

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

УДК 551

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАНА НАД АРКТИЧЕСКИМ ШЕЛЬФОМ ЕВРАЗИИ

© 2023 г. Р. Б. Шакиров^{1,*}, Е. С. Хазанова¹, И. Е. Стёпочкин¹

Представлено академиком РАН И.И. Моховым 30.12.2022 г.

Поступило 30.12.2022 г.

После доработки 03.03.2023 г.

Принято к публикации 13.03.2023 г.

Представлены новые результаты анализа распределения метана в тропосфере над Арктическим шельфом Евразии с помощью ИК-зондировщика AIRS. Показаны основные тренды изменчивости содержания метана (повышение), температуры (AIRS, флуктуации без ярко выраженного тренда) и ледовитости (по данным Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)) за период 2010–2022 гг. Сделаны заключения о разнице в распределениях атмосферного метана над западной и восточной частями Евразийской Арктики, разделяемых по зоне проницаемости, сформированной сейсмически активным линейamentом вдоль хребта Гаккеля. Показано, что гидрометеорологические параметры, включая температуру и льдообразование, вероятно, не являются главными причинами повышения содержания метана в атмосфере Евразийского арктического шельфа. Распределение метана и повышение его содержания связаны с природными региональными факторами, распространенными на обширных площадях, которыми являются, в первую очередь, геологические структуры: нефтегазоносные бассейны и тектоническая раздробленность литосферы, формирующая зоны ее дегазации разных типов.

Ключевые слова: метан, лед, температура, шельф Арктики, нефтегазоносные бассейны, тектоника, тренды, атмосфера

DOI: 10.31857/S2686739722603003, **EDN:** RXANBN

В настоящее время дискуссии о роли Арктических морей в ресурсном и климатических аспектах планеты занимают лидирующее место. Распространены разные взгляды на масштабы и генезис потоков метана в системе литосфера–гидросфера–атмосфера в Арктике [1]. Моря Арктики представляются и как районы экстремальных экологических сценариев за счет выброса метана [2], и как источники гигантских залежей углеводородов, преимущественно газовых [3], и как наиболее чувствительный индикатор эволюционных процессов цикла углерода [4].

В условиях острого недостатка данных прямых наблюдений в регионе, большое значение имеет направление дистанционного зондирования Земли из космоса. Авторы преследуют цель объективной оценки распределения метана в атмосфере на примере западной и восточной Арктики с учетом гидрометеорологических и ледовых условий и региональных геологических факторов

(геологическое строение, особенности распространения углеводородных залежей и др. [5]).

В работе проведен анализ распределения метана в атмосфере арктического шельфа Евразии по данным ИК-зондировщика Atmospheric InfraRed Sounder (AIRS) [6], установленного на спутнике Aqua. Данный аппарат дает широкие возможности для мониторинга изменений климата, в частности содержания парниковых газов в атмосфере Земли. Использовались данные атмосферных профилей метана и температуры версии 7 уровня L3 на регулярной географической сетке с пространственным разрешением 1° и временным разрешением 1 мес [7].

Исследуемый арктический регион для сравнения был условно разделен на 2 макрорегиона с небольшим взаимным перекрытием в первую очередь на основании геологического строения (рис. 1а): западный сектор (20° в.д. – 140° в.д.), включающий моря Баренцево, Карское и большую часть моря Лаптевых [8, 9] и восточный сектор (120° в.д. – 160° з.д.), включающий Восточно-Сибирское и Чукотское моря. Полоса перекрытия (120°–140° в.д.) включает в себя зону проницаемости, сформированную вдоль и на южном продолжении сейсмо- и вулканически активного

¹ Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

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

хребта Гаккеля, в пределах которого зафиксированы вулканизм взрывной “газовой” природы [10] и тектонически контролируемые участки газовых факелов на дне у его подножия [11]. При оценке распределения температуры и метана данные, попадающие в полосу перекрытия, учитывались и для западного, и для восточного секторов для создания объективной региональной картины распределений. Полоса дна вдоль газоактивного линеймента хребта Гаккеля имеет черты геологического строения, в целом не характерные ни для западного, ни для восточного секторов, и заслуживает отдельного исследования. В целом характеристики газогеохимического режима западного и восточного секторов существенно различаются [12–19]. В западном секторе также обнаружены термофильные микроорганизмы, индикаторные для геотермальных проявлений [15]. Для анализа выбран период с 2010 по 2022 г. включительно.

