

УДК 550.8.01.550.85

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ СЕДИМЕНТОГЕНЕЗА И РАННЕГО ДИАГЕНЕЗА В ДОННЫХ ОСАДКАХ КАРСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Кирилл Владимирович Сыромятников¹, Руслан Рустемович Габдуллин²✉

¹ Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия;

Sykirv@gmail.com, <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0001-8798-4425>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

Gabdullin@fgp.msu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

Аннотация. Для изучения процессов седиментогенеза и раннего диагенеза поверхностных осадков Карского моря использованы методы математической статистики. С помощью корреляционного анализа установлены две группы оксидов, связанных с определенными гранулометрическими типами отложений. В результате применения однофакторного дисперсионного анализа установлена закономерность распределения песка, алевролита и пелита в соответствии с условиями седиментации на основе различий между их средними значениями. По этим данным построены карты распределения песка, алевролита и пелита в пределах изученной части Карского моря. На основе данных статистики выявлены некоторые особенности основных факторов седиментогенеза для этого региона.

В результате установленной взаимосвязи отношений Mn/Al, Mn/Fe, MnO/SiO₂ и глубины с применением одномерного регрессионного анализа была изучена интенсивность раннего окислительного диагенеза в пределах шельфовой зоны Карского моря.

Ключевые слова: современные осадки Карского моря, гранулометрический состав, фации, корреляционный анализ, дисперсионный анализ, регрессионный анализ, ранний диагенез, окислительный диагенез

Для цитирования: Сыромятников К.В., Габдуллин Р.Р. Выявление основных факторов седиментогенеза и раннего диагенеза в донных осадках Карского моря на основе методов математической статистики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 5. С. 99–112.

IDENTIFICATION OF THE MAIN FACTORS OF SEDIMENTOGENESIS AND EARLY DIAGENESIS IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE KARA SEA BASED ON METHODS OF MATHEMATICAL STATISTICS

Kirill V. Syromyatnikov¹, Ruslan R. Gabdullin²✉

¹ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia;

Sykirv@gmail.com, <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0001-8798-4425>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Gabdullin@fgp.msu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

Abstract. In the article, methods of mathematical statistics were used to study the processes of sedimentogenesis and early diagenesis of the surface sediments of the Kara Sea. Correlation analysis established two groups of oxides associated with certain granulometric types of deposits. As a result of applying one-way analysis of variance, the regularity of the distribution of sand, silt and pelite was established in accordance with the conditions of sedimentation based on differences between their average values. Based on these data, maps of the distribution of sand, silt, and pelite were constructed within the studied part of the Kara Sea. On the basis of statistical data, some features of the main factors of sedimentogenesis for this region were revealed.

As a result of the established relationship between the Mn/Al, Mn/Fe, MnO/SiO₂ ratios and depth, using a one-dimensional regression analysis, the intensity of early oxidative diagenesis within the shelf zone of the Kara Sea was studied.

Key words: recent sediments of the Kara Sea, particle size distribution, facies, correlation analysis, analysis of variance, regression analysis, early diagenesis, oxidative diagenesis

For citation: Syromyatnikov K.V., Gabdullin R.R. Identification of the main factors of sedimentogenesis and early diagenesis in bottom sediments of the Kara Sea based on methods of mathematical statistics. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 5: 99–112. (In Russ.).

Введение. При изучении различных факторов, влияющих на процессы седиментации в Мировом океане, большой интерес вызывают исследования между распределением отдельных химических компонентов, входящих в состав современных осадков, их минералогией, гранулометрией и фаціальными

условиями накопления. Методы математической статистики позволяют проводить такие исследования с высокой точностью на количественном уровне [Burone et al., 2003; Costa et al., 2018; Zhang et al., 2021; Левитан и др., 2014; Сыромятников и др., 2021]. Отметим работы по изучению фаціальных

Таблица 1

Расположение станций с координатами и глубиной пробоотбора поверхностного слоя (0–2 см) осадков в изученном регионе Карского моря [Русаков и др., 2018]

| № станции | Координаты | Глубина, м | № станции | Координаты | Глубина, м | № станции | Координаты | Глубина, м |
|-------------|------------------|------------|------------|------------------|------------|-----------|------------------|------------|
| 5199 | 72°33'N, 57°85'E | 330 | 5326 | 72°17'N, 74°29'E | 13 | 5232 | 75°9'N, 89°52'E | 51 |
| 5394 | 72°35'N, 57°8'E | 330 | 5328 | 73°23'N, 73°27'E | 22 | 5237 | 77°5'N, 87°17'E | 128 |
| 5392 | 74°1'N, 60°26'E | 313 | 5347 | 72°94'N, 80°E | 21 | BP00-15/6 | 72°N, 81°6'E | 6 |
| 5205 | 74°77'N, 66°6'E | 190 | BP00-23/7 | 73°47'N, 79°85'E | 33 | 5404 | 74°78'N, 66°6'E | 160 |
| 5304 | 74°78'N, 66°6'E | 192 | 5335 | 73°76'N, 79°61'E | 30 | BP01-82/8 | 73°2'N, 73°033'E | 29 |
| 5358 | 75°37'N, 64°35'E | 350 | BP01-01/34 | 74°N, 79°33'E | 91 | BP03-19GC | 74°N, 73°13'E | 34 |
| 5308 | 75°56'N, 72°48'E | 200 | 5349 | 74°3'N, 78°63'E | 34 | BP01-64/6 | 75°58'N, 73°63'E | 99 |
| 5251 | 73°92'N, 59°37'E | 120 | BP00-7/5 | 74°5'N, 81°13'E | 38 | BP03-07C | 75°57'N, 73°13'E | 108 |
| 5248 | 74°12'N, 60°E | 130 | BP00-43/8 | 75°38'N, 85°82'E | 48 | 5214 | 76°53'N, 71°37'E | 159 |
| 5243 | 74°17'N, 60°93'E | 200 | 5232 | 75°9'N, 89°52'E | 51 | BP01-55/5 | 77°05'N, 79°73'E | 83 |
| 5361 | 75°65'N, 63°72'E | 123 | 5237 | 77°5'N, 87°17'E | 128 | 5297 | 70°2'N, 57°56'E | 124 |
| 5327 | 72°77'N, 74°5'E | 12 | BP00-15/6 | 72°N, 81°6'E | 6 | 5324 | 71.47 N, 72.56 E | 16 |
| 5343 | 72°09'N, 81°48'E | 11 | 5404 | 74°78'N, 66°6'E | 160 | 5323 | 71.69 N, 72.95 E | 18 |
| BP00-22 | 72°45'N, 81'E | 15 | BP01-82/8 | 73°2'N, 73°033'E | 29 | BP01-71/4 | 72.67 N, 73.3 E | 23 |
| BP01-kol.03 | 72°93'N, 80°53'E | 17 | BP03-19GC | 74°N, 73°13'E | 34 | 5313 | 74.18 N, 73 E | 28 |
| BP00-14/4 | 72°93'N, 79°78'E | 19 | BP01-64/6 | 75°58'N, 73°63'E | 99 | 5310 | 74.94 N, 72.78 E | 28 |
| 5240 | 79°25'N, 87°62'E | 290 | BP03-07C | 75°57'N, 73°13'E | 108 | 5309 | 75.2 N, 72.73 E | 32 |
| 5241 | 80°N, 85°5'E | 330 | 5214 | 76°53'N, 71°37'E | 159 | 5234 | 76.32 N, 88.83 E | 47 |
| 5200 | 73°1'N, 61°27'E | 205 | BP01-01/34 | 74°N, 79°33'E | 91 | 5236 | 76.97 N, 87.83 E | 90 |
| 5302 | 73°1'N, 61°33'E | 110 | 5349 | 74°3'N, 78°63'E | 34 | 5238 | 78 N, 87.6 E | 108 |
| 5403 | 70°88'N, 58°32'E | 218 | BP00-7/5 | 74°5'N, 81°13'E | 38 | 5239 | 78.6 N, 88.05 E | 242 |
| 5391 | 74°18'N, 59°17'E | 120 | BP00-43/8 | 75°38'N, 85°82'E | 48 | 5344 | 71.87 N, 82.2 E | 10 |

Таблица 2

Химический состав оксидов компонентов поверхностного слоя (0–2 см) донных осадков Карского моря, их гранулометрический состав (масс.%) и кластеры, выделенные с помощью кластерного анализа по методу Уорда [Русаков и др., 2018]

