

УДК 38.19.31, 550.8.052

© Сухих Е.А., Мороз Е.А., Абрамова А.С.

DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2020.45.004>

СВЯЗЬ ВЕЛИЧИН РАДИОГЕННОЙ ТЕПЛОГЕНЕРАЦИИ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ С ПРОЯВЛЕНИЯМИ ДЕГАЗАЦИИ В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ И ОСАДОЧНОМ ЧЕХЛЕ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВО-КАРСКОГО РЕГИОНА

Сухих Е.А., Мороз Е.А., Абрамова А.С.
ФГБУН «Геологический институт РАН», 119017, Москва, Россия
e-mail: sukhikh_ea@mail.ru

По данным многолучевого эхолотирования и акустического профилирования в 28, 38 и 41 рейсах НИС «Академик Николай Страхов», проводившихся Геологическим институтом РАН совместно с Московским государственным университетом (2011 г.) и Институтом океанологии РАН (2018-2019 гг.), были выполнены исследования акустических аномалий в водной толще и в разрезе четвертичных отложений в южной части Баренцево-Карского региона. Установлена связь величин поверхностной радиогенной теплогенерации, а также концентраций естественных радиоактивных элементов в донных осадках с типом дегазационных проявлений в водной толще и в осадочном чехле.

Ключевые слова: звукорассеивающий объект, сейсмоакустика, дегазация, яркое пятно, радиогенная теплогенерация, естественные радиоактивные элементы, Баренцево-Карский регион.

RELATIONSHIP OF THE RADIOGENIC HEAT PRODUCTION IN THE UPPER SEDIMENTARY LAYER WITH THE DEGASSING MANIFESTATIONS IN THE WATER COLUMN AND SEDIMENTARY COVER IN THE SOUTHERN BARENTS-KARA REGION

Sukhikh E.A., Moroz E.A., Abramova A.S.
Geological Institute RAS, 119017, Moscow, Russia

Studies of acoustic anomalies in the water column and in the Quaternary sediments for the southern part of the Barents-Kara region were carried out with multibeam echo sounding and sub-bottom profiling during the 28th, 38th and 41st cruises of the R/V Akademik Nikolaj Strakhov by the Geological Institute of RAS in cooperation with the Moscow State University (2011) and the Institute of Oceanology of RAS (2018-2019). The relationship has been established between the values of the surface radiogenic heat production, as well as the concentrations of natural radioactive elements in bottom sediments, with the type of degassing manifestations in the water column and in the sedimentary cover.

Keywords: sound scattering object, seismoacoustics, degassing, bright spot, radiogenic heat production, natural radioactive elements, Barents-Kara region.

Введение

Южная часть Баренцево-Карского шельфа обладает хорошей геолого-геофизической изученностью глубинными сейсмическими методами и бурением, что позволило выявить существенный углеводородный потенциал территории [1,2,3]. Начиная с 80-х гг., в российской части шельфа был открыт ряд различных по типу сырья месторождений, в том числе, уникальных по объему запасов [4]. На сегодняшний день в России существует единственный действующий проект по добыче углеводородов на Арктическом шельфе с ледостойкой платформы «Приразломная», которая находится в Печорском море на расстоянии 60 км от берега.

Глубинные сейсмические методы, позволяющие исследовать разрез на глубины до 10 км с использованием источников сигнала с частотами до 100 Гц, не обеспечивают должного разрешения в верхней части разреза (ВЧР) осадочной толщи. Комплексные исследования при помощи сейсмоакустических систем на основе электроискровых источников (частоты до 1000 Гц), профилографов с излучением частотно-модулированных сигналов (частоты от 2 до 16 кГц) или параметрическими

профилографами, а также многолучевых эхолотов с возможностью гидролокации бокового обзора, позволяют детально охарактеризовать особенности строения ВЧР [5,6].

Существующие сейсмоакустические данные указывают на наличие скоплений свободного газа в слабоконсолидированных породах ВЧР ряда районов Баренцево-Карского шельфа [7]. Аккумулируясь под подошвой флюидоупора, по локальным его нарушениям свободный газ поднимается в вышележащие комплексы с дальнейшим перераспределением и формированием скоплений, в том числе, приповерхностных, откуда уже возможно поступление газа в водную толщу.

