

Древняя субдукционная зона в Охотском море

Л. П. Забаринская¹ и Н. А. Сергеева¹

Получено 4 марта 2018 г.; принято 15 марта 2018 г.; опубликовано 5 апреля 2018 г.

В статье анализируется богатое научное наследие известного ученого, геолога, доктора геолого-минералогических наук Александра Георгиевича Родникова, посвятившего свою научную деятельность исследованию глубинного строения переходной зоны от Евразийского континента к Тихому океану. Он был инициатором и участником многих национальных и международных программ и проектов: “Верхняя мантия”, “Геодинамический проект”, “Литосфера”, “Геотраверс” и “InterMargins” и других, успешно осуществленных. В Геофизическом центре РАН А. Г. Родников руководил инициативной группой, разработавшей геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. В статье изложены основные идеи А. Г. Родникова, взгляд на историю развития Охотоморского региона, в частности представлена модель образования древней субдукционной зоны между впадиной Дерюгина и Северным Сахалином. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Зона субдукции; офиолитовый комплекс; Охотское море.

Ссылка: Забаринская, Л. П. и Н. А. Сергеева (2018), Древняя субдукционная зона в Охотском море, *Вестник ОНЗ РАН*, 10, NZ4001, doi:10.2205/2018NZ000351.

Памяти А. Г. Родникова посвящается

Введение

Изучение роли субдукционных процессов в тектонической активности континентальных окраин представляется важным, поскольку с ними связаны землетрясения, извержения вулканов, цунами и другие природные катастрофы, представляющие опасность для людей, проживающих в этих регионах.

¹Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

Северо-западная часть Охотского моря, включающая северную часть острова Сахалин и впадину Дерюгина, является областью недавних интенсивных тектонических движений. Геолого-геофизические данные позволили построить геодинамическую модель глубинного строения литосферы региона. Модель подтвердила, что в рассматриваемом регионе присутствует офиолитовый комплекс, отделяющий Северо-Сахалинский осадочный бассейн от впадины Дерюгина. Впадина Дерюгина сформировалась в месте древнего глубоководного желоба после субдукции плиты Охотского моря под о. Сахалин в позднемиоценовое–палеогеновое время. Северо-Сахалинский нефтегазоносный бассейн возник тогда же на месте существовавшей в мезозойское время задуговой впадины. Пример-

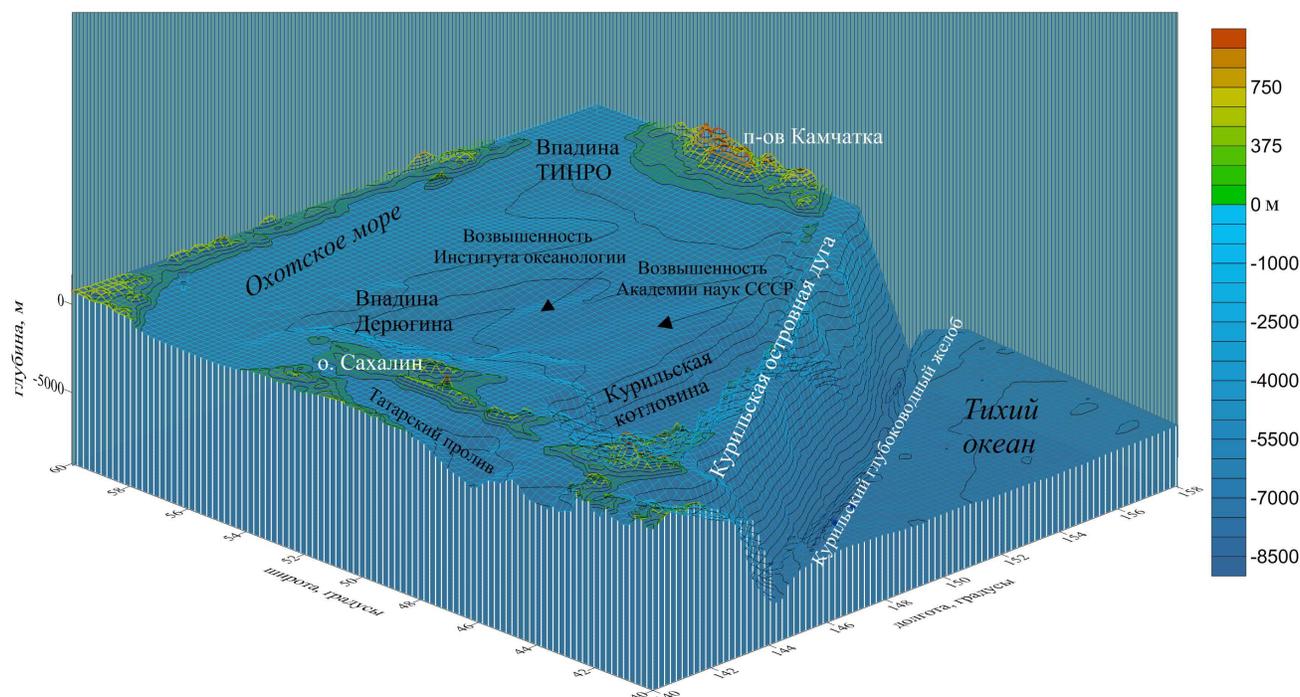


Рис. 1. Топография и батиметрия региона Охотского моря [Smith, Sandwell, 1997].