| № станции | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | MnO | K ₂ O | CaO | MgO | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | Гравий | Песок | Алеврит | Пелит | Кластеры |
|-------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-------|------------------|-------|-------|-------------------|-------------------------------|--------|-------|---------|-------|----------|
| 5199 | 50,920 | 13,120 | 0,680 | 6,530 | 3,350 | 2,080 | 0,980 | 2,840 | 3,620 | 0,410 | 0,13 | 5,04 | 72,81 | 22,02 | 1 |
| 5394 | 54,620 | 13,990 | 0,560 | 6,910 | 3,660 | 2,250 | 0,900 | 2,780 | 3,650 | 0,290 | 0,22 | 26,04 | 50,89 | 22,85 | 1 |
| 5392 | 52,520 | 15,580 | 0,680 | 7,980 | 1,350 | 2,350 | 0,800 | 3,200 | 3,670 | 0,270 | 0 | 5,32 | 72,78 | 21,9 | 1 |
| 5205 | 47,530 | 15,360 | 0,737 | 10,240 | 1,700 | 2,570 | 1,060 | 2,260 | 4,190 | 0,346 | 0 | 14,21 | 67,89 | 17,9 | 1 |
| 5304 | 55,190 | 13,470 | 0,640 | 8,130 | 2,650 | 2,210 | 0,940 | 2,590 | 3,940 | 0,310 | 0 | 40,43 | 45,48 | 14,09 | 1 |
| 5358 | 53,350 | 16,080 | 0,650 | 7,530 | 0,840 | 2,500 | 0,900 | 3,260 | 3,450 | 0,250 | 1,8 | 36,07 | 47,01 | 15,12 | 1 |
| 5308 | 52,640 | 13,870 | 0,690 | 9,160 | 2,460 | 2,090 | 0,910 | 2,920 | 3,760 | 0,440 | 0 | 10,6 | 68,25 | 21,15 | 1 |
| 5251 | 52,550 | 18,050 | 0,828 | 7,350 | 0,494 | 2,910 | 2,610 | 2,970 | 2,220 | 0,187 | 0,4 | 1,53 | 84,71 | 13,36 | 1 |
| 5248 | 55,170 | 17,370 | 0,830 | 7,590 | 0,170 | 2,620 | 2,510 | 2,710 | 2,410 | 0,176 | 0 | 0,34 | 86,45 | 13,21 | 1 |
| 5243 | 54,720 | 18,100 | 0,830 | 8,030 | 1,360 | 2,860 | 0,750 | 2,480 | 3,200 | 0,230 | 0,74 | 36,75 | 52,6 | 9,91 | 1 |
| 5361 | 47,900 | 14,780 | 0,640 | 5,320 | 0,060 | 2,280 | 9,480 | 2,700 | 1,980 | 0,100 | 0 | 25,1 | 64,4 | 10,5 | 1 |
| 5327 | 52,890 | 12,200 | 0,640 | 11,530 | 0,300 | 1,680 | 1,720 | 2,660 | 3,650 | 0,720 | 1 | 10,89 | 64,38 | 23,73 | 1 |
| 5343 | 57,240 | 14,240 | 1,110 | 8,220 | 0,200 | 1,770 | 3,410 | 3,340 | 3,620 | 0,230 | 0 | 4,1 | 86,45 | 9,45 | 1 |
| BP00-22 | 54,190 | 15,120 | 0,842 | 8,290 | 0,121 | 1,980 | 1,960 | 3,200 | 3,070 | 0,193 | 0,07 | 10,64 | 63,01 | 26,28 | 1 |
| BP01-kol,03 | 51,990 | 14,970 | 0,831 | 8,990 | 0,108 | 1,880 | 1,990 | 3,120 | 3,300 | 0,209 | 0 | 0,9 | 72,22 | 26,88 | 1 |
| BP00-14/4 | 52,150 | 15,000 | 0,815 | 9,360 | 0,094 | 2,140 | 1,600 | 3,190 | 3,080 | 0,213 | 0 | 1,31 | 73,34 | 25,35 | 1 |
| 5240 | 47,060 | 16,780 | 0,756 | 9,820 | 1,400 | 2,540 | 0,890 | 2,410 | 3,960 | 0,302 | 0 | 6,22 | 74,31 | 19,47 | 1 |

| № станции | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | MnO | K ₂ O | CaO | MgO | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | Гравий | Песок | Алеврит | Пелит | Кластеры |
|------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-------|------------------|-------|-------|-------------------|-------------------------------|--------|-------|---------|-------|----------|
| 5241 | 52,440 | 16,510 | 0,813 | 8,360 | 0,892 | 2,510 | 0,840 | 2,270 | 3,250 | 0,310 | 0 | 3,51 | 75,07 | 21,42 | 1 |
| 5200 | 60,630 | 13,080 | 0,583 | 5,850 | 1,580 | 2,480 | 1,240 | 1,650 | 3,990 | 0,272 | 0 | 57,74 | 31,08 | 11,18 | 2 |
| 5302 | 59,030 | 13,360 | 0,660 | 6,690 | 1,780 | 2,390 | 1,000 | 2,430 | 3,610 | 0,320 | 2,91 | 49,96 | 32,87 | 14,26 | 2 |
| 5403 | 57,210 | 13,190 | 0,620 | 7,100 | 0,380 | 2,020 | 1,740 | 2,900 | 3,800 | 0,360 | 0 | 41,7 | 44,21 | 14,09 | 2 |
| 5391 | 56,260 | 16,010 | 0,710 | 6,770 | 0,520 | 2,510 | 1,470 | 3,380 | 3,130 | 0,250 | 4,37 | 22,89 | 54,73 | 18,01 | 2 |
| 5326 | 54,940 | 13,540 | 0,710 | 10,940 | 0,390 | 1,870 | 0,790 | 2,710 | 2,830 | 0,380 | 0,39 | 0,47 | 80,52 | 18,62 | 2 |
| 5328 | 58,090 | 13,060 | 0,730 | 8,250 | 0,400 | 1,880 | 1,400 | 2,500 | 3,660 | 0,320 | 1,58 | 6,9 | 68,7 | 22,82 | 2 |
| 5347 | 50,340 | 14,480 | 0,830 | 9,880 | 0,830 | 1,810 | 1,700 | 3,760 | 3,880 | 0,280 | 0 | 2,01 | 65,77 | 32,22 | 2 |
| BP00-23/7 | 55,790 | 14,740 | 0,770 | 8,280 | 0,086 | 2,180 | 1,550 | 2,890 | 3,020 | 0,143 | 0,07 | 11,57 | 61,66 | 26,7 | 2 |
| 5335 | 52,260 | 14,630 | 0,800 | 9,050 | 0,490 | 2,130 | 1,240 | 3,340 | 4,190 | 0,250 | 0 | 11,93 | 72,52 | 15,55 | 2 |
| BP01-01/34 | 56,860 | 16,870 | 0,844 | 6,630 | 0,075 | 2,350 | 1,280 | 2,660 | 2,850 | 0,128 | 0 | 4,84 | 68,34 | 26,83 | 2 |
| 5349 | 51,980 | 14,070 | 0,720 | 10,010 | 0,370 | 1,950 | 1,300 | 3,300 | 3,690 | 0,350 | 0 | 0,79 | 69,92 | 29,29 | 2 |
| BP00-7/5 | 49,220 | 14,960 | 0,713 | 9,770 | 0,354 | 2,000 | 1,180 | 2,900 | 4,190 | 0,246 | 0 | 0,95 | 83,77 | 15,28 | 2 |
| BP00-43/8 | 49,700 | 15,710 | 0,773 | 9,400 | 0,687 | 2,320 | 1,500 | 3,080 | 3,700 | 0,184 | 0,27 | 1,77 | 69,57 | 25,39 | 2 |
| 5232 | 54,450 | 15,410 | 0,764 | 8,000 | 1,074 | 2,390 | 1,410 | 2,260 | 3,740 | 0,261 | 0 | 15,94 | 59,73 | 24,33 | 2 |
| 5237 | 60,050 | 13,800 | 0,679 | 7,170 | 0,424 | 2,440 | 1,190 | 1,890 | 3,530 | 0,298 | 2,86 | 35,72 | 43,93 | 17,49 | 2 |
| BP00-15/6 | 58,810 | 14,070 | 0,998 | 7,710 | 0,116 | 1,770 | 4,200 | 2,980 | 3,050 | 0,251 | 0 | 31,74 | 42,09 | 26,17 | 3 |
| 5404 | 61,660 | 13,240 | 0,680 | 5,500 | 0,040 | 2,200 | 1,300 | 2,370 | 3,780 | 0,270 | 0 | 37,67 | 43,27 | 19,06 | 3 |
| BP01-82/8 | 56,410 | 13,910 | 0,719 | 8,330 | 0,108 | 2,220 | 0,970 | 2,340 | 3,420 | 0,205 | 0 | 4,72 | 68,36 | 26,92 | 3 |
| BP03-19GC | 56,210 | 14,040 | 0,725 | 7,950 | 0,099 | 2,240 | 0,930 | 2,390 | 3,160 | 0,145 | 2,06 | 5,95 | 65,41 | 26,58 | 3 |
| BP01-64/6 | 57,030 | 15,130 | 0,733 | 7,270 | 0,076 | 2,440 | 0,880 | 2,510 | 3,270 | 0,116 | 0 | 4,74 | 65,97 | 29,29 | 3 |
| BP03-07C | 63,910 | 13,660 | 0,686 | 5,560 | 0,076 | 2,440 | 0,960 | 2,110 | 2,950 | 0,119 | 0 | 27,46 | 52,05 | 20,49 | 3 |
| 5214 | 62,910 | 14,710 | 0,648 | 6,050 | 0,171 | 2,640 | 0,910 | 1,950 | 2,810 | 0,241 | 0,41 | 48,07 | 39,78 | 11,74 | 3 |
| BP01-55/5 | 62,460 | 13,360 | 0,647 | 5,520 | 0,078 | 2,300 | 1,200 | 2,290 | 3,020 | 0,140 | 0,38 | 23,65 | 50,48 | 25,49 | 3 |
| 5297 | 76,540 | 9,350 | 0,440 | 2,700 | 0,109 | 2,120 | 1,190 | 1,070 | 2,660 | 0,182 | 11,51 | 66,1 | 17,75 | 4,64 | 4 |
| 5324 | 71,250 | 10,320 | 0,530 | 5,930 | 0,540 | 2,120 | 1,210 | 1,310 | 1,570 | 0,351 | 0 | 90,37 | 8,07 | 1,56 | 4 |
| 5323 | 74,520 | 10,790 | 0,700 | 3,610 | 0,055 | 2,300 | 1,230 | 1,240 | 2,290 | 0,102 | 0 | 59,94 | 28,45 | 11,61 | 4 |
| BP01-71/4 | 67,680 | 12,030 | 0,683 | 5,170 | 0,079 | 2,320 | 1,100 | 1,800 | 2,780 | 0,158 | 0 | 42,95 | 42,34 | 14,71 | 4 |
| 5313 | 82,030 | 6,650 | 0,480 | 2,820 | 0,057 | 1,670 | 0,660 | 0,620 | 2,250 | 0,162 | 0,28 | 85,26 | 9,77 | 4,69 | 4 |
| 5310 | 81,050 | 6,880 | 0,390 | 2,150 | 0,104 | 2,040 | 0,740 | 0,500 | 3,040 | 0,169 | 13,28 | 74,48 | 8,9 | 3,34 | 4 |
| 5309 | 89,960 | 3,640 | 0,280 | 0,990 | 0,096 | 1,220 | 0,340 | 0,100 | 1,790 | 0,071 | 0 | 85,98 | 9,17 | 4,85 | 4 |
| 5234 | 62,080 | 12,990 | 0,530 | 5,970 | 0,006 | 2,180 | 1,030 | 1,710 | 3,460 | 0,209 | 46,75 | 29,06 | 17,69 | 6,5 | 4 |
| 5236 | 64,610 | 12,550 | 0,625 | 5,820 | 0,283 | 2,410 | 1,190 | 1,550 | 3,570 | 0,260 | 0 | 55,5 | 33,1 | 11,4 | 4 |
| 5238 | 67,900 | 12,190 | 0,561 | 4,860 | 0,430 | 2,530 | 1,190 | 1,340 | 3,320 | 0,220 | 0 | 67,8 | 23,97 | 8,23 | 4 |
| 5239 | 65,900 | 12,600 | 0,562 | 5,510 | 0,579 | 2,580 | 0,990 | 1,410 | 3,440 | 0,229 | 0 | 70,41 | 23,73 | 5,86 | 4 |
| 5344 | 68,860 | 11,540 | 0,790 | 5,670 | 0,141 | 2,060 | 2,990 | 2,170 | 2,510 | 0,216 | 0,06 | 86,28 | 6,22 | 7,44 | 4 |

