

УДК 551:553.98(571.121)

DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-6-851-862

О плотности теплового потока, структуре мантии и нефтегазоносности полуострова Ямал (Арктика)

К. С. Иванов, Н. П. Костров

Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mails: ivanovks55@ya.ru, kostrov65@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.06.2020 г., принята к печати 20.07.20 г.

Объект исследований. П-ов Ямал представляет интерес в связи с тем, что концентрация месторождений углеводородов на единицу площади здесь более чем в 100 раз превышает “среднемировую”, что подтверждают запасы уже открытых крупнейших нефтегазовых месторождений. В то же время изученность глубинных горизонтов земной коры и мантии в пределах Ямала и смежных площадей по сравнению с более южными районами явно недостаточна. *Методы.* В работе использовался метод сейсмической томографии, позволяющий выделять аномалии скоростей сейсмических волн напрямую связанных с плотностью теплового потока и геодинамической активностью недр. *Выводы.* По-видимому, Западно-Ямальская положительная тепловая аномалия маркирует область повышенной геодинамической активности, пронизываемую для глубинных флюидно-газовых потоков. Расположение Ямала на приподнятом восточном плече этой аномальной области и обусловило высокую нефтегазоносность этого полуострова. Интерес для поисков могут представлять и другие районы, прилегающие к этой тепловой аномалии.

Ключевые слова: месторождения нефти и газа, Ямал, плотность теплового потока, глубинное строение, триасовые рифты

Источник финансирования

Исследования проводятся в рамках госбюджетной темы ИГГ УрО РАН № АААА-А18-118052590032-6 “Палеогеодинамика и эволюция структурно-вещественных комплексов при формировании земной коры континентального типа”, при поддержке проекта РФФИ № 18-05-70016 “Геологическое строение и эволюция кристаллического фундамента и рифтового комплекса полуострова Ямал и сопредельных территорий Арктической части Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна”

Heat flux density, mantle structure and oil and gas potential of the Yamal Peninsula (Arctic)

Kirill S. Ivanov, Nikolai P. Kostrov

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg
620016, Russia, e-mails: ivanovks55@ya.ru, kostrov65@yandex.ru

Received 04.06.2020, accepted 20.07.2020

Research subject. The Yamal Peninsula is of interest due to the fact that the concentration of hydrocarbon deposits per unit area is more than 100 times higher than the “world average”, which is confirmed by the reserves of the largest oil and gas fields already discovered. At the same time, the knowledge of the deep horizons of the earth’s crust and mantle within the Yamal and adjacent areas is clearly insufficient in comparison with more southern regions. *Methods.* In this work, the method of seismic tomography was used, which makes it possible to identify anomalies in the velocities of seismic waves directly related to the heat flow density and geodynamic activity of the subsurface. *Conclusions.* Apparently, the Western Yamal positive thermal anomaly indicates a region of a high geodynamic activity permeable for deep fluid-gas streams. The location of Yamal on a slightly raised shoulder of this anomalous region has determined the high oil and gas potential of this peninsula. Other regions situated in the vicinity of the discovered thermal anomaly may present significant research interest.

Keywords: oil and gas deposits, Yamal, heat flux density, deep structure, Triassic rifts

Для цитирования: Иванов К.С., Костров Н.П. (2020) О плотности теплового потока, структуре мантии и нефтегазоносности полуострова Ямал (Арктика). *Литосфера*, 20(6), 851–862. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-6-851-862

For citation: Ivanov K.S., Kostrov N.P. (2020) Heat flux density, mantle structure and oil and gas potential of the Yamal Peninsula (Arctic). *Litosfera*, 20(6), 851–862. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-6-851-862

© К.С. Иванов, Н.П. Костров, 2020

Funding information

The research was carried out within the framework of the RFBR project No. 18-05-70016 "Geological structure and evolution of the crystal basement and rift complex of the Yamal Peninsula and adjacent territories". The manuscript was prepared in the framework of the state budget topic of the IGG UB RAS No. AAAA-A18-118052590032-6 "Paleogeodynamics and evolution of structural-material complexes during the formation of the continental-type crust (by the example of the Ural-Mongolian folded belt and the West Siberian platform)"

Acknowledgements

The authors are grateful to the reviewer for their valuable comments that helped us improve this paper.

ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Ямал, несмотря на свои сравнительно небольшие размеры (122 тыс. км², или 0.71% площади Российской Федерации), является главным газодобывающим регионом России (наряду с севером Западной Сибири). По данным ОАО "Газпром" (www.gazprom.ru/projects/yamal/), здесь к настоящему времени выявлено 32 месторождения углеводородного сырья, а суммарные запасы и ресурсы всех месторождений п-ова Ямал составляют 26.5 трлн м³ газа, 1.6 млрд т газового конденсата и 300 млн т нефти. Даже если не учитывать ресурсы, поскольку их величина может в конечном счете достаточно сильно варьировать, запасы уже открытых здесь крупнейших нефтегазовых месторождений (Бованенковское, Новопортовское, Малыгинское, Ростовцевское, Северо-Крузенштернское, Харасавэйское, Тамбейские и др.) (Скоробогатов и др., 2003; Кислухин, 2012; и др.) доказывают, что концентрация месторождений углеводородов (УВ) на единицу площади на Ямале более чем в 100 раз превышает "среднемировую". Очевидно, что столь значительное превышение не может быть случайным и, вероятнее всего, причины относятся к области геодинамики. Структура осадочного чехла района Ямала и Карского моря в связи с месторождениями УВ привлекает внимание многих исследователей (Конторович и др., 2017; Жолондз, 2018; и др.), но детальное описание свит, антиклинальных ловушек, по всей видимости, не дает полного понимания причин появления богатых залежей УВ.

Крайняя неравномерность распределения запасов месторождений УВ по поверхности Земли хорошо известна и является одним из главных доводов в пользу представлений о глубинном происхождении нефти. Так, по разным оценкам, около 50% мировых запасов нефти расположено в районе Персидского залива, огромные скопления тяжелых нефтей сосредоточены в Канаде и Венесуэле. Так что Ямал в этом смысле не является единственным исключением. Месторождения нефти, как правило, располагаются в районах с высокой современной геодинамической активностью. А ее наиболее надежной численной мерой является плотность

теплового потока (также сейсмичность, но она характеристика не постоянная, а "событийная"). Однако Ямал расположен на северной оконечности Западно-Сибирской платформы, достаточно далеко от срединно-океанических хребтов Арктики и современных зон тектонической активности, отмеченных цепочкой действующих вулканов. Обзор геологического строения фундамента Ямала и смежных районов Урала приведен в работах (Бочкарев и др., 2010; Пучков, Иванов, 2020; и др.). Исследований теплового потока Ямала и смежных частей Урала крайне мало (Исаев и др., 2017, 2019; Иванов и др., 2019; и др.), в то время как в более южных частях региона они проводились достаточно интенсивно (Kukkonen et al., 1997; Demezhko, Shchapov, 2001; Pollack et al., 2003; Щапов, 2006; Голованова и др., 2008; и др.). Важно отметить и тот факт, что притоки УВ на ямальских месторождениях есть и из пород доюрского фундамента (Скоробогатов и др., 2003; Кислухин, 2012; Писецкий, Иванов, 2019; и др.).

**О СТРУКТУРЕ МАНТИИ РАЙОНА
П-ОВА ЯМАЛ**

Пониманию причины чрезвычайно высокой нефтегазоносности Ямала может способствовать информация о структуре и температурном режиме верхней мантии, полученная в том числе и с помощью сейсмической томографии. Качественно аномалии сейсмических скоростей относительно глобального среднего значения скорости на данной глубине дают представление о температуре литосферы. Отрицательная аномалия соответствует нагретому, а положительная – охлажденному блоку.