но в миоцене субдукция, по-видимому, прекратилась. Остатки зоны субдукции в виде офиолитового комплекса были идентифицированы по геологическим и геофизическим данным.

Охотоморский регион

Охотское море расположено в переходной зоне от Евразийского континента к Тихому океану. Переходные зоны представлены двумя типами – пассивными и активными окраинами континентов. Активные континентальные окраины отличаются от пассивных интенсивно расчлененным рельефом, высокой сейсмической и вулканической активностью. Регион Охотского моря – это область активных континентальных окраин, структуры которой расположены и развиваются над зоной погружения или субдукции одной литосферной плиты под другую.

Дно Охотского моря образуют тектонические структуры разного типа и разных стадий развития (Рис. 1). В центральной части моря расположены две возвышенности – Академии наук СССР и Института океанологии, которые разделяют Охотское море на три впадины: Куриль-

скую котловину, впадину ТИНРО и впадину Дерюгина. Минимальные глубины моря приурочены к возвышенности Института океанологии (860 м) и к возвышенности Академии наук СССР (894 м). Максимальные глубины во впадинах составляют: в Курильской котловине – 3374 м, во впадине ТИНРО – 991 м и во впадине Дерюгина – 1795 м [Белоусов и Удинцев, 1981; Родников и др., 2014].

Регион Охотского моря представляет собой литосферную плиту (блок твердой оболочки Земли), расположенную между Тихоокеанской, Северо-Американской, Евразийской и Амурской плитами (Рис. 2). Фундамент плиты разнородный: от кристаллического палеозойско-мезозойского, изученного на материке, Сахалине и Камчатке, до мезозойско-кайнозойского, распространенного в акватории Охотского моря [Родников и др., 1996]. Окончательно плита сформировалась в поздне меловую эпоху, а в кайнозойскую эру была перекрыта чехлом осадочных и вулканогенно-осадочных пород [Гранник, 2008; Сергеев, 1976, 2006].

Расположение Охотоморской плиты в зоне контакта литосферных плит (Евразийской, Северо-Американской, Тихоокеанской и Амурской) обусловило на ее границах высокую