Выявлен устойчивый тренд роста содержания метана (CH_4) на фоне мало выраженного десятилетнего тренда изменчивости поля температуры (по данным AIRS) (рис. 1Б), при этом характерной особенностью является схожесть в характере закономерных флуктуаций межгодовой изменчивости между распределением полей температуры и метана. На графиках показана временная изменчивость усредненных по акватории содержания метана и температуры приповерхностного слоя атмосферы. Основным отличием запада от востока является более выраженный тренд на увеличение содержания метана в западном секторе. За 2020–2022 гг. тренд выглядит гораздо характернее, достигая уверенного уровня в 2 ppm в западной зоне и немного ниже в восточной. В западном секторе за наблюдаемый период содержание метана имело минимум 1.91 ppm (июль 2010 г.), и максимум 2.018 ppm (сентябрь 2021 г.), а в восточном минимум составлял 1.89 ppm в марте 2010 г. и максимум 2 ppm в ноябре 2020 г.

Как в западном, так и в восточном секторе содержание метана демонстрирует выраженный тренд к увеличению [20]. С 2010 по 2022 г. увеличение среднесезонных значений составило $2.13 \pm 0.48\%$ (рост температуры $0.46 \pm 0.13\%$) и $1.92 \pm 0.52\%$ (рост температуры $0.62 \pm 0.16\%$) соответственно. В отличие от температуры, в содержании метана отчетливо наблюдаются периодические квартальные флуктуации. Главные межгодовые пики повышения содержания метана совпадают по времени между восточным и западным секторами. В соответствии с рассматриваемыми данными, маловероятно, что они связаны с процессами становления и таяния льда.

Для определения площади льда были взяты данные пассивной микроволновой радиометрии спутников серии Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) [21]. На рис. 1в показаны сред-

негодовые значения площади льда (км^2) в восточном (ВС) и западном (ЗС) секторах. Разделение на секторы при анализе площади льда было произведено согласно морям [21, 22]: ЗС – Баренцево, Карское, Лаптевых (основная, большая часть); ВС – Восточно-Сибирское, Чукотское и Берингово, которое оказывает влияние на ледовый режим Арктики [23]. Зафиксированный минимум льда в сентябре 2012 г. [24] четко отражается в среднегодовых значениях в ЗС и находится в противофазе с ВС в 2012, 2017–2020 гг. Тренд на уменьшение площади льда в ВС фиксируется с 2014 (1.9 млн км^2) по 2019 (1.5 млн км^2) года. За 6 лет площадь льда уменьшилась на $\approx 20\%$ или 0.4 млн км^2 . С 2020 г. площадь льда снова начала расти и в 2021 г. достигла 1.7 млн км^2 , снизившись в 2022 г. к 1.6 млн км^2 . В ЗС нет четко выраженного тренда уменьшения ледовитости, в восточном секторе этот тренд выражен отчетливее (рис. 1В). В западном секторе минимальная площадь достигала 1 млн км^2 в 2012 г., при этом флуктуации ледовитости носят квазипериодический характер. Какой-либо зависимости повышения значений поля метана от ледовитости не наблюдается.

Таким образом, можно сделать вывод, что температура и ледовитость не имеют какой-либо выраженной связи с ростом содержания метана в атмосфере. Особенности распределения и декадное изменение в поле метана, по всей видимости, являются следствием влиянием региональных геологических факторов и их закономерной пространственной изменчивости. Среди них наиболее значимыми являются нефтегазоносные бассейны арктического региона, эволюционный процесс их развития и проницаемость литосферы.