Примечания. Каждый кластер соответствует определенной обстановке осадконакопления [Русakov и др., 2018]: 1 — зона лавинной аккумуляции осадков; 2 — зона аккумуляции песчаных алевритов; 3 — зона аккумуляции алевритовых песков; 4 — зона размытия (пески, гравий).

изученной части Карского моря, что позволило оценить степень интенсивности раннего окислительного диагенеза [Холодов, 2020].

Карское море относится к шельфовым морям западной части Северного Ледовитого океана. Оно ограничено с юга побережьем Евразии; с запада — о-вом Вайгач, арх. Новая Земля и арх. Земля Франца-Иосифа; с востока — арх. Северная Земля. Основными поставщиками терригенного материала в Карское море служат реки Обь, Енисей, Таз и Пур.

Характерная глубина для Карского моря — 50–100 м, максимальная глубина в желобе Святой Анны — 620 м, а в районе желоба Воронина глубина составляет 420 м. Восточно-Новоземельский желоб расположен вдоль восточных берегов Новой Земли и имеет глубину 200–400 м. Между желобами Святой Анны и Воронина расположено мелководное Центральное Карское плато с глубиной до 50 м.

На процессы седиментации в этом регионе влияют морские течения Карского моря: Новозе-

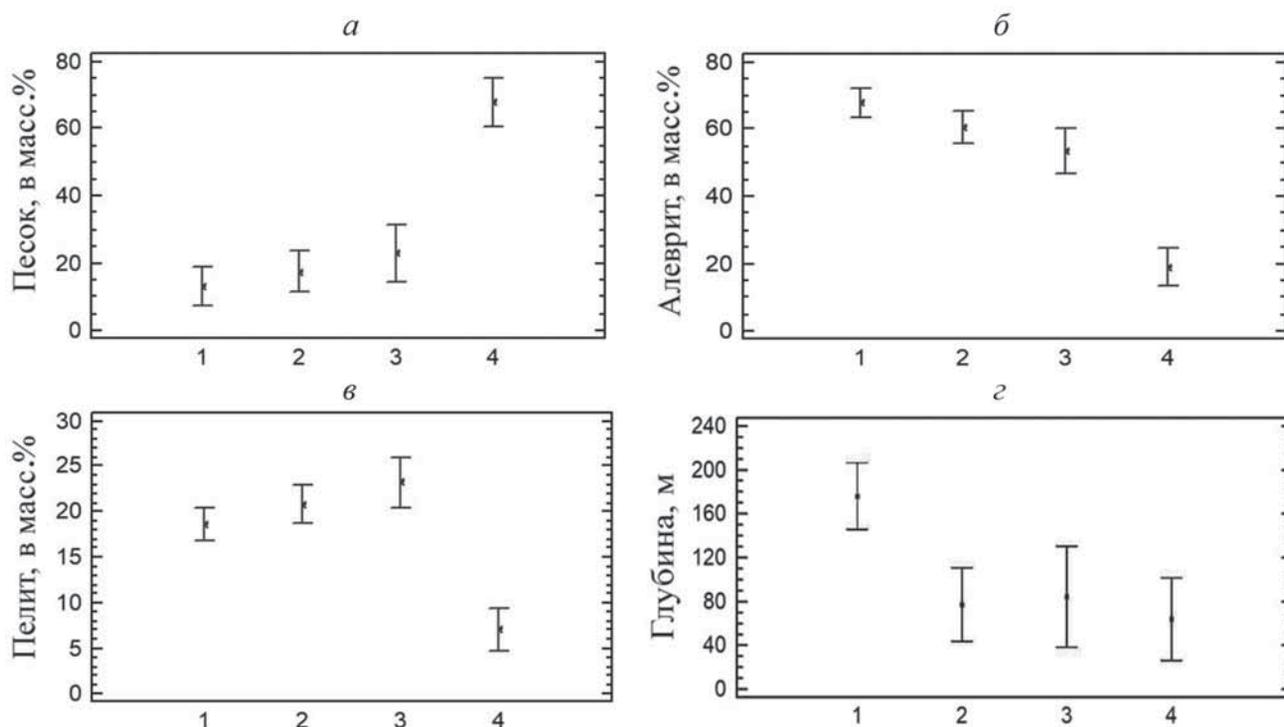


Рис. 2. Распределение среднего содержания гранулометрических типов осадков (%) в четырех фациальных зонах, соответствующих 4-м выделенным кластерам по данным дисперсионного анализа: а — средние и 95%-ные доверительные интервалы распределения песка; б — средние и 95%-ные доверительные интервалы распределения алеврита; в — средние и 99%-ные доверительные интервалы распределения пелита; 1 — зона лавинной аккумуляции осадков; 2 — зона аккумуляции алевритовых песков; 3 — зона аккумуляции песчаных алевритов; 4 — зона размыва

мельское, Ямальское и Обь-Енисейское. Циркуляция поверхностных вод происходит следующим образом (рис. 1): на юго-западе моря расположен замкнутый циклонический круговорот воды, в центральной части моря из Обь-Енисейского мелководья поверхностные течения направлены главным образом на север.

Известно [Карское..., 2016], что в Карском море льды существуют круглый год. Ледообразование начинается с сентября с северо-восточной части моря и далее распространяется по направлению к его южной и юго-западной частям, а в октябре лед охватывает уже почти всю поверхность моря. Ледовитость Карского моря составляет 85%. Здесь морские льды подразделяются на подвижные дрейфующие, а также неподвижные — припайные. В Карском море основную массу составляют дрейфующие льды, постоянно перемещающиеся под действием ветра и течений ледяные поля представляют собой льдины разных очертаний с размером от нескольких десятков метров до километра и более в поперечнике [Карское..., 2016].

Материалы и методы исследований. Для проведения статистического анализа использованы результаты исследований геохимии, гранулометрии и фациальным обстановкам поверхностных осадков, отобранных в ходе 5-й экспедиций на НИС «Академик Борис Петров» (2000, 2001 и 2003 г.) и НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2015 и 2016 г.) (табл. 1, 2). В этом регионе поверхностные осадки

отбирали с помощью дночерпателей типа Океан и бокс-корер. Глубина отбора поверхностных донных осадков составляла 2 см. В лаборатории геохимии осадочных пород ГЕОХИ РАН влажный осадок подвергался обработке ультразвуком для диспергации, а затем водно-механическому разделению на отдельные фракции ситовым методом и декантацией (аналитик Л.А. Задорина). Для выделения гранулометрических типов использована шкала С.К. Уэнтуорта [Wentworth, 1922, (цит. по [Фролов, 1993])]. Статистические анализы выполнены с помощью пакета Statgraphics plus ver. 5.

На основе изученного литологического, химического и фациального состава 53 образцов (табл. 1) проведен корреляционный анализ с целью определения взаимосвязи некоторых макроэлементов и гранулометрического состава. Анализ выполнен с помощью надстройки стандартного пакета Excel 2003 модулем StatPlus Ver. 5 по методике, описанной в [Берк и др., 2005]. Корреляция определяет степень зависимости между переменными [Иванов, 2005]. Корреляционный анализ уже применялся ранее при исследовании морских осадков в различных районах Мирового океана [Левитан и др., 2007, 2016; Hongjun et al., 2017; Nasra et al., 2014].