Томография формы волны (waveform tomography) по данным широкополосных сейсмических станций дала модель структуры верхней мантии Антарктики в беспрецедентной детальности (Lebedev et al., 2018). В Арктическом регионе такие станции расположены на территории США и Канады по регулярной сети до широты 70°, также по береговым линиям Гудзонова залива, Гренландии, в большом количестве на Аляске, в северной Европе, но практически отсутствуют на севере тер-

ритории РФ: одна станция расположена в районе устья Енисея, а другая в примерно в 1500 км к востоку, в устье Лены (Schaeffer et al., 2016; Lebedev et al., 2018). Для района Ямала и Гыдана и для сравнения Таймыра аномалии вертикально поляризованной скорости S-волны в процентах от средней для каждой глубины обобщены по данным (Lebedev et al., 2018) и приведены в табл. 1.

Как видно, до глубин порядка 100 км районы Ямала–Гыдана и Таймыра существенно различаются по величине аномальных скоростей сейсмических волн. Также следует отметить, что на глубине 150 км отчетливо выделяется среди высокоскоростных аномалий (порядка 6–8%) относительно низкоскоростное “пятно” (1–3%) в районе Ямала и Гыдана (с эпицентром примерно в районе Ямбурга и радиусом около 300 км). Лишь за его пределами (север Ямала, север и юг Гыдана) скорости возрастают до +6% и более. На глубине 260 км аномалия скорости около 2% идет под Таймыром вдоль береговой линии в полосе ≈250 км. На глубине 36 км томографическая модель (Lebedev et al., 2018) указывает на наличие под Ямалом и Гыданом низкоскоростной аномалии, тогда как под Таймыром аномалии скоростей отсутствуют. На глубине 56 км аномалия скорости меняет знак под Ямалом, т.е. мантия становится более холодной и сейсмические скорости увеличиваются. Под Таймыром аномалия на глубине 56 км отсутствует. На глубинах 80 и 110 км аномалия скоростей под Ямалом по большей части составляет 3%, уменьшаясь до 1% к юго-востоку. На северо-западе Ямала и западном шельфе Карского моря аномалия составляет около 6%. На этих глубинах также проявляется упомянутая выше почти изометричная аномалия относительно пониженных скоростей (около +1% на фоне 3–4%) радиусом около 300 км. Только на глубине 150 км контраст выше (+1% на фоне 6%). На глубинах от 150 км и ниже аномалии скоростей становятся характерными для платформ. Данная картина согласуется с различными моделями Арктического региона (Lebedev et al., 2018).

Таблица 1. Аномалии скоростей на разных глубинах, по (Lebedev et al., 2018)

Table 1. Velocity anomalies at different depths, after (Lebedev et al., 2018)

Глубина, км (v_{cp} , км/с)	Аномалии скоростей, % от v_{cp}	
	Ямал и Гыдан	Таймыр
36(4.46)	–4...–2	0
56(4.42)	1–3	0
80(4.38)	3–6	1–4
110(4.38)	3–6	3–6
150(4.39)	1–6	6–8
200(4.45)	0–1	2–3
260(4.62)	0	0–2
330(4.75)	0.5–1.0	0

В тепловой 3D модели Баренцева и Карского моря (Klitzke et al., 2016) приведены карты положения изотерм 100 и 450°C. Следует отметить, что в районе п-ов Ямал и Гыдан и в районе шельфа Южно-Карского моря изотерма 100°C проходит на глубинах 2.5–3.0 км, а под п-овом Таймыр эта изотерма опускается до 5.0–5.5 км с подъемом до 4–5 км на юге. Изотерма 450°C находится на глубине 21–24 км и лишь в локальных областях опускается до глубины 24–27 км (Klitzke et al., 2016). Согласно глобальной тепловой модели континентальной литосферы TC1, изотерма 550°C для района Ямала–Гыдана проходит на глубине около 25 км, а под Таймыром – на глубине от 30 до 40 км (Artemieva, 2006).

Устойчивое решение при пересчете сейсмических скоростей в температуру получено для средней температуры диапазона глубин 80–150 км (Lebedev et al., 2018). Под Ямалом и Гыданом наблюдается температурная аномалия 900–1000°C – под северной частью Ямала примерно до северной широты 70.5° и под западным шельфом Карского моря. Изотермы 1000–1100°C расположены южнее 70° с.ш. Обращает на себя внимание локальная, почти изометричная аномалия 1100–1200°C диаметром около 300 км, расположенная в районе Тазовской губы, с эпицентром в районе 67.5° с.ш. и 75° в.д. Наличие этой аномалии средней температуры на глубинах 80–150 км отличает мантию под Ямалом от мантии под Таймыром. На глубине 100 км аномалии скорости объемных Р-волн отсутствуют под Ямалом, но под Таймыром составляют 0.3–0.6% (Яковлев и др., 2012). Оценки температур, по данным различных авторов, важны, в том числе и для рассуждений о том, возможен ли синтез нефти в осадочных бассейнах региона или нет.

Граница Мохо в районе Ямала, согласно (Klitzke et al., 2015), ступенчато понижается с запада на восток с наименьшей глубиной под океаном (менее 15 км), средней глубиной под шельфовой зоной (до 35 км) и наибольшей глубиной под континентом (до 50 км). Под северной оконечностью Ямала и под о-вом Белый, а также в южной части Карского моря (западном шельфе Ямала) граница Мохо проходит на глубинах от 30 до 35 км (Klitzke et al., 2015); под остальной территорией Ямала граница Мохо проходит на глубине 35–40 км, за исключением района, прилегающего к Байдарацкой губе, где граница Мохо опускается до 40–45 км, что согласуется с результатами Н.И. Павленковой (2011) и О.Л. Кускова с коллегами (2014). Подъем границы Мохо до 35–30 км (на фоне окружающей глубины Мохо 35–40 км) отмечается примерно в той же области, что и “пятно” повышенных аномальных скоростей S-волн (Lebedev et al., 2018) (рис. 1, 2) и повышенной средней температуры на глубинах 80–150 км. Обращает на себя внимание понижение