Можно выделить две стадии дегазационных процессов в ВЧР: формирование скоплений свободного газа с образованием на сейсмограммах аномалий типа «яркое» и «плоское» пятно и дегазация в водную толщу по системе естественных нарушений, сопровождающаяся на сейсмограммах затуханием амплитуды в аномалиях. Сонограммы, в свою очередь, позволяют оценить интенсивность дегазационных проявлений в водной толще.

Таким образом, проявления свободного газа в

ВЧР и наличие дегазации в водной толще являются дополнительным индикатором тектонической активности и каркаса разломной сети, по которой идет поступление флюидов из глубоких горизонтов.

Связь величин радиогенной теплогенерации (РТГ) в верхнем слое донных осадков с дегазационными проявлениями на акватории можно предположить, исходя из связи обоих явлений с тектонической активностью и нарушением целостности флюидоупоров.

Параметр РТГ отражает суммарный тепловой эффект распада наиболее распространенных в природе долгоживущих радиоактивных изотопов урана, тория и калия (U , Th , K) в земной коре и является одной из компонент эндогенного теплового потока Земли [8].

Фракционирование U , Th и K контролируется разноглубинными процессами, которые включают первичную дифференциацию коры (K), глубинную циркуляцию флюидов, сопровождающую магматизм и метаморфизм (Th), и циркуляцию метеорных вод (U), и мощность слоя активной теплогенерации (параметр D) в данной последовательности элементов сокращается [9]. Таким образом, наибольшую корреляцию с дегазационными проявлениями должны демонстрировать величины концентраций в донных осадках Th .

Данные и методы

Для исследования звукорассеивающих объектов (ЗРО) в водной толще использовались данные сонарной моды многолучевого эхолотирования акустическим комплексом RESON Seabat 8111 (мелководный эхолот) и 7150 (глубоководный эхолот), проводившегося в 28 (2011 г.), 38 (2018 г.) и 41 (2019 г.) рейсах НИС «Академик Николай Страхов». Сонарная мода предоставляет информацию, аналогичную данным гидролокатора бокового обзора (ГБО), регистрируя интенсивность рассеянного сигнала, характеризующую акустически контрастные свойства не только донных структур, но и водной толщи [10].

Верхняя часть осадочного чехла исследовалась по данным акустического профилирования непараметрическим профилографом EdgeTech 3300.

При помощи программной среды RadExPro (Деко-Геофизика), которая позволяет осуществлять обработку сейсмических данных в формате SEG-Y, выполнена пикировка (присвоение географических координат и интерпретация) дегазационных событий в водной толще и скоплений свободного газа в ВЧР, что позволило сопоставить стадии дегазационного процесса с имеющимися данными по распределению в верхнем слое донных осадков U , Th , K и рассчитанными по этим данным величинами поверхностной РТГ ($A_{\text{пов}}$). Кроме того, обращалось внимание на наличие выраженных в рельефе газовых воронок (покмарок), которые регистрируются на сонограммах в Баренцевом море практически по-

всеместно и, за редким исключением, практически отсутствуют в Печорском и Карском морях. Наличие или отсутствие пространственного совпадения покмарок и дегазационных проявлений в водной толще свидетельствует о продолжающейся газовой разгрузке, либо об ее прекращении, соответственно. На акваториях Печорского и Карского морей отмечались формы рельефа, связанные с деградацией многолетней мерзлоты, поскольку скопления свободного газа в этом районе приурочены к мерзлотным зонам [11].

Осадочный материал отбирался в рейсах из грунтовых трубок и дночерпателей (рис. 1). Анализ величин концентрации U , Th , K выполнялся рентгенфлюоресцентным методом в лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН.

Из полученных в результате анализа валовых концентраций U , Th , K , исходя из данных о распространенности изотопов элементов в природе [12], были вычислены концентрации основных теплогенерирующих изотопов ^{238}U (99.2745%), ^{232}Th (100%) и ^{40}K (0.0117%), на основании которых была рассчитана поверхностная радиогенная теплогенерация ($A_{\text{пов}}$).

$$A_{\text{пов}} (\text{мкВт/м}^3) = \rho(aU + bTh + cK)$$

где ρ – плотность породы, кг/м^3 (для морских осадков принималась плотность 1800 кг/м^3); a , b , c – теплогенерация изотопа на единицу массы ($a=9.17 \cdot 10^{-5}$; $b=2.56 \cdot 10^{-5}$; $c=2.97 \cdot 10^{-5}$, Вт/кг) [12]. Количество определений (N) для баренцевоморского сегмента района исследований составило 86, для Печорского моря – $N=41$, для Карского моря – $N=56$.

