

УДК 550.8.01: 550.85

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-4-87-101

ДЕТАЛИЗАЦИЯ ПОЗДНЕПЛИОЦЕН-ЧЕТВЕРТИЧНОЙ ИСТОРИИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ И ПРОЦЕССОВ ДИАГЕНЕЗА В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКОГО БАСЕЙНА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Кирилл Владимирович Сыромятников¹, Михаил Аркадьевич Левитан²,
Руслан Рустемович Габдуллин³✉

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; sykirv@gmail.com, <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0001-8798-4425>

² Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; m-levitan@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; gabdullin@geokhi.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

Аннотация. В результате одномерного регрессионного анализа были получены количественные параметры по распределению отношений Mn/Al и Mn/Fe в разрезах изученных скважин международного проекта глубоководного бурения № 151 (далее — ODP 151 рейса). На основе данных корреляционного анализа с построением матриц Пирсона и классического факторного анализа с варимаксным вращением было проведено расчленение достаточно однородных верхнеплиоцен-четвертичных осадков с выделением трех главных факторов, которые характеризуют историю седиментации и диагенеза в Норвежско-Гренландском бассейне. На основе применения методов статистического анализа проведены границы между литостратиграфическими подразделениями. Установлено, что на характер и степень интенсивности процессов диагенеза в данном регионе повлияли следующие основные факторы: условия седиментации в Норвежско-Гренландском бассейне в позднеплиоцен-четвертичное время, гранулометрический и химический состав изученных отложений, содержание в осадках органического углерода, скорости осадконакопления.

Ключевые слова: седиментогенез, диагенез, верхнеплиоценовые отложения, четвертичные отложения, Норвежско-Гренландский бассейн, факторный анализ, регрессионный анализ

Для цитирования: Сыромятников К.В., Левитан М.А., Габдуллин Р.Р. Детализация позднеплиоцен-четвертичной истории осадконакопления и диагенеза в восточной части Норвежско-Гренландского бассейна на основе методов математической статистики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 4. С. 87–101.

DETAILED LATE PLIOCENE-QUATERNARY SEDIMENTATION HISTORY AND DIAGENESIS PROCESSES IN THE EASTERN PART OF THE NORWEGIAN-GREENLAND BASIN BASED ON MATHEMATICAL STATISTICAL METHODS

Kirill V. Syromyatnikov¹, Mikhail A. Levitan², Ruslan R. Gabdullin³✉

¹ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; sykirv@gmail.com

² Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; m-levitan@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University; Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; gabdullin@geokhi.ru ✉

Abstract. As a result of univariate regression analysis, quantitative parameters on the distribution of Mn/Al and Mn/Fe ratios in the sections of the studied holes of ODP Leg 151 were obtained. On the basis of correlation analysis data with Pearson matrix construction and classical factor analysis with varimax rotation, a division of rather homogeneous Upper Pliocene-Quaternary sediments was carried out with the allocation of 3 main factors that characterize the history of sedimentation and diagenesis in the Norwegian-Greenland Basin. The boundaries between lithostratigraphic subdivisions are drawn on a strict mathematical basis. It is established that the nature and degree of intensity of diagenesis processes in this region were influenced by the following main factors: sedimentation environments in the Norwegian-Greenland Basin in the Late Pliocene-Quaternary time; grain-size and chemical composition of the studied sediments; total organic carbon content in the sediments; sedimentation rates.

Key words: sedimentogenesis, diagenesis, Upper Pliocene sediments, Quaternary sediments, Norwegian-Greenland Basin, factor analysis, regression analysis

For citation: Syromyatnikov K.V., Levitan M.A., Gabdullin R.R. Detailed Late Pliocene-Quaternary sedimentation history and diagenesis processes in the eastern part of the Norwegian-Greenland Basin based on mathematical statistical methods. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 4: 87–101. (In Russ.).

Введение. Изучение керна скважин глубоководного бурения, пробуренных в Норвежско-Гренландском бассейне [Larsen, et al., 1994; Myhre, et al., 1995; Talwani, et al., 1976], в Северном Ледовитом океане [Backman, et al., 2006], в Беринговом море [Левитан и др., 2018; Creager, et al., 1973], выявило в верхней части осадочного чехла существование марино-гляциальной осадочной формации, сформировавшейся в связи с оледенением Северного полушария. Как правило, эта толща представлена циклическим переслаиванием терригенных обломочных и глинистых осадков (пород), вмещающих материал ледового разноса, который может быть продуктом таяния как морского льда, так и айсбергов. Цикличность строения обусловлена чередованием оледенений и межледниковий. Считается, что начало глобального оледенения Северного полушария произошло 2,8 млн лет назад [Vogt, 1986]. Ранее граница между четвертичной системой и неогеном проходила на уровне (округленно) 1,8 млн лет назад [Gradstein, et al., 2004]. Теперь принято считать, что эта граница соответствует примерно 2,6 млн лет назад [Gradstein, et al., 2012].

Сравнительный анализ показал, что состав, структура и мощность рассматриваемой формации обладают сильной изменчивостью в зависимости от изменений фациальных условий седиментации, эволюции питающих провинций и других факторов. Авторский коллектив решил изучить соответствующие проблемы истории седиментации и диагенеза на примере этой осадочной толщи, вскрытой в восточной части Норвежско-Гренландского бассейна во время ODP 151 рейса тремя скважинами (907A, 908A и 909A,C) [Myhre, et al., 1995]. Следует отметить не только важное теоретическое значение такого исследования, но и возможные прикладные аспекты, например, с точки зрения нефтяной геологии.

К сожалению, плохая сохранность органических остатков не позволила провести участникам рейса детальный биостратиграфический анализ кернов. Поэтому приходится руководствоваться только сделанными определениями положения границы четвертичных и плиоценовых отложений, с одной стороны, и положением подошвы марино-гляциальных отложений, с другой.

Накопленный в мире опыт указывает на важность использования в историко-геологическом анализе геохимических данных. Известно, что существенные результаты могут быть получены за счет применения к ним методов математической статистики. В частности, они помогают получить определенные геологические выводы со статистической достоверностью с уровнем 95 и 99%. В данной статье использованы методы корреляционного, факторного и регрессионного анализов. Первый из них позволяет выделить геохимические ассоциации, взаимосвязанные между собой с уровнем достоверности 95%. На основе факторного анализа удается определить главные факторы, характеризующие

Таблица 1

Расположение скважин с координатами и глубиной дна в восточной части Норвежско-Гренландского бассейна [Myhre, et al.,1995]

Скважина	Координаты	Глубина моря, м
907A	69°14.989'N, 12°41.894'E	1800,8
908A	78°23.112'N, 1°21.637'E	1273,6
909A	78°35.065'N, 3°4.378'E	2622,5
909C	78°35.096'N, 3°4.222'E	2518,0

тот или иной геологический процесс (или сумму процессов). С помощью одномерного регрессионного анализа получаем количественные параметры и модели по линейным и нелинейным взаимосвязям между зависимой и независимой переменными. Данные регрессионного анализа использовались при изучении процессов седиментогенеза и раннего диагенеза донных осадков, например, для Карского моря и эоцен-плейстоценовых отложений плато Ворринг [Сыромятников, Левитан, 2021; Сыромятников, Габдуллин, 2022; Сыромятников и др., 2023].

Материалы и методы исследований. В ODP 151 рейса было пробурено 7 скважин: с № 907 по 913. Нами использованы опубликованные материалы по содержанию оксидов петрогенных элементов, общему содержанию органического углерода (C_{org}), а также данные по плотности (ρ) верхнеплиоцен-четвертичных осадков по скважинам, расположенным с юга на север в последовательности: 907A, 908A, 909A,C (рис. 1, табл. 1, 2) [Myhre, et al.,1995].

На рис. 2 показаны данные по литологии и стратиграфии отмеченных скважин. При этом помещены только материалы по упоминавшейся марино-гляциальной толще. Сква. 907A расположена на юго-восточном окончании Норвежской глубоководной котловины. Две другие скважины были пробурены севернее, в переходной зоне между этой котловиной и структурами южного окончания пролива Фрама; здесь следует указать на то, что сква. 908A расположена в гребневой зоне небольшого подводного хребта Хогворд.

В сква. 907A вскрыта (сверху вниз) пачка темно-коричневых (вверху), серых и темно-серых переслаивающихся алевроитово-пелитовых, глинисто-алевритовых терригенных илов и фораминиферового алевроитового ила. В верхней части разреза присутствуют остатки кокколитов и радиолярий. Характерны редкие друпстоуны. Мощность пачки составляет 17 м. Нижняя пачка состоит из тех же осадков, но без биогенных компонентов и отличается различными оттенками серого цвета. Граница четвертичных и верхнеплиоценовых осадков находится на уровне 35 м.

