеотектонических реконструкций в Арктике и тектоническом единстве террейна Новосибирских островов: новые палеомагнитные и палеонтологические данные // ДАН, 2013а, т. 451, № 4.

Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Кулаков И.Ю. Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // Геология и геофизика, 2013б, т. 54 (8), с. 1083—1107.

Верниковский В.А., Морозов А.Ф., Петров О.В., Травин А.В., Кашубин С.Н., Шокальский С.П., Шевченко С.С., Петров Е.О. Новые данные о возрасте долеритов и базальтов поднятия Менделеева: к проблеме континентальной коры в Северном Ледовитом океане // ДАН, 2014, т. 454, № 4, с. 431—435.

Ганелин А.В. Офиолитовые комплексы Западной Чукотки (строение, возраст, состав, геодинамические обстановки формирования). М., ГЕОС, 2017, 178 с. (Труды ГИН РАН, вып. 613).

Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Кн. 1. Владивосток, Дальнаука, 2006, 572 с.

Глебовский В.Ю., Каминский В.Д., Минаков А.Н., Меркурьев С.А., Чайлдерс В.А., Брозена Дж.М. Формирование бассейна Евразии в Северном Ледовитом океане по данным геостратиграфических исследований. Анализ аномального магнитного поля // Геотектоника, 2006, т. 40, № 4, с. 263—281.

Горячев Н.А. Олойский вуланический пояс (поздняя юра—ранний мел) // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Кн. 1. Владивосток, Дальнаука, 2006, с. 259—260.

Гуревич Н.И., Машенков С.П., Бычкова О.Г., Абельская А.А. Новые сведения об эволюции Американо-Северного Ледовитого океана, по результатам предварительной идентификации магнитных аномалий // Российский геофизический журнал, 2003, № 31—32, с. 37—45.

Данукалова М.К., Толмачева Т.Ю., Мянник П., Суяркова А.А., Кульков Н.П., Кузьмичев А.Б., Мельникова Л.М. Новые данные о стратиграфии ордовикских и силурийских отложений центральной части острова Котельный (Новосибирские острова) и сопоставление с разновозрастными разрезами Восточной Арктики // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2015, т. 23, № 5, с. 22—49.

Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Карякин Ю.В., Кораго Е.А., Симонов В.А. Мезозойско-кайнозойский вулканизм и этапы геодинамической эволюции Центральной и Восточной Арктики // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1126—1144.

Жуланова И.Л. Земная кора северо-востока Азии в докембрии и фанерозое. М., Наука, 1990, 302 с.

Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М. Тектоническая история Арктики // Актуальные проблемы тектоники океанов и континентов. М., Наука, 1987, с. 31—57.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М., Недра, 1990, кн. 2, 334 с.

Казмин Ю.Б., Лобковский Л.И., Кононов М.В. Геодинамическая модель развития Американо-Северного бассейна Арктики (к обоснованию принадлежности хребта Ломоносова, поднятия Менделеева и котловины Подводников к Российской материковой окраине) // Арктика: экология и экономика, 2014, № 4, с. 14—27.

Каменева Г.И., Ильченко Л.Н. Новые данные о возрасте метаморфического комплекса острова Врангеля // Докл. АН СССР, 1978, т. 227, № 2, с. 431—435.

Карасик А.М. Магнитные аномалии хребта Гаккеля и происхождение хребта Гаккеля Северного Ледовитого океана // Геофизические методы разведки в Арктике. Вып. 5. Л., НИИГА, 1968, с. 9—19.

Карасик А.М. Основные особенности развития и структуры дна Арктического бассейна по аэромагнитным данным // Морская геология, седиментология, осадочная петрография и геология океана. Л., Недра, 1980, с. 178—193.

