

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-221-226



## О ВОЗРАСТЕ ОЧАГА РАЗГРУЗКИ ГАЗА В ЧУКОТСКОМ МОРЕ

✉ Логвина Е.А.<sup>1</sup>, Крылов А.А.<sup>1,2</sup>, Семенов П.Б.<sup>1</sup>, Зыков Е.А.<sup>1</sup>, Урванцев Д.М.<sup>1</sup>, Максимов Ф.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт Наук о Земле, СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

✉ E.Logvina@vniio.ru

В работе представлены результаты радиоуглеродного датирования образцов икаита, отобранных в отложениях очага разгрузки газа в Чукотском море. На основании собственной методики проведена коррекция возрастных датировок и их верификация. Результаты свидетельствуют о том, что очаг разгрузки газа, где были обнаружены кристаллы икаита, существует в Чукотском море как минимум 8 тыс. лет.

Ключевые слова: икаит, радиоуглерод, изотопы углерода, Чукотское море

**Введение.** Икаит (гексагидрат кальция) - удивительный эфемерный аутигенный минерал, который формируется в современных морских обстановках при специфических гидрохимических условиях. Минерал обязан своим названием фьорду Ика (Гренландия), где он был обнаружен в составе карбонатно-ледяных столбов [Dahl, Buchardt, 2006]. В осадках природный икаит встречается в виде бело-желтых льдоподобных кристаллов. Гексагидрат кальция ( $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) кристаллизуется в моноклинной системе с пространственной группой  $C2/c$  и состоит из пары ионов ( $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ ), изолированных друг от друга молекулой воды (рис. 1а).

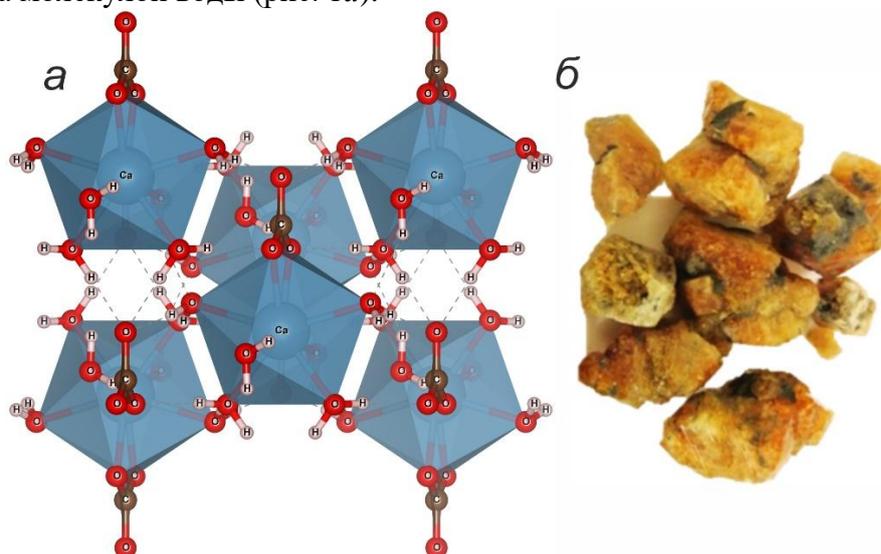


Рис. 1. (а) Кристаллическая структура икаита и его (б) образцы из отложений Чукотского моря.

Проявления аутигенной минерализации, связанной с разгрузкой УВ флюидов, зафиксированы во многих районах Мирового океана и на континенте [Greinert et al., 2004; Lein, 2004 и др.]. В арктических морях такие находки достаточно редки, так как здесь условия для их формирования весьма неблагоприятны. Это связано с низкими температурами и недонасыщенностью поровых вод относительно карбонатных фаз [Крылов и др., 2023]. Тем не менее, такие образования встречаются все чаще и не всегда они приурочены к очагам разгрузки газа. Редкие находки аутигенных карбонатов представлены Mg-кальцитом, арагонитом и икаитом [Kodina et al., 2003; Крылов и др., 2015; Kravchishina et al., 2017; Ruban et al., 2022; Rogov et al., 2023; Логвина и др., 2023; Kaminskii et al., 2023; Kaminsky et al., 2024], а также сидеритами и родохрозитами [Logvina

*et al.*, 2018]. Аутигенные арагониты обнаружены во вмещающих перидотитах в северной части хребта Гаккеля, где их кристаллизация объясняется гидротермальными процессами [Eickmann *et al.*, 2009].