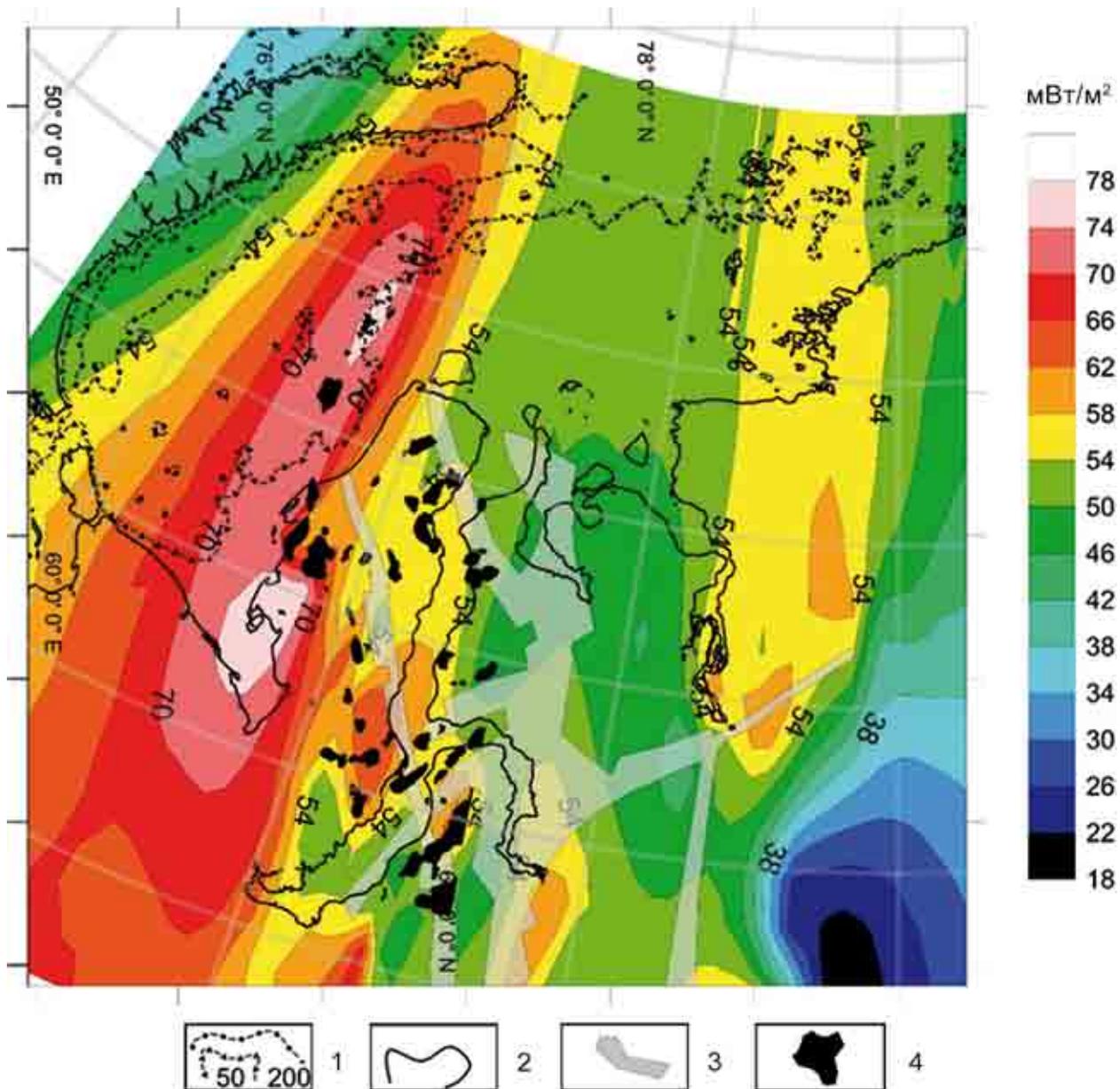


Рис. 1. Плотность теплового потока в районе Ямала.

1 – изобаты 50 и 200 м; 2 – контуры суши, построенные по данным CRUST 1.0; 3 – рифтовая система Западной Сибири, по Л.В. Смирнову с небольшими уточнениями (Иванов и др., 2018); 4 – углеводородные месторождения Ямала, по (Кислухин, 2012). Изолинии плотности теплового потока, мВт/м², построены по данным International Heat Flow Commission.

Fig. 1. Heat flux density in the Yamal region.

1 – isobaths of 50 and 200 m; 2 – land contours constructed according to CRUST 1.0; 3 – rift system of Western Siberia according to L.V. Smirnov with clarifications (Ivanov et al., 2018); 4 – hydrocarbon deposits of Yamal according to (Kislukhin, 2012). Heat flux density contours, mW/m², constructed according to the International Heat Flow Commission.

границы Мохо до 45–50 км в узкой полосе под Полярным Уралом, Пай-Хоем, Новой Землей и Таймыром, которая охватывает район Ямала, Гыдана и Южного Карского моря с запада севера и востока (Klitzke et al., 2015). Согласно интерпретации наблюдений (Павленкова, 2011; Кусков и др., 2014),

структура мантии до глубины 50 км под Таймыром и Пур-Гыданской впадиной существенно различается – под Таймыром мантия более однородная, здесь выявлены всего два слоя с разными сейсмическими скоростями. Под Пур-Гыданской впадиной этих слоев насчитывается 4–5.

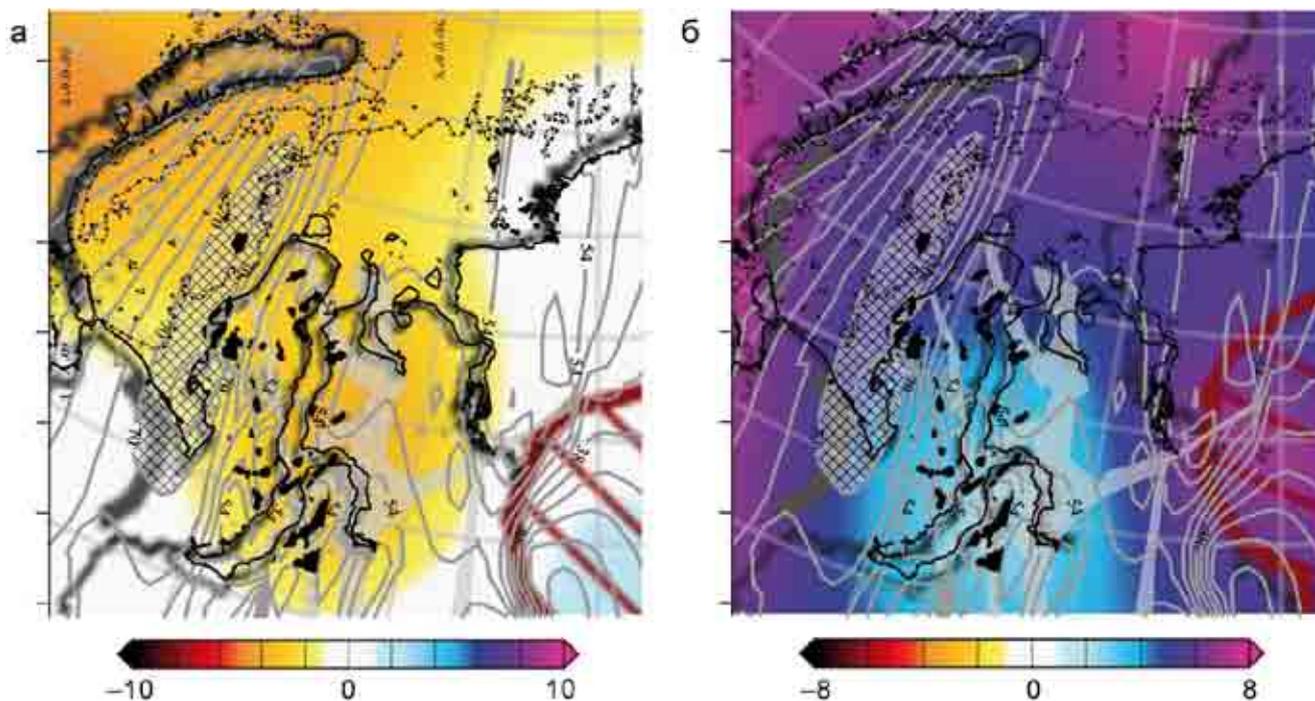


Рис. 2. Наложение слоев модели на глубине 36 (а), 150 (б) км (Lebedev et al., 2018) на карту плотности теплового потока (см. рис. 1).

Fig. 2. Overlaying model layers at a depth of 36 (a) and 150 (б) km (Lebedev et al., 2018) on the heat flux density map (see Fig. 1).

О ПЛОТНОСТИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ЯМАЛА

Тепловой поток в районе Ямала и Гыдана характеризуется повышенной плотностью и градиентами по сравнению с районом Таймыра. На рис. 1 вынесены изобаты 0, 50 и 200 м, очерчивающие береговую линию и шельфовую зону, а также месторождения УВ (Кислухин, 2012; и др.) и система рифтов Западной Сибири (Иванов и др., 2018). Южная часть Карского моря, п-ов Ямал и западная часть п-ова Гыдан лежат в области большой аномалии плотности теплового потока с эпицентром вблизи месторождения Русановское, которое расположено к северо-западу от Ямала, в районе шельфа. Плотность теплового потока изменяется от максимального 74 до 60 мВт/м² в районе западного побережья Ямала. Продвигаясь к югу по Ямалу, можно видеть ряд локальных аномалий плотности теплового потока. Обращает на себя внимание резкое изменение плотности теплового потока в этом районе по сравнению с Таймыром, который отличаются малые градиенты и более низкие значения в эпицентрах локальных аномалий. Низкая плотность теплового потока с (20 мВт/м² в эпицентре) в юго-восточной части карты (см. рис. 1) наблюдается за пределами Западно-Сибирской плиты. На рис. 1 также видно, что практически все месторождения УВ Ямала расположены на флангах Западно-

Сибирской рифтовой системы и одновременно в градиентных зонах теплового потока.

