УДК 550.361+551.248.2(265.53)

doi: 10.30730/2541-8912.2018.2.4.312-322

Тепловой поток и неотектоника района впадины Дерюгина (Охотское море)

© О. В. Веселов*, В. П. Семакин, А. В. Кочергин

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: o.veselov@imgg.ru

Особенности тектонической эволюции литосферы впадины Дерюгина непосредственно связаны с термической активизацией ее верхней мантии в кайнозое. В работе проанализировано распределение теплового потока (ТП) по неотектоническим структурам впадины, охарактеризованы аномалии ТП. Представлено описание температурного режима земной коры и верхней мантии региона. Определены основные этапы тектономагматической активизации земной коры впадины Дерюгина в кайнозое. Для выявления природы распределения теплового потока в регионе проводится сопоставление его показателей для впадины Дерюгина с основными геолого-геофизическими характеристиками впадины, в первую очередь с неотектоникой.

Ключевые слова: тепловой поток, неотектоника, температурная модель, тектономагматическая активизация, впадина Дерюгина.

Heat flow and neotectonics of the Deryugin Basin' region (Okhotsk Sea)

Oleg V. Veselov*, Viktor P. Semakin, Albert V. Kochergin

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: o.veselov@imgg.ru

Peculiarities of the tectonic evolution of the Deryugin Basin' lithosphere are connected directly with the thermal activation of the upper mantle in Cenozoic. In the article the distribution of the heat flow (HF) by the neotectonic structures of the basin has been analyzed. The anomalies of ones have been described also. A description of the temperature regime of the region has been presented. The basic stages of the Cenozoic tectonic-magmatic activation of the crust of the Deryugin Basin have been determined. To reveal the origin of regional heat flow distribution the indicators of heat flow of Deryugin Basin have been compared with the main geological and geophysical characteristics of the basin, the neotectonics being the first.

Keywords: heat flow, neotectonics, temperature model, tectonic-magmatic, Deryugin Basin.

Неотектонические структурные элементы

Впадина Дерюгина – это одно из наиболее интересных с геологической точки зрения образований Охотского моря. Ее отличают своеобразные геолого-геофизические характеристики, основными из которых являются пониженная мощность земной коры, высокая дифференцированность гравимагнитных полей и теплового потока, внутрикоровые внедрения диапиров, интенсивная карбонатно-баритовая минерализация, железомарганцевые образования, широкое распространение газогидратов, значительные выделения газа со дна [Журавлев, 1984; Обжиров и др., 1999; Астахова, 2000; Веселов, 2000; Веселов и др., 2000; Тектоническое..., 2006; Деркачев, Николаева, 2007; Саттарова, Астахов, 2007; Астахов и др., 2008; Харахинов, 2010; Семакин, Кочергин, 2010; Родников и др., 2014; Семакин и др., 2018; КОМЕХ..., 1999].

Впадина Дерюгина (рис. 1, 2), имеющая форму мульды [Журавлев, 1984], характеризуется большими глубинами морского дна (более 1800 м). В северо-западном направлении она переходит в относительно узкий Старицкий прогиб, а в южном – через узкую Южно-Дерюгинскую флексуру сменяется Южно-Дерюгинской зоной поднятий и прогибов. К востоку от Сахалина находится Присахалинский шельф, ограниченный с востока и северо-востока изобатой 200 м (рис. 1).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН.



Рис. 1. Расположение пунктов измерения теплового потока на морфотектонической карте с батиметрией района впадины Дерюгина (Охотского море) согласно [Тектоническое..., 2006; Семакин, Кочергин, 2010] с дополнениями. 1 – изолинии «вершинной» поверхности (цифры – глубины в сотнях метров от уровня моря); 2-4 – бровки (2), подножья (3) и высокоградиентные зоны (4) флексур и тектонических уступов; 5 – оси относительных неотектонических поднятий; 6 – оси относительных неотектонических прогибов; 7 – днища узких грабеноподобных прогибов; 8 – Баритовые горы (1), гора Клам Хилл (2); 9 – участок севернее горы Клам Хилл (см. рис. 4) со значениями теплового потока (с севера на юг) 90, 156 и 109 мВт/м²; 10 – участок структуры «Обжиров» с выходами газовых факелов и низкими значениями теплового потока: 20, 23 и 32 мВт/ м² (см. рис. 3); 11 – станции и значения теплового потока (мВт/м²); 12 – станции магнитовариационных зондирований: А – во впадине Дерюгина, Б – на поднятии Института Океанологии, цифры – глубины моря в районе станций (м); 13 – положение геолого-геофизического профиля по линии А-Б. Цифры в кружках – неотектонические структурные элементы: 1 – впадина Дерюгина, 2, 3 – прогибы: Старицкий (2) и Кашеваровский (3), 4 – Присахалинский шельф, 5 – Присахалинская флексура, 6 – Кашеваровское поднятие, 7 – Центрально-Охотская флексура, 8 – поднятие Института Океанологии, 9-Южно-Дерюгинская зона поднятий и прогибов, 10-Южно-Дерюгинская флексура. Здесь и далее на схемах и в таблице величины тепловых потоков округлены до целых чисел согласно электронной базе данных [Геотермический атлас..., 2012].

