

УДК 550.834.05

## ПРОЯВЛЕНИЕ ГАЗА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НА СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ РАЗРЕЗАХ ОЗЕРА БОЛЬШОЕ ЯРОВОЕ

*П.С. Крылов, Д.К. Нургалиев, П.Г. Ясонов*

### Аннотация

Детальные сейсмоакустические работы проводились в южной части озера Большое Яровое (Алтайский край) с целью картирования донных отложений и их особенностей, связанных с наличием в них газа. Результаты исследования показали, что в озере встречаются различные типы проявления газа, такие как покмарки, акустическая мутность, газовые факелы. Эти особенности, с одной стороны, мешают построению секвенс-стратиграфических моделей осадков для восстановления истории озера, с другой – они позволяют понять процессы образования и миграции газа в осадках, влияния этих процессов на формирование осадков богатых органикой, а также помогают распознавать следы этих процессов в древних отложениях. В этой связи показаны проблемы, возникающие при использовании таких осадков для палеогеофизических реконструкций. В статье отмечена важность исследования формирования метана в донных отложениях озер, так как он играет большую роль в изменении климата.

**Ключевые слова:** озеро Большое Яровое, сейсмоакустика, газ в донных отложениях, модель формирования осадков богатых органикой.

### Введение

При сейсмоакустическом исследовании донных отложений озер очень часто возникают проблемы, связанные с наличием газа в осадках. Это мешает построению секвенс-стратиграфической модели осадков, восстановлению истории развития бассейна, определению места установки различных сооружений на дно. Кроме того, остается открытым вопрос о влиянии газа на процессы формирования богатых органическим материалом отложений и на ареалы обитания специфических донных флоры и фауны. Без сомнения, миграция газа приводит к перемешиванию осадков, нарушению их текстуры, но остается непонятным механизм и характер таких процессов. С другой стороны, метан ( $\text{CH}_4$ ) играет огромную роль в изменении климата, и детальное изучение источников этого газа [1] является важной задачей. Накопление органического материала на дне озера является основой для микробиологической активности и производства большого количества метана [2].

Наличие загазованных отложений в неглубоководных условиях, влияние их на структуру дна было обнаружено сразу же после начала проведения акустических наблюдений на море [3]. Особенности проявления газа на акустических разрезах включают в себя затухание акустической энергии, акустическая мутность, покмарки, белые пятна, газовые факелы и т. д. [4].

В настоящей статье приведены предварительные результаты анализа данных сейсмоакустического метода высокого разрешения с точки зрения изучения особенностей, связанных с проявлением газа в донных отложениях озера Большое Яровое. Эти результаты представляют интерес для лимнологов и палеолимнологов для понимания процессов «жизни» озера. Практическое значение результатов данных исследований состоит в возможности их использования для понимания формирования особенностей рельефа морского дна и тонкой структуры донных отложений над крупными залежами нефти и газа на шельфе.

### Общая характеристика озера Большое Яровое

Объект исследования – озеро Большое Яровое ( $52^{\circ}52'11''$  с.ш.,  $78^{\circ}36'45''$  в.д.) – расположен в 6 км от города Славгород на территории Кулундинской впадины Алтайского края (рис. 1). Озеро находится на высоте 79 м над уровнем моря, длина озера около 11 км, ширина 8 км, вытянуто с севера-запада на юго-восток. Питание в озере снеговое. Соленость воды достигает 110 г/л. Северные и северо-восточные берега озера пологи, юго-западная часть изрезана оврагами.