В акватории Чукотского моря Mg-кальцитовые аутигенные карбонаты с аномально низкими значениями  $\delta^{13}\text{C}$  ( $-63,6\dots-55,6$  ‰), указывающими на их приуроченность к разгрузке УВ флюидов, были обнаружены в 2009 году [Kolesnik *et al.*, 2014].

Икаит, рассмотренный в работе, был обнаружен в отложениях очага разгрузки газа в Чукотском море на поддонной глубине 2,0-2,3 м. Крупные матовые кристаллы икаита желтовато-коричневого цвета достигали 10 см (рис. 1б).

**Материалы и методы.** Икаит в осадках Чукотского моря был обнаружен в 2014 г [Крылов *и др.*, 2015]. Изотопный состав  $\delta^{13}\text{C}$  икаита определялся с помощью масс-спектрометра Finnigan Delta plus XP. В качестве стандартов использовались эталоны известняков NBS-18. Ошибка измерений в отдельных образцах ( $1\sigma$ ) в 80% случаев находилась в пределах 0,1-0,2‰ для углерода и 0,1-0,4‰ для кислорода. Изотопные данные выражены в ‰ и приведены в шкале VPDB.

Определение возраста по стандартной методике [Арсланов, 1987] осуществлялось в соответствии с известным выражением:

$$t = 1/\lambda \ln (A_{\text{ст}}/A_{\text{обр}}) \quad (4)$$

где  $A$  – скорректированные значения активности радиоуглерода (число распадов в 1 мин. в 1 г углерода), соответственно, в современном стандарте и в образце и  $\lambda$  – постоянная распада  $^{14}\text{C}$ .

Расчет долей углерода и коррекция радиоуглеродного возраста проводились исходя из того, что исследуемый образец состоит из смеси углерода двух источников. В основу произведенных вычислений положен принцип, описанный в работе [Logvina *et al.*, 2012], где проводилась коррекция возраста карбонатных раковин, отобранных из отложений очага разгрузки метана в Охотском море.

**Результаты и обсуждение.** Возможность диагностики «углеводородного» прошлого углерода из карбонатов по его изотопному составу представляет немалый интерес в разных сферах геологической науки и практики, включая поиски нефтегазовых месторождений. В этой связи определение периода активности очагов разгрузки газа, важно для прикладной науки. Комплексное изучение изотопного состава углерода и данных радиоуглеродного датирования аутигенных карбонатов способствует решению этой задачи.

Изотопный состав углерода в обычных морских карбонатах колеблется в пределах  $\pm 3\%$  [Галимов, 1968; Hoefs, 2018 *и др.*]. Считается, что такой состав формируется при ассимиляции атмосферного углекислого газа с  $\delta^{13}\text{C} = -7\%$  [Hoefs, 2018]. Аутигенные карбонаты, которые образуются в местах выхода метансодержащих флюидов, обычно, но не всегда, имеют резко отрицательные значения  $\delta^{13}\text{C}$ . Это связано с высоким содержанием изотопа  $\text{C}^{13}$  в углеводородах, которые являются предшественниками углекислого газа, из которого формируются карбонаты. Аналогичным образом наследуется углерод-14. Радиоуглерод (или  $^{14}\text{C}$ ), непрерывно генерируется под воздействием космического излучения медленных нейтронов по следующей реакции:



Период полураспада составляет  $5730 \pm 40$  лет. Это приводит к стационарному состоянию активности  $^{14}\text{C}$  в атмосфере. После растворения атмосферной  $\text{CO}_2$  в поверхностных водах радиоуглерод может входить в состав аутигенных карбонатных образований, в том числе и раковин. С этого момента его содержание в системе обусловлено только радиоактивным распадом и может быть использовано для определения возраста по уравнению:

$$t \text{ (годы)} = 19,035 \cdot 10^3 \log (A_0/A), \quad (3)$$

где  $A_0$  и  $A$  — соответственно начальная (стационарное состояние) и измеренная активность [Reeder, 1983].

Представляется, что, определив количество углерода, унаследованного из метана, можно скорректировать радиоуглеродный возраст образца.