Керн сква. 908A отличается более крупнозернистым составом. В нем доминируют темно-серые алевроиты и глинистые алевроиты, часто встречаются друпстоуны. В самом верху разреза (в первой

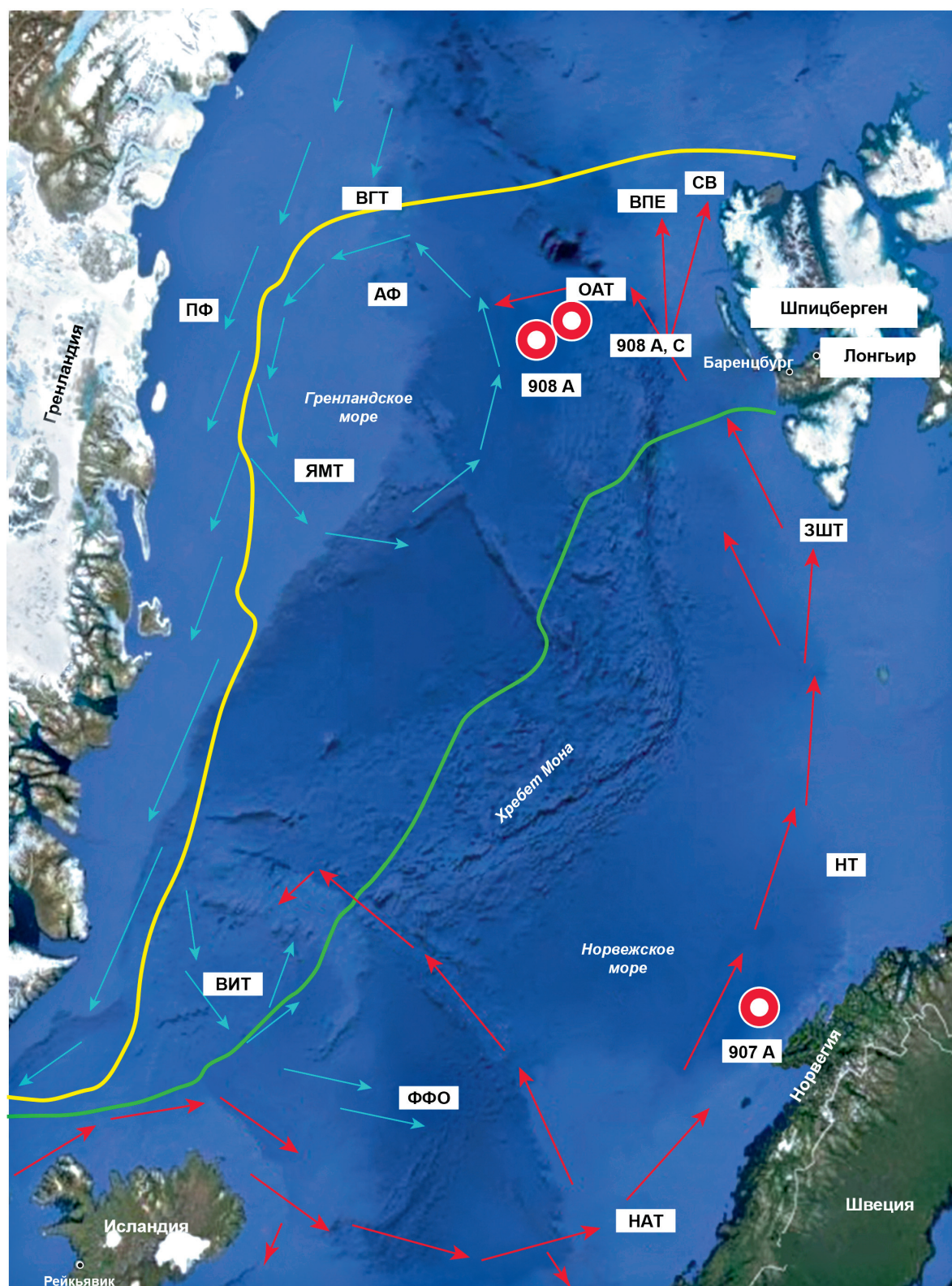


Рис. 1. Обзорная карта района исследования с указанием поверхностных течений и океанических фронтов [Маслов и др., 2022; Blindheim, Rey, 2004; Slubowska-Woldengen, et al., 2008] и положение скважин, пробуренных в международном проекте глубоководного бурения № 151 [Myhre et al., 1995]. Стрелки показывают направления перемещения вод: голубые — арктических, красные — вод Атлантического океана. НАТ — Норвежское Атлантическое течение; НТ — Нордкапское течение; ЗШТ — Западно-Шпицбергенское течение; СВ — Свальбардская ветвь; ВПЕ — ветвь плато Ермак; ОАТ — обратное Атлантическое течение; ЯМТ — Ян-Маеинское течение; ВИТ — Восточно-Исландское течение; ВГТ — Восточно-Гренландское течение; ПФ — Полярный фронт (граница между малосоленными полярными водами и холодными высокосолёными арктическими водами); АФ — Арктический фронт (граница между холодными арктическими и теплыми атлантическими водами); ФФО — фронт Фарерских островов. Желтым показано положение современной границы морских льдов в августе. Зеленым показано положение современной границы морских льдов в декабре [Wadhams, 1986]

Таблица 2

Таблица данных химического состава осадков, плотности натуральных осадков (ρ), содержания органического углерода ($C_{орг}$), отношений Mn/Fe и Mn/Al в верхнеплиоцен-плейстоценовых осадках восточной части Норвежско-Гренландского бассейна по скважинам 907А, 908А и 909А,С [Myhre, et al., 1995]

Глубина, м	SiO ₂ , %	TiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	MnO, %	MgO, %	CaO, %	Na ₂ O, %	K ₂ O, %	P ₂ O ₅ , %	ρ , г/см ³	$C_{орг}$, %	Mn/Fe	Mn/Al
скв. 907А														
0,25	52,69	1,06	12,63	7,01	0,17	3,36	7,01	3,24	2,44	0,23	1,49	0,08	0,008	0,006
1,67	53,37	1,03	14,46	7,21	0,23	3,45	6,14	2,5	2,82	0,26	1,61	0,11	0,010	0,007
3,2	54,27	0,87	13,93	6,31	0,2	3,1	6,64	2,53	2,74	0,11	1,68	0,13	0,010	0,006
4,74	55,52	0,89	14,16	6,85	0,27	3,5	5,14	2,33	2,97	0,21	1,66	0,14	0,013	0,008
6,24	56,93	0,92	13,61	7,00	0,09	3,21	4,95	2,46	2,9	0,3	1,68	0,15	0,004	0,003
7,56	60,28	0,92	15,00	6,67	0,1	3,14	2,44	2,43	2,95	0,21	1,7	0,16	0,005	0,003
10,54	50,5	1,04	14,12	6,7	0,18	3,17	7,96	2,9	2,8	0,19	1,54	0,18	0,009	0,006
13,54	54,3	0,94	14,24	6,59	0,13	2,95	5,05	2,84	3,01	0,18	1,45	0,20	0,006	0,004
16,54	48,69	1,27	13,87	7,77	0,15	3,14	7,08	3,16	2,6	0,23	1,49	0,21	0,006	0,005
17,04	60,49	0,93	14,57	7,53	0,09	3,33	1,96	2,50	3,01	0,17	1,83	0,23	0,010	0,006
20,04	61,46	0,95	15,42	6,66	0,21	2,98	2,1	2,72	3,29	0,17	2,09	0,24	0,003	0,002
23,04	65,52	0,8	13,86	5,75	0,05	2,11	1,72	2,31	2,89	0,24	1,49	0,25	0,003	0,002
26,04	57,72	1,05	15,22	8,67	0,08	3,11	2,06	2,62	3,51	0,2	1,84	0,26	0,004	0,002
26,83	62,53	0,92	14,45	6,54	0,08	2,97	1,96	2,53	3,25	0,16	1,8	0,27	0,003	0,002
29,52	61,07	0,93	16,42	6,67	0,07	2,96	1,9	2,67	3,40	0,13	1,85	0,28	0,076	0,050
32,52	61,47	0,9	13,67	6,56	1,57	2,91	2,16	2,23	3,16	0,15	1,85	0,29	0,002	0,001
35,75	62,6	0,91	16,03	6,48	0,05	2,72	1,86	2,86	3,20	0,14	1,70	0,29	0,003	0,002
36,05	60,1	0,93	15,55	8,41	0,07	2,99	1,93	2,56	3,34	0,14	1,87	0,30	0,003	0,002
39,04	61,35	0,88	15,95	7,55	0,06	2,88	1,84	2,39	3,49	0,14	1,88	0,31	0,003	0,002
42,03	60,63	1,00	17,17	7,4	0,06	2,94	1,96	2,41	3,4	0,12	1,45	0,31	0,003	0,002
44,97	56,72	1,46	17,16	8,67	0,09	3,26	2,87	3,33	2,96	0,15	1,89	0,32	0,003	0,002
45,57	61,56	0,9	15,55	7,63	0,06	2,74	1,87	2,36	3,45	0,15	1,59	0,32	0,003	0,002
48,55	59,68	1,17	16,71	7,79	0,07	3,03	2,24	2,88	3,12	0,13	1,78	0,33	0,003	0,002
51,54	61,26	0,93	16,56	7,03	0,06	2,95	1,94	2,6	3,22	0,14	1,58	0,34	0,003	0,002
54,55	59,31	1,08	16,63	7,93	0,07	2,99	2,14	2,78	3,09	0,12	1,46	0,34	0,003	0,002
55,04	58,67	1,17	16,21	7,49	0,08	3,24	2,79	3,37	2,85	0,15	1,49	0,35	0,003	0,002
скв. 908А														
4,92	61,05	0,88	15,92	5,85	0,04	3,15	1,98	2,21	3,16	0,24	1,96	0,53	0,003	0,001
9,68	64,41	0,85	15,02	5,3	0,09	2,61	1,91	2,57	2,88	0,15	1,96	0,54	0,007	0,003
19,29	67,38	0,72	13,1	4,96	0,04	2,66	2	2,31	2,94	0,35	1,95	0,56	0,003	0,001
29,54	61,05	0,95	16,72	6,68	0,04	2,88	1,85	2,15	3,09	0,16	1,95	0,58	0,003	0,001
37,54	61,42	0,93	16,61	6,5	0,04	2,89	1,82	2,04	3,19	0,17	1,94	0,59	0,003	0,001
47,03	63,97	0,7	13,51	4,34	0,03	2,6	1,76	2,71	2,81	0,19	1,94	0,61	0,003	0,001
56,46	62,82	0,87	16,15	5,79	0,03	2,68	1,79	2,32	3,16	0,17	1,93	0,63	0,002	0,001
67,15	61,32	0,9	16,6	6,51	0,04	3,03	1,88	2,16	3,31	0,16	1,93	0,65	0,003	0,001
76,56	61,83	0,97	16,82	7,45	0,04	2,81	1,7	1,9	3,07	0,16	1,92	0,67	0,002	0,001
86,14	60,83	0,93	15,64	6,39	0,08	2,64	1,85	2,02	2,71	0,18	1,92	0,69	0,005	0,002
94,59	63,04	0,92	15,95	6,22	0,04	2,88	1,8	2,09	3,22	0,15	1,91	0,71	0,003	0,001
105,36	61,73	0,89	16,13	6,62	0,03	2,79	1,77	2,18	3,06	0,2	1,91	0,74	0,002	0,001
115,56	59,59	1,06	18,04	7,77	0,04	2,78	1,84	2,1	2,83	0,1	1,90	0,76	0,002	0,001
125,18	57,87	1,02	18,92	7,88	0,04	2,9	1,72	2,01	2,98	0,12	1,90	0,79	0,002	0,001
133,4	61,89	1,06	17,64	6,58	0,03	2,6	1,67	2,01	2,76	0,06	1,89	0,81	0,002	0,001