В восточном и северо-восточном направлениях шельф переходит в Присахалинскую флексуру, подножье которой является западным ограничением впадины Дерюгина и Старицкого прогиба. Присахалинская флексура в пределах рассматриваемого района имеет различные углы наклона и осложняется малоамплитудными нормальными и листрическими сбросами. В северной части района находится Кашеваровское поднятие, которое на юго-западе и юге граничит соответственно со Старицким прогибом и впадиной Дерюгина, а на востоке – с Центрально-Охотской флексурой (рис. 2). Кашеваровское поднятие осложнено отчетливо выраженными тектоническими уступами (рис. 1). Северо-восточная часть Центрально-Охотской флексуры имеет относительно пологий склон, в отличие от ее юго-западной части, характеризующейся значительной раздробленностью и дифференцированностью. Здесь наблюдается ряд горстовых поднятий субширотного и юго-западного простираний, ограниченных тектоническими уступами и узкими грабеноподобными прогибами. В восточном и юго-восточном направлениях впадина Дерюгина сменяется относительно пологим северо-западным крылом поднятия Института Океанологии, которое осложняется малоамплитудными относительными прогибами и поднятиями, а на отдельных участках – тектоническими уступами, ориентированными на северо-восток и северо-запад (рис. 1). Между Центрально-Охотской флексурой и поднятием Института Океанологии выделяется Кашеваровский прогиб (рис. 2).

Глубинное строение. В приосевой части неотектонической впадины Дерюгина подошва земной коры залегает на глубинах 21 км, увеличиваясь до 23–25 км на ее периферии. Далее в северном и восточном направлениях мощность земной коры увеличивается до 27 км, а в направлении к Сахалину до 31 км и более [Тектоническое..., 2006]. Кровля «базальтового» слоя в приосевой части впадины находится на глубинах 10–11 км, погружаясь в восточном направлении до 13, а в западном – до 15 км. В наиболее глубоководной части



Рис. 2. Расположение станций теплового потока относительно основных неотектонических структурных элементов согласно [Тектоническое..., 2006; Семакин, Кочергин, 2010; Семакин и др., 2018]. 1 – границы основных неотектонических структурных элементов (условные границы второго типа [Косыгин, 1974]) (цифры в кружках - см. усл. обозначения на рис. 1); 2 - впадина Дерюгина и прогибы; 3 – флексуры; 4 – поднятия; 5 – Присахалинский шельф; Южно-Дерюгинская 6 зона поднятий и прогибов; 8 - осевая линия неотектонического Старицкого прогиба и впадины Дерюгина. Остальные усл. обозначения см. на рис. 1.

Геосистемы переходных зон, 2018, т. 2, № 4, с. 312–322

впалины мошность осалочного чехла составляет 1-2 км, а максимальная его мощность (до 12-15 км) устанавливается в осевой части Дерюгинского тектонического прогиба, приуроченного к Присахалинской флексуре [Волгин и др., 2011]. Под этим прогибом мощность гранитно-метаморфического слоя существенно сокращена при одновременном уплотнении «базальтового» слоя и мантии [Волгин и др., 2009]. По данным морских градиентных магнитовариационных зондирований [Kyцов, Ляпишев, 1997], под впадиной Дерюгина кровля электропроводящего слоя, удельное электрическое сопротивление р которого равно 3.1 Ом м, установлена на глубине 70 км, подошва - на 164 км (для моделей «трубчатого» распределения расплава при 0.1 % H₂O), а под поднятием Института Океанологии на глубинах 65 км ($\rho = 34 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и 160 км соответственно (рис. 1, 2). То есть интервалы глубин залегания электропроводящих слоев под указанными неотектоническими структурными элементами достаточно близки при практически одинаковой их мощности (94 и 95 км). Различие между ними – в величинах р (3.1 и 34 Ом м) на кровлях проводящих слоев, а также в объемной доле расплава: под впадиной Дерюгина она варьирует от 6.4 % (средняя степень плавления) до 15.5 % (максимальная степень плавления), а под поднятием Института Океанологии – соответственно от 2.4 до 3.6 %, в результате чего вязкость электропроводящих слоев под указанными структурными элементами будет различна [Тектоносфера..., 1992].

В восточной прибрежной части северного Сахалина кровля верхнемантийного электропроводящего слоя установлена на глубинах 90–100 км (с погружением на запад до 130–140 км), мощность слоя составляет 40 км, удельное электрическое сопротивление – 10 Ом·м, суммарная продольная проводимость 3500–5000 См [Структура..., 1996].