Результаты исследования

Исследование акустических данных по трем направлениям: наличие на сейсмограммах аномалий типа «яркое» или «плоское» пятно, наличие на сонограммах дегазационных проявлений (струи, факела), наличие в рельефе газовых воронок или признаков деградации мерзлоты, – позволило систематизировать имеющийся материал и выделить ряд особенностей.

На сонограммах, полученных вдоль рейсовых маршрутов в южной части Баренцево-Карского региона, было выделено восемь типов акустических событий, интерпретируемых как дегазационные проявления, либо как, возможно, имеющие с ними связь. Первые четыре типа представляют собой струи газа/флюида различной интенсивности (1 – точечное проявление (рис. 2А), 2 – интенсивное точечное проявление (рис. 2Б), 3 – множественные дегазационные проявления (рис. 2В), 4 – интенсивные множественные дегазационные проявления (рис. 2Г)).

Следующие три типа характеризуют факелообразные структуры, которые могут как сопровождать

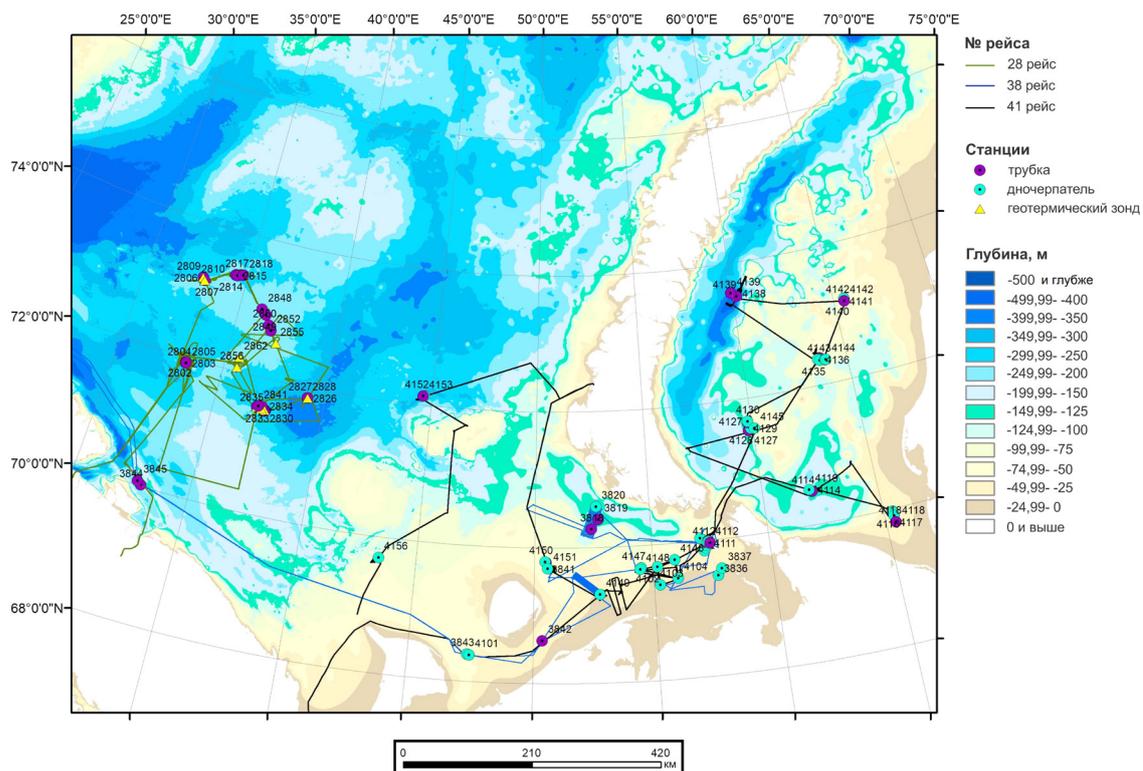


Рис. 1. Карта маршрутов и станций донного опробования в 28, 38 и 41 рейсах НИС «Академик Николай Страхов». Батиметрия района по данным IBCAO V3