Окончание табл. 2

Глубина, м	SiO ₂ , %	TiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	MnO, %	MgO, %	CaO, %	Na ₂ O, %	K ₂ O, %	P ₂ O ₅ , %	ρ, г/см ³	C _{орг} , %	Mn/Fe	Mn/Al
скв. 909А,С														
3,64	55,16	0,93	15,56	7,65	0,16	3,46	3,22	1,93	3,33	0,24	1,73	0,45	0,007	0,004
11,13	58,49	0,94	15,42	6,98	0,19	3,27	2,04	1,98	3,34	0,21	1,81	0,54	0,009	0,005
20,63	56,67	1,04	17,62	8,34	0,14	3,36	1,84	2,00	3,13	0,16	1,86	0,60	0,005	0,003
30,14	59,59	1,00	16,87	7,48	0,05	3,16	1,83	1,91	3,57	0,20	1,89	0,64	0,002	0,001
43,05	64,54	0,80	13,46	5,38	0,14	2,49	1,93	2,50	2,78	0,17	1,92	0,68	0,008	0,004
48,51	60,19	0,94	16,89	6,63	0,05	3,02	1,78	2,07	3,57	0,16	1,93	0,69	0,002	0,001
58,95	59,62	0,94	15,82	7,68	0,04	3,11	1,82	2,11	3,50	0,17	1,95	0,71	0,002	0,001
68,44	61,36	0,94	16,59	6,32	0,08	3,04	1,81	2,09	3,31	0,17	1,96	0,73	0,004	0,002
77,44	60,22	0,92	15,37	6,22	0,12	2,71	1,91	2,12	2,71	0,18	1,97	0,75	0,006	0,003
87,88	60,98	0,95	16,02	6,31	0,08	3,06	1,87	1,97	3,42	0,15	1,98	0,76	0,004	0,002
105,00	61,10	0,96	16,49	6,82	0,04	2,90	1,82	2,03	3,31	0,17	2,00	0,79	0,002	0,001
116,09	60,07	0,93	15,93	7,12	0,05	3,15	1,95	2,05	3,34	0,17	2,01	0,80	0,002	0,001
123,95	60,86	0,93	16,11	6,94	0,05	3,00	1,91	2,11	3,30	0,15	2,02	0,81	0,002	0,001
136,92	59,71	0,93	16,52	7,80	0,04	2,83	1,78	1,81	3,36	0,15	2,02	0,82	0,002	0,001
146,60	61,17	0,94	16,73	7,02	0,05	3,03	1,88	2,12	3,42	0,16	2,03	0,83	0,002	0,001
156,30	61,33	0,95	16,37	7,40	0,04	2,89	1,81	2,02	3,24	0,15	2,04	0,84	0,002	0,001
164,49	60,79	1,00	17,41	6,83	0,04	2,73	1,77	1,84	3,43	0,15	2,04	0,85	0,002	0,001
175,60	60,41	0,96	16,44	7,67	0,18	3,19	1,95	2,01	3,63	0,16	2,05	0,86	0,007	0,005
185,42	59,60	1,00	17,30	7,56	0,05	3,33	1,96	2,09	3,38	0,14	2,05	0,87	0,002	0,001
194,90	58,39	1,04	18,17	7,75	0,06	3,46	2,02	2,30	3,29	0,15	2,06	0,87	0,002	0,001
204,50	61,19	0,97	16,32	6,22	0,04	2,92	1,85	2,09	2,99	0,13	2,06	0,88	0,002	0,001
214,19	59,71	0,99	17,15	7,25	0,04	2,97	1,94	2,02	3,12	0,13	2,06	0,89	0,002	0,001
223,79	57,87	0,98	16,46	8,01	0,05	2,90	1,86	1,87	2,96	0,16	2,07	0,89	0,002	0,001
233,29	62,04	0,99	16,38	5,93	0,04	2,82	1,87	2,08	2,96	0,12	2,07	0,90	0,002	0,001
242,90	62,25	1,05	17,23	6,43	0,03	2,91	1,75	2,12	2,81	0,07	2,08	0,91	0,001	0,001
248,86	60,65	1,02	17,95	6,98	0,04	2,95	1,81	2,09	3,16	0,11	2,08	0,91	0,002	0,001

сверху пачке) отмечены редкие раковинки фораминифер. В нижней пачке остатки фораминифер отсутствуют. Граница пачек описана на 81 м, а подошва четвертичных осадков находится на уровне 50 м.

В скв. 909А,С рассматриваемая толща представлена переслаиванием темно-серых алевроитово-пелитовых и глинисто-алевритовых терригенных илов, вмещающих в верхней пачке (0–45 м) редкие кокколиты, а в нижней (45–249 м) — аутигенные включения черных полос моносulfидов и небольшие конкреции доломита. В обеих пачках описаны дропстоуны. Граница четвертичных и верхнеплиоценовых осадков находится приблизительно в интервале с 75 до 150 м [Myhre, et al., 1995].

Для сопоставления данных по химии и плотности натурального осадка (табл. 2) проведен одномерный регрессионный анализ, чтобы рассчитать плотность натурального осадка для тех горизонтов керна скважин 908А, 909А,С, где она не была измерена [Myhre, et al., 1995]. Затем был выполнен корреляционный анализ с построением матриц Пирсона на основе данных по химическому составу оксидов,

общему содержанию органического углерода, а также плотности верхнеплиоцен-четвертичных осадков данного региона для выявления положительных и отрицательных корреляционных связей между ними. На основе построенных матриц Пирсона для каждой из скважин проведен классический факторный анализ с варимаксным вращением с целью выделения основных факторов, которые позволили бы восстановить условия седименто- и диагенеза верхнеплиоцен-четвертичных осадков восточной части восточной части Норвежско-Гренландского бассейна. С помощью одномерного регрессионного анализа изучено распределение отношений Mn/Fe и Mn/Al в разрезах указанных выше скважин, которые отчасти характеризуют степень интенсивности процессов диагенеза в данном регионе в верхнеплиоцен-четвертичное время.

Факторный и одномерный регрессионный анализы были выполнены в программе Statgraphics plus v.5. Корреляционные матрицы Пирсона были построены с помощью надстройки стандартного пакета Excel 2003 модулем StatPlus Ver. 5 по методике [Берк и др., 2005].

Современная седиментация. Большую роль для данного региона играет система поверхностных течений (рис. 1). Поверхностное Северо-Атлантическое течение проходит между Фарерскими и Шотландскими островами и привносит теплые и соленые воды в Норвежское море, формируя Норвежское течение, в которое с запада впадают воды Восточно-Исландского течения. Дополнительный поток Норвежского течения (Норвежское прибрежное) направлен вдоль побережья Скандинавского полуострова на северо-восток и включает в себя также течения из Балтийского моря и норвежских фьордов.

Норвежское течение подразделяется на две ветви: Нордкапскую, которая уходит на восток в Баренцево море, и Западно-Шпицбергенскую, продолжающую движение на север. Воды Западно-Шпицбергенского течения вовлекаются в циклонический водоворот в центре Гренландского моря, направляясь на запад, а другие его ветви движутся в северо-восточном направлении в бассейне Северного Ледовитого океана как теплые течения промежуточной водной массы [Rossby, et al., 2009; Randelhoff, et al., 2018]. Вдоль восточного побережья Гренландии распространено Восточно-Гренландское течение, которое через Датский пролив перемещает холодные воды в Атлантический океан [McClelland, et al., 2012]. При этом Ян-Майенская ветвь направлена на юго-восток. В районе хребта Мона она поворачивает на восток, а затем на северо-восток. Вторая ветвь отделяется и движется в том же направлении от Восточно-Гренландского течения. В Исландской котловине ее воды формируют Восточно-Исландское течение (рис. 1). В изученном регионе четырьмя основными транспортирующими агентами осадочного материала является Норвежское течение, действующее в районе скважины 907А, Ян-Майенское течение в районе скважины 908А; обратное Атлантическое течение и Арктический фронт в районе скважины 909А,С.

Для данного региона особенно важен ледовый режим. На рис. 1 показано положение современной границы морских льдов в августе и декабре [Wadhams, 1986]. Видно, что зимой морские льды смещаются заметным образом к югу по всей акватории Норвежско-Гренландского бассейна.

Основными питающими провинциями для района скважины 907А являются гравийно-песчано-глинистые толщи мезозойско-кайнозойского возраста континентального шельфа западной Норвегии [Маслов и др., 2022] и норвежские каледониды, представленные гнейсами, кварцитами, мраморами, гранитами архейского и раннепротерозойского возраста, а также вулканогенно-осадочными толщами среднепротерозойского возраста [Хаин, 2001]. Для севернее расположенных скважин 908А и 909А,С главными питающими провинциями являются мезозойские метаморфизованные породы карбонатно-терригенного состава западного террейна Шпицбергена [Маслов и др., 2022; Хаин, 2001].

Продукты эрозии пород континентов и островов переносятся в бассейн аккумуляции с помощью береговой абразии, реками, айсбергами (особенно со Шпицбергена), морским льдом, гравитационными процессами и т.д.

