

УДК 553.981; 551.35

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ ДОННЫХ ОСАДКОВ ГЕОСТРУКТУР ЛАПТЕВО-СИБИРОМОРСКОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ ВОСТОЧНО-АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

© 2024 г. А. И. Гресов^{1,*}, А. В. Яцук^{1,**}

Представлено академиком РАН Г.И. Долгих 11.05.2023 г.

Поступило 11.05.2023 г.

После доработки 16.08.2023 г.

Принято к публикации 03.10.2023 г.

Приведены данные газогеохимических исследований донных осадков Лаптево-Сибироморской зоны. Установленные изотопно-геохимические показатели свидетельствуют о доминировании в осадках эпигенетических углеводородных газов различных газоматеринских источников. Концентрации метана до $8.3047 \text{ см}^3/\text{кг}$ и суммы его гомологов — до $0.0260 \text{ см}^3/\text{кг}$ указывают на формирование УВ-аномалий, превышающих критерии аномальности для осадков арктического шельфа в 166 и 26 раз. Основными геологическими факторами формирования и распределения аномалий в донных осадках зоны являются высокая газоносность подстилающих отложений и газоматеринских источников, складчатая и разрывная тектоника, геоструктурное положение, сейсмоактивность и глубина залегания источников образования УВГ.

Ключевые слова: донные осадки, шельф, углеводородные газы, газонасыщенность, аномалии, геологические факторы, Лаптево-Сибироморская переходная зона

DOI: 10.31857/S2686739724020164

Лаптево-Сибироморская переходная зона (ЛСЗ) является в настоящее время объектом пристального внимания ученых мирового и российского научного сообщества. Интерес к ЛСЗ обусловлен формированием аномалий углеводородных газов (УВГ) в донных осадках в области сочленения Евразийской и Североамериканской литосферных плит [1, 2]. Основная цель настоящих исследований заключалась в изучении влияния основных геологических факторов формирования и распределения в осадках углеводородных аномалий. Актуальность работы обусловлена приоритетом научно-исследовательских работ в Арктической зоне России. Территория ЛСЗ расположена в пределах переходной зоны моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, в том числе в пределах сочленения Евро-Азиатской и Североамериканской литосферных плит, где глобальный раздвиг арктического сегмента Земли выражен Лаптевоморской грабен-рифтовой системой, базальтовым магматизмом

и цепочками эпицентров землетрясений магнитудой до 7 баллов на глубинах 4–36 км (рис. 1).

Среди структур, характеризующих раздвиг земной коры, выделяются Котельнический жесткий блок, не подверженный растяжению. В общей тектонической структуре региона также выделяются Восточно-Лаптевское поднятие, Столбовской и Бельковский горсты, Благовещенская и Шелонская структурные террасы; Новосибирский, Анисинский, Бельковско-Святоносский, Омолойский прогибы, Северо-Омолойский грабен-рифт и Санниковская седловина (рис. 1), сформированные в пределах Верхояно-Колымской и Новосибирско-Чукотской складчатых областей. В пределах ЛСЗ имеют развитие палеозойские магматические образования Котельнического и Решетниковского поднятий, раннемезозойские — Южно-Анжуйской сутуры и меловые — субмеридиональной зоны тектономагматической активизации, а также палеозойско-мезозойские битумопроявления и мел-неогеновые угольные залежи Новосибирских о-вов [3].

Основным материалом газогеохимических исследований являлись керны осадков 55 донных станций, отобранных грунтоотборными