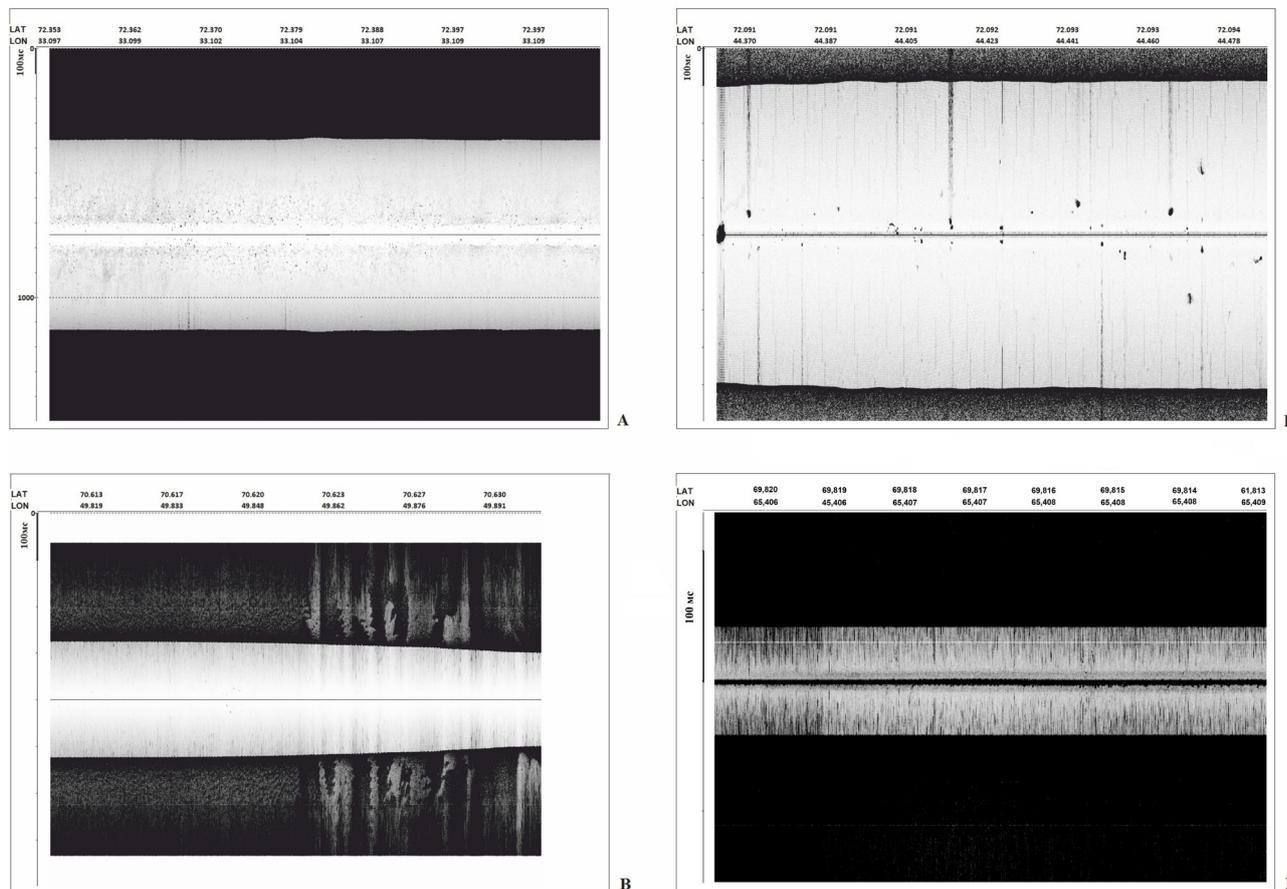


Рис. 2. Струйные проявления дегазации на сонограмме: А – точечные; Б – интенсивные точечные; В – множественные; Г – интенсивные множественные. Разрезы Б и Г содержат помехи от электроискрового источника

струйные проявления, так и существовать самостоятельно, и отличаются по визуальному наличию/отсутствию на сонограмме связи структуры с дном (5 – бескорневые факелообразные звукорассеивающие объекты (ЗРО) (рис. 3А, объект 1), 6 – корневые факелообразные ЗРО (рис. 3А, объект 2), 7 – корневые и бескорневые факелообразные ЗРО (рис. 2А), когда одновременно наблюдаются объекты обоих типов). Бескорневой тип ЗРО нельзя однозначно интерпретировать как имеющий эндогенную дегазационную природу, подобные скопления могут иметь биогенный генезис.

Также в отдельный тип выделено наличие в придонном горизонте акустически контрастных водных масс, что также может не иметь связи с дегазацией, однако указывает на контрастные химические характеристики придонного слоя (8 – придонный слой с контрастными свойствами (рис. 3Б)).

