УДК 551:553.98 (571.121)

О ВЗАИМОСВЯЗИ ГЕОДИНАМИКИ, ТЕПЛОВОГО ПОТОКА, ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ЯМАЛА

К. С. Иванов*, Н. П. Костров, академик РАН В. А. Коротеев

Поступило 26.10.2018 г.

Концентрация месторождений углеводородов на единицу площади на Ямале более чем в 100 раз превышает среднемировую. Месторождения углеводородов обычно располагаются в районах с высокой современной геодинамической активностью. Структура мантии в районе Ямала по данным сейсмической томографии имеет аномальные черты. Южная часть Карского моря, Ямал и западная часть полуострова Гыдан лежат в области большой положительной аномалии плотности теплового потока с эпицентром вблизи месторождения Русановское. Практически все месторождения углеводородов Ямала расположены на флангах Западно-Сибирской рифтовой системы и одновременно в градиентных зонах плотности теплового потока.

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

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524862208-211>

Полуостров Ямал, несмотря на свои сравнительно небольшие размеры (122 тыс. км²), является главным газодобывающим регионом России. По данным ОАО “Газпром” (www.gazprom.ru/projects/yamal/), здесь выявлено 32 месторождения углеводородов, а суммарные запасы и ресурсы всех месторождений полуострова составляют 26,5 трлн куб. м газа, 1,6 млрд тонн газового конденсата и 300 млн тонн нефти. Запасы уже открытых здесь крупнейших нефтегазовых месторождений (Бованенковское, Новопортовское, Малыгинское, Ростовцевское, Северо-Кружшернское, Харасавэйское, Тамбейские и другие) [1, 2 и др.] доказывают, что концентрация месторождений углеводородов 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.

Крайняя неравномерность распределения запасов месторождений углеводородов 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 тяжёлых нефтей сосредоточены в Канаде и Венесуэле и т.д. Ямал в этом смысле не является исключением. Месторождения нефти, как правило, располагаются в районах с высокой современной геодинамической активностью. А её наиболее надёжной численной мерой является плотность теплового потока (а также сейсмичность, но она — характеристика непостоянная, а “событийная”).

Понять, какими причинами вызван феномен чрезвычайно высокой нефтегазоносности Ямала, может помочь информация о структуре 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 — охлаждённому блоку. Сейсмотомография по данным широкополосных сейсмических станций дала достаточно детальную модель структуры верхней мантии Арктики ([3] и др.). Такие станции расположены на территории США по регулярной сети, неравномерно распределены по территории Канады до широты 70°, а также в Гренландии, в большом количестве на Аляске, в северной Европе,

*Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого
Уральского отделения Российской Академии наук,
Екатеринбург*

*E-mail: ivanovks@igg.uran.ru

но, к сожалению, почти отсутствуют на севере РФ: одна станция у устья Енисея, а другая — в устье Лены [3, 4].

На глубине 36 км томографическая модель [3] указывает под Ямалом и Гыданом низкоскоростную аномалию порядка от -4 до -2% (относительно $4,46$ км/с — глобального среднего для данной глубины) вертикальной составляющей скорости S-волны. На глубине 56 км аномалия скорости под Ямалом меняет знак и составляет около $+2\%$ (относительно $4,42$ км/с), т.е. мантия становится более холодной и сейсмические скорости увеличиваются. На глубинах 80 и 110 км аномалия скоростей и под Ямалом, и под Таймыром составляет $1-3\%$ (относительно $4,38$ км/с), за исключением северо-запада Ямала и западного шельфа Карского моря, где аномалия составляет около 6% . На глубине 150 км и ниже аномалии скоростей становятся характерными для холодной литосферы под Русской и Сибирской платформами. Эта картина согласуется с различными моделями Арктического региона ([3] и др.). Устойчивое решение при пересчёте сейсмических скоростей в температуру получено для диапазона глубин 80–150 км. Под Ямалом и Гыданом наблюдается температурная аномалия $900-1000$ °C под северной частью Ямала примерно до северной широты $70,5^\circ$ 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 $67,5^\circ$ с.ш. и 75° в.д. На глубине 100 км аномалии скорости объёмных Р-волн отсутствуют под Ямалом, но под Таймыром составляют $0,3-0,6\%$ [5]. В тепловой 3D-модели Баренцева и Карского моря [6] приводятся карты положения изотерм 100 °C и 450 °C. В районе полуострова Ямал и Гыдан, и в районе шельфа Южно-Карского моря изотерма 100 °C проходит на глубинах $2,5-3$ км, а под Таймыром эта изотерма опускается до $5-5,5$ км [6].