Тепловой поток

В районе впадины Дерюгина станции теплового потока (91) расположены крайне неравномерно относительно основных морфотектонических и неотектонических структурных элементов (рис. 1, 2). На Кашеваровском поднятии и в Южно-Дерюгинской зоне (рис. 2) находятся 1 и 2 станции соответственно, в Кашеваровском прогибе – 3, в центральной и особенно южной части впадины Дерюгина – 19 (наибольшее число), в пределах Присахалинского шельфа и Присахалинской флексуры – по 11, на поднятии Института Океанологии и на Центрально-Охотской флексуре – по 13, в Южно-Дерюгинской флексуре – 4, в прибрежной восточной части северного Сахалина – 14 станций.

Полученные значения теплового потока (ТП) варьируют от 20 до 212 мВт/м² [Веселов, Липина, 1982; Веселов, 2000]. Низкие значения ТП (от 20 до 32 мВт/м²) установлены лишь в пределах Присахалинской флексуры на 6 станциях на линейных участках субмеридионального простирания и во впадине Дерюгина на 2 станциях (28 и 29 мВт/м²). Высокие значения ТП (>100 мВт/м²) выявлены в пределах Кашеваровского поднятия – 104 мВт/м² (1 ст.), на Центрально-Охотской флексуре – 101 и 112 (2 ст.), на Присахалинской флексуре – 165 (1 ст.), на поднятии Института Океанологии – 111 и 212 (2 ст.) и во впадине Дерюгина – от 114 до 210 мВт/м² (5 ст.).

Анализ геотермических данных по плосеверо-восточного шалям мелководного шельфа показал, что в скважинах шельфа от Хангузинской до Лунской площадей геотермический градиент находится в интервале 30-36 °С/км, а тепловой поток - в пределах 45-49 мВт/ м², со средним значением 47 мВт/м². В целом в прибрежной восточной части северного Сахалина и на Присахалинском шельфе величины ТП изменяются от 42 до 49 мВт/м² при среднем значении 46 мВт/м² (по 25 значениям), что достаточно близко к фоновому значению для участков с неактивизированным складчатым фундаментом эпипалеозойского возраста Восточно-Европейской платформы (48 мВт/м²) [Тектоносфера..., 1992]. Несколько выше среднее значение ТП (54 мВт/м²) отмечается в пределах Присахалинской флексуры. На остальных неотектонических структурных элементах средние величины ТП варьируют от 77 (Центрально-Охотская флексура) до 98 мВт/м² (Кашеваровский прогиб). На Присахалинской флексуре среднее значение ТП равно 87 мВт/м², во впадине Дерюгина –

97 мВт/м². Таким образом, за исключением восточной прибрежной части северного Сахалина и Присахалинского шельфа, средние значения ТП на каждой из остальных новейших структур района в большинстве случаев почти вдвое превосходят фоновые значения для неактивизированных структур.

В распределении ТП во впадине Дерюгина, детально рассмотренном в работах [Веселов, Соинов, 1989; Тектоническое..., 2006], отмечается ярко выраженный пик в интервале значений 56–90 мВт/м². Детальный анализ данных в этом интервале позволяет выделить три моды – 62, 72 и 88 мВт/м² со стандартным отклонением 1.5 мВт/м², что в общем типично для структурных элементов Охотского моря. Наиболее характерной модой ТП для впадины Дерюгина является среднее значение 88 мВт/м² [Аргентов и др., 2004].

Под влиянием ряда факторов (неоднородность морфологии дна и акустического фундамента, контрастность теплопроводности пород, скорость осадконакопления и т.п.) измеренные значения ТП могут искажаться, как правило, в меньшую сторону [Веселов, Соинов, 1989]. Но в целом полученное в результате геотермических исследований распределение ТП в Охотском море соответствует глубинному тепловому потоку, поскольку вводимые поправки в суммарном эффекте находятся в пределах точности его определения, отражая реальное распределение глубинного ТП по неотектоническим структурным эле-



Рис. 3. Расположение станций с низкими значениями теплового потока на участке структур «Обжиров» и «Гизелла» с выходами газовых факелов. 1 – структуры с выходами газовых факелов по данным [Обжиров и др., 1999; Деркачев, Николаева, 2007]; 2 – станции и значения теплового потока (кВт/м²) [Веселов, 2000].

ментам (за исключением упомянутых выше низких значений ТП на отдельных участках).