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия

*E-mail: gresov@poi.dvo.ru

**E-mail: yatsuk@poi.dvo.ru

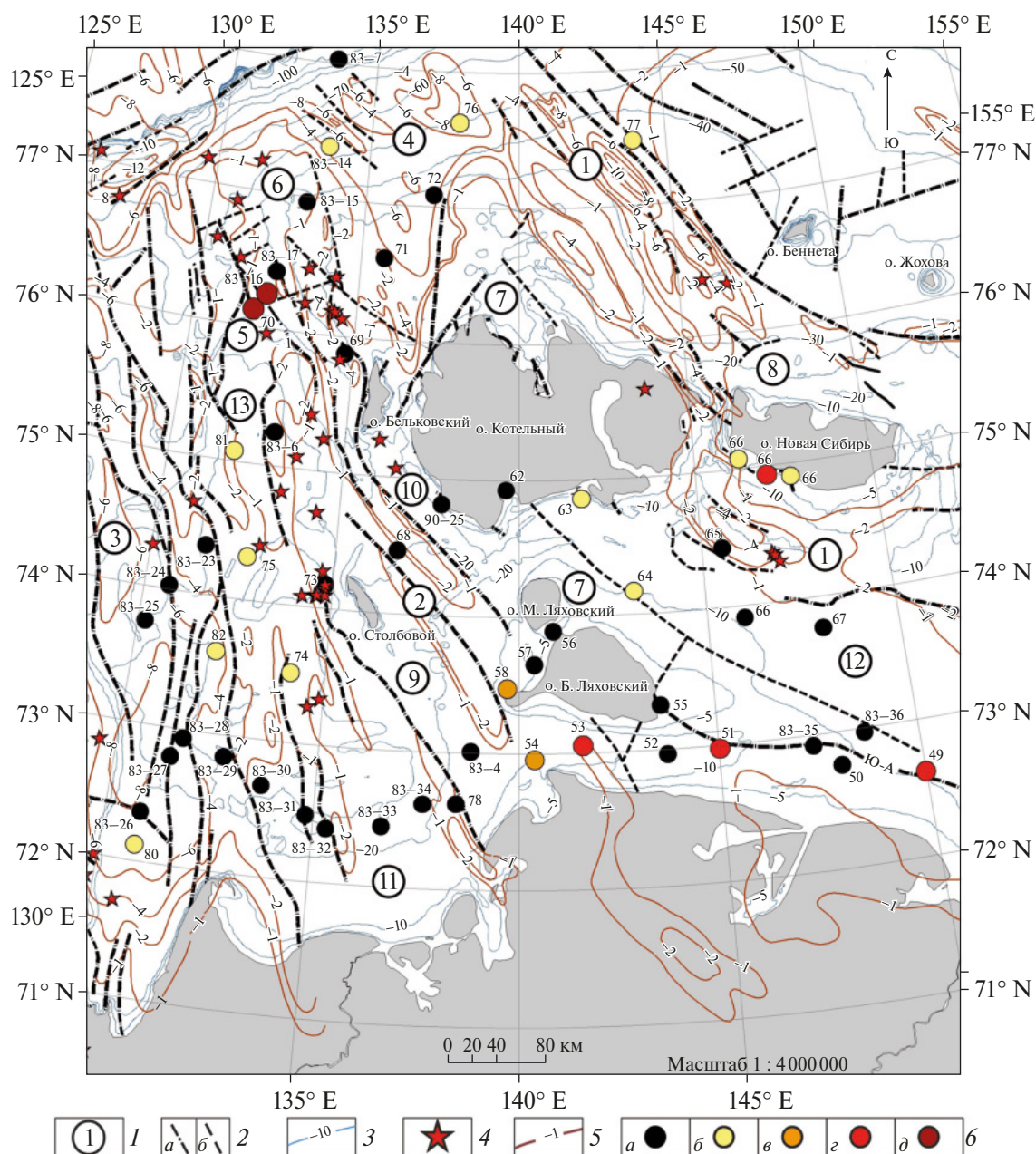


Рис. 1. Структурно-тектоническая карта района исследований [3, 4]: 1 – геоструктуры первого порядка: прогибы: 1 – Новосибирский, 2 – Бельковско-Святоносский, 3 – Омолыйский, 4 – Анисинский; грабен-рифт: 5 – Северо-Омолыйский; поднятия: 6 – Восточно-Лаптевское, 7 – Котельничское, 8 – Решетниковское; горсты: 9 – Столбовской, 10 – Бельковский; структурные террасы: 11 – Шелонская, 12 – Благовещенская; 13 – Санниковская седловина. 2 – тектонические нарушения: а – достоверные, б – предполагаемые. 3 – изобаты, м. 4 – эпицентры землетрясений (по данным USGS Earthquake Hazards Program). 5 – изогипсы мощности осадочного чехла, км. 6 – донные станции с концентрациями УВГ в осадках: < 0.05 (а), 0.05–0.25 (б), 0.25–0.50 (в), 0.50–1.00 (г) и > 1.00 см³/кг (д). Номера станций прибрежных экспедиций и попутного судового опробования – 49–82; рейсов LV83 и LV90 НИС “Академик М.А. Лаврентьев” – 83–4–83–36 и 90–25. Ю-А – Южно-Анюйская сутура.