Радиоуглеродное датирование икаита проводилось по карбонатной фракции. Измеренный возраст составил  $8,96 \pm 0,12$  тыс. лет, а калиброванный:  $10,04 \pm 0,18$  тыс. лет. Изотопный состав углерода икаита после полной трансформации в кальцит составил  $-31,2\%$  и  $-27,9\%$  (VPDB) [Крылов и др., 2015].

Определение долей углерода DIC (*англ.* dissolved organic carbon), из которых мог формироваться икаит, проводилось с учетом процессов: сульфат-обусловленного окисления органического вещества в диагенезе, анаэробного/аэробного окисления метана и с учетом вклада DIC придонной морской воды. Кроме того, учитывалось фракционирование углерода происходящее в процессе окисления метана [Whiticar, 1999] и органического вещества [Blair and Aller, 1995] и, при формировании икаита (так же как для кальцита [Deines et al., 1974]).

В расчетах использовались измеренные в икаит-содержащем керне значения  $\delta^{13}\text{C}$  метана:  $-91,3$  и  $-82,7\%$  VPDB, и  $\delta^{13}\text{C}$  органического вещества  $-23\%$  (VPDB). Рассчитанные доли углерода метана (для двух приведенных значений) к  $C_{\text{ов}}$  составили  $12(7):88(93)$  и  $14(8):86(92)$  соответственно. После введения поправок измеренный радиоуглеродный возраст составил:  $7,44 \pm 0,12$  тыс. лет, а калиброванный:  $8,41 \pm 0,18$  тыс. лет.

Изохронно-корректированный  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  возраст тех же образцов составляет  $8,2 \pm 1,1$  тыс. лет. Полученные значения  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  и корректированного  $^{14}\text{C}$  возраста в целом показали хорошую сходимость. Разработанный подход коррекции радиоуглеродного возраста аутигенных карбонатов апробирован.

**Заключение.** Полученные результаты свидетельствуют о том, что очаг разгрузки газа в отложениях Чукотского моря, где были обнаружены кристаллы икаита может существовать как минимум 8 тыс. лет.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-27-00457.

## ЛИТЕРАТУРА

- Арсланов Х.А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология / Л. Изд-во ЛГУ. 1987. 300 с.
- Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода / М. Недра. 1968. 226 с.
- Крылов А.А., Логвина Е.А., Зыков Е.А., Урванцев Д.М., Семенов П.Б., Малышев С.А., Гусев Е.А. Механизмы формирования икаита в донных отложениях Арктического шельфа // Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. I. – М.: ИО РАН. 2023. С. 92-95.
- Крылов А.А., Логвина Е.А., Матвеева Т.В., Прасолов Э.М., Сатсга В.Ф., Демидова А.Л., Радченко М.С. Икаит ( $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) в донных отложениях моря Лаптевых и роль анаэробного окисления метана в процессе его формирования // Записки РМО, 2015. (4), С. 61-75.
- Крылов А.А., Семенов П.Б., Музафарова Л.Э. Кржижановская М.Г., Константинова Н.П., Малышев С.А. Икаит как маркер разгрузки углеводородов в Чукотском море // Геология морей и океанов: Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Москва, 16–20 ноября 2015 года. Том 4. Москва: Издательство ГЕОС, 2015. С. 41-42.
- Логвина Е.А., Крылов А.А., Гусев Е.А., Зыков Е.А., Урванцев Д.М., Семенов П.Б., Яржембовский Я.Д., Малышев С.А. Икаит в отложениях Карского моря: находки в рейсе НИС «Фритъоф Нансен» // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2023. Выпуск 10, с. 181-191. doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-181-191

Blair N.E., Aller R.C. Anaerobic methane oxidation on the Amazon shelf // *Geochim Cosmochim Acta*, 1995. Vol. 59. P. 3707-3715. doi: 10.1016/0016-7037(95)00277-7

Dahl K., Buchardt B. Monohydrocalcite in the Arctic Ikka Fjord, SW Greenland: First Reported Marine Occurrence // *Journal of Sedimentary Research*. 2006. Vol. 76. Is. 3. P. 460–471. doi: 10.2110/jsr.2006.035

Deines P., Langmuir, D. and Harmon, R.S. Stable carbon isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate ground waters // *Geochim Cosmochim Acta*. 1974. Vol. 38. Is. 7. P. 1147-1164. doi: 10.1016/0016-7037(74)90010-6

Eickmann B., Bach W., Rosner M., and Peckmann J. Geochemical constraints on the modes of carbonate precipitation in peridotites from the Logatchev hydrothermal vent field and Gakkel Ridge // *Chemical Geology*. 2009. Vol. 268. Is. 1-2. P. 97–106. doi: 10.1016/j.chemgeo.2009.08.002

Greinert J., Derkachev A. Glendonites and methane-derived Mg-calcites in the Sea of Okhotsk, Eastern Siberia: implications of a venting-related ikaite/glendonite formation // *Marine Geology*. 2004. Vol. 204. Is. 1. P. 129-144. doi: 10.1016/S0025-3227(03)00354-2

Hoefs J. *Stable isotope Geochemistry* / 8<sup>th</sup> ed. Springer. 2018. XII. 288 p.