Аномально низкие значения ТП (20, 23 и 32 мВт/м²), отмеченные на глубине моря 700 м вблизи бровки Присахалинской флексуры (рис. 1, 2), на участке выхода газовых факелов (структура «Обжиров» [Обжиров и др., 1999]) (рис. 3), можно объяснить эффектом, обусловленным разрушением газовых гидратов в придонной части осадочного чехла морского бассейна. Так как разложение гидратов процесс энергоемкий (420-500 кДж/кг), то за 100-200 лет процесс поглощения тепла из вмещающей среды может понизить приповерхностный ТП в зоне разгрузки на 30-60 мВт/м². В связи с этим не исключается, что и на других участках Присахалинской флексуры и во впадине Дерюгина низкие ТП в диапазоне 28–32 мВт/м² связаны с очагами разгрузки метановых эманаций или наличием и разложением газогидратов [Веселов и др., 2000]. И.И. Бурмистрова и В.Н. Беляева [2005] отмечают активную деятельность газоносных флюидов в период 24 000-12 180 л. н. (от сартанского оледенения Q₃⁴ до ранней дегляциации) в районе станции 6676 «Витязь» (ТП 29 мВт/м²), расположенной во впадине Дерюгина.

В непосредственной близости от подножья северной стороны возвышенности Клам Хилл (рис. 4), расположенной к востоку от Баритовых гор [Деркачев, Николаева, 2007],



Рис. 4. Расположение станций и значения теплового потока (мВт/м²) в районе горы Клам Хилл [Веселов, 2000]. Изобаты (м) по данным [Деркачев, Николаева, 2007].

находятся три станции ТП со значениями (с севера на юг) 90, 156 и 109 мВт/м² [Веселов, 2000]. В геоморфологическом отношении упомянутые две подводные возвышенности высотой до 200 м над уровнем дна впадины имеют характер экструзивных куполов с крутыми северными склонами типа тектонических уступов (рис. 5). На Баритовых горах и на возвышенности Клам Хилл выявлены баритовые постройки и признаки проявления газово-флюидных эманаций [Деркачев, Николаева, 2007; Деркачев и др.,

2009]. В районе гор осаждение бария связывают с гидротермальными процессами [Ахманов и др., 2015], эпизодически происходившими в течение позднего неоплейстоцена (Q_{2}) и голоцена (Q_{4}) [Астахов и др., 2008] и, возможно, в более раннее время на глубине под проявлениями низкотемпературных гидротермальных источников [Саттарова, Астахов, 2007]. В районе возвышенности Клам Хилл баритовые постройки тоже, очевидно, связаны с гидротермальными процессами. Во впадине Дерюгина обнаружены также железомарганцевые образования, которые по ряду признаков имеют гидрогенную природу [Деркачев и др., 2009]. Серия субвертикальных разломов в верхней части осадочного чехла на бортах прогиба свидетельствует о продолжающихся тектонических движениях. По этим разломам внедрялись магматический материал и высокотемпературные флюиды, с которыми связаны поверхностные гидротермальные образования позднемиоценового возраста.

Анализ микропалеонтологических определений диатомей в составе осадочных отложений впадины [Деркачев и др., 2009] показывает, что их формирование происходило в холодных условиях, которые сохраняются до настоящего времени. Распределение придонных температур во впадине Дерюгина охарактеризовано по данным Дальневосточного гидрометеорологического института [Гидрометеорология..., 1998] и результатам геотемпературных измерений, проведенных в 1981 г. в рейсе 18 НИС «Морской геофизик». Эти данные представлены на геолого-геофизическом профиле по линии А–Б (рис. 6)



Рис. 5. Неотектоническая схема Баритовых гор, составленная на основе батиметрической карты [КОМЕХ..., 1999]. 1 – изолинии «вершинной» поверхности (цифры – глубины от уровня моря, м); 2–4 – бровки (2), подножья (3) и высокоградиентные зоны (4) тектонических уступов; 5 – оси неотектонических поднятий; 6 – оси неотектонических прогибов; 7 – днища узких каньонообразных прогибов; 8 – участок драгирования 31-го рейса НИС «Пегас» (кружок в углу – станция драгирования 3161).

и в таблице. В вертикальном разрезе водной толщи отмечается четко выраженная температурная слоистость. В интервале глубин 40-300 м на западном борту впадины существует слой отрицательных температур (до -1.7 °C), имеющих амплитуду годовых колебаний около 1 °C. На глубине от 300 до 600 м в западной части впадины температура возрастает до 0-1.5 °С. Ниже 800 м температура придонной воды варьирует от 2 до 2.3 °С на глубине 1600 м при годовых колебаниях температуры в пределах 0.02-0.03 °С. В центральной части впадины температура придонной воды равна 2.25 °С и сохраняется постоянной в восточном направлении при повышении донной поверхности до 800 м. Выше этой глубины температура на восточном борту впадины Дерюгина вновь понижается до 0.6 °С на минимальных глубинах Охотского поднятия (270-280 м) и возрастает до 0.8 °С в западной части впадины ТИНРО на глубине около 550 м. При внедрении термозонда в осадки до двухметровой глубины отмечалось незначительное повышение температуры (см. таблицу). В современный период на дне впадины Дерюгина не обнаружены гидротермальные аномалии. На большой части геотермических станций градиенты температур в верхней толще осадков на профиле изменяются в пределах (60-85)·10⁻³ °С/м.