Кроме того, было изучено распределение гранулометрических фракций песка, алеврита и пелита в различных фациальных обстановках, соответствующих четырем выделенным кластерам (табл. 2, рис. 2). Известно, что с помощью однофакторного

Таблица 3

Значения коэффициента линейной корреляции для оксидов элементов в поверхностных (0–2 см) донных осадках в изученном регионе Карского моря

| Состав | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | MnO | K ₂ O | CaO | MgO | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | Гравий | Песок | Алеврит | Пелит |
|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------|------------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | 1,000 | -0,87 | -0,64 | -0,87 | -0,34 | -0,30 | -0,24 | -0,87 | -0,56 | -0,37 | 0,19 | 0,84 | -0,84 | -0,64 |
| Al ₂ O ₃ | | 1,000 | 0,73 | 0,69 | 0,18 | 0,61 | 0,18 | 0,77 | 0,37 | 0,10 | -0,17 | -0,74 | 0,75 | 0,52 |
| TiO ₂ | | | 1,000 | 0,64 | -0,06 | 0,14 | 0,30 | 0,74 | 0,24 | 0,04 | -0,30 | -0,66 | 0,69 | 0,53 |
| Fe ₂ O ₃ | | | | 1,000 | 0,22 | 0,05 | 0,01 | 0,79 | 0,57 | 0,55 | -0,21 | -0,79 | 0,78 | 0,64 |
| MnO | | | | | 1,000 | 0,18 | -0,22 | 0,20 | 0,43 | 0,44 | -0,14 | -0,11 | 0,14 | 0,09 |
| K ₂ O | | | | | | 1,000 | -0,06 | 0,07 | 0,09 | -0,15 | -0,03 | -0,09 | 0,13 | -0,06 |
| CaO | | | | | | | 1,000 | 0,26 | -0,29 | -0,16 | -0,09 | -0,10 | 0,16 | -0,04 |
| MgO | | | | | | | | 1,000 | 0,44 | 0,27 | -0,24 | -0,80 | 0,78 | 0,68 |
| Na ₂ O | | | | | | | | | 1,000 | 0,46 | 0,01 | -0,43 | 0,37 | 0,40 |
| P ₂ O ₅ | | | | | | | | | | 1,000 | -0,07 | -0,18 | 0,19 | 0,15 |
| Гравий | | | | | | | | | | | 1,000 | 0,11 | -0,32 | -0,29 |
| Песок | | | | | | | | | | | | 1,000 | -0,95 | -0,78 |
| Алеврит | | | | | | | | | | | | | 1,000 | 0,67 |
| Пелит | | | | | | | | | | | | | | 1,000 |

Примечание. Курсивом выделены значения коэффициента корреляции, отвечающие 95%-ному уровню значимости. Синим фоном обозначены значимые отрицательные значения коэффициента корреляции.

дисперсионного анализа можно изучать влияние одной независимой переменной или фактора на зависимую переменную [Иванов, 2005]. Этот анализ применялся ранее при изучении соотношения цвета и химического состава четвертичных донных осадков из южной части поднятия Менделеева и континентального склона Восточно-Сибирского моря [Левитан и др., 2014;], а также при исследовании взаимоотношений ряда компонентов верхнеплиоценовых отложений Индийского океана [Сыромятников и др., 2021].

В программе Surfer ver. 13, построены карты распределения гранулометрического состава современных осадков.

Результаты исследований и их обсуждение.

Корреляционный анализ поверхностного (0–2 см) слоя осадков с построением корреляционной матрицы Пирсона на основе их гранулометрии и химического состава позволил выделить две группы оксидов, связанных корреляционной зависимостью с песком, алевритом и пелитом (табл. 3). При этом уровень достоверности составил 95%. Первая группа представлена кремнеземом (SiO₂), а вторая — Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, MgO и Na₂O (табл. 3). При этом SiO₂ имеет положительный коэффициент корреляции с песком (+0,84) и отрицательные значения коэффициента корреляции с алевритом (-0,84) и пелитом (-0,64). В свою очередь вторая группа оксидов имеет положительную корреляцию с алевритом и пелитом и отрицательную с песком: 1) Al₂O₃ с песком (-0,74), с алевритом (+0,75) и (+0,52) с пелитом; 2) TiO₂ с песком (-0,66), с алевритом (+0,69), с пелитом (+0,53); 3) Fe₂O₃ с песком (-0,79), с алевритом (+0,78) и с пелитом (+0,64); 4) MgO с песком (-0,8), с алевритом (+0,78) и (+0,68) с пелитом; 5) Na₂O с песком (-0,43),

с алевритом (+0,37) и с пелитом (+0,4). Подчеркнем, что сильная корреляционная взаимосвязь SiO₂ и песка связана с высоким содержанием кварца, входящего в состав терригенного материала, источниками которого были реки Обь и Енисей [Левитан и др., 1998], а также дрейфующие морские льды [Левитан и др., 2012]. Отметим широкое распространение осадков с повышенным содержанием кварца в восточной и северной частях Центрального Карского плато [Гуревич, 2002]. При этом наблюдается положительная корреляция оксидов второй группы — Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, MgO и Na₂O — с алевритовой и пелитовой фракциями осадков. Это связано с тем, что указанные оксиды входят в состав кристаллических решеток минералов, составляющих алевритовую и пелитовую фракции. Кроме того, в изученном регионе отмечено повышенное содержание алевритовой фракции.

На следующем этапе исследований провели дисперсионный однофакторный анализ 53 образцов на основе данных о химическом и гранулометрическом составе осадков поверхностного слоя. В результате установлена закономерность распределения песка, алеврита и пелита в зависимости от их принадлежности к той или иной фациальной обстановке с уровнем достоверности 95%. В табл. 4 и 5 приведены результаты дисперсионного анализа: 1) суммы квадратов (SS, Sum of Squares); 2) степени свободы (Df); 3) средние квадраты (MS, Mean Square); 4) значения критерия Фишера; 5) *P-value*. При этом общее число степеней свободы (Df) равно числу исследуемых образцов за вычетом единицы. Отметим, что критерий Фишера определяется отношением средних квадратов между группами к средним квадратам внутри групп. Как следует из табл. 4, полученные

Таблица 4

Результаты дисперсионного анализа распределения фракций песка, алеврита и пелита в пределах четырех литолого-фациальных зон в изученном регионе Карского моря

| Литологический тип | Источник | Сумма квадратов, SS | Степени свободы, Df | Средние квадраты | F-отношение | P-значение |
|--------------------|----------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------|------------|
| Песок | Между группами | 24743,7 | 3 | 8247,86 | 28,55 | 0,0000 |
| | Внутри групп | 14155,0 | 49 | 288,878 | | |
| | Общая | 38898,7 | 52 | | | |
| Алеврит | Между группами | 18617,4 | 3 | 6205,81 | 34,99 | 0,0000 |
| | Внутри групп | 8691,13 | 49 | 177,37 | | |
| | Общая | 27308,6 | 52 | | | |
| Пелит | Между группами | 1750,22 | 3 | 583,406 | 18,60 | 0,0000 |
| | Внутри групп | 1536,72 | 49 | 31,3616 | | |
| | Общая | 3286,94 | 52 | | | |

Таблица 5

Средние значения содержания песка, алеврита и пелита для четырех литолого-фациальных зон в изученном регионе Карского моря

| Гранулометрические типы | Кластеры | Число образцов | Среднее значение | Минимальное значение | Максимальное значение |
|-------------------------|----------|----------------|------------------|----------------------|-----------------------|
| Песок | 1 | 18 | 13,3 | 0,34 | 40,43 |
| | 2 | 15 | 17,7 | 0,47 | 57,74 |
| | 3 | 8 | 23 | 4,72 | 48,07 |
| | 4 | 12 | 67,8 | 29,06 | 90,37 |
| | Общее | 53 | 28,4 | 0,34 | 90,37 |
| Алеврит | 1 | 18 | 67,9 | 45,48 | 86,45 |
| | 2 | 15 | 60,5 | 31,08 | 83,77 |
| | 3 | 8 | 53,4 | 39,78 | 68,36 |
| | 4 | 12 | 19,1 | 6,22 | 42,34 |
| | Общее | 53 | 52,6 | 6,22 | 86,45 |
| Пелит | 1 | 18 | 18,6 | 9,45 | 26,88 |
| | 2 | 15 | 20,8 | 11,18 | 32,22 |
| | 3 | 8 | 23,2 | 11,74 | 29,29 |
| | 4 | 12 | 7,1 | 1,56 | 14,71 |
| | Общее | 53 | 17,3 | 1,56 | 32,22 |

значения вероятности ошибки (*P-value*) составили <0,05, что свидетельствует о 95%-ной достоверности распределения фракций песка, алеврита и пелита в пределах фациальных обстановок.

На графиках (рис. 2, а, б, в) отражено распределение средних значений песчаной, алевритовой и пелитовой фракций (масс.%) в поверхностных осадках Карского моря в зависимости от их фациальной принадлежности. На графике (рис. 2) и из данных табл. 5 видно, что минимальные значения содержания песчаной фракции (среднее 13,3%) связаны с зоной лавинной седиментации (I), а максимальные (среднее значение 67,8%) — с зоной размыва, где максимально развиты гравийные и песчаные осадки (II). При этом алевритовая фракция в зоне лавинной аккумуляции осадков достигает максимума со средним содержанием 67,9%, несколько уменьшаясь в зонах аккумуляции песчаных алевритов (60,5%)

и алевритовых песков (53,4%) и резко сокращается до 19% в зоне размыва (табл. 5, рис. 2, б). Содержание пелитовой фракции несколько увеличивается от зоны лавинной аккумуляции осадков к области аккумуляции алевритовых песков до 23%, а затем резко уменьшается до 7% в области размыва (табл. 5, рис. 2, в).

Анализ средних, максимальных и минимальных значений глубины, характерных для каждой из четырех литолого-фациальных зон в изученном регионе (табл. 6, 7, рис. 2, г), указывает на отсутствие связи литологического состава с батиметрией. Это обусловлено тем, что механическая дифференциация осадочного материала в процессе его транспортировки реками Обь и Енисей в Карское море осложняется разбавляющей и перемешивающей деятельностью морских течений и волн.