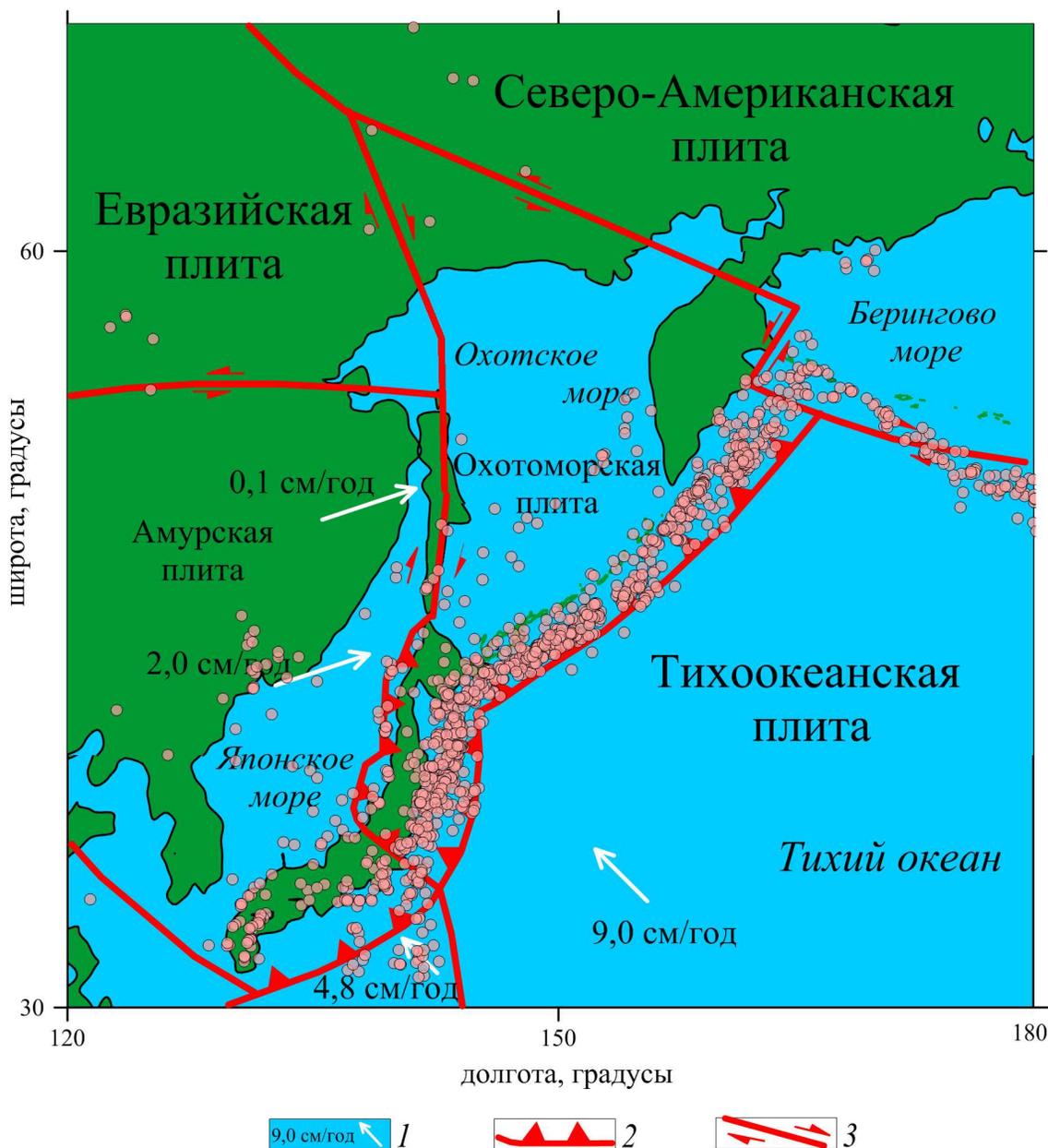


Рис. 2. Тектоническая схема региона Охотского моря [Biebow et al., 2000; Kiratzi and Parazachos, 1996; Maruyama et al., 1997; Rodnikov et al., 2001] с пространственным распределением эпицентров землетрясений с магнитудой $M > 6$ (розовые кружки) за период 1964–2011 гг. 1 – скорость движения плит по данным GPS [Jet Propulsion Lab., 2018]. 2 – зоны субдукции; 3 – разломы.

сейсмичность (Рис. 3). Анализ каталога землетрясений, составленного на основе данных, опубликованных в работах [Кондорская, 1997; Старовойт, 2017], показывает, что в регионе Охотского моря за последние 50 лет произошло около 18 тысяч сейсмических событий.

В основном землетрясения происходят на небольшой глубине – в пределах земной коры и до глубины 50 км. Подавляющее большинство землетрясений приурочено к Курильской островной дуге. Здесь Тихоокеанская плита погружается под континент, образуя сейсмофокаль-