Kaminskii D.V., Chamov N.P., Krylov A.A., Neevin I.A., Buyakaite M.I., Degtyarev K.E., Dubenskii A.S., Kaminskii V.D., Logvina E.A., Okina O.I., Semenov P.B., Kil A.O., Petrov O.V., Pokrovskii B.G., Tolmacheva T.Yu. The first discovery of authigenic carbonates on the Laptev Sea flank of Gakkel ridge (Arctic Ocean) // *Doklady Earth Sciences*. 2023. Vol. 512. No. 2. P. 963-967. doi: 10.1134/S1028334X23601451

Kaminsky D.V., Chamov N.P., Zhilin D.M., Krylov A.A., Neevin I.A., Bujakaite M.I., Degtyarev K.E., Dubensky A.S., Kaminsky V.D., Logvina E.A., Okina O.I., Semenov P.B., Kil A.O., Pokrovsky B.G., and Tolmacheva T.Yu. New Data on the Structure of the Laptev Sea Flank of the Gakkel Ridge (Arctic Ocean) // *Lithology and Mineral Resources*. 2024. Vol. 59. No. 6. P. 598–610. doi: 10.1134/S0024490224700779

Kodina L.A., Tokarev V.G., Vlasova L.N., Korobeinik G.S., Contribution of biogenic methane to ikaite formation in the Kara Sea: Evidence from the stable carbon isotope geochemistry, in Siberian River run-off in the Kara Sea // *Proceedings in Marine Sciences*. 2003. Vol. 6. P. 349–374. doi: 10.1016/S1568-2692(03)80045-1

Kolesnik O.N., Kolesnik A.N., and Pokrovsky B.G. A find of an authigenic methane-derived carbonate in the Chukchi Sea // *Doklady Earth Sciences*. 2014. Vol. 458. No. 3. P. 1168–1170. doi: 10.1134/S1028334X1409030X

Kravchishina M.D., Lein A.Yu., Savvichev A.S. et al. Authigenic Mg-calcite at a cold methane seep site in the Laptev Sea // *Oceanology*. 2017. Vol. 57. No. 1. P. 174–191. doi: 10.1134/S0001437017010064

Lein A.Y. Authigenic Carbonate Formation in the Ocean // *Lithology and Mineral Resources*. 2004. Vol. 39. P. 1–30 (2004). doi: 10.1023/B:LIMI.0000010767.52720.8f

Logvina E.A., Prasolov E.M., Arslanov K.A., Matveeva T.V., Chernov S.B. Correction of the measured radiocarbon age of carbonates from the discharge sites of hydrocarbon fluids // *Geochem. Int.* 2012. Vol. 50. P. 958–963. doi: 10.1134/S0016702912110079

Logvina E., Krylov A., Taldenkova E., Blinova V., Sapega V., Novikhin A., Kassens H., Bauch H.A. Mechanisms of Late Pleistocene authigenic Fe–Mn-carbonate formation at the Laptev Sea continental slope (Siberian Arctic) // *Arktos*. 2018. Vol. 4. Is. 2. doi: 10.1007/s41063-018-0036-0

Reeder R.J. *Carbonates: Mineralogy and Chemistry*, Berlin, Boston: De Gruyter, 1983. doi: 10.1515/9781501508134

Rogov M., Ershova V., Gaina C., Vereshchagin O., Vasileva K., Mikhailova K., Krylov A. Glendonites throughout the Phanerozoic // *Earth-Science Reviews*. 2023. Vol. 241. 104430. doi: 10.1016/j.earscirev.2023.104430

Ruban A., Rudmin M., Mazurov A. et al. Cold-seep carbonates of the Laptev Sea continental slope: constraints from fluid sources and environment of formation // *Chemical Geology*. 2022. Vol. 610. P. 1–13. doi: 10.1016/j.chemgeo.2022.121103