Анализ ВЧР вдоль маршрутов акустического профилирования в 28 рейсе (район свода Федынского и прилегающие структуры) показывает наличие маломощного слоя плейстоцен-голоценовых отложений, залегающих с угловым несогласием на кровле мезозойских комплексов, ниже которой прохождение акустического сигнала не прослеживается [13,14]. Макрорельеф осложнен формами айсберговой экзарации. В пределах борозд выпаживания наблюдаются поля газовых воронок.

Мощность четвертичных осадочных отложений на шельфе Печорского (38 рейс) и юго-западной части Карского (41 рейс) морей существенно варьируется, что говорит о разнообразии рельефообразующих процессов. В ВЧР регистрируются аномалии типа «яркое» и «плоское» пятна и их комбинации, имеющие разный наклон и протяженность, иногда для них характерна многоярусность [6].

Статистический анализ выполнялся для выборки, включающей 183 определения концентраций U , Th , K , по которым были вычислены значения $A_{пов}$. В соответствии с выявленным в районе станции

пробоотбора типом дегазационных проявлений, а также с учетом стадийности процесса дегазации, определением, независимо от глубины пробоотбора в керне, присваивались следующие ранги: 0 – отсутствие каких-либо проявлений в осадках, рельефе и водной толще; 1 – скопления свободного газа в осадочном чехле; 2 – геоморфологические проявления; с 3 по 10 – ЗРО описанных типов в водной толще (рис. 2, 3).

Для выявления статистически значимых связей в программе STATISTICA был выбран коэффициент корреляции Спирмена, поскольку зависимые переменные (концентрации радиоактивных элементов, их соотношения и рассчитанные значения $A_{пов}$) являются количественными (интервальная шкала), а независимая переменная (тип дегазационных проявлений) определяется по порядковой (ранговой) шкале, основываясь на виде и интенсивности дегазационных проявлений.

Корреляции с типами дегазационных проявлений значимы для концентраций U (0.187), Th (0.3), для соотношений Th/K (0.42) и U/K (0.21) и для $A_{пов}$ (0.186) при $p < 0.05$. В скобках указаны величины рангового коэффициента корреляции Спирмена. Для концентрации K и соотношения Th/U корреляции не значимы.

Для того, чтобы выявить возможное воздействие регионального фактора, построены диаграммы рассеяния для исследуемых величин с учетом региональной принадлежности осадочного материала (рис. 4).

Заключение

Значимые связи с дегазационными проявлениями выявлены как для концентраций радиоактивных элементов (U и Th), так и для некоторых их соотношений (U/K , Th/K), а также для величин радиогенной теплогенерации.

В местах пробоотбора в Баренцевом море не было зафиксировано факелообразных ЗРО, соответствующих типам 7-10 (рис. 4). Максимальные зна-

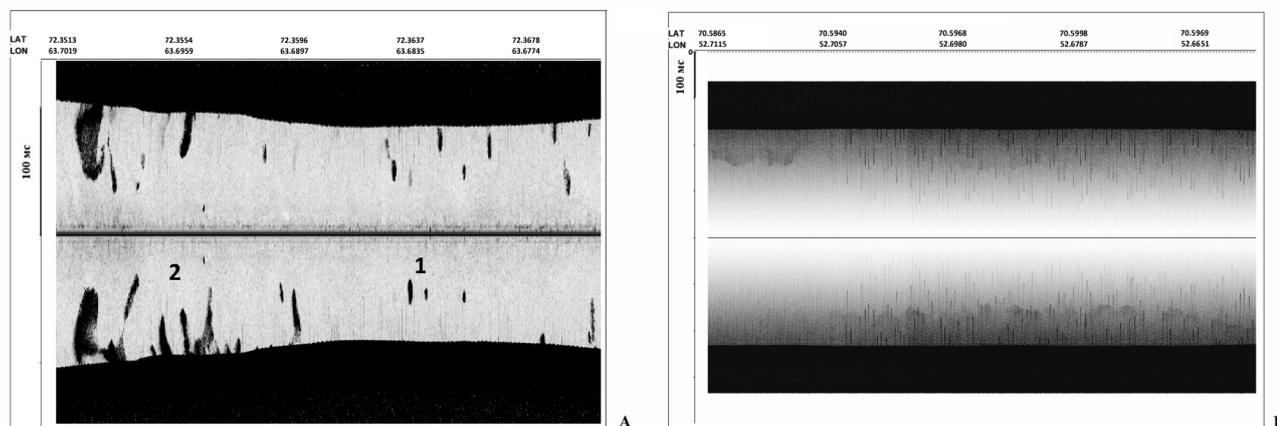


Рис. 3. А – факелообразные звукорассеивающие объекты: 1 – бескорневые, 2 – корневые; Б – придонный слой с контрастными свойствами. Разрез Б содержит помехи от электроискрового источника