Высокие значения ТП (85, 120, 125, 133, 210 мВт/м²) приурочены к зонам новейших разломов, ограничивающих впадину Дерю-

гина с юго-западной и северо-восточной стороны (рис. 1), а в некоторых случаях – к зонам новейших разломов субмеридионального и северо-западного направлений, отчетливо совпадающих с более древними разломами той же ориентировки, выявленными в фундаменте и осадочном чехле [Волгин и др., 2011]. Они характеризуются следующими значениями: 87 и 165 мВт/м² – Присахалинская флексура, 114 мВт/м² – западная приграничная часть впадины Дерюгина, 97 мВт/м² – район границы между Кашеваровским прогибом и поднятием Института Океанологии (рис. 1, 2). Высокие значения ТП могут также находиться в зонах пересечения разломов субширотного простирания с вышеописанными новейшими и более древними разломами: 79 и 210 мВт/м² – участок юго-восточного ограничения впадины Дерюгина, 101 и 112 мВт/м² – Центрально-Охотская флексура. Иногда они приурочены к древним разломам [Волгин и др., 2011] северо-западного направления, выявленным сейсмическими методами, но не выраженным в рельефе: 83 мВт/м² – Центрально-Охотская флексура.

Таким образом, повышенные и высокие значения ТП вполне определенно находятся в зонах разломов, новейших, омоложенных и более древних. Большинство из высоких ТП регистрируется на границах основных неотектонических структурных элементов. Они обусловлены кондуктивными теплопотоками, которые поднимаются по этим разломам



Рис. 6. Распределение придонных температур (°С) вдоль профиля A–Б (см. рис. 1, 2). На линии A–Б показаны положение станций и величины $T\Pi$ (мBт/м²); в рамке значения теплового потока, измеренные на северном склоне горы Клам Хилл (см. рис. 4).

Геосистемы переходных зон, 2018, т. 2, № 4, с. 312–322

с более глубинных горизонтов, где, вероятно, существуют в той или иной мере застывшие интрузивные тела. Это подтверждается также во многих случаях резким изменением величин ТП на близко расположенных станциях, что свидетельствует о геологической молодости дизьюнктивов и внедрений высокотемпературных флюидов.

Тепловой поток вдоль опорного профиля (рис. 7а) характеризуется значительным разбросом величин, при этом резко выделяются локальные аномалии высокого и пониженного ТП. Аномально высокие значения ТП, достигающие 112–114 мВт/м², свидетельствуют о близости к поверхности дна верхних кромок интрузий, внедрившихся в кору.

Согласно методике интерпретации аномалий теплового потока [Еремин и др., 1976; Любимова и др., 1976] проведено определение глубин и температур кромок и центров высокотемпературных объектов, создающих аномалии ТП в трех пунктах на опорном профиле (рис. 76).

В самом западном пункте с аномальным ТП (114 мВт/м²), расположенном восточнее Дерюгинского тектонического прогиба, центр внедрившегося тела находится на глубине 23 км с температурой 1020 °С, а его верхняя и нижняя кромки расположены на глубинах 13 и 33 км (температуры 900 и 1100 °С соответственно). В центральном пункте, соответствующем северной окраине площади Клам Хилл, с максимальным значением ТП 156 мВт/м², интрузия, вероятно в форме дайки, находится в интервале глубин 11–31 км (температуры 820–1080 °С соответ-