Любопытно соотнести карту плотности теплового потока с картой скоростных аномалий S-волн в мантии (Lebedev et al., 2018) (см. рис. 2): “пятно” пониженных скоростей, т. е. разогретая часть мантии, проецируется на рифтовую систему Западной Сибири, а на глубине 36 км (см. рис. 2а) – и на Карское море. На глубине 56 км область слабоположительной аномалии скоростей смоделирована под Ямалом, тогда как под Гыданом аномалия отсутствует. На глубине 80 и 110 км “пятно” выделяется низким положительным значением около 1% на фоне более высоких (3–4% и выше) скоростей в окрестностях. Аналогично на глубине 150 км – 1–3% на фоне 6% и более (см. рис. 2б). Аномалия плотности теплового потока более 70 мВт/м² проецируется на область пониженных скоростей (разогретый блок) на глубине 36 км, который, скорее всего, и обуславливает его величину, поскольку ниже, как показывает модель (Lebedev et al., 2018), эта аномалия плотности теплового потока проецируется на более “холодные” слои, где аномалия скоростей положительная. Сложный мозаичный рисунок повышенной, по сравнению с Таймыром, плотности теплового потока в районе Ямала–Гыдана, вероятно, обусловлен как разогретыми мантийными слоями, так и структурой рифтовой системы. Бо-

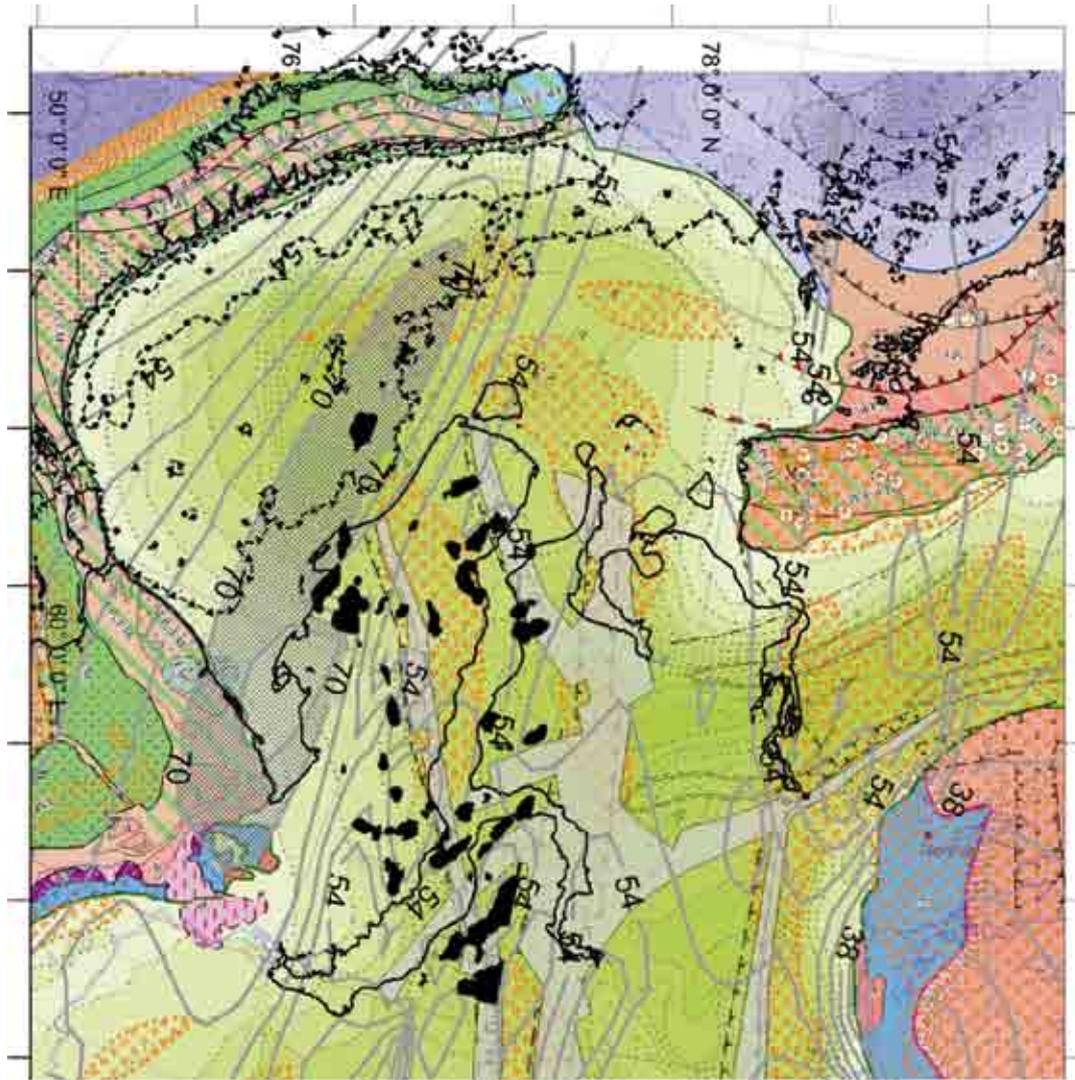


Рис. 3. Карта плотности теплового потока (см. рис. 1), наложенная на фрагмент тектонической карты из (Petrov et al., 2015).

Легенду тектонической карты см. на (<http://www.vsegei.ru/en/intcooperation/temar-5000/>).

Fig. 3. A heat flux density map (see Fig. 1) superimposed on a fragment of the tectonic map from (Petrov et al., 2015).

A legend of the tectonic map is presented at (<http://www.vsegei.ru/en/intcooperation/temar-5000/>).

более детальную информацию о структуре мантии в районе Ямала, Гыдана и Карского моря можно было бы получить, если бы вместо одной сейсмической станции на 1500 км мы имели станции, расположенные по регулярной сети хотя бы в пределах Ямала и Гыдана.

Если соотнести современную тектоническую карту ВСЕГЕИ (Petrov et al., 2015) Арктического региона с картой плотности теплового потока на рис. 1, то можно увидеть (рис. 3), что гигантские магматические провинции пермо-триасового возраста в районе Ямала, Гыдана и шельфа Карского моря на континенте прослеживаются системой рифтов. Эпиконтинентальный осадочный бассейн

в районе представлен осадочными толщами мезозойского возраста, мощность которых варьируется от 0 на юго-западе Ямала до 8–11 км вблизи северо-западного побережья в районе интенсивной тепловой аномалии (70 мВт/м²). Здесь мощность осадочного чехла увеличивается до 11 км по направлению к эпицентру, расположенному немного южнее месторождения Ленинградское. Также на рис. 3 видно, что рифт, пересекающий Ямал с юго-востока на северо-запад, ограничивает относительно мало-мощный слой осадков (от 0 до 4 км) на юго-западе от более мощных (от 6 до 11 км) толщ, залегающих над гигантской магматической провинцией и в районе северо-западного побережья Ямала.