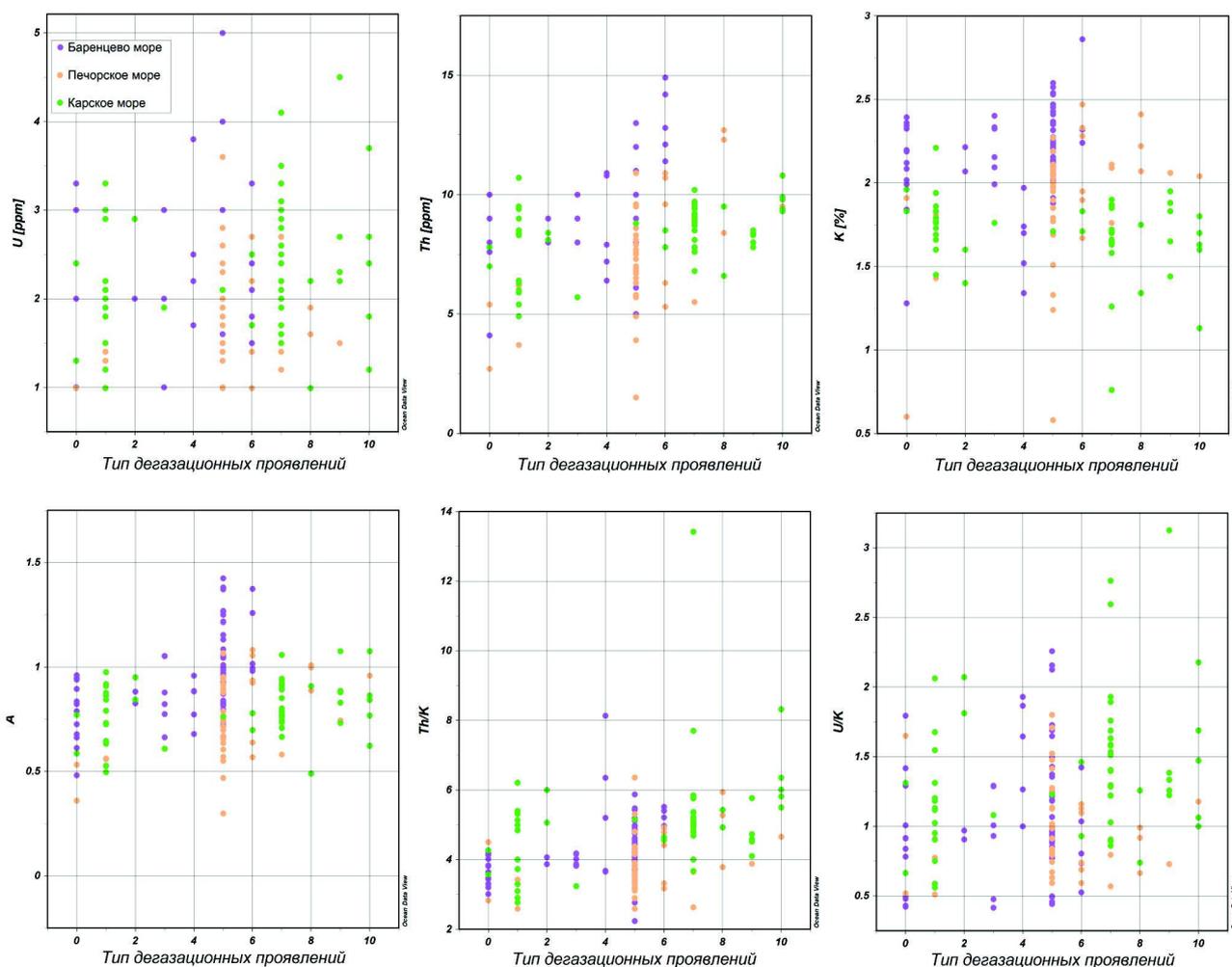


Рис. 4. Диаграммы рассеяния величин концентраций основных радиоактивных элементов, их соотношений и радиогенной теплогенерации в зависимости от типа дегазационных проявлений (ранжирование от 0 до 10, см. текст) с учетом региональной принадлежности осадочного материала

чения $A_{\text{пов}}$, а также концентрации U , Th , K в верхнем слое донных осадков Баренцева моря соответствуют зонам с множественными струйными дегазационными проявлениями типов 5 и 6 (рис. 4).