Результаты исследований и их обсуждение. На основе одномерного регрессионного анализа 103 образцов по скважине 908А была установлена обратная взаимосвязь между плотностью натурального осадка и глубиной по разрезу (рис. 2) с уровнем достоверности 99%, p -value < 0,01. Коэффициент корреляции составляет: -0,5. Коэффициент детерминации равен 23,5%. Стандартная ошибка регрессии — 0,04. Взаимосвязь плотности и глубины по объединенному разрезу скважины 909А,С, напротив, носит положительный характер. Коэффициент корреляции равен 0,5, а коэффициент детерминации — 28,4%. Стандартная ошибка составляет 0,06. Данная модель регрессии имеет 99%-й уровень достоверности, поскольку p -value составляет менее 0,01 (табл. 3).

Таблица 3

Уравнение регрессии для расчета показателей плотности натурального осадка (ρ , г/см³) верхнеплиоцен-плейстоценовых отложений восточной части Норвежско-Гренландского бассейна для скважин 908А, 909А,С

Уравнение регрессии	Количество исследуемых образцов	Коэффициент корреляции, R, %	Коэффициент детерминации, R ² , %	Стандартная ошибка регрессии	p-value
Скв. 908А					
$\rho = 1/(0,51 + 0,13 \cdot 10^{-3} \cdot H)$	103	-0,5	23,5	0,04	0,000
Скв. 909А,С					
$\rho = 1,63 \cdot H^{0,044}$	78	0,5	28,4	0,06	0,000

На основе построенных корреляционных матриц Пирсона для каждой из скважин были определены положительные и отрицательные корреляционные связи с глубиной, а также основных оксидов (в мас.%), плотности (ρ , г/см³) и содержания органического углерода (в мас. %) на основе значимых коэффициентов корреляции с уровнем достоверности 95%. Данные корреляционного анализа приведены в табл. 4. В результате для скважины 907А были выделены две геохимические ассоциации, имеющие корреляцию с глубиной. Первая ассоциация представлена SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, C_{орг}, содержание которых возрастает с глубиной и имеет положительные коэффициенты корреляции, соответственно равные: 0,53; 0,82; 0,44; 0,55 и 0,97. Вторая ассоциация представлена P₂O₅ и CaO, содержание которых уменьшается с глубиной и их коэффициенты Пирсона равны -0,67 и -0,69. Корреляционные связи между основными оксидами, плотностью и содержанием органического углерода показаны в построенной матрице (табл. 4).

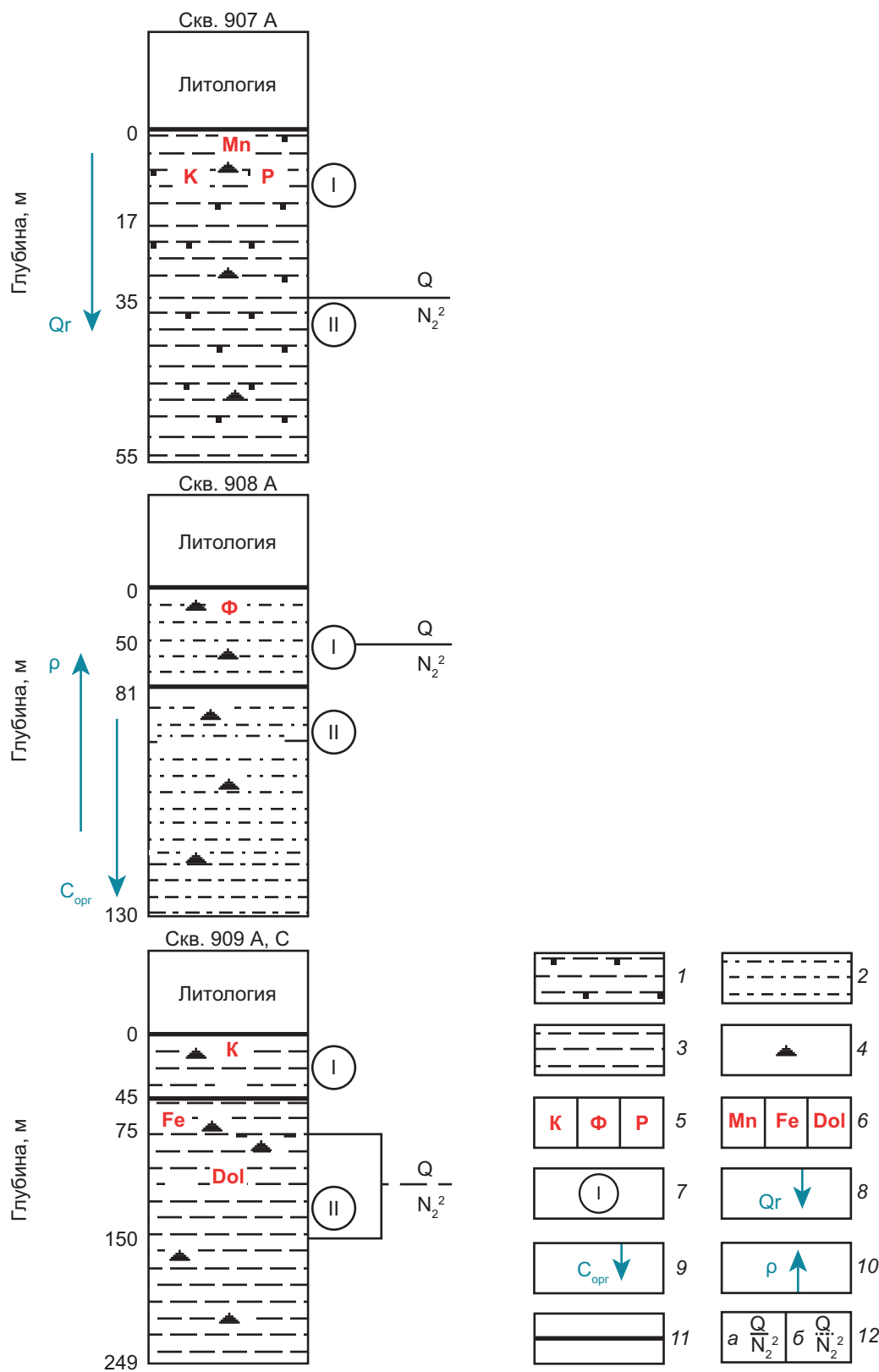


Рис. 2. Литологический разрез скважин 907А, 908А и 909А,С. Типы осадков: 1 — переслаивание алевритово-пелитового ила, пелитово-алевритового ила, фораминиферового алевритового ила с пелитовым илом; 2 — пелитовый ил, встречаются дропстоуны менее 5%; 3 — переслаивание пелитового, алевритово-пелитового и пелитового илов, с незначительным количеством известковых нанофоссилий менее 5% с моносulfидами железа по всему разрезу. Материалы ледового разноса: 4 — дропстоуны. 5 — биогенные остатки: К — кокколиты; Ф — фораминиферы; Р — радиолярии. 6 — аутигенные образования: Мп — оксигидроксиды Мп; Fe — моносulfиды железа; Dol — доломит. 7 — нумерация пачек; 8 — направление увеличения содержания зерен кварца; 9 — направление увеличения концентрации валового органического углерода; 10 — направление увеличения плотности натурального осадка (ρ , г/см³) по разрезу; 11 — литологические границы между пачками верхнеплицен-четвертичных осадков в соответствии с данными [Myhre, et al.,1995]; 12 — биостратиграфические границы: а — доказанные; б — предполагаемые [Myhre, et al., 1995]

Таблица 4

Корреляционная матрица Пирсона на основе данных по содержанию оксидов и органического углерода ($C_{орг}$), плотности (ρ), отношений Mn/Fe и Mn/Al в разрезах (H , м — глубина горизонта опробования) верхнеплиоцен-четвертичных осадков восточной части Норвежско-Гренландского бассейна по скважинам 907А, 908А и 909А,С