ОБСУЖДЕНИЕ

Зоны пониженных скоростей сейсмических волн (“горячие зоны литосферы”) под Ямалом, вероятнее всего, могут иметь либо радиогенное происхождение и/или быть следом прохождения горячего пятна в мантии, которое сейчас находится под Исландией (Lawver, Müller, 1994; Torsvik et al., 2015; Lebedev et al., 2018). Существенное расхождение следов плюма под Исландией (Lawver, Müller, 1994; Torsvik et al., 2015) начиная с отметки 30 млн лет назад заключается в том, что плюм, вероятно, не пересекал Гренландию, как пишут L. Lawver и R. Müller (1994), а 60 млн лет назад находился у ее восточного берега, вблизи Исландии (Torsvik et al., 2015). Приведенные данные о возрасте и составе вулканитов различных морфоструктур Западно-Арктического шельфа не противоречат геодинамическим реконструкциям следа Исландского плюма (Тимонин, Юдин, 2004). Однако С. Лебедев с соавторами (Lebedev et al., 2018) пишут, что след горячей точки под Исландией пересекает Гренландию, хотя его траектория сомнительна. М.Д. Хуторской с коллегами (2013) считают, что существует генетическая и пространственная связь аномалий теплового поля и локализации месторождений, что, впрочем, также видно на рис. 2. Л.В. Подгорных с соавторами (2001), моделируя район Ямала и прилегающее Карское море, приводят значения теплового потока на о-ве Белый, практически совпадающие с приведенным нами у западного побережья п-ова Ямал. На нашей карте значения теплового потока несколько выше и меняются от 74 мВт/м² на юге до 58 мВт/м² на севере (на карте Л.В. Подгорных с соавторами (2001) у западного побережья п-ова Ямал – 54–58 мВт/м² и на о-ве Белый – 54–59 мВт/м²). Ресурсы УВ, приуроченные к мезозойским отложениям, представлены в подавляющей части газом. М.Д. Хуторской с коллегами (2003) приводят методы косвенной оценки перспектив нефтегазоносности на базе уже имеющихся геолого-геофизических данных, таких как метод термомографического отображения земной коры на основе термографического моделирования, что позволяет определить уровень, на котором существуют условия для катагенетического преобразования углеводородов. Строение Южно-Карской впадины (Хуторской и др., 2003) изучено сейсмическими работами МОВ и МПВ, а также гравимагнитными методами. Результаты этих работ показывают, что впадина представляет собой рифтогенный бассейн мезозойского возраста с заметно утоненной континентальной корой (26–30 км). В Южно-Карском мегабассейне все ресурсы УВ приурочены к мезозойским отложениям и представлены в подавляющей части газом. По своей структуре Западно-Арктический регион является типичной мозаичной областью, что не позволяет остановиться на мето-

дике его двухмерного геотермического моделирования (Хуторской и др., 2003). Метод наименьших квадратов, примененный для оценки погрешности глубины нахождения изотерм в створе пересечения профилей, показал, что она составляет ±150 м, что при средней глубине расчета температур 30 км составляет относительную погрешность 0.5% (Хуторской и др., 2003). В.И. Исаев с соавторами (2017) продемонстрировали оценку позднеэоценовой эрозии Арктического региона Западной Сибири, выполненную на основе моделирования геотермического режима баженовских “нефтематеринских” отложений, на примере Арктического, Средне-Ямальского и Ростовцевского месторождений п-ова Ямал. Применен метод палеотемпературного моделирования, основанный на численном решении уравнения теплопроводности горизонтально-слоистого твердого тела с подвижной верхней границей. В математическую модель непосредственно включены климатический вековой ход температур на земной поверхности как краевое условие и палеотемпературы из определений отражательной способности витринита как “наблюденные”. Оптимальная “невязка” составляет порядка ±2°C. Выполнялось решение прямых задач геотермии на 42 ключевых моментах геологического времени. В результате моделирования скважин Арктическая-11, Средне-Ямальская-14, Ростовцевская-64 по данному критерию из трех сценариев палеореконовструкций выбран 1-й – учет перерывов осадконакопления и позднеэоценовых размывов, который, по данным этих авторов, подтверждается хорошей согласованностью расчетных значений плотности теплового потока (49–52–56 мВт/м²) с экспериментальными определениями плотности теплового потока для п-ова Ямал (50–55, 49–56 мВт/м²). В.И. Исаев с коллегами (2019) установили, что 80–85% известных месторождений УВ Ямала приурочены к аномальным особенностям глубинного теплового потока.

Отметим, что главные различия наших построений с моделями названных авторов (Исаев и др., 2019; и др.) заключаются в том, что они придерживаются “осадочно-миграционной” гипотезы происхождения нефти (исходя из чего и строились эти модели), в то время как мы рассматриваем УВ как преимущественно глубинные образования (детальнее см.: (Кудрявцев, 1973; А.А. Маракушев, С.А. Маракушев, 2006; Иванов и др., 2008, 2010, 2018; Кучеров и др., 2020; и др.)).

Слои с пониженными скоростями могут быть обусловлены встречным восходящим магматизмом при формировании рифта (Астафьев и др., 2008, 2013; Астафьев, 2018). Снижению скоростей сейсмических волн может также способствовать наличие воды и расплавов, как в зонах субдукции. Однако такие зоны отсутствуют под Ямалом и окрестностями Южно-Карского моря.

В более южных районах Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна, северо-западной частью которого является п-ов Ямал, было установлено, что главные, наиболее крупные нефтяные месторождения этого региона приурочены к плечам триасовых рифтов (Нежданов и др., 2000; Иванов и др., 2008, 2018; и др.). Считалось, что расположены эти месторождения преимущественно там, где в фундаменте развиты докембрийские комплексы. Было показано, что это вызвано преимущественно двумя главными группами причин. Во-первых, рифты являются проницаемыми зонами, дренирующими верхнюю мантию (причем это справедливо в рамках обеих парадигм о генезисе нефти – и органической, и неорганической). Во-вторых, деформации и структуры чехла определяют фундамент. Толщина фундамента в среднем в 14 раз больше толщины чехла. С учетом средней прочности пород фундамента (153 ± 10 МПа) его прочность на два порядка превышает прочность чехла (Иванов и др., 2018). Наши исследования показывают, что легкие сиалические блоки, считавшиеся ранее докембрийскими, сложены преимущественно средне- и позднепалеозойскими гранитоидами и метаморфическими сланцами с средней плотностью ≈ 2.60 г/см³. Они вышли на уровень верхней коры во время триасового рифтогенеза и позднее продолжали изостатически “всплывать”, это сформировало над ними антиформы в осадочном орточехле, которые заполнились нефтью (Иванов и др., 2018).

Считается, что фундамент Ямала во многом аналогичен Западно-Сибирскому и также представлен докембрийскими метаморфическими сланцами, перекрытыми палеозойскими (начиная с раннего ордовика) глинисто-карбонатными и вулканогенными толщами (Скоробогатов и др., 2003; Бочкарев и др., 2010; и др.), причем данные по абсолютному возрасту этих образований стали появляться только недавно (Бочкарев и др., 2010; Иванов и др., 2016а, б, 2017, 2020; и др.). Так, ⁴⁰Ar/³⁹Ar датирование метаморфических сланцев Тазовского полуострова, отобранных из фундамента по разрезу глубокой скважины Лензитская-77, показало возраст метаморфизма 271.2 ± 3.5 млн лет и возраст выведения этих сланцев на приповерхностный уровень 251.6 ± 3.5 млн лет. Последняя датировка совпадает по времени с периодом наиболее интенсивного формирования рифтов, заполняемых базальтами, в фундаменте Западно-Сибирской платформы.

В основании Южно-Карского бассейна проявлена рифтовая система, которая формировалась, вероятно, в конце перми–раннем триасе. Предполагается, что время формирования этой рифтовой зоны было синхронно со сходными событиями в Западно-Сибирском мегабассейне. Примерно в середине триаса рифты Южно-Карского бассейна, расположенные ближе в Пайхойско-

Новоземельской складчато-надвиговой области, испытали конседиментационные инверсионные движения с формированием антиклинальных складок. Середина триасового периода – это вероятное время проявления фазы сжатия и складчатости и на Новой Земле. Пострифтовое региональное погружение Южно-Карского бассейна предположительно началось с середины триаса. Толщина синрифтового комплекса достигает 3–5 км. Геометрия отдельных рифтовых впадин и всей зоны указывает на то, что они имеют в основном трансензионную природу и некоторые из них, вероятно, являются бассейнами типа pull-apart (Никишин и др., 2011).

Судя по сильно вытянутой форме Западно-Ямальской тепловой аномалии, она, вероятнее всего, также обусловлена рифтовой структурой, но, исходя из гораздо большей плотности теплового потока, более молодой, чем Западно-Сибирская и Южно-Карская рифтовые системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как можно видеть, структура мантии в районе Ямала, по данным сейсмической томографии, имеет значимые аномальные черты. До глубины порядка 100 км районы Ямала–Гыдана и Таймыра существенно различаются по величине аномальных скоростей сейсмических волн.