В Печорском море максимальные значения исследуемых параметров соответствуют типам 5, 6 (множественные струйные) и 8 (корневые факелобразные ЗРО) (рис. 4).

В донных осадках Карского моря концентрации U и Th в осадках с 7-10 типами ЗРО повышены, тогда как концентрации K , напротив, понижены. Кроме того, концентрации K в верхнем слое донных осадков Карского моря, в общем, ниже, чем в Печорском и Баренцевом морях, и не превышают 2%. Величи-

ны U/K -соотношения для типов 7-10 в группе осадков Карского моря повышены (для 7, 9 и 10 типов – максимальны), что может свидетельствовать о связи генезиса данных типов с дегазацией, либо с системами естественных трещин. Эта закономерность была выявлена по данным гамма-каротажа скважин [15]. Максимумы значений $A_{\text{пов}}$ для донных осадков Карского моря соответствуют 7, 9 и 10 типам ЗРО.

Наличие газовых скоплений в ВЧР само по себе не дает повышенных значений исследуемых параметров, тогда как максимумы значений соответствуют районам деградации мерзлоты и распространения покмарок с дегазационными проявлениями в водной толще.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-35-20060 и 20-05-00054.

Благодарность

Авторы благодарят геологические отряды ИО РАН и МГУ за возможность работать с материалами донного отробования.

Список литературы

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Масштаб 1:1 000 000 (3-е поколение). Листы S-(36), 37, Баренцево море (зап., центр. Часть). Спб.: Картфабрика ВСЕГЕИ. 2016. 156 с.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Масштаб 1:1 000 000 (3-е поколение). Листы R-39, 40, о. Колгуев – прол. Карские Ворота. Спб.: Картфабрика ВСЕГЕИ. 2013. 477 с.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Южно-Карская. Масштаб 1:1 000 000 (3-е поколение). Лист R-41, Амдерма. Спб.: Картфабрика ВСЕГЕИ. 2012. 401 с.
4. Тимонин Н.И. Строение литосферы и нефтегазоносность Баренцево-Карского региона // Литосфера. 2009. №2. С. 41-55.
5. Левченко О.В., Мерклин Л.Р. Сейсмостратиграфия. Печорское море. Системные исследования. М.: Море. 2003. С. 321-354.
6. Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Сухих Е.А. и др. Проявление глубинной дегазации в водной толще и верхней части разреза Печорского моря // Георесурсы. 2019. Т. 21. №4. С. 68-76.
7. Тарасов Г.А., Рокос С.И. О признаках газопроявлений в новейших отложениях Баренцево-Карского шельфа // ДАН. 2008. Т. 418. №3. С. 361-365.
8. Хуторской М.Д., Поляк Б.Г. Роль радиогенной теплогенерации в формировании поверхностного теплового потока // Геотектоника. 2016. №2. С. 43-61.
9. Хуторской М.Д. Структура и компоненты теплового потока // Георесурсы. 2015. Т. 2. С. 70-82.
10. Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Абрамова А.С. и др. Картирование звукорассеивающих объектов в северной части Баренцева моря и их геологическая интерпретация // Океанология. 2017. Т. 57. №4. С. 655-662.
11. Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г. Свободный газ и многолетняя мерзлота в осадках верхней части разреза мелководных районов шельфа Печорского и Карского морей. Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. Апатиты: КНИЦ РАН. 2001. С. 40-51.
12. Jaupart C., Mareschal J.-C. Constraints on Crustal Heat Production from Heat Flow Data / Ed. R.L.Rudnick. Amsterdam: Elsevier Science Publishers. Treatise on Geochemistry. Vol. 3: The Crust. 2004. Pp. 65-84.
13. Мусатов Е.Е. Структура кайнозойского чехла и неотектоника Баренцево-Карского шельфа по сейсмоакустическим данным // Российский журнал наук о Земле. 1998. Т. 1. №2. С. 157-183.
14. Мороз Е.А., Зарайская Ю.А., Сухих Е.А. и др. Рельеф и строение верхней части осадочного чехла в районе свода Федынского по акустическим данным // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. №2. С. 82-91.
15. Fertl W.H. Gamma ray spectral data assists in complex formation evaluation. Log Analysts. 1979. Vol. 20. No. 5. Pp. 3-37.