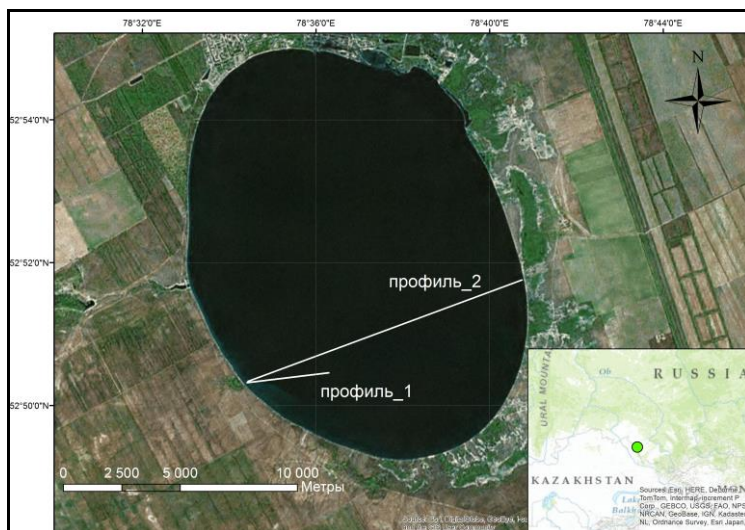


Рис. 1. Озеро Большое Яровое. Расположение сейсмоакустических профилей

Рельеф местности создан экзогенными процессами на фоне медленных и сравнительно слабодифференцированных новейших опусканий Кулундинской впадины в течение неогена и четвертичного периода. Исходный аккумулятивный рельеф был сформирован в начале и середине четвертичного периода, когда вследствие опускания происходило накопление мощной толщи аллювиальных и эоловых отложений краснодубровской свиты. В это время образовались обширные эолово-аллювиальные (лессовые) равнины, местами сохранившие свой первоначальный вид [5].

### Методика исследований

Сейсмоакустические исследования проводились с использованием специализированного комплекса, разработанного и изготовленного в Казанском федеральном университете. В состав комплекса входят: источник упругих волн, гидрофон, GPS-приемник, надувная лодка, электромотор, сейсмостанция, ноутбук, элементы электрического питания [6]. В качестве источника упругих колебаний использовался индукционный излучатель *Boomer*. Излучатель представляет собой забортное устройство-катамаран, которое буксируется на удалении 2 м от борта исследовательского катера. В качестве источника электрической энергии для высоковольтного преобразователя излучателя использовалась аккумуляторная батарея емкостью 160 А·ч, обеспечивая непрерывную работу излучателя в течение 5–6 ч. Созданная конструкция излучателя и его системы управления позволила получать электрическую энергию 90–144 Дж при величине накопительной емкости в 80 мкФ и напряжении 1.5–1.9 кВ. Минимальный период возбуждения импульса при этом составил 2 с. В используемой системе наблюдения непрерывного сейсмопрофилирования применялось одноканальное приемное устройство. GPS-приемник *GARMIN* использовался для координатной привязки профилей, пикетов возбуждения упругих колебаний, локации судна.

Исследования были проведены летом 2008 г. в южной части озера Большое Яровое.

### Результаты

Сейсмоакустические исследования проводились по двум профилям общей протяженностью 11 км. Сейсмоакустический профиль 2 (рис. 2) пересекает озеро практически диаметрально и дает полную картину характера распространения донных отложений и рельефа дна.

Предварительный сейсмостратиграфический анализ (рис. 2) позволяет выделить на временном разрезе несколько ключевых отражений (сверху вниз):

- современное дно (А) и группа отражений ниже этой поверхности – А1, А2, которые проявляются спорадически в разрезе с изменяющимся коэффициентом отражения.

- отражение В, которое достаточно четко проявляется на протяжении всего профиля 2, и залегающие ниже В1, В2.

- отражение С в левой части разреза по большей мере условное, так как мы практически не наблюдаем четкого отражения. Сигнал затухает, не проникая до коренных пород.

- отражение D в правой части разреза характерно для оползневого тела.

Выделенные границы, их геометрия и соотношения имеют важное значение для реконструкции истории озера, но это тема отдельной большой статьи.

Необходимо отметить, что большая часть временного разреза донных отложений озера искажена присутствием и миграцией газа, и это сильно мешает построению секвенс-стратиграфической модели отложений.

Особенности волновой картины (хаотичная форма записи, четко ограниченная по вертикали и прослеживаемая до больших глубин) позволяют выделить различные зоны газонасыщения осадков и образования покмарков.