Несмотря на недостаточную разведанность нефтегазовых залежей на Евразийском арктическом шельфе [26], в западном секторе обнаружены уникальные месторождения углеводородов (Штокмановское, Приразломное, Русановское и др.) [5], многочисленные локальные структуры, которые являются источниками метана по аналогии с другими бассейнами. В восточном секторе углеводородные скопления практически не разведаны прямыми методами, но имеющаяся информация показывает, что их распространение носит иной характер. При этом перспективность восточного сектора может не уступать западному, тем не менее, условия дегазации литосферы в них отличаются. Согласно газогеохимическим исследованиям [15, 16], перспективы нефтегазоносности в восточном секторе могут быть связаны, в том числе, с осадочно-породными толщами северной части Северной структурной террасы, Ломоносово-Менделеевской флексуры-разломной зоны и Предвосточносибирского осадочного бассейна, континентального склона и верхней террасы котловины Подводников, прогиба Вилькиц-

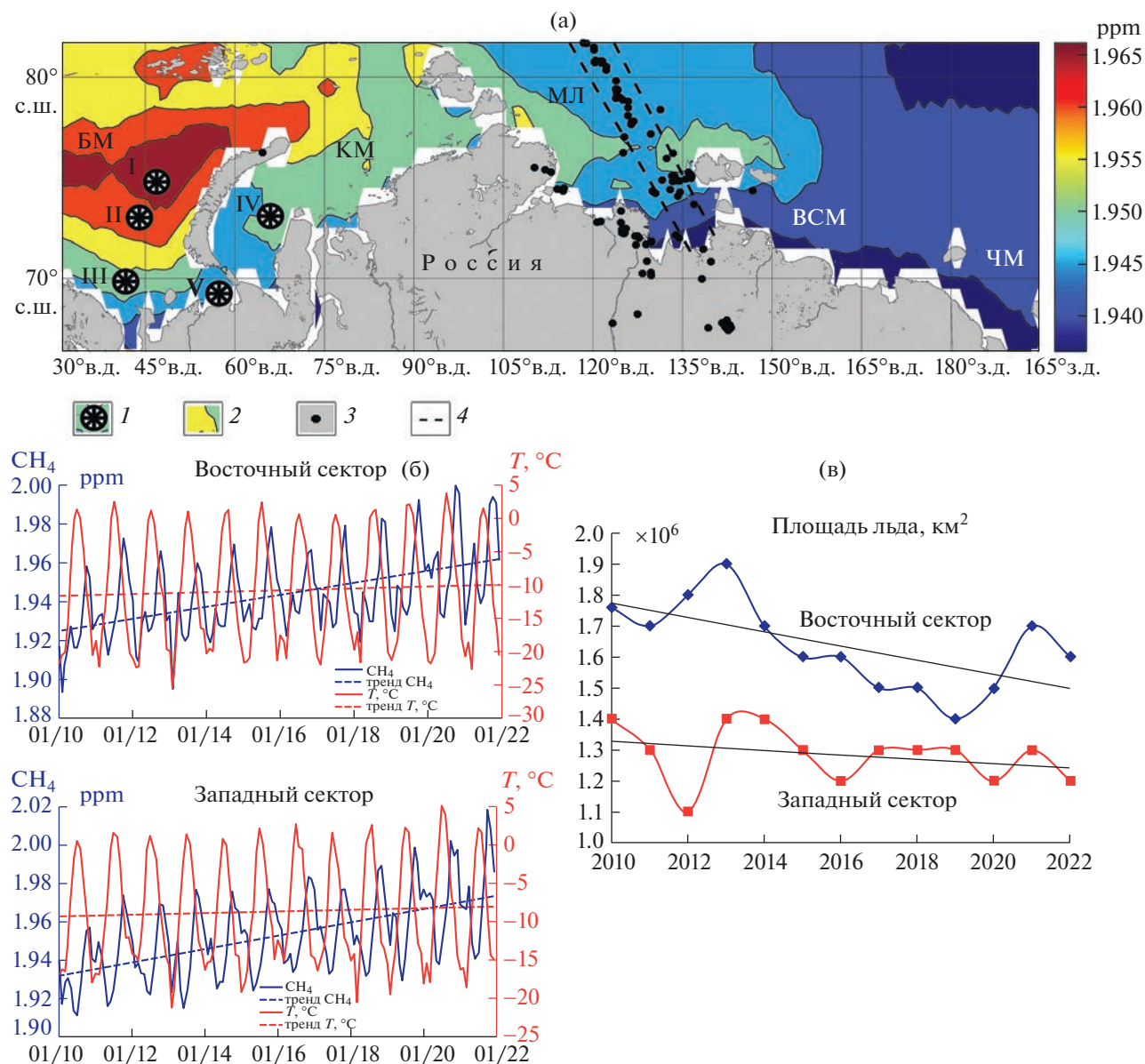


Рис. 1. а – распределение поля содержаний метана (среднегодовое содержание) в приземном слое атмосферы в 2010–2022 гг.; б – графики изменчивости содержания метана (CH₄) в ppm и температуры приземного слоя атмосферы (T, °C) в восточном и западном секторе (средние значения по регионам); в – диаграммы изменения площади льда (км²) в восточном и западном секторе [21]. 1 – месторождения (I – Лудловское, II – Штокмановское, III – Мурманское, IV – Русановское, V – Приразломное), 2 – метан, 3 – землетрясения [25], 4 – схематические границы полосы вдоль сейсмоактивной зоны в районе хребта Гаккеля. БМ – Баренцево море, КМ – Карское море, МЛ – море Лаптевых, ВСМ – Восточно-Сибирское море, ЧМ – Чукотское море.

кого и Ломоносово-Менделеевской флексуразломной зоны. В осадочных отложениях Предвосточносибирского осадочного бассейна и Северной структурной террасы установлены миграционные углеводородные газы с газогеохимическими показателями, характерными для газонефтяных и нефтяных залежей Ленского, Верхнебуреинского, Анадырского, Сахалинского и др. нефтегазоносных бассейнов Востока России [15, 16]. Указанные геоструктуры характеризуются