Согласно томографической модели С. Лебедева с соавторами (Lebedev et al., 2018), на глубине 36 км под Ямалом и Гыданом присутствует низкоскоростная аномалия, тогда как под Таймыром аномалии скоростей нет. На глубине 150 км среди высокоскоростных аномалий выделяется относительно низкоскоростное “пятно” (с эпицентром в районе Ямбурга и радиусом около 300 км). По интерпретации наблюдений (Кусков и др., 2014), структура мантии до глубины 50 км под Таймыром и Пур-Гыданской впадиной существенно различается: под Таймыром мантия более однородная, выявлены всего 2 слоя, различающихся по сейсмическим скоростям, под Пур-Гыданской впадиной – 4–5 таких слоев.

На рис. 1 видно, что практически все месторождения углеводородов Ямала расположены на флангах рифтов Западно-Сибирской рифтовой системы и одновременно в градиентных зонах плотности теплового потока. По-видимому, выделенная на рис. 1 “Западно-Ямальская положительная тепловая аномалия” маркирует область повышенной геодинамической активности, проницаемую для глубинных флюидно-газовых потоков. Расположение Ямала на приподнятом восточном плече этой аномальной области главным образом и обусловило высокую нефтегазоносность этого полуострова. В плане находок новых месторождений могут представлять интерес и другие районы этой аномалии и прилегающие к ней участки. Перспективным

представляется район северо-восточного замыкания аномалии, к западу и северу от о-ва Белый. Новые месторождения, в том числе уже обнаруженные сейсмопрофилированием (Конторович и др., 2017; и др.), должны быть найдены в антиклинальных ловушках мезозойского чехла.

Благодарности

Авторы выражают признательность рецензенту за замечания, способствовавшие улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафьев Д.А. (2018) Осадочные и нефтегазоносные бассейны Земли в системе глобальных коромантийных структур и геодинамических процессов. *Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии*. Мат-лы I Тектонич. совещ. М: МГУ, ГИН РАН, 27-31.
- Астафьев Д.А., Каплунов В.Г., Шейн В.А., Черников А.Г. (2013) Обоснование первоочередных площадей для проведения поисково-разведочных работ зон нефтегазонакопления на шельфе морей восточной Арктики. *Вести газовой науки*, 3(14), 70-78.
- Астафьев Д.А., Скоробогатов В.А., Радчикова А.М. (2008) Грабен-рифтовая система и размещение зон нефтегазонакопления на севере Западной Сибири. *Геология нефти и газа*, 4, 2-8.
- Бочкарев В.С., Брехунцов А.М., Лукомская К.Г. (2010) Складчатый фундамент полуострова Ямал. *Горные ведомости*, 8(75), 6-35.
- Голованова И.В., Пучков В.Н., Сальманова Р.Ю., Дежежко Д.Ю. (2008) Новый вариант карты теплового потока Урала, построенный с учетом влияния палеоклимата. *Докл. АН*, 422(3), 394-397.
- Жолондз А.С. (2018) Строеение Южно-Карской впадины и транзитной зоны приамальского шельфа Карского моря. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: ВНИИ-Океангеология, 145 с.
- Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Елизаров Д.В., Шокальский С.П. (2016а) О возрасте и составе гнейсов из фундамента северо-западной части Западно-Сибирской плиты. *Литосфера*, (1), 59-73.
- Иванов К.С., Коротеев В.А., Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Травин А.В. (2020) Первые данные о возрасте метаморфических сланцев Тазовского полуострова (Арктика, Западная Сибирь). *Докл. РАН. Науки о Земле*, 491(1), 33-37. DOI 10.31857/S268673972003007X
- Иванов К.С., Костров Н.П., Коротеев В.А. (2019) О взаимосвязи геодинамики, теплового потока, глубинного строения и нефтегазоносности Ямала. *Докл. АН*, 486(2), 208-211. <https://journals.eco-vector.com/0869-5652/article/view/13430>
- Иванов К.С., Кучеров В.Г., Федоров Ю.Н. (2008) К вопросу о глубинном происхождении нефти. *Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири*. Мат-лы Междунар. академ. конф. Тюмень: ЗапСибНИИГГ, 160-173.
- Иванов К.С., Лац С.А., Коротеев В.А., Костров Н.П., Погромская О.Э. (2018) Главные причины закономерности размещения месторождений нефти Западно-Сибирской платформы. *Докл. АН*, 481(3), 285-288.
- Иванов К.С., Панов В.Ф., Лиханов И.И., Козлов П.С., Пономарев В.С., Хиллер В.В. (2016б) Докембрий Урала. *Горн. ведомости*, 148(9), 4-21.
- Иванов К.С., Панов В.Ф., Лиханов И.И., Козлов П.С., Хиллер В.В., Пономарев В.С., Ерохин Ю.В., Фаррахова Н.Н. (2017) Докембрийские комплексы Западной Сибири и ее восточного обрамления. Обзор и следствия для нефтегазовой геологии. *Горн. ведомости*, 154(6), 18-33.
- Иванов К.С., Федоров Ю.Н., Петров Л.А., Шишмаков А.Б. (2010) О природе биомаркеров нефти. *Докл. АН*, 432(2), 227-231.
- Исаев В.И., Лобова Г.А., Фомин А.Н., Булатов В.И., Кузьменков С.Г., Галиева М.Ф., Крутенко Д.С. (2019) Тепловой поток и нефтегазоносность (полуостров Ямал, Томская область). *Георесурсы*, 21(3), 125-135. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.125-135>
- Исаев В.И., Старостенко В.И., Лобова Г.А., Фомин А.Н., Исагалиева А.К. (2017) Тектоно-седиментационная интерпретация данных геотермии при выявлении и оценке позднэоценовой эрозии на арктических месторождениях углеводородов п-ова Ямал. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 328(7), 19-31.
- Кислухин И.В. (2012) Особенности геологического строения и нефтегазоносность юрско-неокомских отложений полуострова Ямал. (Ред. И.И. Нестеров). Тюмень: ТюмГНГУ, 116 с.
- Конторович В.А., Аюнова Д.В., Губин И.А., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Конторович А.Э., Малышев Н.А., Скворцов М.Б., Соловьев М.В., Сурикова Е.С. (2017) История тектонического развития арктических территорий и акваторий Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. *Геология и геофизика*, 58(3-4), 423-444.
- Кудрявцев Н.А. (1973) Генезис нефти и газа (Тр. Всесоюз. нефт. науч.-исслед. геол.-развед. ин-та. Вып. 319). Л.: Недра, 216 с.
- Кусков О.Л., Кронрод В.А., Прокофьев А.А., Павленкова Н.И. (2014) Структура литосферной мантии Сибирского кратона по сверхдлинным сейсмическим профилям Метеорит и Рифт. *Геология и геофизика*, 55(7), 1124-1143.
- Кучеров В.Г., Дмитриевский А.Н., Иванов К.С., Серовайский А.Ю. (2020) Глубинный цикл углеводородов – от субдукции к мантийному апвеллингу. *Докл. РАН. Науки о Земле*, 492(1), 61-65. DOI: 10.31857/S268673972005009
- Маракушев А.А., Маракушев С.А. (2006) P-T фации простых, углеводородных и органических веществ системы C–H–O. *Докл. АН*, 406(4), 521-527.
- Нежданов А.А., Пономарев В.А., Туренков Н.А., Горбунов С.А. (2000) Геология и нефтегазоносность ачимовской толщи Западной Сибири. М.: Изд. Академии горных наук, 247 с.
- Никишин В.А., Малышев Н.А., Никишин А.М., Обметко В.В. (2011) Позднепермско-триасовая система рифтов Южно-Карского осадочного бассейна. *Вестн. МГУ. Сер. 4: Геология*, (6), 3-9.
- Павленкова Н.И. (2011) Реологические свойства верхней мантии Северной Евразии и природа региональных границ по данным сверхдлинных сейсмических профилей. *Геология и геофизика*, 52(9), 1287-1301.
- Писецкий В.Б., Иванов К.С. (2019) К построению