Кораго Е.А., Верниковский В.А., Соболев Н.Н., Ларионов А.Н., Сергеев С.А., Столбов Н.М., Проскурнин В.Ф., Соболев П.С., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Травин А.В. Возраст фундамента

- островов Де Лонга (архипелаг Новосибирские острова): новые геохронологические данные. ДАН, 2014, т. 457, № 3, с. 315—322.
- Косько М.К.** Восточно-Арктический шельф России: геология и тектонические основы нефтегазогеологического районирования: Автореф. дис.... д. г.-м. н. СПб, Санкт-Петербургский университет, 2007, 46 с.
- Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шипилов Э.В.** Геодинамическая модель тектонического развития Арктики в мезозое и кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России // Геотектоника, 2013, № 1, с. 3—35.
- Лобковский Л.И., Вержбицкий В.Е., Кононов М.В., Шрейдер А.А., Гарагаш И.А., Соколов С.Д., Тучкова М.И., Котелкин В.Д., Верниковский В.А.** Геодинамическая модель эволюции Арктического региона в позднем мезозое—кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России // Арктика: экология и экономика, 2011, № 1, с. 104—115.
- Лобковский Л.И., Шипилов Э.В., Кононов М.В.** Геодинамическая модель верхнемантийной конвекции и преобразования литосферы Арктики в мезозое и кайнозое // Физика Земли, 2013, № 6, с. 20—38.
- Лобковский Л.И., Рамазанов М.М.** Исследование конвекции в верхней мантии, термомеханически связанной с зоной субдукции, и ее геодинамические приложения для Арктики и Северо-Восточной Азии // Изв. РАН. Механика жидкости и газа, 2021, № 3, с. 139—150.
- Лобковский Л.И., Соколов С.Д., Сорохтин Н.О., Кононов М.В.** Двухъярусная субдукция в верхней мантии как механизм эволюции литосферы восточной Арктики в поздней юре—раннем мелу // ДАН, Науки о Земле, 2021, т. 500, № 2, с. 13—20.
- Леднева Г.В., Пиис В.Л., Базылев Б.А.** Верхнетриасовые кремнисто-вулканогенно-терригенные отложения Чукотского полуострова: состав магматических пород, U-Pb возраст цирконов и геодинамические интерпретации // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (8), с. 1425—1444.
- Луцицкая М.В., Соколов С.Д., Котов А.Б., Натапов Л.М., Белоусова Е.А., Катков С.М.** Позднепалеозойские гранитоиды Чукотки: особенности состава и положение в структуре арктического региона России // Геотектоника, 2015, № 4, с. 1—27.
- Моисеев А.В., Маскаев М.В., Ульянов Д.К., Соколов С.Д., Беляцкий Б.В.** Тектоническое положение и обстановки формирования вулканических пород кульпольнейского комплекса и до аптских даек Южно-Анхойской сутуры (Западная Чукотка) // ДАН, Науки о Земле, 2021, т. 499, № 1, с. 42—48.
- Морозов А.Ф., Петров О.В., Шокальский С.П., Кашубин С.Н., Кременецкий А.А., Шкаатов М.Ю., Каминский В.Д., Гусев Е.А., Грикуров Г.Э., Рекант П.В., Шевченко С.С., Сергеев С.А., Шатов В.В.** Новые геологические данные, обосновывающие континентальную природу области Центрально-Арктических поднятий // Регион. Геология и металлогения, 2013, № 53, с. 34—55.
- Натальин Б.А.** Раннемезозойские эвгеосинклинальные системы в северной части Циркум-Пацифики. М., Наука, 1984, 136 с.
- Парфенов Л.М., Натальин Б.А.** Тектоническая эволюция Северо-Востока Азии в мезозое и кайнозое // Доклады АН СССР, 1977, т. 235, № 5, с. 1132—1135.
- Парфенов Л.М., Натапов Л.М., Соколов С.Д., Цуканов Н.В.** Террейны и аккреционная тектоника Северо-Востока Азии // Геотектоника, 1993, № 1, с. 68—78.
- Поселов В.А., Буценко В.В., Жолондз С.М., Киреев А.А.** Структуры растяжения в комплексе Центрально-Арктических подводных поднятий // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (1), с. 3—17.
- Пушаровский Ю.М.** Тектоника Северного Ледовитого океана // Геотектоника, 1976, № 2—3, с. 3—14.
- Сколотнев С.Г., Федонкин М.А., Корнийчук А.В.** Новые данные о геологическом строении юго-западной части поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) // ДАН, 2017, т. 476, № 2, с. 190—196. doi:10.7868/S0869565217260152.
- Соколов С.Д., Тучкова М.И., Ганелин А.В., Бондаренко Г.Е., Лейер П.** Тектоника Южно-Анхойской сутуры (Северо-Восток Азии) // Геотектоника, 2015, № 1, с. 5—30.
- Соколов С.Д., Луцицкая М.В., Моисеев А.В.** Тектоническая позиция и геодинамические обстановки неопротерозойского гранитоидного магматизма Восточной Арктики // ДАН, Науки о Земле, 2020, т. 483, № 2, с. 5—10, doi: 0.31857/S2686739720080204.
- Соколов С.Д., Тучкова М.И., Леднева Г.В., Луцицкая М.В., Ганелин А.В., Ватрушкина Е.В., Моисеев А.В.** Тектоническая позиция Южно-Анхойской сутуры // Геотектоника, 2021, № 5, с. 51—72.
- Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республика Саха (Якутия) /** Под ред. Л.М. Парфенова, М.И. Кузьмина. М., Наука/Интерпериодика, 2001, 571 с.
- Тихомиров П.Л.** Меловой окраинно-континентальный магматизм северо-востока Азии и вопросы генезиса крупнейших фанерозойских провинций кремнекислого вулканизма. М., ГЕОС, 2020, 375 с.