Whiticar M.J., Suess E. The Cold Carbonate Connection Between Mono Lake, California and the Bransfield Strait. Antarctica // *Aqu. Geochem.* 1998. Vol. 4. P. 429–454. doi: 10.1023/A:1009696617671

## ABOUT THE AGE OF THE METHANE SEEP IN THE CHUKCHI SEA

Logvina E.A.<sup>1</sup>, Krylov A.A.<sup>1,2</sup>, Semenov P.B.<sup>1</sup>, Zykov E.A.<sup>1</sup>, Urvantsev D.M.<sup>1</sup>, Maksimov F.E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>VNIOkeangeologia, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

The paper presents the results of radiocarbon dating of ikaite collected in the sediments of the gas seep in the Chukchi Sea. Based on our own methodology, we corrected the age datings and verified the obtained data. The results indicate that the ikaite-containing gas seep in the Chukchi Sea has existed for at least 8 000 years.

Keywords: *ikaite, radiocarbon age, carbon isotopes, Chukchi Sea*

### REFERENCES:

Arslanov H.A. Radiocarbon: geochemistry and geochronology. L. Publishing house of Leningrad State University. 1987. 300 p. (in Russian).

Galimov E.M. Geochemistry of stable carbon isotopes. M. Nedra. 1968. 226 p. (in Russian).

Krylov A.A., Logvina E.A., Zykov E.A., Urvantsev D.M., Semenov P.B., Malyshev S.A., Gusev E.A. Mechanisms of ikaite formation in bottom sediments of the Arctic shelf // *Geology of seas and oceans: Proceedings of the XXV International Scientific Conference (School) on Marine Geology*. T. I. - M.: IO RAS. 2023. P. 92-95. (in Russian).

Krylov A.A., Logvina E.A., Matveeva T.V., Prasolov E.M., Sapega V.F., Demidova A.L., Radchenko M.S. Ikaite (CaCO<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O) in bottom sediments of the Laptev Sea and the role of anaerobic oxidation of methane in the process of its formation // *Notes of the RMO*, 2015. №4, P. 61-75. (in Russian).

Krylov A.A., Semenov P.B., Muzafarova L.E., Krzhizhanovskaya M.G., Konstantinova N.P., Malyshev S.A. Ikaite as a marker of hydrocarbon discharge in the Chukchi Sea // *Geology of the seas and oceans: Proceedings of the XXI International Scientific Conference (School) on Marine Geology*, Moscow, November 16–20, 2015. Vol. 4. Moscow: GEOS Publishing House, 2015. P. 41-42. (in Russian).

Logvina E.A., Krylov A.A., Gusev E.A., Zykov E.A., Urvantsev D.M., Semenov P.B., Yarzhembovsky Ya.D., Malyshev S.A. Ikaite In The Kara Sea Sediments: Findings On The R/V Fritjof Nansen Cruise // *Relief and Quaternary formations of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2023. Is. 10, P. 181-191. doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-181-191

Blair N.E., Aller R.C. Anaerobic methane oxidation on the Amazon shelf // *Geochim Cosmochim Acta*, 1995. Vol. 59. P. 3707-3715. doi: 10.1016/0016-7037(95)00277-7

Dahl K., Buchardt B. Monohydrocalcite in the Arctic Ikka Fjord, SW Greenland: First Reported Marine Occurrence // *Journal of Sedimentary Research*. 2006. Vol. 76. Is. 3. P. 460–471. doi: 10.2110/jsr.2006.035

Deines P., Langmuir, D. and Harmon, R.S. Stable carbon isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate ground waters // *Geochim Cosmochim Acta*. 1974. Vol. 38. Is. 7. P. 1147-1164. doi: 10.1016/0016-7037(74)90010-6

Eickmann B., Bach W., Rosner M., and Peckmann J. Geochemical constraints on the modes of carbonate precipitation in peridotites from the Logatchev hydrothermal vent field and Gakkel Ridge // *Chemical Geology*. 2009. Vol. 268. Is. 1-2. P. 97–106. doi: 10.1016/j.chemgeo.2009.08.002

Greinert J., Derkachev A. Glendonites and methane-derived Mg-calcites in the Sea of Okhotsk, Eastern Siberia: implications of a venting-related ikaite/glendonite formation // *Marine Geology*. 2004. Vol. 204. Is. 1. P. 129-144. doi: 10.1016/S0025-3227(03)00354-2

Hoefs J. Stable isotope Geochemistry / 8<sup>th</sup> ed. Springer. 2018. XII. 288 p.