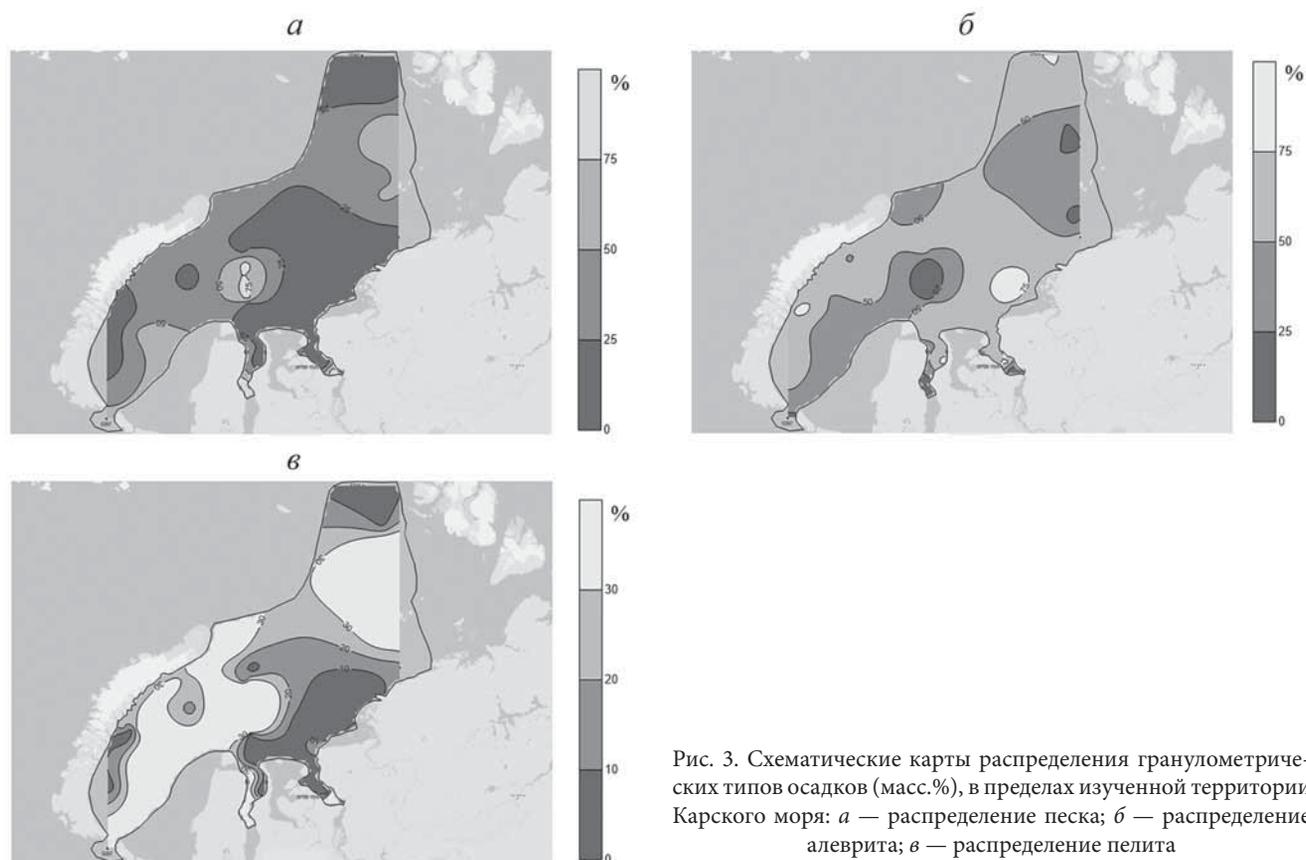


Рис. 3. Схематические карты распределения гранулометрических типов осадков (масс. %), в пределах изученной территории Карского моря: а — распределение песка; б — распределение алеврита; в — распределение пелита

Таблица 6

Результаты дисперсионного анализа взаимосвязи 4-х литолого-фациальных зон с глубиной в пределах изученного региона Карского моря

| Гранулометрический тип | Источник | Сумма квадратов, SS | Степени свободы, Df | Средние квадраты | F-отношение | P-значение |
|------------------------|----------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------|------------|
| Песок | Между группами | 125439 | 3 | 41813 | 5,01 | 0,0041 |
| | Внутри групп | 408736 | 49 | 8341,6 | | |
| | Общая | 534175 | 52 | | | |

Таблица 7

Средние значения глубины, характерные для четырех литолого-фациальных зон изученного региона Карского моря

| Кластеры | Число образцов | Среднее значение глубины, м | Минимальное значение | Максимальное значение |
|----------|----------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 18 | 176 | 11 | 350 |
| 2 | 15 | 77,5 | 13 | 218 |
| 3 | 8 | 84,8 | 6 | 160 |
| 4 | 12 | 63,8 | 10 | 242 |
| Общее | 53 | 109 | 6 | 350 |

На основе данных дисперсионного анализа о распределении гранулометрических типов поверхностных осадков в пределах изученного региона были построены схематические карты содержания песка (рис. 3, а), алеврита (рис. 3, б) и пелита (рис. 3, в). Характер распределения фракций в пределах исследуемого региона Карского моря показывает, что от 50 до 75% песчаной фракции наблюдается в восточной, центральной и юго-западной частях Карского моря. При этом ее содержание, превышающее 75%, отмечено на относительно небольшом участке в центральной части изученного региона, а содержание до 25% характерно для северной, северо-восточной и юго-восточной частей Карского моря. Наряду с этим выявлено широкое распространение алевритовой фракции с содержанием >75%, эта область охватывает большую часть рассматриваемой территории. В то же время пелитовая фракция с содержанием >30% наблюдается в восточной, юго-западной и центральной частях Карского моря и имеет здесь подчиненное значение.

Кроме того, в наши задачи входило изучение распределения пелитовой фракции и содержания Fe_2O_3 в области смешения речных и морских вод. Маргинальный фильтр [Лисицын, 1994] представляет собой довольно узкий в глобальных масштабах пояс, где происходит смешение речных и морских вод. Основное значение для работы маргинальных

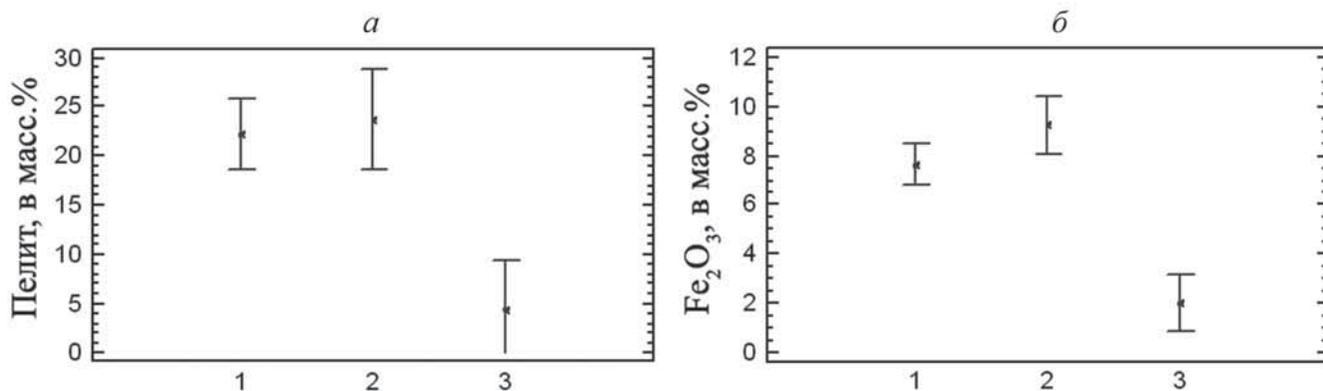


Рис. 4. Распределение пелитовой фракции и Fe₂O₃ (%) в трех фациальных зонах по данным дисперсионного анализа: а — средние и 95%-ные доверительные интервалы распределения пелита; б — средние и 95%-ные доверительные интервалы распределения Fe₂O₃; 1 — современные осадки в области эстуариев Оби и Енисея; 2 — современные осадки в основной зоне смешения речной и морской воды; 3 — современные осадки внутреннего шельфа изученной части Карского моря вне зоны смешения

Таблица 8

Распределение Fe₂O₃, песка, алеврита и пелита (масс.%) в трех переходных фациальных зонах Карского моря

| № станции | Фациальные зоны | Fe ₂ O ₃ | Песок | Алеврит | Пелит |
|------------|-----------------|--------------------------------|-------|---------|-------|
| BP01-71/4 | 1 | 5,170 | 42,95 | 42,34 | 14,71 |
| BP01-82/8 | 1 | 8,330 | 4,72 | 68,36 | 26,92 |
| 5328 | 1 | 8,250 | 6,90 | 68,70 | 22,82 |
| BP03-19GC | 2 | 7,950 | 5,95 | 65,41 | 26,58 |
| 5313 | 3 | 2,820 | 85,26 | 9,77 | 4,69 |
| 5310 | 3 | 2,150 | 74,48 | 8,90 | 3,34 |
| 5309 | 3 | 0,990 | 85,98 | 9,17 | 4,85 |
| 5349 | 2 | 10,010 | 0,79 | 69,92 | 29,29 |
| BP01-01/34 | 1 | 6,630 | 4,84 | 68,34 | 26,83 |
| 5335 | 1 | 9,050 | 11,93 | 72,52 | 15,55 |
| BP00-23/7 | 1 | 8,280 | 11,57 | 61,66 | 26,70 |
| BP00-7/5 | 2 | 9,770 | 0,95 | 83,77 | 15,28 |

Примечания. Фациальные зоны: 1 — современных осадков в области эстуариев рек Обь и Енисей; 2 — современных осадков в основной зоне смешения речной и морской воды; 3 — современных осадков внутреннего шельфа в изученной части Карского моря вне зоны смешения.

фильтров имеют три компонента сорбционной системы: глинистые минералы, Fe, C_{орг}, а меньшее — Mn и Al.

В результате проведения однофакторного дисперсионного анализа обнаружено соответствие между гранулометрическим и химическим составом осадков, что выражается в фациальном переходе от зоны смешения морских и речных вод к фоновой морской седиментации в современный период времени (табл. 8, 9, 10). В табл. 9 и 10 и на графиках (рис. 4, а, б) в зоне смешения речной и морской воды наблюдается увеличение пелитовой фракции (рис. 4, а), а также Fe₂O₃ (рис. 4, б), уровень достоверности 95%.