Хаин В.Е., Филатова Н.И., Полякова И.Д. Тектоника, геодинамика и перспективы нефтегазоносности Восточно-Арктических морей и их континентального обрамления. М., Наука, 2009, 227 с. (Труды ГИН РАН, вып. 601).

Шатский Н.С. О тектонике Арктики // Избранные труды. Т. 1. М., АН СССР, 1963, с. 426—444.

Шеховцов В.А., Глотов С.П. Государственная геологическая карта РФ м-ба 1:200 000. Серия Олойская. Лист Q-58-XI, XII. Объяснительная записка / Ред. С.Д. Соколов. М., 2001.

Шипилов Э.В. Базальтоидный магматизм и сдвиговая тектоника Арктической континентальной окраины Евразии в приложении к начальному этапу геодинамической эволюции Амеразийского бассейна // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (12), с. 2115—2142.

Akinin V.V., Gottlieb E.S., Miller E.L., Polzunenkov G.O., Stolbov N.M., Sobolev N.N. Age and composition of basement beneath the De Long archipelago, Arctic Russia, based on zircon U-Pb geochronology and O-Hf isotopic systematics from crustal xenoliths in basalts of Zhokhov Island // *Arktos*, 2015, v. 1, 9, doi: 10.1007/s41063-015-0016-6.

Amato J.M., Toro J., Miller E.L., Gehrels G.E., Farmer G.L., Gottlieb E.S., Till A.B. Late Proterozoic–Paleozoic evolution of the Arctic Alaska-Chukotka terrane based on U-Pb igneous and detrital zircon ages: Implications for Neoproterozoic paleogeographic reconstructions // *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2009, v. 121, p. 1219—1235, doi: 10.1130/B26510.1.

Amato J.M., Toro J., Akinin V.V., Hampton B.A., Salnikov A.S., Tuchkova, M.I. Tectonic evolution of the Mesozoic South Anyui suture zone, eastern Russia: A critical component of paleogeographic reconstructions of the Arctic region // *Geosphere*, 2015, v. 11 (5), p. 1530—1564, doi: 10.1130/GES01165.1.