Граница Мохо в районе Ямала, согласно [7], 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 конечностью Ямала и под о. Белый, а также в южной части Карского моря (западном шельфе Ямала) граница Мохо проходит на глубинах от 30 до 35 км [7]; 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 [8, 9]. Обращает на себя внимание понижение границы Мохо до 45–50 км под Уралом, Пай-Хоем, Новой Землёй и Таймыром ([8] и др.). Согласно интерпретации наблюдений [8, 9], структура мантии до глубины 50 км под Таймыром и Пур-Гыданской впадиной существенно отличается тем, что под Таймыром мантия более однородна, здесь выделяется всего два слоя, различающиеся по сейсмическим скоростям. Под Пур-Гыданской впадиной этих слоёв насчитывается 4–5.

В более южных районах Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна, северо-западной частью которого является полуостров Ямал, было установлено, что главные, наиболее крупные нефтяные месторождения этого региона приурочены к плечам триасовых рифтов ([10–12] и др.), и расположены эти месторождения преимущественно там, где в фундаменте развиты докембрийские комплексы. Это вызвано преимущественно двумя главными группами причин:

1. Рифты являются проницаемыми зонами, дренирующими верхнюю мантию (причём это справедливо в рамках обеих парадигм о генезисе нефти — и органической, и неорганической);

2. Деформации и структуры чехла определяются фундаментом. Толщина фундамента в среднем в 14 раз больше толщины чехла. С учётом средней прочности пород фундамента (153 ± 10 МПа), его прочность на два порядка превышает прочность чехла [12].

Наши исследования показывают, что лёгкие силикатные блоки, считавшиеся ранее докембрийскими, сложены преимущественно средне- и позднепалеозойскими гранитоидами и метаморфическими сланцами со средней плотностью $\approx 2,60$ г/см³. Они вышли на уровень верхней коры во время триасового рифтогенеза и позднее продолжали изостатически “всплывать”, что сформировало над ними антиформы в осадочном орточехле, которые заполнились нефтью [12].

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 ([1, 13] и др.).

В основании Южно-Карского бассейна проявлена рифтовая система, которая формировалась, по всей видимости, в конце перми — раннем триасе синхронно с рифтами в Западно-Сибирском мегабас-

сейне. Примерно в середине триаса рифты Южно-Карского бассейна испытали конседиментационные инверсионные движения с формированием антиклинальных складок. Пострифтовое погружение здесь началось, по-видимому, 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 транс-тензионную природу и некоторые из них, вероятно, являются бассейнами типа pull-apart ([14] и др.).

Плотность теплового потока в регионе показана на рис. 1, где изобата 200 м очерчивает зону шельфа, а 50 м — мелкого шельфа. Южная часть Карского моря, полуостров Ямал и западная часть полуострова Гыдан лежат в области большой положительной аномалии плотности теплового потока с эпицентром вблизи месторождения Русановское, расположенного на шельфе к северо-западу от Ямала. Плотность теплового потока изменяется от максимального 74 до 60 мВт/м² в районе западного побережья Ямала. Плотность теплового потока более 74 мВт/м² наблюдается на юго-западе Ямала в овальной вытянутой в меридиональном направлении аномалии с эпицентром 76 мВт/м² в районе острова Литке (см. рис. 1). На Ямале также отмечается ряд локальных аномалий плотности теплового потока. В целом обращает на себя внимание резко повышенная плотность теплового потока в районе Ямала, по сравнению, например, с плотностью теплового потока Таймыра, который отличают малые градиенты и более низкие значения в эпицентрах. Из карты также 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; так перспективен район северо-восточного замыкания Западно-Ямальской аномалии, к западу и северу от острова Белый. Новые месторождения будут найдены в антиклинальных ловушках в мезозойском чехле, в том числе уже обнаруженных сейсмопрофилированием ([15] и др.).