трубками, дночерпателями и мультикорами с НИС “Академик М.А. Лаврентьев”, гидрографических и попутных судов ММФ РФ. В процессе работ использовался метод поинтервального отбора керна осадков в герметические

сосуды с последующей их дегазацией и анализом газа. Методика дегазации, хроматографического анализа и определения газонасыщенности донных отложений соответствовала нормативному Руководству [5]. Изучение изотопного состава

углерода $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ осуществлялось в лаборатории стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН. Для определения генезиса УВГ, помимо данных $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, использовался комплексный метод расчета геохимических показателей: молекулярной массы УВ-фракции ($M_{\text{УВ}}$), весовых концентраций C_1-C_5 , нормированных по отношению к $M_{\text{УВ}}$ в долях целого на 1000 (или в граммах на килограмм газа УВ-фракции) [6], и коэффициента “влажности” УВ-фракции [7] в виде: $\text{Квл} = (\Sigma\text{C}_2-\text{C}_5 / \Sigma\text{C}_1-\text{C}_5) \times 100 (\%)$, где C_1-C_5 — весовые концентрации УВ в долях на 1000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Интерпретация результатов газового опробования донных осадков и анализов изотопного состава углерода метана, а также данные работ [8–10] позволили выделить в осадках ЛСЗ одиннадцать генетических групп УВГ различных литотипов и газоматеринских источников, характеризующихся индивидуальными средними газогеохимическими показателями $M_{\text{УВ}}$, Квл и $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$. Исходя из полученных данных (табл. 1), сингенетические УВГ современных осадков характеризуются биохимическим происхождением. В миграционных (эпигенетических) газах гидратов, кайнозойских газовых залежей, торфяников и бурых углей доминируют биогенные газы с примесью метаморфогенной составляющей. Газогеохимические показатели УВГ каменных углей, предполагаемых мезозойских твердых битумов (антраксолитов?), газовых, конденсатногазовых, газоконденсатных, нефтегазовых и газонефтяных скоплений и залежей указывают на их метаморфогенное образование; магматических пород — магматогенное. В целом газогеохимические показатели всех групп УВГ достаточно близки по значениям к аналогам Восточно-Сибирского моря [9, 10], а также — Ленского, Анадырского, Охотоморского и Сахалинского углефтегазоносных осадочных бассейнов Востока России [8].

В процессе исследований установлено, что формирование состава и концентраций УВ-газов в донных осадках ЛСЗ подчиняются правилам аддитивности, то есть последовательного накопления в осадках УВГ различного генезиса с преобладанием газовой фазы и изотопно-газогеохимических показателей более углеводородонасыщенного материнского источника. Установлено, что максимумом средних концентраций CH_4 характеризуются осадки на участках развития УВГ бурых, каменных углей

и газогидратов (табл. 1), минимальными — магматических пород, промежуточными — остальные газоматеринские источники. Максимумы средних концентраций $\Sigma\text{C}_2-\text{C}_5$ установлены на площадях развития УВГ предполагаемых газоконденсатных, нефтегазовых и газонефтяных залежей, минимальные — современных осадков, магматических пород и кайнозойских газовых залежей, промежуточные — остальных литотипов и газоматеринских источников. Можно отметить двухкратное превышение средних концентраций CH_4 и $\Sigma\text{C}_2-\text{C}_5$ в осадках на площадях развития залежей каменного и бурого угля (табл. 1), что явно указывает на значительную роль степени катагенеза угольного (органического) вещества на процессы формирования УВ-насыщенности донных отложений.