Kaminskii D.V., Chamov N.P., Krylov A.A., Neevin I.A., Buyakaite M.I., Degtyarev K.E., Dubenskii A.S., Kaminskii V.D., Logvina E.A., Okina O.I., Semenov P.B., Kil A.O., Petrov O.V., Pokrovskii B.G.,

*Tolmacheva T.Yu.* The first discovery of authigenic carbonates on the Laptev Sea flank of Gakkel ridge (Arctic Ocean) // *Doklady Earth Sciences*. 2023. Vol. 512. No. 2. P. 963-967. doi: 10.1134/S1028334X23601451

*Kaminsky D.V., Chamov N.P., Zhilin D.M., Krylov A.A., Neevin I.A., Bujakaite M.I., Degtyarev K.E., Dubensky A.S., Kaminsky V.D., Logvina E.A., Okina O.I., Semenov P.B., Kil A.O., Pokrovsky B.G., and Tolmacheva T.Yu.* New Data on the Structure of the Laptev Sea Flank of the Gakkel Ridge (Arctic Ocean) // *Lithology and Mineral Resources*. 2024. Vol. 59. No. 6. P. 598-610. doi: 10.1134/S0024490224700779

*Kodina L.A., Tokarev V.G., Vlasova L.N., Korobeinik G.S.*, Contribution of biogenic methane to ikaite formation in the Kara Sea: Evidence from the stable carbon isotope geochemistry, in Siberian River run-off in the Kara Sea // *Proceedings in Marine Sciences*. 2003. Vol. 6. P. 349-374. doi: 10.1016/S1568-2692(03)80045-1

*Kolesnik O.N., Kolesnik A.N., and Pokrovsky B.G.* A find of an authigenic methane-derived carbonate in the Chukchi Sea // *Doklady Earth Sciences*. 2014. Vol. 458. No. 3. P. 1168-1170. doi: 10.1134/S1028334X1409030X

*Kravchishina M.D., Lein A.Yu., Savvichev A.S. et al.* Authigenic Mg-calcite at a cold methane seep site in the Laptev Sea // *Oceanology*. 2017. Vol. 57. No. 1. P. 174-191. doi: 10.1134/S0001437017010064

*Lein A.Y.* Authigenic Carbonate Formation in the Ocean // *Lithology and Mineral Resources*. 2004. Vol. 39. P. 1-30 (2004). doi: 10.1023/B:LIMI.0000010767.52720.8f

*Logvina E.A., Prasolov E.M., Arslanov K.A., Matveeva T.V., Chernov S.B.* Correction of the measured radiocarbon age of carbonates from the discharge sites of hydrocarbon fluids // *Geochem. Int.* 2012. Vol. 50. P. 958-963. doi: 10.1134/S0016702912110079

*Logvina E., Krylov A., Taldenkova E., Blinova V., Sapega V., Novikhin A., Kassens H., Bauch H.A.* Mechanisms of Late Pleistocene authigenic Fe-Mn-carbonate formation at the Laptev Sea continental slope (Siberian Arctic) // *Arktos*. 2018. Vol. 4. Is. 2. doi: 10.1007/s41063-018-0036-0

*Reeder R.J.* Carbonates: Mineralogy and Chemistry, Berlin, Boston: De Gruyter, 1983. doi: 10.1515/9781501508134

*Rogov M., Ershova V., Gaina C., Vereshchagin O., Vasileva K., Mikhailova K., Krylov A.* Glendonites throughout the Phanerozoic // *Earth-Science Reviews*. 2023. Vol. 241. 104430. doi: 10.1016/j.earscirev.2023.104430

*Ruban A., Rudmin M., Mazurov A. et al.* Cold-seep carbonates of the Laptev Sea continental slope: constraints from fluid sources and environment of formation // *Chemical Geology*. 2022. Vol. 610. P. 1-13. doi: 10.1016/j.chemgeo.2022.121103

*Whiticar M.J., Suess E.* The Cold Carbonate Connection Between Mono Lake, California and the Bransfield Strait, Antarctica // *Aqu. Geochem.* 1998. Vol. 4. P. 429-454. doi: 10.1023/A:1009696617671