Необходимо добавить, что одно из основных направлений наших исследований — изучение степени интенсивности окислительного диагенеза в пределах рассматриваемого региона. Известно [Геохимия..., 1980; Розанов, 1976, 1980; Страхов, 1960; Фролов, 1992; Холодов, 2006, 2020], что к индикаторам раннего окислительного диагенеза относятся отношение Fe и Mn, их валентность и форма нахождения. В процессе раннего диагенеза в окислительных условиях в первую очередь увеличивается содержание Mn, а для восстановительной обстановки характерно его

Таблица 9

Результаты дисперсионного анализа распределения пелитовой фракции в пределах трех переходных фациальных зон (табл. 8)

| Источник | Сумма квадратов, SS | Степени свободы, Df | Средние квадраты | F-отношение | P-value |
|----------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------|---------|
| Между группами | 770,086 | 2 | 385,043 | 12,53 | 0,0025 |
| Внутри групп | 276,468 | 9 | 30,7187 | | |
| Общая | 1046,55 | 11 | | | |

Таблица 10

Результаты дисперсионного анализа распределения Fe₂O₃ в пределах трех переходных фациальных зон (табл. 8)

| Источник | Сумма квадратов, SS | Степени свободы, Df | Средние квадраты | F-отношение | P-value |
|----------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------|---------|
| Между группами | 91,0288 | 2 | 45,5144 | 28,03 | 0,0001 |
| Внутри групп | 14,6164 | 9 | 1,62405 | | |
| Общая | 105,645 | 11 | | | |

Таблица 11

Рассчитанное содержание отношений Mn/Al, Mn/Fe и MnO/SiO₂ по глубине

| H, м | Mn/Al | Mn/Fe | MnO/SiO ₂ | H, м | Mn/Al | Mn/Fe | MnO/SiO ₂ | H, м | Mn/Al | Mn/Fe | MnO/SiO ₂ | H, м | Mn/Al | Mn/Fe | MnO/SiO ₂ |
|------|-------|-------|----------------------|------|-------|-------|----------------------|------|-------|-------|----------------------|------|-------|-------|----------------------|
| 330 | 0,75 | 1,14 | 0,0658 | 34 | 0,08 | 0,08 | 0,0071 | 17 | 0,02 | 0,03 | 0,0021 | 16 | 0,15 | 0,20 | 0,0076 |
| 330 | 0,77 | 1,17 | 0,0670 | 38 | 0,07 | 0,08 | 0,0072 | 19 | 0,02 | 0,02 | 0,0018 | 18 | 0,01 | 0,03 | 0,0007 |
| 313 | 0,25 | 0,38 | 0,0257 | 48 | 0,13 | 0,16 | 0,0138 | 290 | 0,24 | 0,32 | 0,0297 | 23 | 0,02 | 0,03 | 0,0012 |
| 190 | 0,32 | 0,37 | 0,0358 | 51 | 0,20 | 0,30 | 0,0197 | 330 | 0,16 | 0,24 | 0,0170 | 28 | 0,03 | 0,04 | 0,0007 |
| 192 | 0,58 | 0,72 | 0,0480 | 128 | 0,09 | 0,13 | 0,0071 | 205 | 0,35 | 0,60 | 0,0261 | 28 | 0,04 | 0,11 | 0,0013 |
| 350 | 0,15 | 0,25 | 0,0157 | 6 | 0,02 | 0,03 | 0,0020 | 110 | 0,39 | 0,59 | 0,0302 | 32 | 0,08 | 0,21 | 0,0011 |
| 200 | 0,52 | 0,60 | 0,0467 | 160 | 0,01 | 0,02 | 0,0006 | 218 | 0,08 | 0,12 | 0,0066 | 47 | 0,00 | 0,00 | 0,0001 |
| 120 | 0,08 | 0,15 | 0,0094 | 29 | 0,02 | 0,03 | 0,0019 | 120 | 0,10 | 0,17 | 0,0092 | 90 | 0,07 | 0,11 | 0,0044 |
| 130 | 0,03 | 0,05 | 0,0031 | 34 | 0,02 | 0,03 | 0,0018 | 13 | 0,08 | 0,08 | 0,0071 | 108 | 0,10 | 0,20 | 0,0063 |
| 200 | 0,22 | 0,38 | 0,0249 | 99 | 0,01 | 0,02 | 0,0013 | 22 | 0,09 | 0,11 | 0,0069 | 242 | 0,13 | 0,23 | 0,0088 |
| 123 | 0,01 | 0,03 | 0,0013 | 108 | 0,02 | 0,03 | 0,0012 | 21 | 0,17 | 0,19 | 0,0165 | 10 | 0,04 | 0,06 | 0,0020 |
| 12 | 0,07 | 0,06 | 0,0057 | 159 | 0,03 | 0,06 | 0,0027 | 33 | 0,02 | 0,02 | 0,0015 | | | | |
| 11 | 0,04 | 0,05 | 0,0035 | 83 | 0,02 | 0,03 | 0,0012 | 30 | 0,10 | 0,12 | 0,0094 | | | | |
| 15 | 0,02 | 0,03 | 0,0022 | 124 | 0,03 | 0,09 | 0,0014 | 91 | 0,01 | 0,03 | 0,0013 | | | | |

сокращение [Волков, 1979]. После этого начинаются процессы восстановления Fe³⁺ до Fe²⁺. Известно, что Al и SiO₂ не участвуют в процессах раннего диагенеза [Левитан и др., 2014]. При этом коэффициент корреляции Пирсона между отношениями Mn/Fe, Mn/Al и MnO/SiO₂ составляет 0,9, что свидетельствует о наличии сильной корреляционной взаимосвязи между ними (табл. 11 и 12), что позволяет использовать их для изучения интенсивности окислительного диагенеза в пределах изученной части дна Карского моря.

При этом содержание отношения Mn/Al и Mn/Fe, MnO/SiO₂ было рассчитано по следующим формулам:

$$Mn = S_{(MnO)} / A_{r(MnO)} / A_{r(Mn)}$$

где S_(MnO) — содержание MnO, %; A_r — относительная атомная масса;

$$Fe = S_{(Fe_2O_3)} / A_{r(Fe_2O_3)} / A_{r(Fe)}$$

где S_(Fe₂O₃) — содержание Fe₂O₃, %;

Таблица 12

Значения коэффициента корреляции Пирсона для отношений Mn/Al, Mn/Fe и MnO/SiO₂

| | Mn/Al | Mn/Fe | MnO/SiO ₂ |
|----------------------|-------|-------|----------------------|
| Mn/Al | 1,000 | 0,985 | 0,987 |
| Mn/Fe | | 1,000 | 0,963 |
| MnO/SiO ₂ | | | 1,000 |

Таблица 13

Сводные данные регрессионного анализа взаимосвязи отношения Mn/Al и глубины; уравнение нелинейной регрессии Y = (a + bX)²

| Параметры | Значения коэффициентов уравнения регрессии | | Значение случайной ошибки уравнения регрессии | t-критерий Стьюдента | P-value |
|---|--|------------------------|---|----------------------|---------|
| a | 0,1687 | | 0,0321 | 5,2575 | 0,00 |
| b | 0,0013 | | 0,0002 | 5,7887 | 0,00 |
| Дисперсия | Сумма квадратов | Число степеней свободы | Оценка дисперсии | Критерий Фишера | P-value |
| Дисперсия регрессии | 0,8394 | 1 | 0,8394 | 33,51 | 0,00 |
| Дисперсия остатка | 1,2776 | 51 | 0,0251 | | |
| Общая дисперсия | 2,117 | 52 | | | |
| Коэффициент корреляции, R | | | | 0,63 | |
| Коэффициент детерминации, R ² , % | | | | 39,65% | |
| Скорректированный коэффициент детерминации, % | | | | 38,47% | |
| Стандартная ошибка | | | | 0,16 | |
| Среднее значение абсолютной ошибки | | | | 0,13 | |
| Статистика Дурбина-Ватсона | | | | 1,91 | |

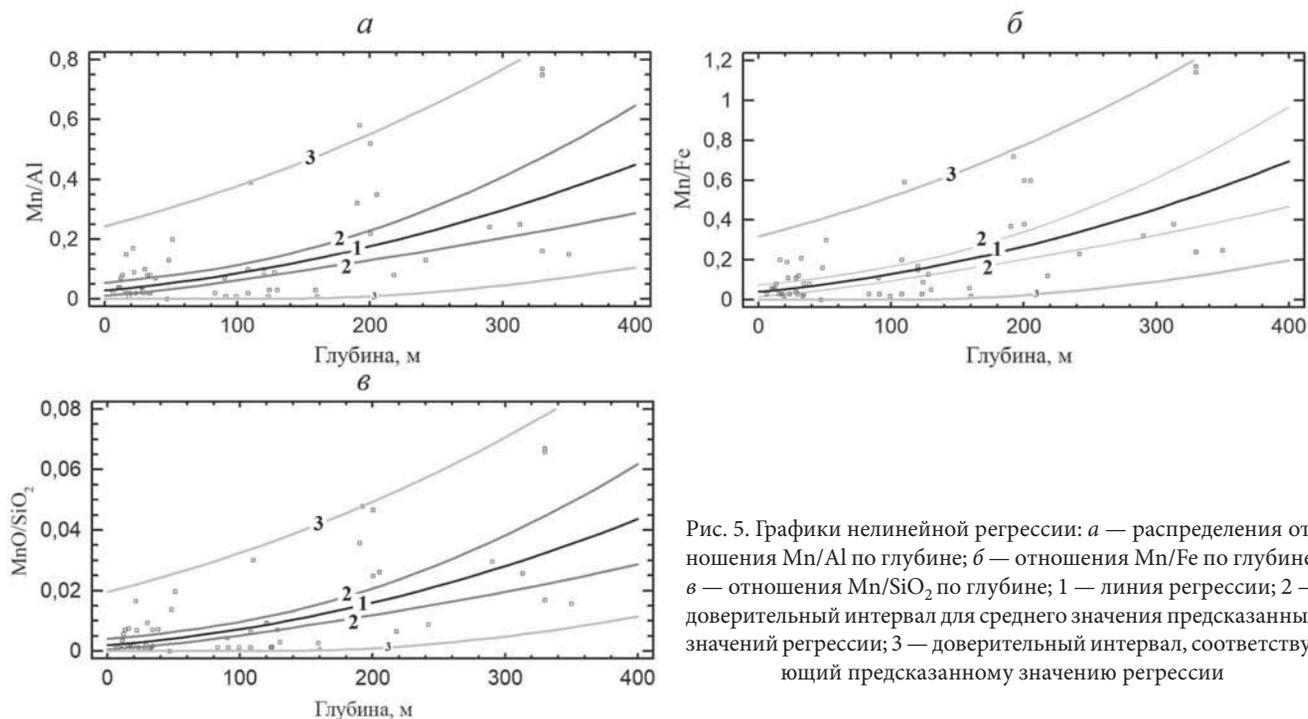


Рис. 5. Графики нелинейной регрессии: а — распределения отношения Mn/Al по глубине; б — отношения Mn/Fe по глубине; в — отношения Mn/SiO₂ по глубине; 1 — линия регрессии; 2 — доверительный интервал для среднего значения предсказанных значений регрессии; 3 — доверительный интервал, соответствующий предсказанному значению регрессии

$$MnO / SiO_2 = S_{(MnO)} / S_{(SiO_2)},$$

где S_(MnO) — содержание MnO, %, а S_(SiO₂) — содержание SiO₂, %.