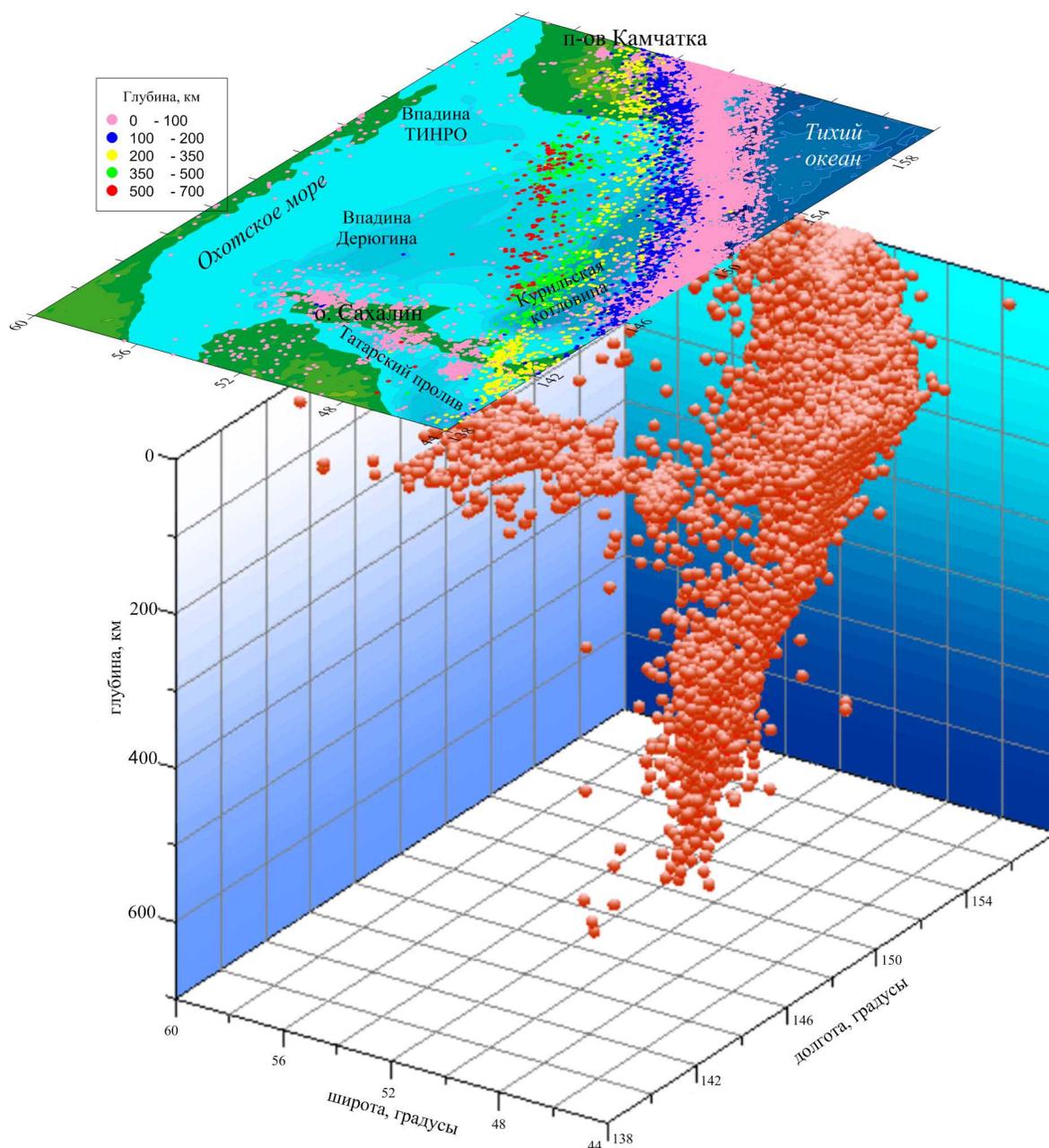


Рис. 3. Сейсмичность региона Охотского моря по данным [Кондорская, 1997; Старовойт, 2017].

ную зону, которая прослеживается до глубины 700 км. На западе плита Охотского моря ограничена глубинными разломами, простирающимися вдоль Сахалина, где очаги землетрясений локализуются в основном в коре. Землетрясение, произошедшее в мае 1995 г. с магнитудой $M_s = 7,2$ по шкале Рихтера, разрушило г. Нефтегорск. В результате этого катастрофического события на поверхности Сахалина возникли раз-

ломы северо-восточного простирания общей протяженностью до 35 км.

Впадина Дерюгина

К востоку от о. Сахалин расположена впадина Дерюгина (Рис. 1). Она оконтурена изобатой 1500 м и простирается с севера на юг на