В результате газогеохимических исследований донных отложений ЛСЗ установлено, что концентрации CH_4 и $\Sigma\text{C}_2-\text{C}_5$ в осадках закономерно возрастают от 0.0017 и 0.00001 $\text{см}^3/\text{кг}$ до 8.3047 и 0.02593 $\text{см}^3/\text{кг}$ с увеличением глубины их опробования от 0.1 до 3.3 м и в среднем составляют 0.1700 и 0.00220 $\text{см}^3/\text{кг}$. Исходя из критериев аномальности $\text{CH}_4 > 0.05$ и $\Sigma\text{C}_2-\text{C}_5 > 0.001$ $\text{см}^3/\text{кг}$ для осадков Восточноарктического шельфа [2], максимальные их концентрации превышают указанные показатели в 166 и 26 раз, средние — в 3.4 и 2.2 раза, что указывает на высокую УВ-насыщенность донных осадков района исследований. При этом влияние структурно-тектонического строения ЛСЗ является одним из основных факторов формирования и распределения УВ-аномалий.

В процессе исследований установлено, что максимум средних концентраций CH_4 наблюдается в донных осадках Северо-Омолыйского грабен-рифта и поднятий, $\Sigma\text{C}_2-\text{C}_5$ — Санниковской седловины и прогибов, минимумом обоих — горстов (табл. 2). Промежуточное положение занимают осадки структурных террас. При этом формирование аномалий CH_4 и $\Sigma\text{C}_2-\text{C}_5$ с концентрациями до 2.3056 и 0.02313 $\text{см}^3/\text{кг}$ наблюдается в осадках крыльев прогибов и грабен-рифта, до 8.3047 и 0.02593 — их осевой (мульдовой) части, до 0.3620 и 0.01849 $\text{см}^3/\text{кг}$ — замыкания синклиналиных складок. Аналогичные значения в осадках западного крыла Котельничского поднятия достигают 0.6900 и 0.00899, сводовой части — 0.5378 и 0.00647 $\text{см}^3/\text{кг}$. Формирование аномалий метана — 0.0553–0.1494 $\text{см}^3/\text{кг}$ и $\Sigma\text{C}_2-\text{C}_5$ — 0.0086–0.0102 $\text{см}^3/\text{кг}$ в донных отложениях Санниковской седловины наблюдается в центральной ее части. Низкие концентрации

Таблица 1. Средние значения газогеохимических показателей и концентраций УВГ донных осадков района исследований на участках развития различных газоматеринских источников

Генетические группы УВГ (номера станций)	Средние значения показателей			CH ₄ , см ³ /кг			ΣC ₂ -C ₅ , см ³ /кг		
	M _{УВ} , г/моль	К _{вл} , %	δ ¹³ C-CH ₄ , ‰	мин.	макс.	среднее	мин.	макс.	среднее
1.Современных осадков (57, 62, 64)	16.05	0.1	−78.0	0.0180	0.0654	0.0347	0.00003	0.00004	0.00003
2.Газогидратов (70, 83-7, 83-14, 83-16)	16.10	0.7	н. о	0.0059	8.3047	2.4143	0.00003	0.00682	0.00237
3.Торфяников (55, 59)	16.13	1.1	−62.0	0.0305	0.1058	0.0681	0.00024	0.00139	0.00081
4.Угольных залежей:	16.20	1.9	−60.7	0.0029	0.6275	0.2068	0.00004	0.00644	0.00257
4.1. бурых углей (58, 60, 63, 66, 80, 83-28)	16.27	2.6	−58.0	0.0018	0.6900	0.4755	0.00004	0.00899	0.00594
4.2. каменных углей (49, 51, 53, 83-34)									
5.Газовых залежей:	16.15	1.4	н. о	0.0117	0.0637	0.0377	0.00010	0.00052	0.00026
5.1. кайнозойских (61, 78)	16.41	3.1	−56.0	0.0097	0.0507	0.0302	0.00028	0.00115	0.00071
5.2. мезозойских*(74, 83-32)									
6.Магматических пород* (52, 56, 71, 83-15, 83-17, 83- 24, 83-30, 90-25)	16.65	6.5	н. о	0.0037	0.0210	0.0072	0.00018	0.00060	0.00026
7.Твердых битумов* (50, 54, 69, 73, 83-6, 83-23, 83-35, 83-36)	17.64	16.7	−49.8	0.0030	0.3620	0.0598	0.00027	0.00424	0.00137
8.Конденсатногазовых за- лежей* (67, 79, 81, 83-4, 83- 25, 83-26, 83-29, 83-31)	17.12	12.0	−53.0	0.0065	0.1549	0.0580	0.00043	0.01019	0.00379
9.Газоконденсатных зале- жей* (68, 75, 82)	18.28	23.4	−50.4	0.0243	0.1524	0.0773	0.00375	0.02313	0.01165
10.Нефтегазовых залежей* (65, 77)	19.43	31.8	−48.2	0.0083	0.0923	0.0503	0.00190	0.01849	0.01020
11.Газонефтяных залежей* (72, 76)	21.60	47.2	−44.8	0.0358	0.0570	0.0464	0.01396	0.02593	0.01995