Известно [Иванов, 2005], что основная цель одномерного регрессионного анализа — изучение взаимосвязи между зависимой и независимой переменными. В данном случае в качестве зависимых переменных приняты отношения Mn/Fe, Mn/Al и MnO/SiO₂, а независимую переменную представляет глубина моря.

Рассмотрение первой пары переменных позволило обнаружить положительную взаимосвязь величины отношения Mn/Al с глубиной с уровнем достоверности 99%, так как значение вероятности ошибки (*P-value*) составляет >0,01 (табл. 13 рис. 5, а).

Отметим, что рост отношения Mn/Al с глубиной моря составляет 39,7% (табл. 14). Стандартная ошибка регрессии (среднеквадратическое отклонение регрессионных остатков) равна 0,16. Уравнение ре-

Таблица 14

Предсказанные содержания Mn/Al по глубине с учетом уравнения регрессии Mn/Al = (0,169 + 0,00125 Н)²

| Прогнозные данные | | | |
|-------------------|-------|--------------|-------|
| Глубина Н, м | Mn/Al | Глубина Н, м | Mn/Al |
| 6 | 0,031 | 300 | 0,297 |
| 200 | 0,176 | 350 | 0,369 |
| 250 | 0,232 | | |

Таблица 15

Сводные данные регрессионного анализа взаимосвязи отношения Mn/Fe и глубины, уравнение нелинейной регрессии Y = (a + bX)²

| Параметры | Коэффициенты уравнения регрессии | | Значение случайной ошибки уравнения регрессии | t-критерий Стьюдента | P-value |
|---|----------------------------------|------------------------|---|----------------------|---------|
| | a | b | | | |
| a | 0,2007 | | 0,0361 | 5,565 | 0,00 |
| b | | 0,0016 | 0,00024 | 6,503 | 0,00 |
| Дисперсия | Сумма квадратов | Число степеней свободы | Оценка дисперсии | Критерий Фишера | P-value |
| Дисперсия регрессии | 1,3373 | 1 | 1,33725 | 42,29 | 0,00 |
| Дисперсия остатка | 1,6127 | 51 | 0,03162 | | |
| Общая дисперсия | 2,95 | 52 | | | |
| Коэффициент корреляции, R | | | | 0,67 | |
| Коэффициент детерминации, R ² , % | | | | 45,3% | |
| Скорректированный коэффициент детерминации, % | | | | 44,3% | |
| Стандартная ошибка | | | | 0,18 | |
| Среднее значение абсолютной ошибки | | | | 0,14 | |
| Статистика Дурбина-Ватсона | | | | 1,9 | |

Таблица 16

Предсказанные значения содержания Mn/Fe по глубине, с учетом уравнения регрессии $Mn/Fe = (0,201 + 0,0016H)^2$

| Прогнозные данные | | | |
|-------------------|-------|------------|-------|
| Глубина, м | Mn/Fe | Глубина, м | Mn/Fe |
| 6 | 0,04 | 300 | 0,46 |
| 200 | 0,27 | 350 | 0,57 |
| 250 | 0,36 | | |

грессии, которое описывает эту взаимосвязь, имеет следующий вид:

$$Mn/Al = (0,169 + 0,00125H)^2,$$

где H — глубина, м.

Модель регрессии показывает, что процессы окислительного диагенеза резко активизируются с увеличением глубины моря (рис. 5, а).

Распределение отношения Mn/Fe по глубине имеет положительную корреляцию ($R=0,67$, табл. 15, рис. 5, б). Величина отношения Mn/Fe с глубиной увеличивается на 45,3% (табл. 16). Стандартная ошибка регрессии составляет 0,18. Достоверность этой модели с учетом вероятности ошибки ($P\text{-value}<0,01$) составляет 99% (табл. 11). Уравнение нелинейной регрессии имеет вид: $Mn/Fe = (0,201 + 0,0016H)^2$.

Здесь мы также наблюдаем (табл. 12) повышенные значения Mn/Fe по мере увеличения глубины морского бассейна.

Таблица 17

Сводные данные регрессионного анализа распределения MnO/SiO₂ по глубине, уравнение нелинейной регрессии $Y = (a + bX)^2$

| Параметры | Коэффициенты уравнения регрессии | | Значение случайной ошибки уравнения регрессии | t-критерий Стьюдента | P-value |
|---|----------------------------------|------------------------|---|----------------------|---------|
| a | 0,04425 | | 0,0096 | 4,54 | 0,00 |
| b | 0,00041 | | 0,00006 | 6,43 | 0,00 |
| Дисперсия | Сумма квадратов | Число степеней свободы | Оценка дисперсии | Критерий Фишера | P-value |
| Дисперсия регрессии | 0,092 | 1 | 0,091 | 41,4 | 0,00 |
| Дисперсия остатка | 0,114 | 51 | 0,0022 | | |
| Общая дисперсия | 0,206 | 52 | | | |
| Коэффициент корреляции, R | | | | 0,67 | |
| Коэффициент детерминации, R ² , % | | | | 44,8% | |
| Скорректированный коэффициент детерминации, % | | | | 43,7% | |
| Стандартная ошибка | | | | 0,05 | |
| Среднее значение абсолютной ошибки | | | | 0,04 | |
| Статистика Дурбина-Ватсона | | | | 1,77 | |

Анализ распределения MnO/SiO₂ по глубине — величина отношения MnO/SiO₂ растет при увеличении глубины с 99%-ным уровнем достоверности ($P\text{-value}<0,01$, табл. 17, рис. 5, в). При этом коэффициент корреляции составляет 0,67, а коэффициент детерминации, соответственно, 44,8. Значение стандартной ошибки равно 0,05 (табл. 17). Уравнение регрессии, которое описывает эту взаимосвязь, имеет вид: $MnO/SiO_2 = (0,043 + 0,0004H)^2$.

В связи с тем, что SiO₂ входит главным образом в состав песчаной фракции, содержание которой заметно уменьшается с ростом глубины, а процессы окислительного диагенеза активизируются, это выражается в резком увеличении содержания оксидов марганца в осадках (рис. 5, в, табл. 18), что и отражает приведенное уравнение.

Заключение. В результате применения корреляционного анализа установлена связь гранулометрического состава осадков Карского моря с выделенными группами оксидов, что обусловлено минеральным составом пород питающих провинций. Кроме того, зависимость распределения пелиты, алевролита и пелита от фациальных обстановок, установленная с помощью однофакторного дисперсионного анализа, связана с транспортирующей деятельностью рек Обь и Енисей, а также морских течений и волн, которые не только перемещали, но и перемешивали поступающий в море терригенный материал. Это подтверждается обнаружением в зоне эстуариев Оби и Енисея нескольких слоев смешанного осадочного материала обь-енисейского происхождения, так называемый феномен заноса обского осадочного материала в эстуарий Енисея [Osadchiv et al., 2019].

Таблица 18

Предсказанные содержания MnO/SiO₂ по глубине с учетом уравнения регрессии $MnO/SiO_2 = (0,043 + 0,0004H)^2$

| Прогнозные данные | | | |
|-------------------|----------------------|------------|----------------------|
| Глубина, м | MnO/SiO ₂ | Глубина, м | MnO/SiO ₂ |
| 6 | 0,002 | 300 | 0,028 |
| 200 | 0,016 | 350 | 0,035 |
| 250 | 0,022 | | |

Таким образом, на процессы седиментации в пределах выделенных литолого-фациальных зон изученного региона влияли следующие основные факторы: 1) минеральный состав пород питающих провинций; 2) транспортирующая деятельность рек Обь и Енисей; 3) деятельность морских течений, волн и дрейфующих льдов; 4) рельеф дна морских фаций.

При этом процессы раннего окислительного диагенеза в поверхностных осадках Карского моря протекали в десятки раз интенсивнее с увеличением глубины дна морского бассейна, что установлено в процессе применения одномерного регрессионного анализа. Отметим, что наблюдается активизация окислительного диагенеза в интервале глубины от 6 до 350 м, что подтверждается ростом значения Mn/Al в 11,9 раз с увеличением глубины моря, Mn/Fe — в 14,3 раза, а MnO/SiO_2 — в 17,5 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Асадулин Э.Э., Мирошников А.Ю. Распределение разнородных терригенных донных осадков в западной части Карского моря по геохимическим признакам // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 98–105.

Асадулин Э.Э., Мирошников А.Ю., Величкин В.И. Геохимическая специализация донных осадков в зонах смешения вод Оби и Енисея с водами Карского моря // Геохимия. 2013. № 12. С. 1116–1129.