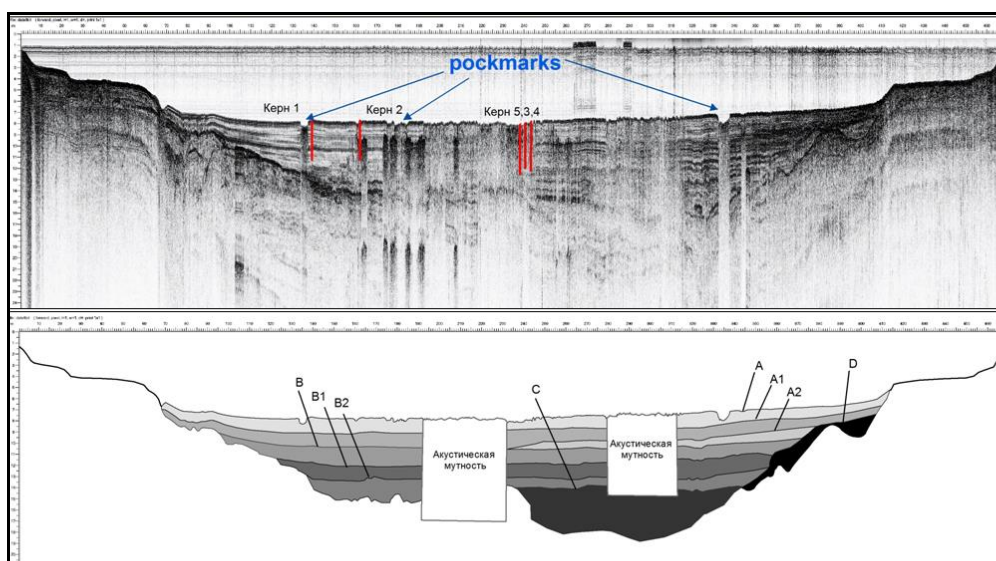


Рис. 2. Сейсмоакустический разрез 2. Отображение разреза с детектированием сигнала. На разрезе отмечены места отбора керновых колонок. Стрелками указаны покмарки (верхний рисунок). Предварительный сеймостратиграфический анализ (нижний рисунок) позволяет выделить 8 границ – этапов формирования донных отложений (A, A1, A2, B, B1, B2, C, D)

На сейсмоакустических разрезах покмарки обычно имеют характерную V- или U-образную форму на поверхности дна (рис. 2). Мягкие илистые осадки обладают идеальными характеристиками для образования покмарков. Такие кратерообразные понижения на поверхности дна образуются за счет подъема газа из толщи донных отложений в их поверхностную часть и дальнейшего выброса в водную толщу некоторого объема сильногазированных придонных осадков [3]. Непрерывность стратиграфической записи нарушается при образовании покмарка – ямы, сформированной за счет всплывания части придонных отложений, которая заполняется близлежащими осадками (зона перемешивания) и в конечном итоге выравнивается за счет более быстрого отложения осадков, возраст которых моложе. Таким образом, если покмарки формировались на протяжении всей истории озера, может оказаться так, что детальная корреляция даже близко расположенных колонок будет затруднена. Степень различия колонок зависит от скорости формирования покмарков и их размеров. В настоящей работе мы используем оригинальный термин *покмарки* (*rockmark*) [7], общепринятый в мире.

Необходимо отметить, что проявления газа прослеживаются только в областях, где мощность донных отложений превышает некоторую критическую величину, то есть их нет вблизи берега, где мощность осадков мала. На профиле 2 сейсмоакустические проявления газонасыщенности осадков наблюдаются от пикета 133 до пикета 337. Это свидетельствует в пользу того, что основная часть газа вырабатывается микроорганизмами в толще самих донных отложений.

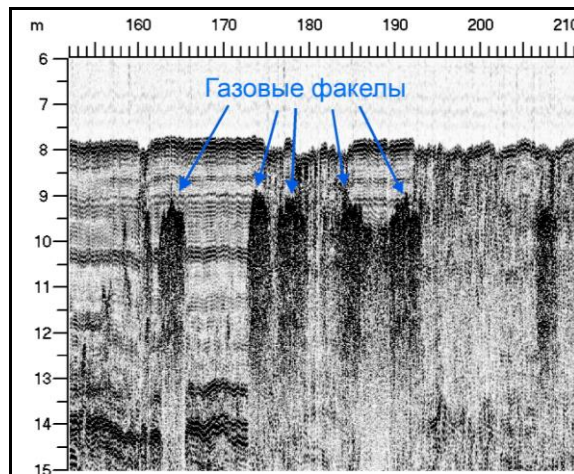


Рис. 3. Показаны газовые факелы в приповерхностных осадках. Начальная стадия образования покмарков