Beranek L.P., Mortensen J.K., Lane L.S., Allen T.L., Fraser T.A., Hadlari T., Zantvoort W.G. Detrital zircon geochronology of the western Ellesmerian clastic wedge, northwestern Canada: Insights on Arctic tectonics and the evolution of the northern Cordilleran miogeocline // *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2010, v. 122, p. 899—1911.

Box S.E. Early Cretaceous orogenic belt in northeastern Alaska: Internal organization, lateral extent, and tectonic interpretation // *Tectonostratigraphic terranes of the Circum-Pacific Region* // *Earth Sci. Ser.*, v. 1, Houston, Texas, 1985, p. 137—145.

Box S.E., Patton W.W. Igneous history of the Koyukuk terrane, western Alaska: Constraints on the origin, evolution, and ultimate collision of an accreted island-arc terrane // *J. Geophys. Res.*, 1989, v. 94, p. 15 843—15 867.

Brozena J.M., Childers V.A., Lawver L.A., Gahagan L.M., Forsberg, R., Faleide J.I., Eldholm O. New aerogeophysical study of the Eurasia Basin and Lomonosov Ridge: implications for basin development // *Geology*, 2003, v. 31, p. 825—828.

Buchan K.L., Ernst R.E. The High Arctic Large Igneous Province (HALIP): evidence for an associated giant radiating dyke swarm / Eds. E. Hanski, S. Mertanen, T. Ramo, J. Vuollo // *Dyke swarms—time markers of crustal evolution*. Rotterdam, Balkema Publishers, 2006, www.largeigneousprovinces.org/06apr.

Carey S.W. The orocline concept in geotectonics, part I // *Proc. R. Soc. Tasmania*. 1955, v. 89, p. 255—288.

Churkin M., Trexler J.H. Continental plates and accreted ocean terranes in the Arctic // *The Arctic Ocean. The ocean basins and margins*. N.Y., London, Plenum Press, 1981, p. 1—20.

Dumoulin J.A., Harris A.G., Gagiev M., Bradley D.C., Repetski J.E. Lithostratigraphic, conodont, and other faunal links between lower Paleozoic strata in northern and central Alaska and northeastern Russia / Eds. E.L. Miller, A. Grantz, S.L. Klemperer // *Tectonic evolution of the Bering Shelf–Chukchi Sea–Arctic margin and adjacent landmasses*. *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.* 360, 2002, p. 291—312.

Dumoulin J.A., Jones J.V., Bradley D.C., Till A.B., Box S.E., O’Sullivan P. Neoproterozoic–early Paleozoic provenance evolution of sedimentary rocks in and adjacent to the Farewell terrane (interior Alaska) // *Geosphere*, 2018, v. 14, p. 367—394.

Dusel-Bacon C., Brosig W.P., Till A.B., Doyle E.O., Mayfield C.F., Reiser H.H., Miller T.P. Distribution, facies, ages, and proposed tectonic associations of regionally metamorphosed rocks in northern Alaska. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 1989, 1497-A, 44 p.

Ershova V.B., Lorenz H., Prokopiev A.V., Sobolev N.N., Khudoley A.K., Petrov E.O., Estrada S., Sergeev S., Larionov A., Thomsen T.B. The De Long Islands: a missing link in unraveling the Paleozoic paleogeography of the Arctic // *Gondwana Res.*, 2016, v. 35, p. 305—322.

Embry A.F. Geological and geophysical evidence in support of the hypothesis of anticlockwise rotation of northern Alaska // *Mar. Geol.*, 1990, v. 93, p. 317—329.

Embry A.F., Dixon J. The breakup unconformity of the Amerasia Basin, Arctic Ocean: Evidence from Arctic Canada // *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1990, v. 102, p. 1526—1534.