наличием геологических признаков нефтегазоносности, в том числе большим объемом слабодислоцированных осадочных пород и присутствием в составе осадочных толщ, обогащенных Сорг, значительной глубиной погружения перспективных геоструктур (4–10 км), присутствием в осадочной толще природных резервуаров, состоящих из пород-коллекторов и перекрывающих их флюидоупоров, а также ловушек углеводородов, в которых возможно формирование за-

лежей нефти и газа. Вопросы дегазации этих структур в настоящее время недостаточно исследованы. Возможно, что в восточном секторе сохранность углеводородных залежей лучше, чем в западном. Об этом косвенно свидетельствуют и результаты литологических исследований авто-ров вдоль регионального профиля 5-АР [11]: при отборе гравитационной трубкой были обнаружены участки с тонкозернистыми пластичными отложениями чрезвычайно высокой плотности уже на интервалах до 200 см ниже поверхности дна. Разломная тектоника [5] более выражена в западном секторе (в соответствии с разделением западного и восточного секторов по зоне хребта Гаккеля), что, вероятно, и выражается в более интенсивной дегазации недр, контрастируя в этом отношении с восточным сектором.

Анализ приведенных факторов показывает, что распределение поля метана и уровень его содержания в атмосфере арктического шельфа Евразии, главным образом, определяют региональные особенности распространения углеводородных залежей и геологического строения нефтегазоносных бассейнов. Кроме нефтегазовых месторождений, важную роль в качестве источников метана на арктическом шельфе могут иметь угольные залежи [1], начальные ресурсы метана в которых на прилегающем континенте достигают огромных значений и на которые также влияют факторы глубинной дегазации [25]. Предварительно можно выделить западно-арктическую (западный сектор) и восточно-арктическую (восточный сектор) газогеохимические провинции, разделяемые сейсмо- и вулканически активной зоной проницаемости в районе хребта Гаккеля. Влияние антропогенных факторов и локальных активных участков дегазации дна существует, но, по всей видимости, имеет подчиненное значение при мелкомасштабных оценках по отношению к региональным особенностям геологического строения. Зона хребта Гаккеля и прилегающих участков дна в дегазации арктического шельфа занимает особое место, и изучать ее предлагается как отдельный объект.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья посвящается Российскому фонду фундаментальных исследований. Авторы выражают признательность рецензентам за конструктивные замечания.