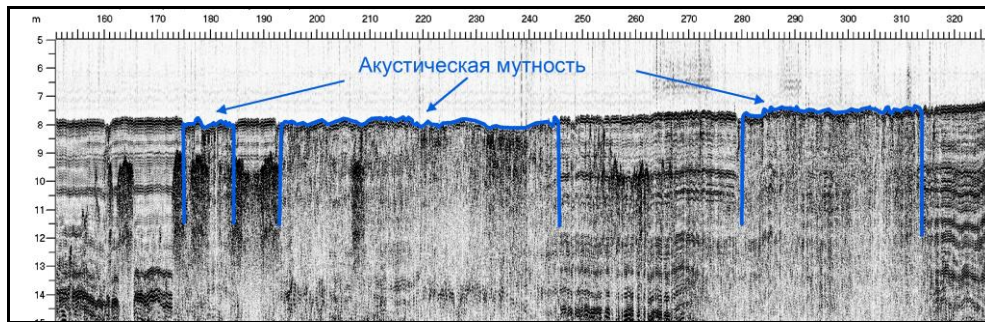


Рис. 4. Показаны области акустической мутности

Вероятно, в будущем покмарки будут образовываться в местах, под которыми сегодня наблюдаются вертикальные темные полосы – сильно газонасыщенные зоны, так называемые газовые факелы в приповерхностных осадках (рис. 3). Это нелинейные образования, внутри которых скопления газа привели к увеличению порового давления, в результате чего образовались микроразломы, что, в свою очередь, привело к еще большему притоку газа в эти зоны. По этим микроразломам газ прокладывает себе путь к поверхности дна, образуя вертикальные потоки газа, которые мы наблюдаем на некоторых участках временного разреза. Необходимо отметить, что почти все газовые факелы ограничиваются сверху – они заканчиваются на отражении A1. Можно предположить, что эта граница слабопроницаема и накопление газа происходит у ее подошвы. По мере увеличения порового давления газ прорывает себе путь к поверхности дна, что является начальной стадией образования покмарков.

На профиле на участках с 175 по 184, с 193 по 243 и с 280 по 314 пикет (рис. 4) структура отложений проявляется в виде акустической мутности, то есть в затухании акустической энергии в результате ее хаотического отражения от пузырьков газа. Дно озера над этими участками имеет волнистый вид. Такое дно могло образоваться вследствие выхода газа на поверхность, перемешива-

ния отложений и частичного отрыва отложений от дна озера и их всплывания на поверхность. В нижележащих отложениях также видны участки с волнистыми отражающими поверхностями, что свидетельствует о том, что выделения газа отмечаются на всем протяжении существования озера. Хотя можно отметить, что в настоящее время эти процессы значительно усилились.

### Обсуждение

Таким образом, по результатам визуального анализа сейсмоакустического разреза мы выделили несколько типов газонасыщенных зон.

1. Зоны наличия отдельных крупных покмарков на современном дне озера. Мы обнаружили несколько их типов – связанные с газовыми факелами (пикеты 159–161, 175–185) и не связанные с газовыми факелами явно (пикеты 134–137, 332–338).

2. Зоны наличия отдельных газовых факелов (пикеты 173–175, 163–165, 177–179, 184–186, 189–191, 207–209).

3. Зоны акустической мутности, которые с поверхности отмечаются неровным дном. Можно полагать, что это области многочисленных мелких покмарков. Такое проявление газа наиболее сильно мешает анализу и интерпретации сейсмоакустических данных для реконструкции истории озера. Возможно, что эта зона располагается в пределах тектонически активного разлома, где постоянно происходят подвижки и за счет этого газ проникает к поверхности.

Большое значение имеет предложенный механизм накопления осадков при формировании покмарков. Хотя в одномерном рассмотрении нарушения стратиграфической последовательности не происходит, а просто меняется средняя скорость накопления осадков, то в 2D- и 3D-варианте стратиграфическая корреляция сильно усложняется. Это приводит к существенным трудностям создания адекватных возрастных моделей и интерпретации палеобиологических и палеогеофизических данных.

Еще один вопрос, требующий обсуждения, – это наличие проявлений покмарков (например, пикеты 319–324 на глубине 12 м на рис. 2) на уровне различных отражающих поверхностей (поверхности дна в различные эпохи эволюции озера). Необходимо отметить, что газовая активность была не одинаковой в различные эпохи. Похоже, что сегодня мы наблюдаем ее наивысшую активность на всей поверхности дна озера.