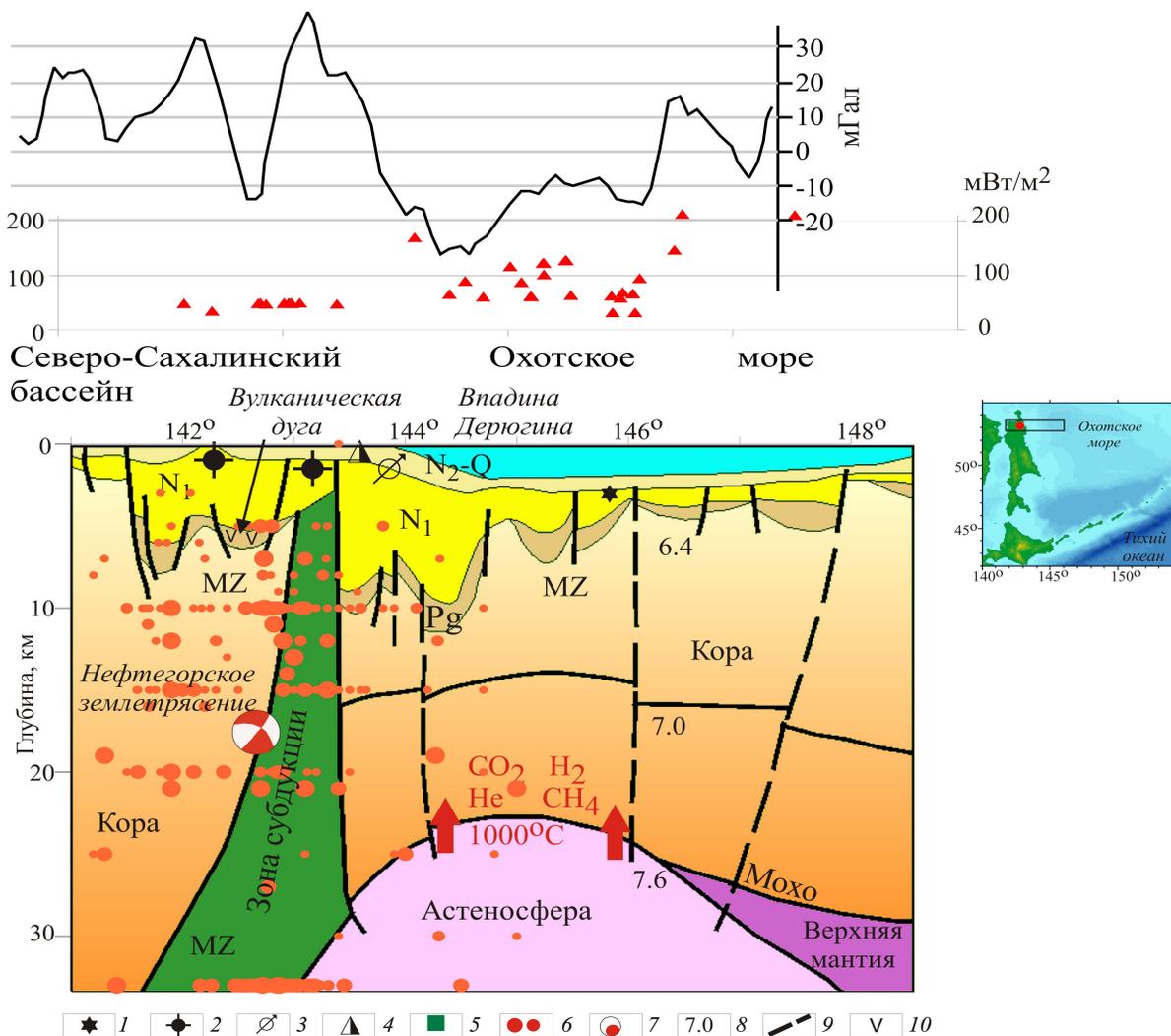


Рис. 4. Геодинамическая модель глубинного строения впадины Дерюгина. Справа – карта-схема расположения профиля. Вверху – аномалии силы тяжести в свободном воздухе [Smith, Sandwell, 1997]; ниже – распределение измеренных значений теплового потока вдоль профиля [Pollak et al., 1991]. 1 – бариты, сульфиды; 2 – нефть; 3 – газ; 4 – грязевые вулканы; 5 – офиолитовый пояс; 6 – положения очагов землетрясений; 7 – механизм очага; 8 – скорости сейсмических волн, км/с; 9 – разломы; 10 – андезиты.

800 км при ширине от 100–150 км на севере до 200 км на юге. Максимальная глубина 1795 м. На востоке впадина переходит в серию узких (до 10–20 км) субширотных грабен, образующих Восточно-Дерюгинский осадочный бассейн и заполненных осадками мощностью до 4 км. Дно впадины представляет собой плоскую равнину, слегка расчлененную по краям устьями подводных долин [Белюсов и Удинцев, 1981].

Глубинный разрез, пересекающий Северо-Сахалинскую осадочную впадину и впадину Дерюгина и разделяющий их офиолитовый ком-

плекс, представлен на Рис. 4. Впадина Дерюгина выполнена кайнозойскими, преимущественно глубоководными, морскими терригенными и кремнисто-терригенными отложениями толщиной до 12 км. Они залегают на фундаменте, сложенном триас-раннемеловыми вулканогенно-кремнистыми, в отдельных случаях, позднемеловыми вулканогенными отложениями. Бассейн начал развиваться как задуговой прогиб в позднем мелу в результате рифтогенной деструкции. В конце неогена в результате активизации тектонических движений превратился

в складчатую область [Родников и др., 1996]. Олигоцен-нижнемиоценовый комплекс, составляющий нижнюю часть осадочной толщи и слагающий отдельные изолированные рифтовые грабены, сформировался в глубоководном бассейне в условиях некомпенсированного осадконакопления. Мощность этих отложений составляет 3–5 км. Верхняя основная часть бассейна сложена миоцен-четвертичными осадками, выполняющими крупные прогибы, отделенные от поднятий листрическими сбросами. Верхние слои сложены диатомовыми пелитами с прослоями пирокластических пород [Родников и др., 1996]. Слоистая толща впадины Дерюгина повсеместно смята в складки и разбита разломами, осложняющими борта впадины [Biebow et al., 2000]. Разломы отражают современную тектоническую обстановку региона, обусловленную, по-видимому, глубинными процессами. Активная современная тектоника подчеркивается высокими значениями теплового потока, достигающими 200 мВт/м^2 [Смирнов, 1986] и сейсмическими проявлениями, приуроченными в основном к западному борту впадины Дерюгина. Мощный осадочный чехол впадины залегает на неровной поверхности акустического фундамента со скоростями сейсмических волн 6,2–6,4 км/с. Скорости по поверхности Мохо пониженные до 7,6 км/с [Piip and Rodnikov, 2004]. Толщина фундамента незначительная – не больше 10 км, обусловленная процессами растяжения и последующего прогибания. Предполагается, что фундамент сложен мезозойскими океаническими вулканогенно-кремнистыми и глинистыми образованиями, породы которых обнажаются на Сахалине и Западной Камчатке [Родников и др., 1996].

Тектоническая активность, проявившаяся в регионе Охотского моря, в частности во впадине Дерюгина, обусловлена процессами, протекающими в верхней мантии. Здесь на небольшой глубине 25–30 км расположена астеносфера – аномальная горячая мантия, содержащая магматические очаги с высокими температурами, достигающими 1200°C [Родников и др., 2002].

Газогеохимические исследования подтверждают активные гидротермальные процессы, протекающие во впадине: вдоль зон разломов отмечается в придонной воде высокое содержание метана, водорода, углекислого газа, гелия и сероводорода. Обнаружена баритовая минерализация.

Кроме того, на западном борту впадины Дерюгина на глубине примерно 800 м в керне глинистых осадков обнаружены газогидраты, содержащие в основном метан [Обжиров и др., 1999; Biebow et al., 2000].