Рис. 1. Плотность теплового потока в районе Ямала: 1 — изобаты 50 и 200 м, 2 — контуры суши, построенные по данным CRUST 1.0 (<http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html>); 3 — рифтовая система Западной Сибири по Л. В. Смирнову с уточнениями [12]; 4 — углеводородные месторождения Ямала по [2]; 5 — изолинии плотности теплового потока мВт/м², построенные по данным International Heat Flow Commission (<http://iaspei.org>); 6 — область плотности теплового потока выше 70 мВт/м² (Западно-Ямальская аномалия).

Источник финансирования. Исследования проводятся в рамках проекта РФФИ № 18–05–70016.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скоробогатов В. А., Строганов А. В., Конев В. Д. Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. М.: Недра-Бизнесцентр, 2003. 353 с.
2. Кислухин И. В. Особенности геологического строения и нефтегазоносность юрско-неокомских отложений полуострова Ямал. Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. 116 с.
3. Lebedev S., Schaeffer A. J., Fullea J., Pease V. In. Circum-Arctic: Lithosphere Evolution // Geol. Soc. London. Spec. Publ. 2018. V. 460. P. 419–440.
4. Schaeffer A. J., Lebedev S. & Becker, T. W. // Geophys. J. Int. 2016. V. 207. P. 901–933.
5. Яковлев А. В., Бушенкова Н. А., Кулаков И. Ю., Добрецов Н. Л. // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 10. С. 1261–1272.
6. Klitzke P., Sippel J., Faleide J. I., Scheck-Wenderoth M. // Tectonophysics. 2016. V. 691. P. 120–132.

7. *Klitzke P., Faleide J.I., Scheck-Wenderoth M. & Sippel J.* // *Solid Earth*. 2015. V. 6. P. 153–172.
8. *Павленкова Н.И.* // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52. № 9. С. 1287–1301.
9. *Кусков О.Л., Кронрод В.А., Прокофьев А.А., Павленкова Н.И.* // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55. № 7. С. 1124–1143.
10. *Нежданов А.А., Пономарев В.А., Туренков Н.А., Горбунов С.А.* *Геология и нефтегазоносность ачимовской толщи Западной Сибири*. М.: Изд-во Академии горных наук, 2000. 247 с.
11. *Иванов К.С., Кучеров В.Г., Федоров Ю.Н.* В сб.: *Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири*. Тюмень: ЗапСибНИИГГ, 2008. С. 160–173.
12. *Иванов К.С., Лац С.А., Коротеев В.А., Костров Н.П., Погромская О.Э.* // *ДАН*. 2018. Т. 481. № 3. С. 285–288.
13. *Бочкарев В.С., Брехунцов А.М., Лукомская К.Г.* // *Горные ведомости*. 2010. № 8 (75). С. 6–35.
14. *Никишин В.А., Малышев Н.А., Никишин А.М., Обметко В.В.* // *Вестн. МГУ. Сер. геол.* 2011. № 6. С. 3–9.
- 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.* // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58. № 3/4. С. 423–444.

ON THE RELATIONSHIP OF GEODYNAMICS, HEAT FLOW, DEEP STRUCTURE AND PETROLEUM AND GAS POTENTIAL OF YAMAL

K. S. Ivanov, N. P. Kostrov, Academician of the RAS V. A. Koroteev

*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russian Federation*

Received October 26, 2018

Hydrocarbon deposits concentration per unit square in Yamal is more than 100 times greater than the world average. Hydrocarbon deposits are generally located in regions with high modern geodynamic activity. The mantle structure in Yamal area has abnormal features according to seismic tomography. The southern part of Kara sea, Yamal and the western part of Gydan peninsula are situated in a big positive heat flow density anomaly with the epicenter near to Rusanovskoe deposit. Almost all deposits of hydrocarbones in Yamal are situated on the flanks of the West-Siberian rift system and simultaneously in gradient zones of heat flow density.

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