### Заключение

В результате предварительного анализа сейсмоакустических данных, полученных на озере Большое Яровое, получены следующие результаты:

- выявлено 8 отражений, проявляющихся на всем протяжении профиля, которые характеризуют этапы в эволюции озера;
- выявлено несколько типов газопроявлений в донных отложениях – акустическая мутность, газовые факелы, покмарки;
- предложено несколько механизмов формирования газонасыщенных зон: зоны газовых факелов, вероятно, формируются за счет нелинейного протыкания осадков потоком газов, но они прекращаются при появлении плотных

непроницаемых осадков, в данном случае на поверхности слоя A1; зоны акустической мутности, возможно, формируются за счет тектонического фактора, наличия глубинного разлома и постоянной активности зоны, которые формируют своеобразный рельеф дна;

– обнаружение различных типов газонасыщенных осадков является признаком нарушения стратиграфической записи и должно учитываться при палеогеофизических построениях по колонкам донных отложений;

– предложенная модель осадконакопления отложений богатых органическим материалом может иметь большое значение для понимания особенностей формирования древних нефтематеринских толщ;

– исследования газа в донных отложениях могут иметь и практическое значение, так как запасов газа вполне достаточно для обеспечения локальных потребностей, и в будущем они могут разрабатываться, а сейсмоакустический метод может стать полезным инструментом при добыче этого топлива;

– полученные результаты могут найти применение в комплексных методиках обследования рельефа морского дна при поисках нефтяных и газовых залежей на морском шельфе.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, за счет субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, а также при частичной поддержке РФФИ (проект № 14-05-00785а).

#### Литература

1. *Gülzow W., Rehder G., Schneider v. Deimling J., Seifert T., Tóth Z.* One year of continuous measurements constraining methane emissions from the Baltic Sea to the atmosphere using a ship of opportunity // *Biogeosciences*. – 2013. – V. 10. – P. 81–99. doi: 10.5194/bg-10-81-2013.
2. *Jensen J.B., Bennike O.* Geological setting as background for methane distribution in Holocene mud deposits, Arhus Bay, Denmark // *Cont. Shelf Res.* – 2009. – V. 29, No 5. – P. 775–784. – doi: 10.1016/j.csr.2008.08.007.
3. *Hovland M., Judd A.G.* Seabed Pockmarks and Seepages. Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. – London: Graham & Trotman, 1988. – 305 p.
4. *Cukur D., Krastel S., Tomonaga Y., Çagatay M.N., Meydan A.F.* Seismic evidence of shallow gas from Lake Van, eastern Turkey // *Mar. Pet. Geol.* – 2013. – V. 48. – P. 341–353.
5. Геология СССР. Западная Сибирь (Алтайский край, Кемерово, Новосибирская, Омская, Томская области). Т. XIV. Ч. 1: Геологическое описание. / Гл. ред. А.В. Сидоренко. – М.: Недра, 1967. – 664 с.
6. *Нигмедзянова А.Р., Борисов А.С., Oberhaensli H.* Палеорекострукция истории развития Западно-Аральской котловины на основе сейсмоакустических данных // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент: Материалы Междунар. семинара (Казань, 3–7 нояб., 2004 г.). – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2004. – С. 343–347.

7. King L.H., McLean B. Pockmarks on the Scotian Shelf // Bull. Geol. Soc. Am. – 1970. – V. 81. – P. 3141–4148.
8. Cole D., Stewart S.A., Cartwright J.A. Giant irregular pockmark craters in the Paleogene of the Outer Moray Firth Basin, UK North Sea // Mar. Pet. Geol. – 2000. – V. 17, No 5. – P. 563–577. – doi: 10.1016/S0264-8172(00)00013-1.