Forsyth D.A., Morel-A-L’Huissier P., Asudeh I., Green A., Jackson H. Alpha ridge and Iceland—products of the sample plume // *J. Geodyn.*, 1986, v. 6, p. 197—214.

Gaina C., Werner S.C., Saltus R., Maus S. Circum-Arctic mapping project: new magnetic and gravity anomaly maps of the Arctic / Eds. A.M. Spencer, A.F. Embry, D.L. Gautier, A.V. Stoupakova, K. Sørensen // Arctic petroleum geology. Geol. Soc. London Mem., 2011, v. 35, p. 39—48.

Golonka J. Phanerozoic palaeoenvironment and palaeolithofacies maps of the Arctic region / Eds. A.M. Spencer, A.F. Embry, D.L. Gautier, A.V. Stoupakova, K. Sørensen // Arctic petroleum geology. Geol. Soc. London Mem., 2011, v. 35, p. 79—129.

Gottlieb E.S., Pease V., Miller E.L., Akinin V.V. Neoproterozoic basement history of Wrangel Island and Arctic Chukotka: integrated insights from zircon U-Pb, O and Hf isotopic studies / Eds. V. Pease, B. Coakley // Circum-Arctic lithosphere evolution. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 2017, v. 460, p. 183—206, <https://doi.org/10.1144/SP460.11>.

Grantz A., Clark D.L., Phillips R.L., Srivastava S.P., Blome C.D., Gray L.B., Haga H., Mamet B.L., McIntyre D.J., McNeil D.H., Mickey M.B., Mullen M.W., Murchey B.I., Ross C.A., Stevens C.H., Silberling N.J., Wall J.H., Willard D.A. Phanerozoic stratigraphy of Northwind Ridge, magnetic anomalies in the Canada basin, and the geometry and timing of in the Amerasia basin, Arctic Ocean // Geol. Soc. Am. Bull., 1998, v. 110 (6), p. 801—820.

Grantz A., Hart P.E., Childers V.A. Geology and tectonic development of the Amerasia and Canada Basins, Arctic Ocean / Eds. A.M. Spencer, A.F. Embry, D.L. Gautier, A.V. Stoupakova, K. Sørensen // Arctic petroleum geology. Geol. Soc. London Mem., 2011, v. 35, p. 771—799.

Gurevich N.I., Merkouriev S.A., Abelskaya A.A. Evolution of the southern Canada basin, the Arctic ocean, on the basins of geohistorical analysis of magnetic anomalies // Geophys. Res. Abstr., 2005, v. 7, 02710.

Halgedahl S., Jarrard R. Paleomagnetism of the Kuparuk River Formation from oriented drill core: evidence for rotation of the North Slope block / Eds. L. Tailleux, P. Weimer // Alaskan North Slope geology: Pacific section. Soc. Econ. Paleontol. Mineral., 1987, v. 50, p. 581—620.

Hall J.K. Geophysical evidence for ancient sea-floor spreading from Alpha Cordillera and Mendeleev Ridge / Ed. M.G. Pitcher // Arctic geology. AAPG Mem., 1973, v. 19, p. 542—561.

Harris R.A. Geochemistry and tectonomagmatic affinity of the Misheguk massif, Brooks Range ophiolite, Alaska // Lithos, 1995, v. 35 (1—2), p. 1—25, doi:10.1016/0024-4937(94) 00048-7.

Jackson H.R., Forsyth D.A., Johnson G.L. Oceanic affinities of the Alpha Ridge, Arctic Ocean // Mar. Geol., 1986, v. 73, p. 237—261.

Jokat W. Seismic investigations along the western sector of the Alpha Ridge, Central Arctic Ocean // Geophys. J. Int., 2003, v. 152, p. 185—201.

Jokat W., Uenzelmann-Neben G., Kristoffersen Y., Rasmussen T. Lomonosov Ridge — A double-sided continental margin // Geology, 1992, v. 20, p. 887—890.