| Станция | Координаты | | Глубина | тп | Температура, °С | |
|------------|------------|------------|---------|-----------|-----------------|-----------------------------|
| | с.ш. | в.д. | моря, м | MBT/M^2 | придонная | в осадках на глубине 2 м |
| МГ 9-6 | 53°40.8' | 144°29.2' | 1050 | 63 | 2.11 | 2.27 |
| МГ 9-7 | 53°44.9' | 144°36.5' | 1314 | 87 | 2.30 | 2.53 |
| МГ 9-8 | 53°45.6' | 144°46.7' | 1440 | 56 | 2.32 | 2.46 |
| M-935 | 53°54' | 144°52' | 1500 | 60 | 2.32 | 2.48 |
| МГ 9-9 | 53°50.6' | 145°01.3' | 1560 | 114 | 2.32 | 2.59 |
| МГ 9-11 | 53°55.4' | 145°18.9' | 1620 | 99 | 2.32 | 2.59 |
| Seiko-50 | 54°05' | 145°52' | 1623 | 79 | 2.32 | 2.55 |
| МГ 17-25 | 53°57' | 146°09.45' | 1600 | 92 | 2.32 | 2.56 |
| OKHHF09B | 53°53.7' | 146°24.5' | 1630 | 81 | 2.32 | 2.52 |
| OKHHF10C | 54°01.3' | 146°25.5' | 1600 | 90 | 2.32 | 2.51 |
| OKHHF10A | 54°01.1' | 146°25.5' | 1600 | 109 | 2.32 | 2.54 |
| OKHHF10B | 54°01.2' | 146°25.6' | 1600 | 156 | 2.32 | 2.66 |
| OKHHF11A | 54°09.3' | 146°26.1' | 1690 | 74 | 2.32 | 2.51 |
| МГ 17-24 | 54°02.1' | 146°29.0' | 1585 | 62 | 2.32 | 2.48 |
| МГ 17-22 | 54°16.38' | 146°58.32' | 1330 | 112 | 2.32 | 2.64 |
| МГ 17-21 | 54°21.4' | 147°15.25' | 1140 | 83 | 2.32 | 2.54 |
| МГ 17-20 | 54°27.4' | 147°33.23' | 955 | 91 | 2.32 | 2.54 |
| МГ 18-01-2 | 54°37.1' | 148°02.9' | 788 | 81 | 2.25 | 2.43 |
| МГ 18-02 | 54°47.8' | 148°26.0' | 624 | 56 | 1.97 | 2.08 |
| Seiko-48 | 54°58' | 148°28' | 660 | 69 | 1.90 | 2.08 |
| МГ 18-03 | 54°57.0' | 148°49.0' | 575 | 73 | 1.73 | 1.89 |
| МГ 18-04-2 | 54°04.2' | 149°07.8' | 500 | 71 | 1.41 | 1.56 |
| МГ 18-05 | 55°15.7' | 149°35.0' | 375 | 80 | 1.03 | 1.20 |
| МГ 18-06 | 55°26.1' | 149°55.7' | 312 | 73 | 0.77 | 0.91 |
| МГ18-08 | 55°48.9' | 150°41.9' | 270 | 60 | 0.76 | 0.88 |

Геотермические данные по профилю А-Б

Примечание. Станции измерения теплового потока приведены в последовательности с запада на восток по профилю А-Б.

ственно), с центром на глубине 21 км, температура 950 °С. Для восточной аномалии с ТП 112 мВт/м² источник аномального тепла располагается в интервале глубин 20–54 км с температурами соответственно 860–1280 °С, с центром на 37 км, температура 1100 °С. Эти источники возникли, видимо, во временном интервале верхний эоплейстоцен – средний неоплейстоцен (910–290 тыс. л. н.).

Представленные выше оценки температур и глубин верхних кромок диапиров для пунктов аномального теплового потока на опорном профиле сопоставимы с оценками температур и глубин верхних кромок маломощных слоев частичного плавления пород основного состава, полученных в результате двумерного температурного моделирования для профиля ГСЗ 10-М, пересекающего с



Н, км

Рис. 7. Распределение вдоль профиля А–Б (см. рис. 1, 2) теплового потока (а) и температур (б) в верхней части тектоносферы. 1 – новейшие разломы, секущие поверхности консолидированного фундамента; 2 – граница Мохоровичича; 3 – диапиры, создающие аномалии теплового потока, и температура (°C) верхней и нижней их кровли; 4 – изотермы (°C) в коре и верхней мантии вдоль профиля по линии А–Б; 5 – положение Дерюгинского тектонического прогиба согласно работе [Волгин и др., 2011].

запада на восток впадину Дерюгина [Тектоносфера..., 1992]. Сопоставление ТП с мощностью кристаллической части земной коры региона, анализ температурных моделей с привлечением других геофизических данных позволяют сделать вывод, что уменьшение мощности земной коры впадины Дерюгина является по существу термической деструкцией консолидированной части коры. Она происходит за счет частичного плавления мантии и внедрения базит-гипербазитовых расплавов, смещения фаз регионального метаморфизма в высокотемпературную область с усилением мафичности низов коры, что сопровождается изменением морфологии дна района впадины Дерюгина.

Высокий уровень регионального фона ТП в пределах рассматриваемой территории

> (кроме прибрежной части Сахалина и шельфа) связывается co слоем частичного плавления в верхней мантии на глубине 70 км [Куцов, Ляпишев, 1997]. Тепловые потоки в восточной прибрежной части северного Сахалина и на шельфе (в среднем 46 мВт/м²) обусловлены, видимо, большей глубиной залегания кровли и меньшей мощностью мантийноэлектропроводящего ГО слоя [Структура..., 1996] по сравнению с впадиной Дерюгина и поднятием Института Океанологии.