С запада впадина Дерюгина ограничивается Шмидтовским подводным поднятием, сложенным меловым офиолитовым комплексом пород, образующим тонкие пластины, надвинутые в конце миоцена на мезозойский фундамент.

На п-ве Шмидта вдоль восточного берега Сахалина также прослеживается офиолитовый комплекс, приуроченный к глубинному разлому [Алексейчик и др., 1963; Разницын, 1982; Рождественский, 2000]. Здесь офиолитовый комплекс представлен гарцбургитами, дунитами, верлитами, родингитами, габбро и амфиболитами, образующими тонкие пластины, надвинутые в поздне-меловую эпоху и в конце миоцена на мезозойский фундамент [Обжиров и др., 1999; Родников и др., 1996].

Предполагается, что офиолитовый комплекс в Шмидтовском подводном поднятии отражает положение древней (мезозойской) субдукции океанической коры Охотского моря под структуры Сахалина. Здесь наблюдается повышенная сейсмическая активность, приуроченная в основном к западному борту впадины Дерюгина (Рис. 3), где выходит на поверхность древняя субдукционная зона [Родников и др., 2014].

Подтверждением служит и выделенная сахалинскими геологами на Восточном Сахалине поздне-меловая-палеогеновая Восточно-Сахалинская вулканическая дуга, состоящая из фрагментов вулканических островов, междуговых и преддуговых прогибов, надвинутых на окраинно-морские образования в восточных районах Центрального и Северного Сахалина [Гранник, 1999]. Вулканическая дуга сложена андезитами, дацитами, риолитами и их туфами известково-щелочной серии. За ней в позднем мезозое на Северном Сахалине располагался тыловой прогиб, сложенный терригенными, кремнистыми и карбонатными породами с отдельными прослоями вулканического материала.

Формирование впадины Дерюгина можно представить следующим образом. Примерно около 100 млн лет назад океаническая литосфера Охотского моря погружалась под Сахалин,