References

1. Geological state map of the Russian Federation. North Kara-Barents Sea series. Scale 1:1000000 (3rd generation). Sheets S-36,37, Barents Sea (west., centr. part). SPb.: Kartfabrika VSEGEI. 2016. 156 p.
2. Geological state map of the Russian Federation. North Kara-Barents Sea series. Scale 1: 1000000 (3rd generation). Sheets R-39,40, o. Kolguev – proliv Karskie Vorota. SPb.: Kartfabrika VSEGEI. 2013. 477 p.
3. Geological state map of the Russian Federation. South Kara series. Scale 1: 1000000 (3rd generation). Sheet R-41, Amderma. SPb.: Kartfabrika VSEGEI. 2012. 401 p.
4. Timonin N.I. Lithosphere structure and oil and gas occurrence of Barents-Kara region. *Lithosphere*. 2009. No. 2. Pp. 41–55. (In Russ.)
5. Levchenko O.V., Merklin L.R. Seismic stratigraphy. Pechora sea. Systemresearch. Moscow: MORE. 2003. Pp. 321-354. (In Russ.)
6. Sokolov S.Yu., Moroz E.A., Sukhikh E.A. et al. Manifestations of deep degassing into the water column and upper part of the Pechora sea sedimentary section. *Georesursy*. 2019. V. 21. No. 4. Pp. 68-76.
7. Tarasov G.A., Rokos S.I. Signs of Gas Manifestation in Recent Sediments of the Barents–Kara Shelf. *Doklady Earth Sciences*. 2008. V. 418. No. 1. Pp. 46-49.
8. Khutorskoy M.D., Polyak B.G. Role of radiogenic heat generation in surface heat flow formation. *Geotectonics*. 2016. V. 50. No. 2. Pp. 179-195.
9. Khutorskoy M.D. Structure and Components of Heat Flow. *Georesursy*. No. 4(63) V. 2. 2015. Pp. 70-82.
10. Sokolov S.Yu., Moroz E.A., Abramova A.S. et al. Mapping of sound scattering objects in the Northern part of the Barents sea and their geological interpretation. *Oceanology*. 2017. V. 57. No. 4. Pp. 655-662. (In Russ.)
11. Rokos S.I., Kostin D.A., Dlugach A.G. Free gas and permafrost in the sediments of the upper section of the shallow shelf areas of the Pechora and Kara seas. Sedimentological processes and evolution of marine ecosystems in conditions of marine periglacial. Apatity: KNC RAS. 2001. Pp. 40-51. (In Russ.)
12. Jaupart C., Mareschal J.-C. Constraints on Crustal Heat Production from Heat Flow Data. Ed. R.L.Rudnick. Amsterdam: Elsevier Science Publishers. Treatise on Geochemistry. Vol. 3: The Crust. 2004. Pp. 65-84.
13. Musatov E.E. Structure of the Cenozoic cover and neotectonics of the Barents-Kara shelf according to seismoacoustic data. *Rossiyskiy jurnal nauk o Zemle*. 1998. V. 1. No. 2. Pp. 157-183. (In Russ.)
14. Moroz E.A., Zarajskaya Yu. A., Sukhikh E.A. et al. Relief and structure of the upper part of sedimentary cover in the area of the Fedynsky rise according to acoustic data. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2020. No. 2. Pp. 82-91. (In Russ.)
15. Fertl W.H. Gamma ray spectral data assists in complex formation evaluation. *Log Analysts*. 1979. V. 20. No. 5. Pp. 3-37.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Сухих Елена Александровна

научный сотрудник лаборатории тепломассопереноса, ФГУБН Геологический институт РАН, 119017, Москва, Россия

Information about authors
Affiliations

Sukhikh Elena Aleksandrovna

Researcher at the Laboratory of Heat and Mass Transfer, Geological Institute RAS, 119017, Moscow, Russia

Мороз Евгений Андреевич

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов, ФГБУН Геологический институт РАН, 119017, Москва, Россия

Абрамова Анастасия Сергеевна

младший научный сотрудник лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов, ФГБУН Геологический институт РАН, 119017, Москва, Россия

Moroz Evgeniy Andreevich

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Geomorphology and Tectonics of the Ocean Floor, 119017, Moscow, Russia

Abramova Anastasiya Sergeevna

Junior Researcher at the Laboratory of Geomorphology and Tectonics of the Ocean Floor, Geological Institute RAS, 119017, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 19.08.2020 г.