На основе результатов анализа распределения ТП во впадинах Охотского моря, представленных в ранее опубликованных работах [Веселов, 2000; Тектоническое..., 2006], сделан вывод, что одна мода распределения равна 62, две другие – 72 и 88 мВт/м², со стандартными отклонениями ±1.5 мВт/ м². Геологические данные позволяют связать первое значение со структурными элементами, кристаллический фундамент которых испытал тектономагматическую активизацию (ТМА) в начале палеогена. Два последующих средних значения ТП соответствуют структурным элементам, фундамент которых подвергался ТМА в неогене и квартере (курильская, штирийская, алеутская, аттическая, сахалинская фазы активизации). Эти выводы в основном совпадают с результатами анализа гистограмм, построенных для более обширных районов альпид [Тектоносфера..., 1992]. Установлено, что в зонах молодой активизации на уровни теплового потока, отвечающие возрасту фундамента, наложены аномалии интенсивностью 24 ± 2 и 33 ± 3 мВт/м². В зонах новейшей активизации возникают локальные аномалии ТП высокой интенсивности, обусловленные явно малоглубинными источниками. Величины П отражают длительность и возраст этапов тектономагматической активности литосферы Охотоморского региона [Аргентов и др., 2004; Тектоническое..., 2006].

Заключение

Итак, тектонические преобразования коры структурных элементов Охотского моря в целом и впадины Дерюгина в частности можно разделить на пять главных этапов: позднемеловой (95-65 млн л. н.), эоценовый (50-37), позднеолигоценовый (26-24), поздне-среднемиоценовый (12-10), плиоценплейстоценовый (4.1-0.9 млн л. н.). Наиболее активно преобразование дна впадины с формированием осадочного бассейна происходило с курильской фазы (26-24 млн л. н.) в результате рифтогенеза. Сформировавшийся фундамент осадочного чехла впадины имеет складчато-блоковое строение, выраженное в морфологии дна, аномалиях геофизических полей, в частности теплового потока, в разнообразии тектонических структурных элементов.

Авторы выражают благодарность А.В. Дегтереву, О.А. Жердевой и М.В. Сеначину за техническую поддержку в подготовке статьи к публикации.

Список литературы

1. Аргентов В.В., Жигулев В.В., Веселов О.В., Патрикеев В.Н., Волгин П.Ф., Лютая Л.М., Ли И.А. Особенности геологического строения впадины Дерюгина по результатам комплексной интерпретации геофизических данных // Геодинамика, геология и нефтегазоносность осадочных бассейнов Дальнего Востока России: Докл. междунар. науч. симп., Южно-Сахалинск, 24–28 сент. 2002. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2004. Т. 1. С. 120–130.

2. Астахов А.С., Астахова Н.В., Саттарова В.В., Свининников А.И., Грецкая Е.В., Ващенкова Н.Г., Иванов М.В. Осадконакопление и рудогенез во впадине Дерюгина (Охотское море). Владивосток: Дальнаука, 2008. 289 с.

3. Астахова Н.В. Геохимические особенности осадков впадины Дерюгина (Охотское море) // *Тихо-океан. геология.* 2000. Т. 19, № 2. С. 87–93.

4. Ахманов Г.Г., Михайлик П.Е., Гревцев В.А., Наумкина Н.И., Семенова Г.М. К генезису травертиноподобных баритов впадины Дерюгина (Охотское море) // Отечествен. геология. 2015. № 1. С. 82–88.

5. Бурмистрова И.И., Беляева В.Н. О палеогидрологии в котловине Дерюгина в последнем ледниковье и голоцене // Геология морей и океанов: Тез. докл. XVI Междунар. науч. школы по морской геологии. М.: ГЕОС, 2005. Т. 1. С. 178.

6. Веселов О.В. Структура теплового потока Охотоморского региона // Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности в регионах северо-западной окраины Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2000. Т. 1. С. 107–129.

7. Веселов О.В., Куделькин В.В., Чухонцев В.И. Особенности распространения и образования газовых гидратов в Охотском море // Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности в регионах северозападной окраины Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2000. Т. 1. С. 7–37.

8. Веселов О.В., Липина Е.А. Каталог данных о тепловом потоке востока Азии, Австралии и запада Тихого океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. 121 с.

9. Веселов О.В., Соинов В.В. Термическая структура осадочного чехла дна Охотского моря // Проблемы освоения нефтегазовых месторождений Дальнего Востока. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. С. 127–160.

10. Волгин П.Ф., Лютая Л.М., Кочергин А.В. Плотностной разрез земной коры впадины Дерюгина (Охотское море) по результатам гравитационного моделирования // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 3. С. 12–22. [Volgin P.F., Lyutaya L.M., Kochergin A.V. Density section of the Earth's crust in the Deryugin Basin (Sea of Okhotsk): Gravity modeling results. *Russian J. of Pacific Geology*, 2009, 3(3): 210-219. https://doi. org/10.1134/s1819714009030026] 11. Волгин П.Ф., Семакин В.П., Кочергин А.В. Структурные элементы осадочного чехла района впадины Дерюгина (Охотское море) // *Тихоокеан. геология.* 2011. Т. 30, № 5. С. 14–21. [Volgin P.F., Semakin V.P., Kochergin A.V. Structural elements of the sedimentary cover in the Deryugin Basin of the Sea of Okhotsk. *Russian J. of Pacific Geology*, 2011, 5(5): 380-386. https://doi.org/10.1134/s1819714011050113]

12. Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока (2009–2012). Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2012. URL: http://maps.nrcgit.ru/geoterm

13. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 9. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб., 1998. 342 с.