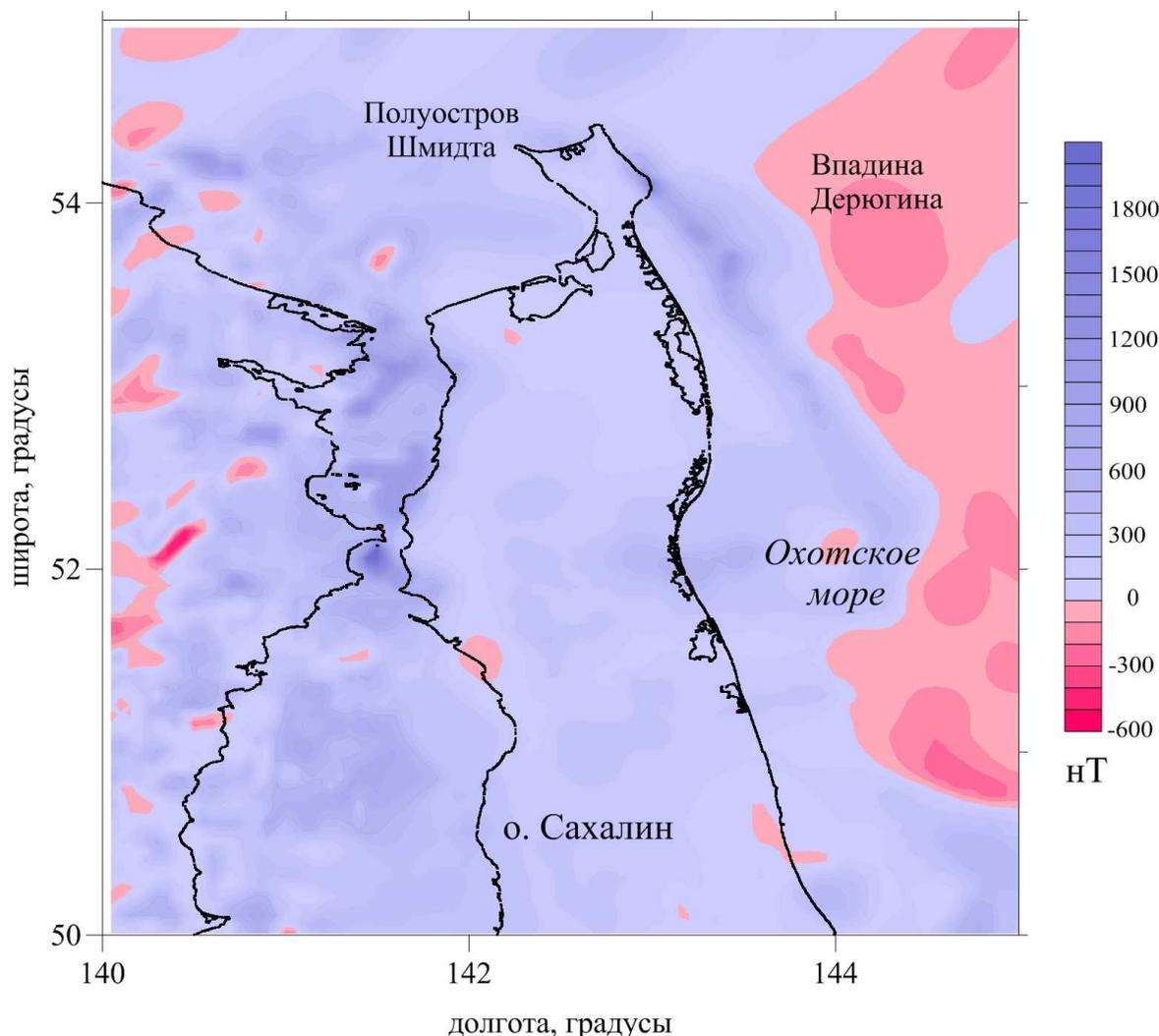


Рис. 5. Аномальное магнитное поле района Северного Сахалина и впадины Дерюгина [Красный, 1990]. Вдоль северного Сахалина прослеживается положительная магнитная аномалия, фиксирующая положение офиолитового комплекса.

восточная часть которого составляла островную дугу. За ней, в районе западного Сахалина, располагался бассейн, в который в позднемеловое–раннепалеогеновое время сносились песчано-глинистые отложения, впоследствии образовавшие фундамент Северо-Сахалинского нефтегазоносного бассейна. Вдоль восточного Сахалина во время субдукции океанической коры под остров располагался глубоководный желоб, заполняемый рыхлыми осадками. Около 10–15 млн лет назад субдукция литосферы Охотского моря под Сахалин, по-видимому, завершилась в связи с развитием в Татарском проливе рифтовых центров расширения, а на восточной части острова образовались надвиговые структуры. Остатки субдукционной зоны установлены геологиче-

скими и подтверждены сейсмическими, гравиметрическими и магнитометрическими исследованиями.

По данным аэромагнитной съемки офиолитовый комплекс п-ва Шмидта прослеживается в Охотском море в юго-восточном направлении вдоль восточного побережья Сахалина (Рис. 5) на 250 км при ширине до 30 км [Корнев, 1990] и связан с Восточно-Сахалинским глубинным разломом, перекрытым в настоящее время кайнозойскими отложениями. В магнитном поле эта зона представляет собой пояс высокоградиентных аномалий, интенсивность которых достигает 1300 нТл.

На месте древнего глубоководного желоба образовалась впадина Дерюгина, где в кайно-

зойскую эру накопились мощные вулканогенно-осадочные породы, содержащие залежи углеводородов. Под корой сформировался астеносферный диапир частично расплавленного вещества (Рис. 3). Содержащиеся в нем флюиды, включающие водно-углеводородные, рудные и водно-углекислые компоненты, способствовали формированию месторождений нефти и газа.

Обсуждение и выводы

Таким образом, реконструированная древняя субдукционная зона Восточного Сахалина контролировала в поздне меловое–палеогеновое время развитие осадочных бассейнов Сахалина, сейсмичность, магматизм и образование полезных ископаемых [Rodnikov et al., 2013]. Сформировавшаяся после завершения субдукции в неогене субдукционная сутура представлена мощной (70 км) зоной серпентинитовых пород офиолитовой формации, сопоставимой с океанической корой. Протягивается она вдоль восточного края Сахалина на расстояние более 1200 км. Субдукционная сутура отчетливо проявлена в магнитном поле интенсивностью до 2000 нТл.

Впадина Дерюгина образовалась на месте древнего глубоководного желоба после завершения субдукции плиты Охотского моря под Сахалин. За кайнозойскую эру здесь накопились мощные песчано-глинистые отложения. Толщина осадков достигает 12 км. Северо-Сахалинский нефтегазоносный бассейн сформировался на месте существовавшей в мезозойское время задуговой впадины. Для Северо-Сахалинского бассейна отмечаются средние значения теплового потока и толщина коры, превышающая 30 км, а впадина Дерюгина характеризуется повышенными значениями теплового потока, тонкой корой, сейсмической и гидротермальной активностью. Впадина расположена над горячим плюмом в мантии – астеносферным диапиром частично расплавленного вещества, обнаруженно-го на глубине примерно 25 км.

Вероятно, что астеносферные диапиры с частичным плавлением вещества представляют собой каналы, по которым горячие мантийные флюиды, несущие продукты дегазации мантии, проникают в осадочные бассейны, обеспечивая преобразование органического материала, и яв-

ляющиеся дополнительным источником углеводородов. Западный борг впадины Дерюгина ограничен офиолитовым поясом ультраосновных магматических пород, по-видимому, фиксирующим древнюю (мезозой) субдукционную зону, отделяющую впадину от Восточного Сахалина, представлявшего в то время островную дугу с андезитовым магматизмом. За дугой располагался тыловой осадочный трог, в меловой период заполненный вулканогенно-кремнистыми и глинисто-кремнистыми отложениями, в настоящее время образующими складчатое основание Северного Сахалина. В связи с этим обосновывается положение о перспективности на нефть и газ мезозойского фундамента Северо-Сахалинского нефтегазоносного бассейна, сформировавшегося в основном в условиях задуговых впадин, благоприятных для генерации, аккумуляции и консервации углеводородов.