Примечание: полужирным шрифтом выделены аномальные концентрации УВГ, н.о — не определялся. * — предполагаемые залежи.

CH₄, ΣC₂-C₅ и отсутствие их аномалий в осадках горстов указывают на доминирование процессов дегазации в этих структурах. Аналогическая газодинамическая ситуация установлена и в осадках Восточно-Лаптевского поднятия, где установлена одна локальная аномалия метана (рис. 1). Формирование в осадках Шелонской и Благовещенской террас аномалий CH₄ и ΣC₂-C₅—0.0507—0.6723 и 0.00115—0.00825 см³/кг (табл. 2) связано с миграцией УВГ в зонах разломов и его апофизов, транзитно секущих углегазоносные формации.

Структурно-формационные особенности отложений позволяют предполагать, что

продольные складчатости фундамента разломы были активными в палеозое, поперечные и диагональные — мел-кайнозое. Смещение по разломам кайнозойских отложений, геоморфологические данные, современная сейсмичность ЛСЗ и газогеохимические показатели эпигенетических УВГ указывают на продолжающиеся до настоящего времени движения по ним и активной их роли в процессах миграции газов в донные отложения. При этом интенсивность тектонической нарушенности западной части ЛСЗ (условная граница по меридиану 140°Е) в значительной мере выше, чем

Таблица 2. Средние концентрации УВГ в донных осадках геоструктур района исследований

Геоструктуры	CH ₄ , см ³ /кг			ΣC ₂ -C ₅ , см ³ /кг		
	мин.	макс.	среднее	мин.	макс.	среднее
Структурные террасы (19):	0.0017	0.6723	0.0500	0.00001	0.00825	0.00088
Благовещенская (8)	0.0037	0.6723	0.0987	0.00001	0.00825	0.00165
Шелонская (11)	0.0017	0.0507	0.0146	0.00009	0.00115	0.00033
Поднятия (30):	0.0022	0.6900	0.0963	0.00001	0.0899	0.00119
Решетниковское (3)	0.0637	0.6275	0.2657	0.00005	0.00644	0.00279
Котельничское (14)	0.0037	0.6900	0.1402	0.00001	0.00899	0.00183
Восточно-Лаптевское (13)	0.0022	0.0659	0.0098	0.00004	0.00036	0.00014
Горсты (4):	0.0025	0.0083	0.0065	0.00008	0.00062	0.00037
Столбовской (1)	0.0070	0.0070	0.0070	0.00023	0.00023	0.00023
Бельковский (3)	0.0025	0.0083	0.0063	0.00008	0.00062	0.00042
Прогибы (34):	0.0029	0.3620	0.0391	0.00004	0.02313	0.00326
Новосибирский (7)	0.0050	0.1058	0.0349	0.00006	0.01849	0.00320
Анисинский (8)	0.0054	0.0570	0.0242	0.00066	0.02593	0.00389
Бельковско-Святоносский (9)	0.0068	0.3620	0.0552	0.00016	0.00424	0.00194
Омолойский (10)	0.0029	0.1524	0.0394	0.00004	0.02313	0.00408
Северо-Омолойский грабен-рифт (14)	0.0022	8.3047	0.9677	0.00007	0.01966	0.00307
Санниковская седловина (6)	0.0068	0.1549	0.0641	0.00005	0.01019	0.00486
Район исследований (107)	0.0017	8.3047	0.1700	0.00001	0.02593	0.00219

Примечание: полужирным шрифтом выделены аномальные концентрации УВГ, в скобках — число определений.