Работа способствует достижению целей проекта ГЕОМИР в Десятилетии ООН наук об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030 гг.).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование поддержано грантом РФФИ № 20-55-12010 и выполнено в рамках тем государственного задания пер. №№ АААА-А19-119122090009-2 и 121021500055-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В., Никонов Р.А., Каргина Т.Н. Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3(39). С. 6–22. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-3-2-22>
2. Шахова Н.Е. Метан в морях Восточной Арктики. Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Москва, 2010. 213 с.
3. Dmitrieva D.M., Romasheva N.V. Sustainable Development of Oil and Gas Potential of The Arctic And Its Shelf Zone: The Role of Innovations Journal of Marine // Science and Engineering. 2020. № 8. P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/jmse8121003>
4. Romasheva N.V., Dmitrieva D.M. Energy Resources Exploitation in the Russian Arctic: Challenges and Prospects for the Sustainable Development of the Ecosystem // Energies. 2021. № 14(24). P. 1–31. <https://doi.org/10.3390/en14248300>
5. Шельфовые осадочные бассейны Российской Арктики: геология, геоэкология, минерально-сырьевой потенциал / под ред. д-ра техн. наук Г.С. Казанина; АО “МАГЭ”. Мурманск; СПб.: “Реноме”, 2020. 544 с.
6. <https://airs.jpl.nasa.gov/>
7. Susskind J., Blaisdell J.M., Iredell L. Improved methodology for surface and atmospheric soundings, error estimates, and quality control procedures: the atmospheric infrared sounder science team version-6 retrieval algorithm // Journal of Applied Remote Sensing. 2014. Т. 8. №. 1. P. 084994–084994.
8. Найдина О.Д. Природные условия северо-восточного региона моря Лаптевых в раннем послеледниковье // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2013. Т. 21. № 4. С. 124–136.
9. Овсепян Я.С., Талденкова Е.Е., Баух Х.А., Кандиано Е.С. Реконструкция событий позднего плейстоцена–голоцена на континентальном склоне моря Лаптевых по комплексам бентосных и планктонных фораминифер // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 964–112.
10. Koulakov I., Schlindwein V., Liu M., Gerya T., Jakovlev A., Ivanov A. Low-degree mantle melting controls the deep seismicity and explosive volcanism of the Gakkel Ridge. // Nat Commun. 2022. V. 13. № 1. P. 3122. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30797-4>
11. Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Дозорова К.А., Цуканов Н.В. Система разломов, контролирующих метановые сипы на шельфе моря Лаптевых // ДАН. 2019. Т. 486. № 3. С. 354–358. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863354-358>
12. Шакиров Р.Б., Обжиров А.И., Саломатин А.С., Макаров М.М. Новые данные о линеаментном контроле современных очагов метановой дегазации морей Восточной Азии // ДАН. 2017. Т. 477. № 3. С. 327–330.
13. Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. Газогеохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. 21. С. 231–243.