14. Деркачев А.Н., Баранов Б.В., Карп Б.Я., Суховеев Е.Н., Григорьева Т.Н., Пальчик Н.А., Мороз Г.Н. Гидротермальные отложения как индикатор плиоценчетвертичного вулканизма в центральной части Охотского моря // Докл. АН. 2009. Т. 426, № 6. С. 782–785.

15. Деркачев А.Н., Николаева Н.А. Особенности аутигенного минералогенеза в осадках Охотского моря // Дальневосточные моря России. Кн. 3: Геологические и геофизические исследования. М.: Наука, 2007. С. 223–239.

16. Еремин Г.Д., Волкова Н.А., Веселов О.В. Интерпретация локальной аномалии теплового потока, расположенной вблизи восточного побережья о. Сахалин // *Геотермия (Геотермические исследования в СССР*). М.: ГИН АН СССР, 1976. Ч. 2. С. 183–187.

17. Журавлев А.В. Сравнительная характеристика впадин Дерюгина и ТИНРО Охотского моря // *Тихо-океан. геология.* 1984. № 1. С. 21–27.

18. Косыгин Ю.А. *Основы тектоники*. М.: Недра, 1974. 216 с.

19. Куцов А.М., Ляпишев А.М. Глубинная электропроводность тихоокеанских трансектов и природа зон высокой проводимости // Геофизические поля и моделирование тектоносферы. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997 (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 3). С. 52–77.

20. Любимова Е.А., Никитина В.Н., Томара Г.А. Тепловые поля внутренних и окраинных морей СССР. Состояние наблюдений и теория интерпретации двумерных неоднородностей. М.: Наука, 1976. 224 с.

21. Обжиров А.И., Астахова Н.В., Липкина М.И., Верещагина О.Ф., Мишукова Г.И., Сорочинская А.В., Югай И.Г. Газогеохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря. Владивосток: Дальнаука, 1999. 184 с.

22. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. *Геодинамические модели* глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. М.: Науч. мир, 2014. 172 с.

23. Саттарова В.В., Астахов А.С. Особенности распределения рудных элементов в осадках впадины Дерюгина (Охотское море) // Геология морей и океанов: Материалы XVII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии, Москва, 12–16 ноября 2007 г. М.: ГЕОС, 2007. Т. 2. С. 158–159.

24. Семакин В.П., Кочергин А.В. Неотектоника района впадины Дерюгина (Охотское море) // *Тихоокеан. геология.* 2010. Т. 29, № 6. С. 77–89. [Semakin V.P., Kochergin A.V. Neotectonics of the Deryugin Basin area (Sea of Okhotsk). *Russian J. of Pacific Geology*, 2010, 4(6): 520-528. https://doi. org/10.1134/s1819714010060072]

25. Семакин В.П., Кочергин А.В., Питина Т.И. Глубинное строение глубоководных впадин Охотского моря // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9, № 1. С. 109–122. [Semakin V.P., Kochergin A.V., Pitina T.I. Plutonic structure of the deep-sea basins in the Sea of Okhotsk region. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, 9(1): 109-122. (In Russ.)]. https://doi.org/10.5800/ GT-2018-9-1-0340

26. Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона / отв. ред. А.Г. Родников, И.К. Туезов, В.В. Харахинов. М.: Нац. геофиз. ком., 1996. 337 с.

27. Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря / отв. ред. К.Ф. Сергеев. М.: Наука, 2006. 130 с.

28. Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии / отв. ред. К.Ф. Сергеев, В.В. Гордиенко, М.Л. Красный. Владивосток: ДВО РАН, 1992. 238 с.

29. Харахинов В.В. *Нефтегазовая геология Саха*линского региона. М.: Науч. мир, 2010. 276 с.

30. KOMEX (Kurile Okhotsk Sea Marine Experiment). Cruise reports: KOMEX I and II. RV Professor Gagarinsky Cruise 22, RV Akademik Lavrentiev Cruise 28: 7 July – 12 Sept. 1998. GEOMAR Report. 1999. Vol. 82. 188 p.

Сведения об авторах

ВЕСЕЛОВ Олег Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, СЕМАКИН Виктор Петрович, старший научный сотрудник, КОЧЕРГИН Альберт Васильевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник – лаборатория геодинамики и морской геологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.