	H , м	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ρ , г/см ³	$C_{орг}$	Mn/Fe	Mn/Al
скв. 907А															
H , м	1,00	0,53	0,27	0,82	0,44	-0,08	-0,37	-0,69	0,16	0,55	-0,67	0,04	0,97	-0,12	-0,13
SiO ₂		1,00	-0,46	0,43	-0,16	0,01	-0,64	-0,93	-0,47	0,67	-0,38	0,36	0,61	0,00	-0,01
TiO ₂			1,00	0,32	0,64	-0,13	0,41	0,21	0,80	-0,30	-0,03	-0,06	0,19	-0,11	-0,10
Al ₂ O ₃				1,00	0,47	-0,34	-0,14	-0,63	0,16	0,60	-0,66	0,18	0,79	0,09	0,09
Fe ₂ O ₃					1,00	-0,22	0,35	-0,17	0,33	0,25	-0,17	0,18	0,38	-0,19	-0,19
MnO						1,00	0,03	0,04	-0,27	-0,05	-0,02	0,19	-0,06	-0,07	-0,07
MgO							1,00	0,51	0,31	-0,38	0,22	0,07	-0,46	0,07	0,07
CaO								1,00	0,32	-0,78	0,48	-0,42	-0,77	0,00	0,02
Na ₂ O									1,00	-0,46	-0,05	-0,19	0,07	-0,01	0,00
K ₂ O										1,00	-0,51	0,48	0,64	0,12	0,10
P ₂ O ₅											1,00	-0,21	-0,67	-0,11	-0,09
ρ												1,00	0,15	0,15	0,13
$C_{орг}$													1,00	-0,09	-0,09
Mn/Fe														1,00	1,00
Mn/Al															1,00
скв. 908А															
H , м	1,00	-0,54	0,67	0,65	0,65	-0,27	-0,14	-0,73	-0,55	-0,27	-0,64	-1,00	1,00	-0,46	-0,38
SiO ₂		1,00	-0,78	-0,88	-0,82	0,09	-0,47	0,40	0,59	-0,06	0,63	0,54	-0,54	0,36	0,27
TiO ₂			1,00	0,94	0,90	-0,04	0,22	-0,48	-0,78	-0,05	-0,78	-0,67	0,68	-0,32	-0,22
Al ₂ O ₃				1,00	0,92	-0,18	0,37	-0,51	-0,71	0,12	-0,76	-0,64	0,66	-0,44	-0,36
Fe ₂ O ₃					1,00	-0,12	0,37	-0,44	-0,83	0,10	-0,57	-0,65	0,65	-0,42	-0,29
MnO						1,00	-0,25	0,36	0,15	-0,36	0,00	0,26	-0,27	0,95	0,98
MgO							1,00	0,27	-0,38	0,75	0,07	0,15	-0,14	-0,36	-0,32
CaO								1,00	0,33	0,17	0,70	0,72	-0,72	0,46	0,44
Na ₂ O									1,00	-0,18	0,32	0,54	-0,54	0,43	0,28
K ₂ O										1,00	0,17	0,28	-0,28	-0,36	-0,37
P ₂ O ₅											1,00	0,64	-0,65	0,16	0,15
ρ												1,00	-1,00	0,45	0,37
$C_{орг}$													1,00	-0,45	-0,38
Mn/Fe														1,00	0,98
Mn/Al															1,00
скв. 909А,С															
H , м	1,00	0,29	0,49	0,49	-0,02	-0,56	-0,24	-0,33	0,01	-0,29	-0,81	0,90	0,93	-0,56	-0,57
SiO ₂		1,00	-0,34	-0,28	-0,77	-0,32	-0,74	-0,58	0,49	-0,27	-0,51	0,50	0,47	-0,13	-0,25
TiO ₂			1,00	0,90	0,43	-0,34	0,42	-0,17	-0,33	0,07	-0,47	0,33	0,36	-0,48	-0,43
Al ₂ O ₃				1,00	0,47	-0,46	0,38	-0,25	-0,31	0,26	-0,47	0,42	0,44	-0,59	-0,55
Fe ₂ O ₃					1,00	0,04	0,64	0,19	-0,49	0,45	0,23	-0,12	-0,10	-0,16	-0,03
MnO						1,00	0,29	0,49	0,09	0,00	0,59	-0,66	-0,66	0,97	0,99
MgO							1,00	0,47	-0,17	0,52	0,34	-0,39	-0,37	0,12	0,21
CaO								1,00	-0,07	0,07	0,59	-0,62	-0,57	0,42	0,49
Na ₂ O									1,00	-0,40	-0,18	0,09	0,07	0,23	0,15
K ₂ O										1,00	0,36	-0,20	-0,21	-0,11	-0,05
P ₂ O ₅											1,00	-0,82	-0,82	0,55	0,60
ρ												1,00	1,00	-0,63	-0,67
$C_{орг}$													1,00	-0,63	-0,66
Mn/Fe														1,00	0,99
Mn/Al															1,00

Примечание: Курсивом и п/ж показаны коэффициенты корреляции, отвечающие 95% уровню значимости. Курсивом — положительные, а п/ж — отрицательные значения коэффициентов корреляции с уровнем достоверности 95%.

По скважине 908А на основе положительных значимых коэффициентов корреляции с глубиной разреза выделяется первая геохимическая ассоциация, представленная TiO_2 , Al_2O_3 и $C_{орг}$ с коэффициентами корреляции, соответственно, равными 0,67; 0,65 и 1,00. Во вторую ассоциацию входят SiO_2 , CaO , P_2O_5 , а также и плотность натурального осадка; их содержания и величина плотности уменьшаются с глубиной. Коэффициенты Пирсона, соответственно, равны $-0,54$; $-0,73$; $-0,64$ и $-1,00$ (табл. 4). В совмещенном разрезе скважин 909А,С выделяются две группы геохимических параметров с положительной и отрицательной корреляцией по глубине. Первая группа имеет положительную связь с глубиной: TiO_2 — 0,49; Al_2O_3 — 0,49; ρ — 0,9; $C_{орг}$ — 0,93. Вторая группа представлена MnO , P_2O_5 , Mn/Fe , Mn/Al с отрицательными коэффициентами корреляции, соответственно, равными: $-0,56$; $-0,81$; $-0,56$; $-0,57$ (табл. 4).

На основе построенных матриц Пирсона был выполнен классический факторный анализ (табл. 5, рис. 3 и 4) с варимаксным вращением, который позволил выделить в составе довольно однородной верхнеплиоцен-четвертичной толщи осадков восточной части Норвежско-Гренландского бассейна 3 главных фактора, которые характеризуют процессы седименто- и диагенеза в данном регионе.

По скважине 907А были выделены 3 главных фактора, которые в сумме объясняют 84% дисперсии в исследуемых данных (рис. 3 и 4, табл. 5). Первый фактор составляет 45,9% от общей дисперсии, второй — 27,8%, а третий — 10,3%. Первый фактор отражает основной литологический и химический состав отложений. С ним положительно коррелируют SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O и $C_{орг}$, что связано с накоплением терригенно-глинистого материала, включающего обломки калиевых полевых шпатов (КПШ), а также кластики калишпатовых гранитоидов. Судя по особенностям его распределения по разрезу можно утверждать, что верхняя пачка обладает составом, существенно отличающимся от состава осадков нижней пачки. Возможно, что основным источником осадочного материала для верхней пачки служили рыхлые толщи шельфовых мезозойско-кайнозойских отложений, которые с помощью «бульдозерного» механизма сбрасывались на континентальный склон при наступаниях ледникового щита, доходившего до бровки шельфа [Vogt, 1986]. Тогда для нижней пачки в качестве основной питающей провинции можно предположить коренные породы каледонид Западной Норвегии. Положительные значения второго фактора связаны с отраженной в гранулометрии гидродинамики восточной части Норвежско-Гренландском бассейне в позднелиоцен-четвертичное время. Распределение второго фактора по разрезу позволило нам провести дополнительную границу между литологическими подпачками на уровне 39,04 м от уровня моря. В позднем плиоцене во время формирования нижней подпачки началось

Таблица 5

Результаты классического факторного анализа с варимаксным вращением оксидов, органического углерода и плотности верхнеплиоцен-четвертичных осадков восточной части Норвежско-Гренландского бассейна по скважинам 907А, 908А, 909А,С

Скважина №	Фактор №	Собственные значения	% дисперсии	Суммарный % дисперсии
907А	1	4,65	45,9	45,9
	2	2,82	27,8	73,7
	3	1,05	10,3	84,0
908А	1	6,40	56,5	56,5
	2	2,35	20,7	77,2
	3	1,19	10,5	87,7
909А,С	1	4,74	44,7	44,7
	2	3,46	32,6	77,3
	3	0,93	8,80	86,1

обширное оледенение Северного полушария, но поверхность моря только начинала покрываться морским льдом. В секции от 39,04 до 17,04 м (верхняя подпачка нижней пачки) изменения в гранулометрическом составе осадков связаны с активным развитием оледенения и формированием мариногляциальных отложений в плейстоцене. Интервал от 17,04 до 0 м (верхняя пачка) охватывает период седиментации, который связан с почти полным исчезновением ледового покрова и восстановлением деятельности поверхностных морских течений (рис. 1). В это время в большей степени развиты однообразные по составу гемипелагические тонкие алевритово-пелитовые осадки (табл. 5; рис. 2, 3). Третий фактор обусловлен диагенезом. В верхней пачке он связан с окислительным диагенезом Mn типа, с ним положительно коррелируют MnO , K_2O , а также плотность (табл. 5; рис. 3, 4). Ниже по разрезу уже преобладает диагенез восстановительного типа (особенно в верхней подпачке нижней пачки). По этому фактору (как и по двум предыдущим) в разрезе проявлены те же три литологические секции. С помощью рентгено-фазового анализа было установлено возрастание валового содержания кварца вниз по разрезу [Myhre, et al.,1995].

Для верхнеплиоцен-четвертичных осадков скважины 908А было выделено 3 главных фактора, составляющие 87,7% дисперсии. Первый фактор составляет 56,5% от общей дисперсии, с ним связаны высокие значения SiO_2 , Na_2O , P_2O_5 , плотности и CaO . Данный фактор отражает литологический состав более крупнозернистого карбонатно-терригенного (кварц-плагноклазового) обломочного материала, содержание которого уменьшается вниз по разрезу, что подтверждается как уменьшением плотности верхнеплиоцен-четвертичных осадков скважины 908А с глубиной, так и возрастанием в этом направлении концентраций $C_{орг}$ [Myhre, et al.,1995] (табл. 5; рис. 2; 3; 4). Не исключено, что это явление связано