Kos'ko M.K., Cecile M.P., Harrison J.C., Ganelin V.G., Khandoshko N.V., Lopatin B.G. Geology of Wrangel Island, between Chukchi and East Siberian seas, northeastern Russia // Geol. Surv. Can. Bull., 1993, v. 461, 107 p.

Kuzmichev A.B. Where does the South Anyui suture go in the New Siberian islands and Laptev Sea // Tectonophysics, 2009, v. 463, p. 86—108.

Lane L.S. Canada Basin, Arctic Ocean: evidence against a rotational origin // Tectonics, 1997, v. 16 (3), p. 363—387.

Lane L.S., Cecile M.P., Gehrels G.E., Kos'ko M.K., Layer P.W., Parrish R.R. Geochronology and structural setting of Latest Devonian—Early Carboniferous magmatic rocks, Cape Kiber, northeast Russia // Can. J. Earth Sci., 2015, v. 52, p. 147—160. <http://dx.doi.org/10.1139/cjes-2013-0184>.

Lawver L.A., Scotese C.R. A review of tectonic models for the evolution of the Canada Basin / Eds. A. Grantz, G.L. Johnson, J.F. Sweeney // The Arctic Ocean region. The geology of North America. Boulder, Geol. Soc. Am., Colorado, 1990, v. L, p. 593—618.

Lawver L.A., Grantz A., Gahagan L. Plate kinematic evolution of the present Arctic region since the Ordovician // Geol. Soc. Am., Spec. Pap., 2002, v. 360, p. 333—358.

Lebedeva-Ivanova N.N., Zamansky Y.Y., Langinen A.E., Sorokin M.Y. Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82 °N: evidence of continental crust // Geophys. J. Int., 2006, v. 165, p. 527—544.

Lemonnier N. Evolution géodynamique et paléogéographique mésozoïque du nord de l'Alaska: du bassin amériasiens à l'orogénèse brookienne [Ph.D. thesis]. Université Pierre et Marie Curie, 2015, 332 p.

Mather B.R., Muller R.D., Seton M., Rutter S., Nebel O., Mortimer N. Intraplate volcanism triggered by burst in slab flux // Sci. Adv., 2020, 6 : eabd0953 16 December 2020.

McClelland W.C., Schmidt J.M., Till A.B. New U-Pb SHRIMP ages from Devonian felsic volcanic and Proterozoic plutonic rocks of the Southern Brooks Range, Alaska // Geol. Soc. Am., Abstracts with Program, 2006, v. 38, p. 12.

McClelland W.C., Strauss, J.V., Colpron, M., Gilotti J.A., Faehnrich, K., Malone, S.J., G.E., Macdonald F.A., Oldow J.S. Taters versus Sliders: Evidence for a long-lived history of strike-slip displacement along the Canadian Arctic Transform System (CATS) // *GSA Today*, 2021, v. 3 (7), p. 4—11, <https://doi.org/10.1130/GSATG500A.1>.

Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Matushkin N.Y. Arctida between Rodinia and Pangea // *Precambrian Res.*, 2015, v. 259, p. 114—129.

Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Tolmacheva T.Yu., Matushkin N.Yu., Zhdanova A.I., Pisarevskiy S.A. First paleomagnetic data for the New Siberian Islands: Implications for Arctic paleogeography // *Gondwana Res.*, 2016, v. 37, p. 308—323.

Miller E.L., Verzhbitsky V.E. Structural studies near Pevek, Russia: implications for formation of the East Siberian Shelf and Makarov Basin of the Arctic Ocean / Eds. D.B. Stone, K. Fujita, P.W. Layer, E.L. Miller, A.V. Prokopiev, J. Toro // *Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: A tribute to L. Parfenov*, 2009, Series 4. Copernicus GmbH, p. 223—241.