в восточной (рис. 1), при средней УВ-насыщенности (ΣC₁-C₅) осадков 0.2030 см³/кг в первой и 0.1307 см³/кг — во второй. Следует также отметить, что в пределах линейной сейсмоактивной зоны, представленной цепочкой эпицентров землетрясений в западной части ЛСЗ, в донных осадках установлены аномалии CH₄ до 8.3047 см³/кг и ΣC₂-C₅ — до 0.01966 см³/кг.

В целом распределение УВ-аномалий в донных отложениях ЛСЗ по станциям газогеохимического опробования приведено на рис. 1.

Исходя из полученных данных, основными геологическими факторами формирования и распределения аномалий УВГ в донных отложениях ЛСЗ являются глубина их залегания, высокая газоносность подстилающих отложений и газонасыщенность материнских источников, степень катагенеза угольного (органического) вещества, сейсмоактивность района исследований, геоструктурное положение и тектонический фактор.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Газогеохимические и аналитические исследования выполнены в рамках Гостемы ТОИ ДВО РАН № FWMM-2024-0029 “Геология и геохимия природных газов, газогеохимические индикаторы геологических процессов и полезных ископаемых Мирового океана” (124022100076-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Cramer D. Franke // Journal of Petroleum Geology. V. 28(4), October 2005, P. 1–15.
2. Яшин Д. С., Ким Б. И. // Геология нефти и газа. 2007. № 4. С. 24–35.
3. Государственная геологическая карта. Масштаб 1:1000 000. Серия Лаптево-Сибироморская. Листы S-53, S-54. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016, 309 с.
4. Государственная геологическая карта России и прилегающих акваторий. Масштаб 1:2500000. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016.

5. Руководство по определению и прогнозу газоносности вмещающих пород при геологоразведочных работах. Ростов-на-Дону: ВНИИГРИУголь. 1985. 96 с.
6. Велев В.Х. Молекулярная масса углеводородной фракции и весовое распределение компонентов C_1-C_5 в природных газах разных генетических типов. Органическая геохимия нефтей, газов и органического вещества докембрия. (Под ред. Алексеева А.А.). М.: Наука, 1981, С. 22–28.
7. Abrams M.A. // Marine and Petroleum Geology. 2005. № 22. P. 457–477.
8. Гресов А.И. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока и перспективы ее промышленного освоения. Том 2. Углеметановые бассейны Республики Саха (Якутия) и Северо-Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2012. 468 с.
9. Гресов А.И., Яцук А.В. // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 2. С. 197–215.
10. Гресов А.И., Яцук А.В. // Геология нефти и газа. 2023. № 1. С. 95–110.

GEOCHEMICAL ANOMALIES OF HYDROCARBON GASES IN BOTTOM SEDIMENTS OF GEOSTRUCTURES OF THE LAPTEV-SIBERIAN TRANSITION ZONE OF THE EAST ARCTIC SHELF

A. I. Gresov^{a, #}, A. V. Yatsuk^{a, ##}

^a*Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

[#]*E-mail: gresov@poi.dvo.ru*

^{##}*E-mail: yatsuk@poi.dvo.ru*

The data of gas geochemical studies of bottom sediments of the Laptev-Siberian transition zone are presented. The established isotope-geochemical indicators determine the dominance of epigenetic hydrocarbon gases of various gas sources in the sediments. Methane concentrations up to 8.3047 cm³/kg and the sum of its homologues up to 0.0260 cm³/kg indicate the formation of hydrocarbon anomalies exceeding the anomaly criteria for Arctic shelf sediments by 166 and 26 times. The main geological factors for the formation and distribution of anomalies in the bottom sediments of the Laptev-Siberian transition zone are the high gas content of the underlying sediments and gas sources, fold and fault tectonics, geostructural position, seismic activity and depth of occurrence of hydrocarbon sources.

Keywords: bottom sediments, shelf, hydrocarbon gases, genesis, gas saturation, anomalies, geological factors, Laptev-Siberian transition zone