Поступила в редакцию  
26.08.15

---

**Крылов Павел Сергеевич** – аспирант кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: [sprint@front.ru](mailto:sprint@front.ru)

**Нургалиев Данис Карлович** – доктор геолого-минералогических наук, профессор, проректор по научной деятельности, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: [Danis.Nourgaliev@kpfu.ru](mailto:Danis.Nourgaliev@kpfu.ru)

**Ясонов Павел Георгиевич** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ палеомагнетизма и магнетизма горных пород Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: [p.yasonov@mail.ru](mailto:p.yasonov@mail.ru)

\* \* \*

## DETECTION OF THE PRESENCE OF GAS IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE BOL'SHOE YAROVUE BASED ON THE SEISMOACOUSTIC PROFILES

*P.S. Krylov, D.K. Nurgaliev, P.G. Yasonov*

### Abstract

Detailed seismoacoustic investigation has been carried out in the southern part of Lake Bol'shoe Yarovoe (Altai Krai) to map the bottom sediments and features associated with the presence of gas. The obtained results demonstrate that various types of gas can be differentiated in the lake, such as pockmarks, acoustic turbidity, and gas flares. These features, on the one hand, prevent the reconstruction of sequence stratigraphic patterns and, on the other hand, contribute to understanding of the processes of gas formation and migration in the sediments, possible impacts of these processes on the formation of sediments enriched in the organic matter, as well as help to recognize these processes in the ancient sediments. In this regard, the problems arising from the use of such sediments for paleogeophysical reconstructions have been shown. The paper points out the importance of studying the formation of methane in the sediments of lakes, because it plays an important role in the climate change.

**Keywords:** Lake Bol'shoe Yarovoe, seismic acoustics, gas in the bottom sediments, model of the formation of sediments enriched in the organic matter.

### References

1. Gülzow W., Rehder G., Schneider v. Deimling J., Seifert T., Tóth Z. One year of continuous measurements constraining methane emissions from the Baltic Sea to the atmosphere using a ship of opportunity. *Biogeosciences*, 2013, vol. 10, pp. 81–99. doi: 10.5194/bg-10-81-2013.
2. Jensen J.B., Bennike O. Geological setting as background for methane distribution in Holocene mud deposits, Arhus Bay, Denmark. *Cont. Shelf Res.*, 2009, vol. 29, no. 5, pp. 775–784. doi: 10.1016/j.csr.2008.08.007.
3. Hovland M., Judd A.G. Seabed Pockmarks and Seepages. Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. London: Graham & Trotman, 1988. 305 p.



4. Cukur D., Krastel S., Tomonaga Y., Çagatay M.N., Meydan A.F. Seismic evidence of shallow gas from Lake Van, eastern Turkey. *Mar. Pet. Geol.*, 2013, vol. 48, pp. 341–353.
5. Geology of the USSR. Western Siberia (Altai Krai, Kemerovo, Novosibirsk, Omsk, Tomsk Regions). Vol. XIV. P.1: Geological Description. Sidorenko A.V. (Ed.). Moscow, Nedra, 1967. 664 p. (In Russian)
6. Nigmatzyanova A.R., Borisov A.S., Oberhaensli H. Paleoreconstruction of the Development History of the West Aral Sea Kettle on the Basis of Acoustic Data. *Paleomagnetizm i magnetizm gornykh porod: teoriya, praktika, eksperiment: Materialy Mezhdunarodnogo seminar (Kazan', 3–7 noyab., 2004 g.)* [Paleomagnetism and Rock Magnetism: Theory, Practice, and Experiment: Mat. Int. Semin. (Kazan, Nov. 3–7, 2004)]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 2004, pp. 343–347. (In Russian)
7. King L.H., McLean B. Pockmarks on the Scotian Shelf. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1970, vol. 81, pp. 3141–4148.
8. Cole D., Stewart S.A., Cartwright J.A. Giant irregular pockmark craters in the Paleogene of the Outer Moray Firth Basin, UK North Sea. *Mar. Pet. Geol.*, 2000, vol. 17, no. 5, pp. 563–577. doi: 10.1016/S0264-8172(00)00013-1.

Received  
August 26, 2015

---

**Krylov Pavel Sergeevich** – PhD Student, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: [sprint@front.ru](mailto:sprint@front.ru)

**Nugraliev Danis Karlovich** – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Vice-Rector for Research, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: [Danis.Nourgaliev@kpfu.ru](mailto:Danis.Nourgaliev@kpfu.ru)

**Yasonov Pavel Georgievich** – PhD in Geology and Mineralogy, Associate Professor, Leading Research Fellow, Laboratory of Paleomagnetism and Rock Magnetism, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: [p.yasonov@mail.ru](mailto:p.yasonov@mail.ru)