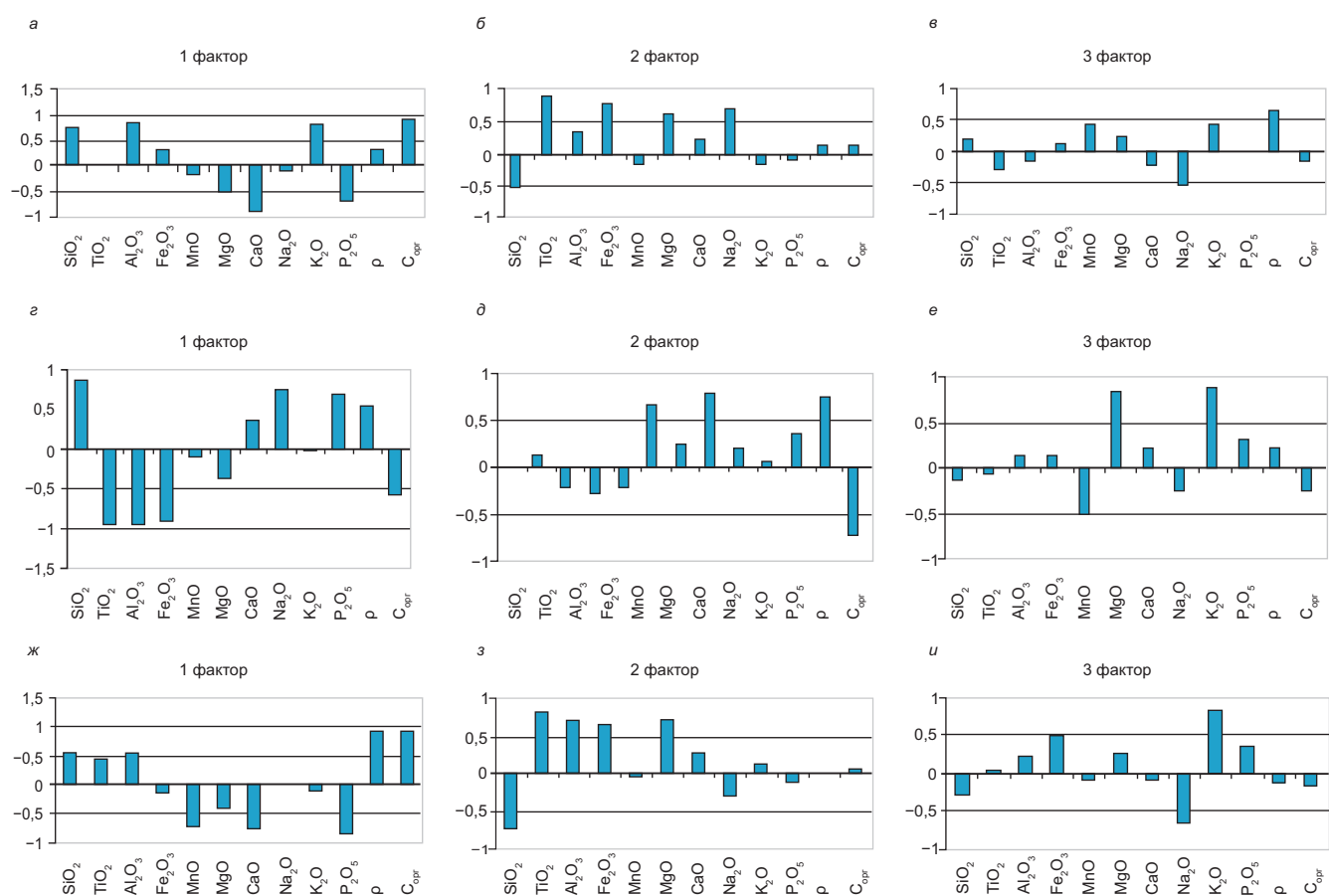


Рис. 3. Распределение факторных нагрузок для трех главных выделенных факторов: а-в — по скважине 907А; г-е — по скважине 908А; ж-и — по скважине 909А,С

не только с возрастанием глинистости осадков, но и с повышающимся выделением газообразных углеводородов (метана и его гомологов) в процессе диагенеза, которые разрыхляли осадки [Литология..., 1981]. Это было доказано на основе данных [Myhre, et al., 1995] по содержанию CH_4 и $\text{C}_{\text{орг}}$ в верхнеплиоцен-четвертичных осадках скважины 908А. В результате нами была установлена положительная нелинейная регрессионная взаимосвязь CH_4 и $\text{C}_{\text{орг}}$ с уровнем достоверности 99%, $p\text{-value} < 0,01$. Коэффициент корреляции равен 0,998, а коэффициент детерминации 99,7%. Стандартная ошибка составляет всего 0,01. В результате получено уравнение регрессии (рис. 5). На уровне 81 м удалось провести еще одну границу, отражающую уже не столь важные изменения в литологическом составе. Второго фактора составляет 20,7% от общей дисперсии и положительно коррелирует в большей степени с MnO , CaO и плотностью (табл. 5). Данный фактор отвечает процессу уменьшения роли средне-крупнозернистой гранулометрической фракции вниз по разрезу, что вызвано ослаблением гидродинамической активности придонного слоя с увеличением возраста. Рассмотрение распределения значений первого и второго факторов по глубине выявило границу на глубине 50 м, что полностью совпало с границей между четвертичными и плиоценовыми

отложениями (рис. 2). Отмеченная в распределении первого фактора дополнительная граница (81 м) прослежена и в распределении второго фактора. Третий фактор составляет всего 10,5% дисперсии и с ним связаны повышенные содержания MgO , K_2O , P_2O_5 . Третий фактор связан с восстановительной стадией диагенеза и отражает цикличность диагенетической активности, вероятно, в связи с ледниково-межледниковыми циклами (табл. 5). Интересно, что даже в распределении третьего фактора по глубине можно провести границу на уровне 81 м.

Рассмотрим 3 главных фактора, выделенных в пределах верхнеплиоцен-четвертичных отложений объединенного разреза скважин 909А,С (табл. 5). Первый фактор составляет 44,7%. Для него характерны повышенные содержания SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{C}_{\text{орг}}$ и значения плотности. Прежде всего он связан с литологическим составом и характеризует доминирующий алюмосиликатный состав существенно пелитовых осадков. Второй фактор составляет 32,6% от общей дисперсии и связан с гидродинамическим режимом восточной части Норвежско-Гренландского бассейна. Данный фактор положительно коррелирует с TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO и CaO , что отвечает карбонатно-терригенному и вулканогенному составу обломочного материала. Третий фактор,

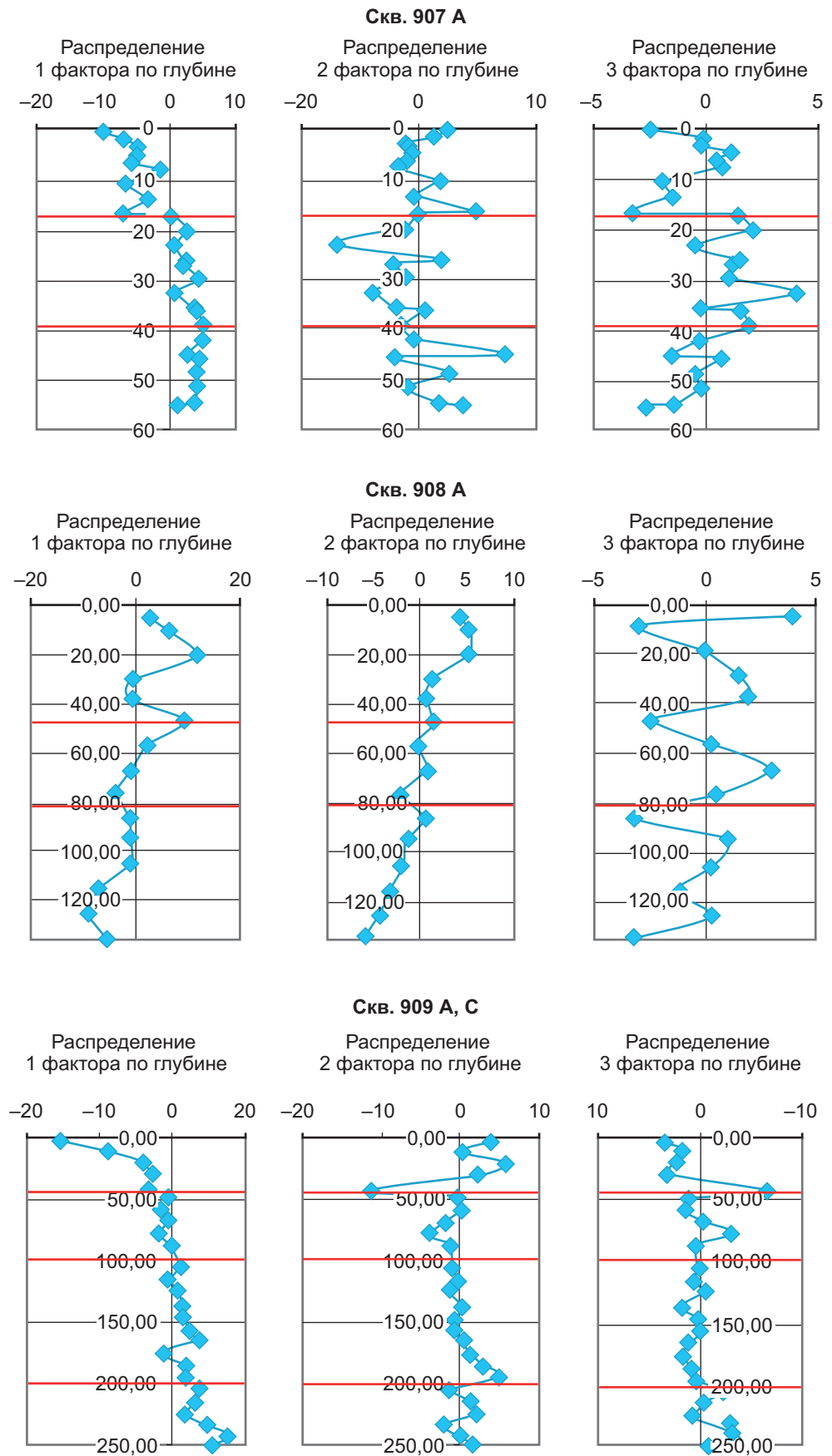


Рис. 4. Распределение проекций основных факторов по разрезу скважин 907А, 908А, 909А,С (в м). Красная линия — граница между пачками и подпачками верхнеплицен-четвертичных осадков в соответствии с результатами классического факторного анализа с варимаксным вращением