- флюидо-динамической модели Новопортовского нефтегазоконденсатного месторождения Ямала (по результатам ДФМ-интерпретации сейсмических данных). *Литосфера*, **19**(5), 752-766. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-5-752-766
- Подгорных Л.В., Хуторской М.Д., Грамберг И.С., Леонов Ю.Г. (2001) Трехмерная геотермическая модель Карского шельфа и прогноз нефтегазоносности. *Докл. АН*, **380**(2), 228-232.
- Пучков В.Н., Иванов К.С. (2020) Тектоника Севера Урала и фундамента Западной Сибири: общая история развития. *Геотектоника*, (1), 1-21.
- Скоробогатов В.А., Строганов А.В., Копеев В.Д. (2003) Геологическое строение и газонефтепродуктивность Ямала. М.: Недра-Бизнесцентр, 353 с.
- Тимонин Н.И., Юдин В.В. (2004) Исландский плюм и его воздействие на раннетриасовый вулканизм северного Приуралья. *Урал. геол. журн.*, **1**(37), 37-52. <https://www.ural-geol-j.net/2004-n1>
- Хуторской М.Д., Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В., Леонов Ю.Г., Подгорных Л.В., Поляк Б.Г., Сухих Е.А., Цыбуля Л.А. (2013) Геотермия Арктических морей. М.: ГЕОС, 238 с.
- Хуторской М.Д., Подгорных Л.В., Грамберг И.С., Леонов Ю.Г. (2003) Термография Западно-Арктического бассейна. *Геотектоника*, (3), 79-96.
- Щапов В.А. (2006) Геотермические исследования Урала. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. 25.00.10. Екатеринбург: Ин-т геофизики УрО РАН, 44 с.
- Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л. (2012) Структура верхней мантии арктического региона по данным региональной сейсмографии. *Геология и геофизика*, **53**(10), 1261-1272.
- Artemieva I. (2006) Global $1^\circ \times 1^\circ$ thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution. *Tectonophysics*, **416**, 245-277.
- CRUST 1.0 <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html>;
- Demezhko D.Yu., Shchapov V.A. (2001) 80 000 years ground surface temperature history inferred from the temperature-depth log measured in the superdeep hole SG-4 (the Urals, Russia). *Global Planet. Change*, **29**(1-2), 219-230.
- International Heat Flow Commission. <http://ihfc-iugg.org/>
- Klitzke P., Faleide J.I., Scheck-Wenderoth M., Sippel J. (2015) A lithosphere-scale structural model of the Barents Sea and Kara Sea region. *Solid Earth*, **6**, 153-172.
- Klitzke P., Sippel J., Faleide J.I., Scheck-Wenderoth M. (2016) A 3D Gravity and thermal model for the Barents Sea and Kara Sea. *Tectonophysics*, **691**, 120-132.
- Kukkonen I.T., Golovanova I.V., Khachay Yu.V., Druzhinin V.S., Kosarev A.M., Schapov V.A. (1997). Low Geothermal heat flow of the Urals fold belt – implication of low heat production, fluid circulation or palaeoclimate? *Tectonophysics*, **276**, 63-85.
- Lebedev S., Schaeffer A.J., Fullea J., Pease V. (2018) Seismic tomography of the Arctic region: Inferences for the thermal structure and evolution of the lithosphere. (Eds V. Pease, B. Coakley). *Circum-Arctic Lithosphere Evolution. Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, **460**, 419-440. <https://doi.org/10.1144/SP460.10>
- Lawver L.A., Müller R.D. (1994) Iceland hotspot track. *Geology*, **22**(4), 311-314.
- Pease V., Drachev S., Stephenson R., Zhang X. (2014) Arctic lithosphere – a review. *Tectonophysics*, **628**, 1-25.
- Petrov O., Morozov A., Shokalsky S., Kashubin S., Artemieva I.M., Sobolev N., Petrov E., Ernst R. E., Sergeev S., Smelror M. (2015) Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. *Earth Sci. Rev.*, **154**, 29-71. doi: 10.1016/j.earscirev.2015.11.013
- Pollack H.N., Demezhko D.Yu., Duchkov A.D., Golovanova I.V., Huang S., Shchapov V.A., Smerdon J.E. (2003) Surface temperature trends in Russia over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures. *J. Geophys. Res.*, **108**(B4), 2180. doi: 10.1029/2002JB002154
- Schaeffer A.J., Lebedev S., Becker T.W. (2016) Azimuthal seismic anisotropy in the Earth's upper mantle and the thickness of tectonic plates. *Geophys. J. Int.*, **207**, 901-933.
- Timonin N.I., Yudin V.V. (2004) The influence of the Iceland's plume on the early Triassic volcanism of the Northern Pre-Urals. *Ural. Geol. J.*, **1**(37), 37-52. <https://www.ural-geol-j.net/2004-n1>
- Torsvik T.H., Amundsen H.E.F., Trønnes R.G., Doubrovine P.V., Gina C., Kuszniir N.J., Steinberger B., Corfu F., Ashwal L.D., Griffin W.L., Werner S.C., Jamtveit B. (2015) Continental crust beneath southeast Iceland. *PNAS*, **112**(15), E1818-E1827. <https://doi.org/10.1073/pnas.1423099112>, <https://www.pnas.org/content/112/15/E1818>