Благодарность. Работа выполнена по теме НИР 0145-2016-0005 государственного задания ГЦ РАН.

Литература

- Алексейчик, С. Н., и др. (1963), Тектоника, история геологического развития и перспективы нефтегазоносности Сахалина, *Тр. ВНИГРИ, Вып. 328* с.183, Ленинград, Гостоптехиздат.
- Белюсов, В. В., Г. Б. Удинцев (1981), *Строение дна Охотского моря*, 176 с. Наука, Москва.
- Гранник, В. М. (1999), Реконструкция сейсмофокальной зоны Восточно-Сахалинской вулканической палеодуги по распределению редкоземельных элементов, *Докл. РАН, 366*, No. 1, 79–83.
- Гранник, В. М. (2008), *Геология и геодинамика южной части Охотоморского региона в мезозое и кайнозое*, 297 с. Дальнаука, Владивосток.
- Кондорская, Н. В., (Ред.) (1964-1977), *Землетрясения в СССР (ежегодник, 1962-1991 гг.)*, ОИФЗ РАН, Москва.
- Корнев, О. С. (1990), Геоманнитные формации фундамента Охотоморской плиты, *Тихоокеанская геология*, No. 2, 33–39.
- Красный, М. Л. (1990), *Геофизические поля и глубинное строение Охотско-Курильского региона*, 162 с. ДВО АН СССР, Владивосток.
- Обжиров, А. И., Н. В. Астахова, М. И. Липкина, и др. (1999), *Газо-геохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря*, 184 с. Дальнаука, Владивосток.
- Разницын, Ю. Н. (1982), *Офиолитовые аллохтоны и сопредельные глубоководные впадины на западе Тихого океана*, 104 с. Наука, Москва.

- Родников, А. Г., и др. (1996), *Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона*, 338 с. Национальный геофизический комитет, Москва.
- Родников, А. Г., Н. А. Сергеева, Л. П. Забаринская (2002), Глубинное строение впадины Дерюгина (Охотское море), *Тихоокеанская геология*, No. 4, 3–8.
- Родников, А. Г., Л. П. Забаринская, В. А. Рашидов, Н. А. Сергеева (2014), *Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин*, 172 с. Научный мир, Москва.
- Рождественский, В. С. (2000), *Микроплита Сахалин-Хоккайдо, Объяснительная записка к Тектонической карте Охотоморского региона, 1:2 500 000*, Ред. Н. А. Богданов, В. Е. Хаин, 60–71 с. Наука, Москва.
- Сергеев, К. Ф. (1976), *Тектоника Курильской островной дуги*, 240 с. Наука, Москва.
- Сергеев, К. Ф., (Ред.) (2006), *Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря*, 130 с. Наука, Москва.
- Смирнов, Я. Б. (1986), *Геотермическая карта Северной Евразии и методы анализа термической структуры литосферы*, 180 с. ГИН АН СССР, Москва.
- Старовойт, О. Е., (Ред.) (1997-2017), *Землетрясения Северной Евразии (ежегодник, 1992-2011 гг.)*, ГС РАН, Обнинск.
- Biebow, N., T. Lüdmann, V. Karp, R. Kulinich, (Eds.) (2000), *Cruise reports: KOMEX V and VI RV Professor Gagarinsky Cruise 26 and MV Marshal Gelovany Cruise 1*, GEOMAR Report, 88, 296 с. GEOMAR, Kiel.
- Jet Propulsion Lab. (2018), Global Positioning System (GPS) Time Series, California Institute of Technology, Pasadena, California. (<http://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>)
- Kiratzi, A. A., C. V. Papazachos (1996), Moment-tensor summation to derive the active crustal deformation in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, No. 3, 821–831.
- Maruyma, S., et al. (1997), Paleogeographic maps of Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present, *The Island Arc*, 6, No. 1, 121–142. **Crossref**
- Piip, V. B., A. G. Rodnikov (2004), The Sea of Okhotsk crust from deep seismic sounding data, *Russian J. Earth Sci.*, 6, No. 1, 1–14. **Crossref**
- Pollak, H. N., S. J. Hurter, J. R. Johnson (1991), *New Global Heat Flow Compilation*, Department of Geological Sciences, University of Michigan, USA.
- Rodnikov, A. G., N. A. Sergeyeva, L. P. Zabarinskaya (2001), Deep structure of the Eurasia-Pacific transition zone, *Russian J. Earth Sci.*, 3, No. 4, 293–310. **Crossref**
- Rodnikov, A. G., N. A. Sergeyeva, L. P. Zabarinskaya (2013), Ancient subduction zone in the Sakhalin Island, *Tectonophysics*, 600, 217–225. **Crossref**
- Smith, W. H. F., D. T. Sandwell (1997), Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, *Science*, 277, 1957–1962.

Л. П. Забаринская и Н. А. Сергеева, Геофизический центр Российской академии наук, ул. Молодежная 3, 119296 Москва, Россия. (n.sergeyeva@gcras.ru)