Miller E.L., Toro J., Gehrels G., Amato J.M., Prokopiev A., Tuchkova M.I., Akinin V.V., Dumitru T.A., Moore T.E., Cecile M.P. New insights into Arctic paleogeography and tectonics from U–Pb detrital zircon geochronology // *Tectonics*, 2006, v. 25, p. 1—19.

Miller E.L., Meisling K.E., Akinin V.V., Brumley K., Coakley B.J., Gottlieb E.S., Hoiland C.W., O'Brien T.M., Soboleva A., Toro J. Circum-Arctic lithosphere evolution (CALE) Transect C: displacement of the Arctic Alaska-Chukotka microplate towards the Pacific during opening of the Amerasia basin of the Arctic / Eds. V. Pease, B. Coakley // *Circum-Arctic lithosphere evolution. Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 2017, v. 460, p. 57—120, <https://doi.org/10.1144/SP460.9>.

Moore T.E., Wallace W.K., Bird K.J., Karl S.M., Mull C.G., Dillon J.T. Geology of northern Alaska / Eds. G. Plafker, H.C. Berg // *The geology of Alaska. Geol. Soc. Am.*, 1994, v. G-1, p. 49—140.

Moore T.E., Wallace W.K., Mull C.O., Adams K.E., Plafker G., Nokleberg W.J. Crustal implications of bedrock geology along the Trans-Alaska Crustal Transect (TACT) in the Brooks Range, northern Alaska // *J. Geophys. Res.*, 1997, v. 102 (B9), p. 20 645—20 684.

Natal'in B., Amato J.M., Toro J., Wright J.E. Paleozoic rocks of the northern Chukotka Peninsula, Russian Far East: implications for the tectonics of the Arctic region // *Tectonics*, 1999, v. 18 (6), p. 977—1004.

Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., Freiman S.I., Malyshev N.A., Morozov A.F., Posamentier H.W., Verzhbitsky V.E., Zhukov N.N., Startseva K. Arctic Ocean Mega Project: Paper 3 — Mesozoic to Cenozoic geological evolution // *Earth Sci. Rev.*, 2021, v. 217, 103034, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103034>.

Nokleberg W.J., Parfenov L.M., Monger J.W.H., Norton I.O., Khanchuk A.I., Stone D.B., Scotese C.R., Scholl D.W., Fujita K. Phanerozoic tectonic evolution of the Circum-North Pacific. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1626, 2000, 122 p.

O'Brien T.M., Grove M. Subduction accretion, thermal overprinting, and exhumation of high-pressure/low-temperature metasedimentary rocks of the south-central Brooks Range // *Int. Geol. Rev.*, 2020, <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1841684>.

Oldow J.S., Seldensticker C.M., Phelps J. C., Julian F.E., Gottschalk R.R., Boler K.W., Handschy J.W., Ave Lallemand H.G. Balanced cross sections through the central Brooks Range and North Slope, Arctic Alaska. Tulsa, Okla., Am. Assoc. Pet. Geol., 1987, 19 p.

Pallister J.S., Budahn J.R., Murchey B.L. Pillow basalts of the Angayucham terrane: Oceanic plateau and island crust accreted to the Brooks Range // *J. Geophys. Res.*, 1989, v. 48 (B11), p. 15 901—15 923, [doi:10.1029/JB094iB11p15901](https://doi.org/10.1029/JB094iB11p15901).

Patton W.W., Jr., Box S.E., Moll-Stalcup E.J., Miller T.P. Geology of west-central Alaska / Eds. G. Plafker, H.C. Berg // *The geology of Alaska. Boulder, Colorado, Geol. Soc. Am.*, 1994, v. G-1, p. 241—269.

Pease V. Eurasian orogens and Arctic tectonics: an overview / Eds. A.M. Spencer, A.F. Embry, D.L. Gautier, A.V. Stoupakova, K. Sørensen // *Arctic petroleum geology. Geol. Soc. London Mem.*, 2011, v. 35, p. 311—324.

Pease V., Coakley B. Circum-Arctic lithosphere evolution. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 2018, v. 460, <http://doi.org/10.1144/SP460.19>.