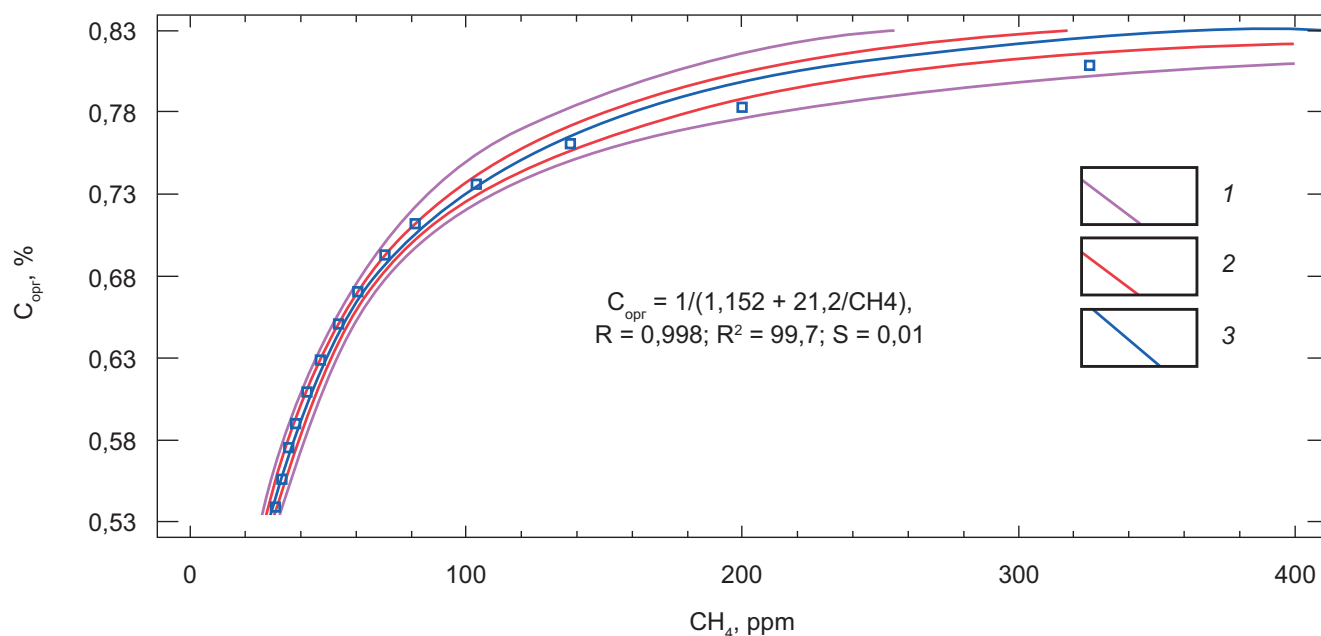


Рис. 5. Результаты регрессионного анализа прямой нелинейной взаимосвязи $C_{\text{орг}}$ и CH_4 в верхнеплиоцен-четвертичных осадках по скважине 908А. R — коэффициент корреляции; R^2 — коэффициент детерминации; S — стандартная ошибка. 1 — доверительный интервал, соответствующий предсказанному значению регрессии; 2 — доверительный интервал для среднего значения предсказанных значений регрессии; 3 — линия регрессии

который составляет 8,8% от общей дисперсии, отражает диагенетические процессы — восстановление Fe при образовании железистых моносulfидов и сидеритовых конкреций [Myhre, et al., 1995], возможное формирование диагенетических фосфатов, процессы иллитизации по смектиту. Поэтому для данного фактора характерны повышенные содержания Fe_2O_3 , K_2O и P_2O_5 .

По всем трем факторам удалось установить существование границ на уровнях 200, 100 и 45 м. Уровень 45 м соответствует ранее установленной авторами отчета по данному рейсу Проекта глубоководного бурения границе между верхней и нижней литологическими пачками. С нашей точки зрения, уровень 100 м можно рассматривать как подошву четвертичных осадков. Он попадает в предполагаемый интервал границы между четвертичным периодом и плиоценом (рис. 2). Граница 200 м введена нами впервые и она характеризует достаточно заметные изменения как в условиях седиментации, так и в восстановительном диагенезе. Обращает на себя внимание большое графическое сходство в поведении первого фактора для скважин 907А и 909А,С. Для скважины 907А объяснение этому уже было дано выше. Вероятно, его можно применить и для скважины 909А,С, имея в виду в качестве питающей провинции для верхней пачки отложения шельфа. Кроме того, между этими двумя скважинами выявлено и похожее трехчленное строение разреза, что обусловлено, в том числе, их существенно пелитовым составом.

Результаты одномерного регрессионного анализа по распределению отношений Mn/Al и Mn/Fe в скважинах 907А, 908А и 909А,С позволили оценить

и объяснить степень интенсивности диагенетических преобразований.

В итоге по скважине 907А выявлена обратная экспоненциальная зависимость отношения Mn/Al с глубиной по разрезу, с уровнем достоверности 99%, $p\text{-value} < 0,01$. Коэффициент корреляции равен $-0,5$, а коэффициент детерминации, который показывает долю изменения отношения Mn/Al с глубиной, составляет 25,3%. При этом стандартная ошибка (среднеквадратическое отклонение регрессионных остатков) равна 0,7. Наряду с этим отношение Mn/Fe имеет схожую обратную экспоненциальную взаимосвязь с глубиной с уровнем достоверности 99%, $p\text{-value} < 0,01$. Здесь и коэффициент корреляции, и коэффициент детерминации, и стандартная ошибка регрессии также равны $-0,5$, 25,3%, 0,7 (табл. 6; рис. 6).

В скважине 908А обнаружена обратная экспоненциальная зависимость распределения отношения Mn/Fe по глубине, с уровнем достоверности 95%, $p\text{-value} < 0,05$ (табл. 6; рис. 6, в). Коэффициент корреляции составляет $-0,6$. Коэффициент детерминации равен 32,5%, а стандартная ошибка — 0,3. При этом не установлена статистическая зависимость между отношением Mn/Al и глубиной в этой скважине.

Для скважины 909 зафиксирована достаточно сильная обратная зависимость распределения отношения Mn/Fe с глубиной, с уровнем достоверности 99%, $p\text{-value} < 0,01$. Коэффициент корреляции равен $-0,6$, а коэффициент детерминации — 40,6%. Стандартная ошибка составляет 0,05 (табл. 6; рис. 6, з). Распределение отношения Mn/Al также характеризуется сильной обратной взаимосвязью с глубиной, с уровнем достоверности 99%, $p\text{-value} < 0,01$ (табл. 6; рис. 6, д). При этом коэффициент корреляции равен

–0,7, а коэффициент детерминации –43,7%. Стандартная ошибка составляет всего 0,002. Сходство в распределении отношений Mn/Fe и Mn/Al обусловлено, вероятно, изменениями в составе терригенного материала ниже и выше границы 100 м. В свою очередь, именно эти изменения повлияли на активизацию диагенеза выше этой границы и ослабление — ниже ее. Это подтверждает проведенную нами границу между верхнеплиоценовыми и четвертичными отложениями. Ниже этой отметки происходит не резкое, а постепенное уменьшение отношения Mn/Fe, что связано с ледовыми условиями осадконакопления в четвертичное время и накоплением более грубого осадочного вещества, содержащего материалы ледового разноса в виде друпстоунов.

Распределение отношений Mn/Al и Mn/Fe в разрезе трех рассмотренных скважин отражает не только процессы диагенеза в восточной части Норвежско-Гренландского бассейна, но и историю осадконакопления в данном регионе. Следует отметить постепенное сокращение отношений Mn/Al и Mn/Fe, характерное для скважины 907А (рис. 6, а, б), где мощности верхнеплиоцен-четвертичных осадков небольшие и составляют всего 55 м. При этом слабо повышенные значения отношений Mn/Al и Mn/Fe отражают процессы окислительного диагенеза, а их сокращение с глубиной обусловлено восстановительным диагенезом. В керне скважины 908А выявлено отсутствие признаков сильного

Таблица 6

Результаты одномерного регрессионного анализа по распределению Mn/Fe и Mn/Al в верхнеплиоцен-четвертичных осадках восточной части Норвежско-Гренландского бассейна в разрезах скважин 907А, 908А, 909А,С

Уравнение регрессии	Количество исследуемых образцов	Коэффициент корреляции, R	Коэффициент детерминации, R ² , %	Стандартная ошибка регрессии	p-value
Скв. 907А					
Mn/Al = exp(–5,16 – 0,0223·H)	26	–0,5	25,3	0,7	0,008
Mn/Fe = exp(–4,74811 – 0,0219·H)	26	–0,5	25,3	0,7	0,009
Скв. 908А					
Mn/Fe = exp(–5,55 – 0,00495·H)	15	–0,6	32,5	0,3	0,03
Скв. 909А,С					
Mn/Fe = 0,0075·H ^{–0,36}	26	–0,6	40,6	0,05	0,0005
Mn/Al = 0,0097 – 0,00143·ln(H)	26	–0,7	43,7	0,002	0,0002
Скв. 907А					
Mn/Al = exp(–5,16 – 0,0223·H)	26	–0,5	25,3	0,7	0,008
Mn/Fe = exp(–4,74811 – 0,0219·H)	26	–0,5	25,3	0,7	0,009
Скв. 908А					
Mn/Fe = exp(–5,55 – 0,00495·H)	15	–0,6	32,5	0,3	0,03
Скв. 909А,С					
Mn/Fe = 0,0075·H ^{–0,36}	26	–0,6	40,6	0,05	0,0005
Mn/Al = 0,0097 – 0,00143·ln(H)	26	–0,7	43,7	0,002	0,0002

Примечание: H (в м) — глубина разреза по скважинам 907А, 908А, 909А,С.