14. *Shakirov R.B., Mau S., Mishukova G.I., Obzhairov A.I., Shakirova M.V., Mishukova O.V.* The features of methane fluxes in the western and eastern Arctic: A review. Part I // *Geosystems of Transition Zones*. 2020. V. 4. № 1. P. 004–025.
<https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.004-025>
15. *Пономарева А.Л., Полоник Н.С., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Григорьев Р.А., Шмале О., Мау С.* Взаимосвязь распределения метана и психро-, мезо- и термофильных углеводородокисляющих микроорганизмов в донных отложениях в Карском море // *Геосистемы переходных зон*. 2021. Т. 5. № 4. С. 389–398.
<https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.389-393.394-398>
16. *Obzhairov A.I., Polonik N.S., Ponomareva A.L., Vereshchagina O.V., Telegin Yu.A., Syrbu N.S., Flint M.V.* Distribution Patterns of Methane, Hydrogen, and Helium in the Water Column of the Kara Sea // *Oceanology*. 2021. № 61. P. 881–891.
<https://doi.org/10.1134/S000143702106028X>
17. *Yatsuk A., Gresov A., Snyder G.T.* Hydrocarbon Gases in Seafloor Sediments of the Edge Shelf Zone of the East Siberian Sea and Adjacent Part of the Arctic Ocean // *Frontiers in Earth Science*. 2022. № 10. P. 856496.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.856496>
18. *Гресов А.И., Яцук А.В., Аксентов К.И., Саттарова В.В., Швалов Д.А., Зарубина Н.В.* Геохимические исследования плейстоценовых отложений окраинно-шельфовой зоны Восточно-Сибирского моря и Северного Ледовитого океана // *Геохимия*. 2022. Т. 67. № 10. С. 961–977.
<https://doi.org/10.31857/S001675252210003X>
19. *Шакиров Р.Б., Обжиров А.И., Саломатин А.С., Макаров М.М.* Новые данные о линейamentном контроле современных очагов метановой дегазации морей Восточной Азии // *ДАН*. 2017. Т. 477. № 3. С. 327–330.
20. *Юрганов Л.Н., Лейфер А., Вадаккенулиямбатта С.* Признаки ускорения возрастания концентрации метана в атмосфере после 2014 года: спутниковые данные для Арктики // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 5. С. 248–258.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-248-258>
21. *Fetterer F., Knowles K., Meier W., Savoie M., Windnagel A.K.* 2017, updated daily. Sea Ice Index, Version 3. Monthly Data by Year. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center.
<https://doi.org/10.7265/N5K072F8>
22. Sea ice analysis spreadsheets overview nsidc.org/sites/nsidc.org/files/files/data/noaa/g02135/Sea-Ice-Analysis-Spreadsheets-Overview.pdf
23. *Cavalieri D.J., Parkinson C.L.* Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *The Cryosphere*. 2012. V. 6. № 4. P. 881–889.
24. *Parkinson C.L., Comiso J.C.* On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm // *Geophys. Res. Lett.* 2013. № 40. P. 1356–1361.
<https://doi.org/10.1002/grl.50349>
25. Earthquake Catalog.
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
26. *Никитин Б.А., Дзюбло А.Д.* Перспективы освоения газовых ресурсов шельфа арктических морей России // *Вести газовой науки*. 2017. № 4 (32). С. 15–24.
27. *Гресов А.И.* Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока и перспективы ее промышленного освоения. Том II. Углеметановые бассейны Республики Саха (Якутия) и Северо-Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2012. 468 с.

NEW DATA ON THE PATTERNS OF METHANE DISTRIBUTION OVER THE ARCTIC SHELF OF EURASIA

R. B. Shakirov^{a, #}, E. S. Khazanova^a, and I. E. Steepochkin^a

^a *V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

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

Presented by Academician of the RAS I.I. Mokhov December 30, 2022

New results of the analysis of methane distribution in the troposphere over the Arctic shelf of Eurasia using satellite methods are presented. The main trends in the variability of methane content (increase), temperature (fluctuations without a pronounced trend) and ice cover for the period 2010–2022 are shown. Conclusions are made about the difference in the distributions of atmospheric methane over the western and eastern Eurasian Arctic, divided by the zone of the seismically active lineament of the Gakkel Ridge. It is shown that hydrometeorological parameters, including temperature and ice formation, are probably not the main factors for increasing the methane content in the atmosphere of the Eurasian Arctic shelf. The increase in methane content is associated with regional factors that are widespread over vast areas, such are, first of all, geological structures: oil and gas basins and tectonic fragmentation of the lithosphere, which forms permeability zones.

Keywords: methane, ice, temperature, Arctic shelf, oil and gas basins, tectonics, trends