REFERENCES

- org/10.18599/grs.2019.3.125-135 (In Russian)
- Isaev V.I., Starostenko V.I., Lobova G.A., Fomin A.N., Isagalieva A.K. (2017) Tectono-sedimentation interpretation data of geothermy at revealing and evaluation Late-Eocene erosion at Arctic deposits of hydrocarbons (pen. Yamal). *Izv. Tomsk Politekh.Univ. Inzhiniring georesursov*, **328**(7), 19-31. (In Russian)
- Ivanov K.S., Erokhin Yu.V., Elizarov D.V., Shokalskii S.P. (2016a) About the age and composition of gneisses from the foundation of the northwestern part of the West Siberian Plate. *Litosfera*, (1), 59-73. (In Russian)
- Ivanov K.S., Fedorov Yu.N., Petrov L.A., Shishmakov A.B. (2010) On nature of bio-marks of oil. *Dokl. Akad. Nauk*, **432**(2), 227-231. (In Russian)
- Ivanov K.S., Koroteev V.A., Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Travin A.V. (2020) The first data on the age of metamorphic schists of the Taz Peninsula (the Arctic, Western Siberia). *Dokl. RAN. Nauki o Zemle*, **491**(1), 33-37. DOI 10.31857/S268673972003007X (In Russian)
- Ivanov K.S., Kostrov N.P., Koroteev V.A. (2019) On the relationship of geodynamics, heat flow, deep structure and oil- and gas potential of Yamal. *Dokl. Akad. Nauk*, **486**(2), 208-211. <https://journals.eco-vector.com/0869-5652/article/view/13430> (In Russian)
- Ivanov K.S., Kucherov V.G., Fedorov Yu.N. (2008) On the issue of deep origin of oil. *Sostoyanie, tendentsii i problemy razvitiya neftegazovogo potentsiala Zapadnoi Sibiri*. Materialy Mezhdunarodnoi akademicheskoi konferentsii [State, trends and problems of Development of the oil- and gas potential of Western Siberia. Materials of the Intern. Acad. Conf.]. Tyumen', ZapSibNIIGG Publ., 160-173. (In Russian)
- Ivanov K.S., Lats S.A., Koroteev V.A., Kostrov N.P., Pogromskaya O.E. (2018) The main reasons for the regularity of the oil deposit location at the West Siberian platform. *Dokl. Akad. Nauk*, **481**(3), 285-288. (In Russian)
- Ivanov K.S., Panov V.F., Likhanov I.I., Kozlov P.S., Ponomarev V.S., Hiller V.V. (2016) Precambrian of the Urals. *Gornye Vedomosti*, 148(9), 4-21. (In Russian)
- Ivanov K.S., Panov V.F., Likhanov I.I., Kozlov P.S., Hiller V.V., Ponomarev V.S., Erokhin Yu.V., Farrakhova N.N. (2017) Precambrian complexes of Western Siberia and its eastern framing. Review and consequences for oil and gas geology. *Gornye Vedomosti*, **6**(154), 18-33. (In Russian)
- Khutorskoi M.D., Akhmetzyanov V.R., Ermakov A.V., Leonov Yu.G., Podgornykh L.V., Polyak B.G., Sukhikh E.A., Tsybulya L.A. (2013) *Geotermiya Arkticheskikh morei* [Geothermy of the Arctic seas]. Moscow, GEOS Publ., 238 p. (In Russian)
- Khutorskoi M.D., Podgornykh L.V., Gramberg I.S., Leonov Yu.G. (2003) Termography of West-Arctic basin. *Geotectonics*, (3), 79-96.
- Kislukhin I.V. (2012) *Osobennosti geologicheskogo stroeniya i neftegazonosnost' yursko-neokomskikh otlozhenii poluoostrova Yamal* [Features of the geological structure and oil and gas potential of the Jurassic-Neocomian deposits of the Yamal Peninsula]. (Ed. I.I. Nesterov). Tyumen', TumGNGU Publ., 116 p. (In Russian)
- Kontorovich V.A., Ayunova D.V., Gubin I.A., Kalinin A.Yu., Kalinina L.M., Kontorovich A.E., Malyshev N.A., Skvortsov M.B., Solov'ev M.V., Surikova E.S. (2017) A history of tectonic development of the Arctic territories and water areas of the West Siberian oil- and gas province. *Geol. Geofiz.*, **58**(3-4), 423-444. (In Russian)
- Klitzke P., Faleide J.I., Scheck-Wenderoth M., Sippel J. (2015) A lithosphere-scale structural model of the Barents Sea and Kara Sea region. *Solid Earth*, **6**, 153-172.
- Klitzke P., Sippel J., Faleide J.I., Scheck-Wenderoth M. (2016) A 3D Gravity and thermal model for the Barents Sea and Kara Sea. *Tectonophysics*, **691**, 120-132.
- Kucherov V.G., Dmitrievskii A.N., Ivanov K.S., Serovay-skiy A.Yu. (2020) The deep cycle of hydrocarbons – from subduction to mantle upwelling. *Dokl. RAN. Nauki o Zemle*, **492**(1), 61-65. DOI: 10.31857/S268673972005009 (In Russian)
- Kudryavtsev N.A. (1973) *Genezis nefli i gaza* [Genesis of oil and gas]. Tr. Vsesoyuzn. Neft. nauch.-issled. geol.-razved. in-ta. Vyp. 319. Leningrad, Nedra Publ., 216 p. (In Russian)
- Kukkonen I.T., Golovanova I.V., Khachay Yu.V., Druzhinin V.S., Kosarev A.M., Schapov V.A. (1997). Low Geothermal heat flow of the Urals fold belt – implication of low heat production, fluid circulation or palaeoclimate? *Tectonophysics*, **276**, 63-85.
- Kuskov O.L., Kronrod V.A., Prokofiev A.A., Pavlenkova N.I. (2014) The structure of lithospheric mantle of the Siberian craton according to the extra-long seismic profiles Meteorite and Rift. *Geol. Geofiz.*, **55**(7), 1124-1143. (In Russian)
- Lebedev S., Schaeffer A.J., Fullea J., Pease V. (2018) Seismic tomography of the Arctic region: Inferences for the thermal structure and evolution of the lithosphere. (Eds V. Pease, B. Coakley). *Circum-Arctic Lithosphere Evolution. Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, **460**, 419-440. <https://doi.org/10.1144/SP460.10>
- Lawver L.A., Müller R.D. (1994) Iceland hotspot track. *Geology*, **22**(4), 311-314.
- Markushev A.A., Markushev S.A. (2006). *P-T* facies of simple, hydrocarbon and organic substances of C–H–O system. *Dokl. RAN*, **406**(4), 521-527. (In Russian)
- Nezhdanov A.A., Ponomarev V.A., Turenkov N.A., Gorbunov S.A. (2000) *Geologiya i neftegazonosnost' achimovskoi tolshchi Zapadnoi Sibiri* [Geology and oil and gas potential of the Achimov strata of Western Siberia]. Moscow, Publ. of the Academy of Mining, 247 p. (In Russian)
- Nikishin V.A., Malyshev N.A., Nikishin A.M., Obmetko V.V. (2011) Late Permian-Triassic rift system of the South Kara sedimentary basin. *Vestn. MGU Ser. 4. Geologiya*, **6**, 3-9. (In Russian)
- Pavlenkova N.I. (2011) Rheological properties of the upper mantle of Northern Eurasia and the nature of regional boundaries according to the data of extra-long seismic profiles. *Geol. Geofiz.*, **52**(9), 1287-1301. (In Russian)
- Pease V., Drachev S., Stephenson R., Zhang X. (2014) Arctic lithosphere – a review. *Tectonophysics*, **628**, 1-25.
- Petrov O., Morozov A., Shokalsky S., Kashubin S., Artemieva I.M., Sobolev N., Petrov E., Ernst R.E., Sergeev S., Smelror M. (2015) Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. *Earth Sci. Rev.*, **154**, 29-71. doi: 10.1016/j.earscirev.2015.11.013
- Pisetskii V.B., Ivanov K.S. (2019) Development of a fluid-dynamical model (DFM) of the Yamal Novoportovskiy oil- and gascondensing deposit (based on DFM seismic data interpretation). *Litosfera*, **19**(5), 752-766. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-5-752-766 (In Russian)

- Pollack H.N., Demezhko D.Yu., Duchkov A.D., Golovanova I.V., Huang S., Shchapov V.A., Smerdon J.E. (2003) Surface temperature trends in Russia over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures. *J. Geophys. Res.*, **108**(B4), 2180. doi: 10.1029/2002JB002154
- Schaeffer A.J., Lebedev S., Becker T.W. (2016) Azimuthal seismic anisotropy in the Earth's upper mantle and the thickness of tectonic plates. *Geophys. J. Int.*, **207**, 901-933.
- Skorobogatov V.A., Stroganov A.V., Kopeev V.D. (2003) *Geologicheskoe stroenie i gazoneftenosnost' Yamala* [Geological structure and gas and oil potential of Yamal]. Moscow, Nedra-Business Center Publ., 353 p. (In Russian)
- Timonin N.I., Yudin V.V. (2004) The influence of the Iceland's plume on the early Triassic volcanism of the Northern Pre-Urals. *Ural. Geol. Zhurn.*, **1**(37), 37-52. <https://www.ural-geol-j.net/2004-n1> (In Russian)
- Torsvik T.H., Amundsen H.E.F., Trønnes R.G., Doubrovine P.V., Gina C., Kuznir N.J., Steinberger B., Corfu F., Ashwal L.D., Griffin W.L., Werner S.C., Jamveit B. (2015) Continental crust beneath southeast Iceland. *PNAS*, **112**(15), E1818-E1827. <https://doi.org/10.1073/pnas.1423099112>, <https://www.pnas.org/content/112/15/E1818>
- Yakovlev A.V., Bushenkova N.A., Kulakov I.Yu., Dobretsov N.L. (2012) The structure of the upper mantle of the Arctic region according to regional seismography. *Geol. Geofiz.*, **53**(10), 1261-1272. (In Russian)
- Zholondz A.S. (2018) *Stroenie Yuzhno-Karskoi vpadiny i tranzitnoi zony priyamal'skogo shel'fa Karskogo morya*. Diss. kand. geol.-min. sci. [Structure of the South-Kara Depression and the transit zone of the Pri-Yamal shelf of the Kara Sea. Cand. geol. and min. sci. diss.]. St.Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 145 p. (In Russian)