Берк К., Кэйри П. Анализ данных с помощью Microsoft Excel. М.: Изд. дом «Вильямс», 2005. 560 с.

Волков И.И. Окислительно-восстановительные процессы диагенеза осадков // Геохимия донных осадков / Отв. ред. И.И. Волков. М.: Наука, 1979. С. 363–413.

Горбунова З.Н. Высокодисперсные минералы в осадках Карского моря // Океанология. 1997. № 37. С. 785–788. Геохимия диагенеза осадков Тихого океана (транс-океанский профиль). М.: Наука, 1980. 288 с.

Гуревич В.И. Современный седиментогенез и геоэкология Западно-Арктического шельфа Евразии. М.: Научный мир, 2002. 135 с.

Иванов О.В. Статистика: Учебный курс для социологов и менеджеров. Ч. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 224 с.

Карское море. Экологический атлас. М.: ООО «Арктический Научный Центр», 2016. 271 с.

Кошелева В.А. Седиментогенез Карского моря. СПб.: Росс. госуд. гидрометеорологический ун-т (РГГМУ), 2014. 250 с.

Крылов А.А. Литология современных донных осадков северо-западной части Карского моря: Автореф. канд. дисс. СПб., 2000. 19 с.

Куликов Н.Н. Минералогический состав современных донных отложений Карского моря // Дельтовые и мелководно-морские отложения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 27–31.

Левитан М.А., Арнольд М., Буртман М.В. и др. К истории голоценовой седиментации в восточной части Карского моря // Океанология. 2000. № 4. С. 614–620.

Левитан М.А., Буртман М.В., Горбунова З.Н., Гурвич Е.Г. Кварц и полевые шпаты в поверхностном слое донных осадков Карского моря // Литология и полезные ископаемые. 1998. № 2. С. 115–125.

Основные факторы, которые влияли на степень интенсивности окислительного диагенеза в рассматриваемом регионе, связаны с глубиной моря: гидродинамический режим, рельеф дна и состав осадков морских фаций.

Благодарности. Авторы искренне признательны М.А. Левитану за плодотворное обсуждение 1-го варианта статьи, а также В.Ю. Русакову за предоставленные современные данные о химии и гранулометрии современных осадков поверхностного слоя, которые были использованы при написании статьи.

Финансирование. Участие К.В. Сыромятникова осуществлялось при финансовой поддержке госзаказа ГЕОХИ РАН № 0137-2019-0007; участие Р.Р. Габдуллина осуществлялось при финансовой поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Математические методы анализа сложных систем».

Левитан М.А., Буртман М.В., Демина Л.Л. и др. История голоценовой седиментации в южной части Карского моря // Литология и полезные ископаемые. 2004. № 6. С. 651–666.

Левитан М.А., Буртман М.В., Демина Л.Л. и др. Фациальная изменчивость поверхностного слоя осадков Обь-Енисейского мелководья и эстуариев Оби и Енисея // Литология и полезные ископаемые. 2005. № 5. С. 472–484.

Левитан М.А., Кукина Н.А. Минеральный состав легкой фракции верхнечетвертичных осадков желоба Святая Анна и его палеоокеанологическая интерпретация // Литология и полезные ископаемые. 2002. № 3. С. 306–315.

Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р. Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 2007. 404 с.

Левитан М.А., Сыромятников К.В. Методики выявления тонкой структуры полярной толщи и отложений морской изотопной стадии 6 в центральной части Северного Ледовитого океана // Геохимия. 2016. № 5. С. 457–464.

Левитан М.А., Сыромятников К.В., Кузьмина Т.Г. Некоторые литолого-геохимические особенности современной и четвертичной седиментации в Северном Ледовитом океане // Геохимия. 2012. № 7. С. 627–643.

Левитан М.А., Сыромятников К.В., Рощина И.А., Штайн Р. Соотношение цвета и химического состава четвертичных донных осадков из южной части поднятия Менделеева и континентального склона Восточно-Сибирского моря // Геохимия. 2014. № 3. С. 233–248.

Лейн А.Ю., Миллер Ю.М., Намсараев Б.Б. и др. Биогеохимические процессы цикла серы на ранних стадиях диагенеза осадков на профиле река Енисей–Карское море // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 681–692.

Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.

Мурдмаа И.О., Иванова Е.В. Последледниковая история осадконакопления в депрессиях шельфа Баренцева моря // Литология и полезные ископаемые. 1999. № 6. С. 142–154.

Розанов А.Г., Волков И.И., Соколов В.С. и др. Окислительно-восстановительные процессы в осадках Калифор-

нийского залива и прилегающей части Тихого океана // Биогеохимия диагенеза осадков океана. М.: Наука, 1976. 208 с.

Розанов А.Г., Волков И.И., Соколов В.С. Окислительно-восстановительные процессы. Формы железа и марганца в осадках и их изменение // Геохимия диагенеза осадков Тихого океана (трансокеанский профиль). М.: Наука, 1980. С. 22–46.

Русаков В.Ю., Кузьмина Т.Г., Левитан М.А. и др. Литолого-геохимическая типизация поверхностного слоя донных осадков Карского моря // Океанология. 2017а. Т. 57. № 1. С. 214–226.

Русаков В.Ю., Кузьмина Т.Г., Левитан М.А. и др. Некоторые особенности распределения тяжелых металлов в поверхностном слое осадков Карского моря // Геохимия. 2017б. № 12. С. 1088–1099.

Русаков В.Ю., Кузьмина Т.Г., Торпченнова Е.С., Жилкина А.В. Механизмы современной седиментации в Карском море по данным литолого-геохимического изучения поверхностного слоя донных осадков // Геохимия. 2018. № 11. С. 1076–1096.

Страхов Н.М. Основы литогенеза. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 203 с.

Сыромятников К.В., Левитан М.А. Применение дисперсионного и регрессионного анализов для изучения взаимоотношений ряда компонентов верхнеплиоценовых отложений Индийского океана // Геохимия Т. 66, № 2. С. 114–126.

Фролов В.Т. Литология. Кн. 1, 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 336 с; 1993, 406 с.

Холодов В.Н. Геохимия осадочного процесса. М.: ГЕОС. 2006. 126 с. (Тр. ГИН; вып. 574).

Холодов В.Н. Основы многостадийной фазовой дифференциации в осадочном породообразовании и рудогенезе. М.: ГЕОС, 2020. 126 с. (Тр. ГИН; вып. 623). aari.ru/resources/a0013_17/kara/Atlas_Kara_Sea_Winter/text/rejim.htm.

Burone L., Muniz P., Pires-Vanin A.M.S., Rodrigues M. Spatial distribution of organic matter in the surface sediments of Ubatuba Bay // J. Analit. Acad. Bras. Sci. 2003. Vol. 75, № 1. P. 75–90.

Costa E.M., Tassinari W.S., Pinheiro H.S.K. et al. Mapping soil organic carbon and organic matter fractions by geographically weighted regression // J. Environ. Quality. Vol. 47, № 4. P. 718–725.

Dethleff D., Kuhlmann G. Fram Strait sea-ice sediment provinces based on silt and clay compositions identify Siberian

Kara and Laptev seas as main source areas // Polar Res. 2010. Vol. 29. P. 265–282.

Gordeev V.V., Beeskov B., Volker R. Geochemistry of the Ob and Yenisey Estuaries: A Comparative Study // Berichte Polarforsch. 2007. Vol. 565. 235 p.

Gurevich V.I. Recent sedimentogenesis and environment of the Arctic shelf of Western Eurasia. Oslo: Norsk Polarinstitut, 1995. 95 p.

Hongjun L., Lin L., Sheng Y. et al. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in the seawater and sediment of Yalujiang Estuary // Marine Pollution Bull. 2017. Vol. 117. P. 499–506.

Levitan M.A., Kolesov G., Chudetsky M. Chemical characteristics of main lithofacies based on instrumental neutron-activation analysis data // Berichte Polarforsch. 2002. Vol. 419. P. 101–111.

Levitan M.A., Krupskaya V.V. Composition of fraction >125 μm from surface sediments (on BP01 and BP02 data). Berichte Polarforsch. 2003. Vol. 450. P. 27–34.

Nasra S.M., Khairyb M.A., Okbahc M.A., Solimana N.F. AVS–SEM relationships and potential bioavailability of trace metals in sediments from the Southeastern Mediterranean Sea // Egypt. Chemistry and Ecology. 2014. Vol. 30. P. 15–28.

Miroshnikov A.Y., Asadulin A.A. Tracking and Distribution of Radioactive Contamination from nuclear plants to the Bottom Sediments of Ob and Yenisei Rivers and Kara Sea Basin // Berichte Polarforschung. 2013. Vol. 300. P. 145–153.

Nürnberg D., Levitan M.A., Pavlidis J.A., Shelekhova E.S. Distribution of clay minerals in surface sediments from the eastern Barents and south-western Kara seas // Geol. Rundsch. 1995. Vol. 84. P. 665–682.

Schoster F., Stein R. Major and minor elements in surface sediments of Ob and Yenisei estuaries and the adjacent Kara Sea // Berichte Polarforsch. 1999. Vol. 300. P. 196–207.

Stein R., Dittmers K., Fahl K. et al. Arctic (palaeo) river discharge and environmental change: evidence from the Holocene Kara Sea sedimentary record // Quaternary Sci. Rev. 2004. Vol. 23. P. 1485–1511.

Stein R., Grobe H., Wahsner M. Organic carbon, carbonate, and clay mineral distributions in eastern central Arctic Ocean surface sediments // Marine Geol. 1994. Vol. 119. P. 269–285.

Zhang T., Wang R., Xiao W. et al. Characteristics of terrigenous components of Amerasian Arctic Ocean surface sediments: Implications for reconstructing provenance and transport modes // Marine Geol. 2021. Vol. 437. P. 1–13.

Статья поступила в редакцию 04.05.2022, одобрена после рецензирования 08.06.2022, принята к публикации 22.11.2022