Pease V., Drachev S., Stephenson R., Zhang X. Arctic lithosphere: a review // *Tectonophysics*, 2014, v. 628, p. 1—25.

Prokopiev A.V., Ershova V.B., Khudoley A.K., Vasiliev D.A., Baranov V.V., Kalinin M.A. Pre-mid-Frasnian angular unconformity on Kotel'nyy Island (New Siberian Islands Archipelago): evidence of Mid-Paleozoic Deformation in the Russian High // *Arktos*, 2018, v. 4, p. 1—8, <https://doi.org/10.1007/s41063-018-0059-6>.

Petrov O., Morozov A., Shokalsky S., Kashubin S., Sobolev N., Artemieva I.M., Petrov E., Richard E.E., Sergeev S., Smelror M. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region // *Earth Sci. Rev.*, 2016, v. 154, p. 29—71.

Richter M., Nebel O., Maas R., Mather B., Nebel-Jacobsen Y., Capitano F., Dick H., Cawood P. An Early Cretaceous subducting-modified mantle underneath the ultraslow spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // *Sci. Adv.*, 2020, 6:eabb4340 30 October 2020.

Rowley D.B., Lottes A.L. Plate-kinematic reconstructions of the North Atlantic and Arctic: Late Jurassic to Present // *Tectonophysics*, 1988, v. 155, p. 73—120.

Skolotnev S., Aleksandrova G., Isakova T., Tolmacheva T., Kurilenko A., Raevskaya E., Rozhnov S., Petrov E., Korniyuchuk A. Fossils from seabed bedrocks: Implications for the nature of the acoustic basement of the Mendeleev Rise (Arctic Ocean) // *Mar. Geol.*, 2019, v. 407, p. 148—163, <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.11.002>.

Sokolov S.D., Bondarenko G.Ye., Morozov O.L., Shekhovtsov V.A., Glotov S.P., Ganelin A.V., Kravchenko-Berezhnoy I.R. The South Anyui Suture, NE Arctic Russia: facts and problems to solve. Tectonic evolution of the Bering Shelf-Chukchi Sea-Arctic margin and adjacent landmasses // *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.*, 2002, v. 360, p. 209—224.

Taylor P.T., Kovacs L.C., Vogt P.R., Johnson G.L. Detailed aeromagnetic investigation of the Arctic Basin // *J. Geophys. Res.*, 1981, v. 86, p. 6323—6333.

The geology of Alaska / Eds. G. Plafker, H.C. Berg. The geology of North America. Boulder, Geol. Soc. Am., 1994, v. G-1, 1055 p.

Till A.B. A synthesis of Jurassic and Early Cretaceous crustal evolution along the southern margin of the Arctic Alaska–Chukotka microplate and implications for defining tectonic boundaries active during opening of Arctic Ocean basins // *Lithosphere*, 2016, v. 8 (3), p. 219—237.

Till A.B., Schmidt J.M., Nelson S.W. Thrust involvement of metamorphic rocks, southwestern Brooks Range, Alaska // *Geology*, 1988, v. 10, p. 930—933.

Vogt P.R., Taylor P.T., Kovacs L.C., Johnson G.L. Detailed aeromagnetic investigation of the Arctic Basin // *J. Geophys. Res. Solid Earth.*, 1979, v. 84, p. 1071—1089.

Weber J.R., Sweeney J.F. Reinterpretation of morphology and crustal structure in the central Arctic Basin // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 1985, v. 90, p. 663—677.

Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and the subducting slabs: insight into deep Earth dynamics // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2004, v. 146 (1), p. 3—34.

Zhao D. Multiscale seismic tomography and mantle dynamics // *Gondwana Res.*, 2009, v. 15, p. 297—323.

*Поступила в редакцию 18 октября 2021 г.,
принята в печать 7 декабря 2021 г.*