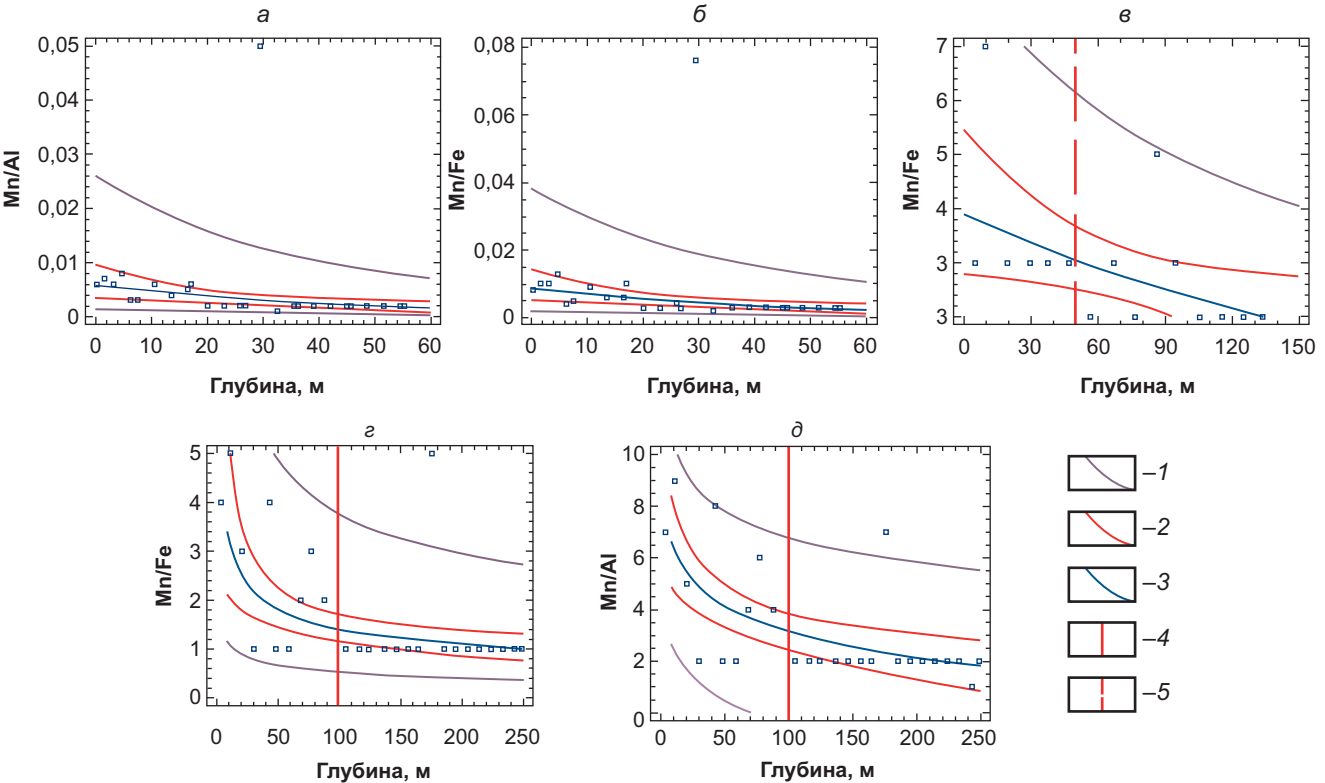


Рис. 6. Результаты регрессионного анализа прямой нелинейной взаимосвязи Mn/Fe и Mn/Al с глубиной по разрезу скважин: а, б — по скважине 907А; в — по скважине 908А; г, д — по скважине 909А,С. 1 — доверительный интервал, соответствующий предсказанному значению регрессии; 2 — доверительный интервал для среднего значения предсказанных значений регрессии; 3 — линия регрессии; 4 — граница доказанная; 5 — граница предполагаемая

окислительного диагенеза. Наблюдаемое распределение отношения Mn/Fe с глубиной (рис. 6, в) свидетельствует только о различном химическом составе четвертичных и верхнеплиоценовых осадков. Столь же четко различия в геохимии этих разновозрастных отложений видны по отношениям Mn/Fe и Mn/Al в керне скважины 909 (рис. 6, з, д). Однако диагенетические процессы проявлены явно сильнее в осадках последней скважины из-за их более тонкого гранулометрического состава и гораздо большей мощности.

Заключение. В результате применения методов математической статистики было произведено более детальное расчленение достаточно однородной толщи верхнеплиоцен-четвертичных осадков восточной части Норвежско-Гренландского бассейна на составляющие ее пакки и подпакки, чем было сделано в первичном описании в отчетах по ODP 151 рейса [Myhre, et al., 1995]. Так, в скважине 907А нижняя пакка была расчленена на две подпакки: 55–39 и 39–17 м. В керне скважины 909А,С в нижней пакке также выделены две подпакки: 249–200 и 200–45 м. Для скважины 908А нами установлено, что граница между четвертичными и верхнеплиоценовыми осадками строго совпадает с проведенной границей по результатам проведения классического факторного анализа с варимаксным вращением данных химического состава, содержания органического углерода, а также плотности натурального осадка. В скважине 909А,С обнаружено, что проведенная по результатам этого же анализа граница на уровне 100 м попала в предварительно определенный методами биостратиграфии интервал глубин для подошвы четвертичных отложений.

По результатам бурения в ODP 151 рейса [Myhre, et al., 1995] и проведенных авторами исследований выяснено, что скважина 907А относится к южной фациальной зоне, а остальные изученные скважины — к северной. Обе зоны отличаются своими питающими провинциями, степенью влияния атлантических вод, ледовым и гидродинамическим режимом, скоростями седиментации (судя по данным о мощностях синхроничных интервалов), историей процессов диагенеза.

В южной зоне питающей провинцией служит западная Норвегия и ее шельф, приток атлантических вод относительно велик (особенно он возрос в конце

четвертичного времени), усиление ледового режима во время оледенения Северного полушария произошло позже, чем на севере. Скорости седиментации отличаются небольшими величинами. Достаточно четко проявлен окислительный диагенез, а восстановительный диагенез ослаблен.

В северной фациальной зоне Западный Шпицберген и его шельф служили основным источником осадочного материала, относительное значение потока атлантических вод было гораздо меньше (хотя и здесь зафиксированы его проявления в конце плейстоцена-голоцене), ледовый морской режим установился почти сразу после начала оледенения Северного полушария. Скорости седиментации более высокие, причем они заметно меньше в условиях подводного хребта, чем в котловине, и здесь же на хребте формировались более крупнозернистые осадки. Доминирует восстановительный диагенез, вплоть до образования скоплений моносльфидов и мелких конкреций доломитов в условиях относительно высоких скоростей седиментации пелитовых осадков.

Были выделены основные факторы, которые оказывали влияние на характер и степень интенсивности диагенеза в данном регионе: 1) условия седиментации; 2) гранулометрический и минеральный состав верхнеплиоцен-четвертичных осадков; 3) содержание органического углерода; 4) скорости осадконакопления в восточной части Норвежско-Гренландского бассейна.

Примененные методы исследования позволили математически точно обосновать литостратиграфическое расчленение верхнеплиоцен-четвертичной толщи марино-гляциальных отложений в восточной части Норвежско-Гренландского бассейна. На этой основе детализирована история осадконакопления, изменения гидродинамической активности придонных вод, эволюция диагенеза в различных фациальных условиях.

Финансирование. Участие всех авторов осуществлялось при финансовой поддержке госзаказа ГЕОХИ РАН им. В.И. Вернадского. Участие Р.Р. Габдуллина происходило также при финансовой поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Математические методы анализа сложных систем».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берк К., Кэйри П. Анализ данных с помощью Microsoft Excel / Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2005. 560 с.
- Левитан М.А., Гельви Т.Н., Сыромятников К.В. и др. Фациальная структура и количественные параметры плейстоценовых отложений Берингова моря // Геохимия. № 4. 2018. С. 321–335.
- Литология на новом этапе развития геологических знаний. М.: Наука, 1981. 270 с.
- Маслов А.В., Клювиткин А.А., Козина Н.В. и др. Минеральный и химический состав поверхностных

донных осадков ряда районов восточной части Норвежско-Гренландского бассейна // Океанология. 2022. Т. 62, № 5. С. 795–810.

Сыромятников К.В., Габдуллин Р.Р. Основные факторы 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.

Сыромятников К.В., Габдуллин Р.Р., Левитан М.А. Количественные параметры диагенетических преобра-

зований в эоцен-плейстоценовых осадках плато Воринг (Норвежское море) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 6. С. 55–66.

Сыромятников К.В., Левитан М.А. Применение дисперсионного и регрессионного анализов для изучения взаимоотношений ряда компонентов верхнеплиоценовых отложений Индийского океана // Геохимия. 2021. Т. 66, № 2. С. 114–126.

Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. М.: Научный мир, 2001. 606 с.

Backman J., Moran K., McInroy D.B., Mayer L.A., et al. Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program. V. 302. DOI: 10.2204/iodp.proc.302.2006. 2006.

Blindheim J., Rey F. Water-mass formation and distribution in the Nordic Seas during the 1990s // ICES Journal of Marine Science. 2004. V. 61. P. 846–863.

Creager J. S., Scholl D.W., Supko P.R., et al. Init. Repts. DSDP, 19. Washington DC, U.S. Govt. Print. Office, 1973. P. 897.

Gradstein F.M., Ogg J.G., Smith A.G. A Geologic Time Scale 2004. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004. 599 p.

Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. The geologic time scale 2012. Amsterdam: Elsevier, 2012. 1176 p.

Larsen H.C., Saunders A.D., Clift P.D., et al. Proceedings of the ODP // Init. Repts. 1994. V. 152. College Station, TX (Ocean Drilling Program). P. 5–16.

McClelland J.W., Holmes R.M., Dunton K.H., Macdonald R.W. The Arctic Ocean Estuary // Estuaries and Coasts. 2012. V. 35. P. 353–368.

Myhre A.M., Thiede J., Firth J.V., et al. Proceedings of the ODP // Init. Repts. 1995. V. 151. College Station, TX (Ocean Drilling Program). P. 925.

Randelhoff A., Reigstad M., Chierici M., et al. Seasonality of the Physical and Biogeochemical Hydrography in the Inflow to the Arctic Ocean Through Fram Strait // Front. Mar. Sci. V. 5. P. 1–16. 2018. doi:10.3389/fmars.2018.00224.

Rosby T., Ozhigin V., Ivshin V., Bacon S. An isopycnal view of the Nordic Seas hydrography with focus on properties of the Lofoten Basin // Deep-Sea Research I. 2009. V. 56. P. 1955–1971. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.07.005>.

Slubowska-Woldengen M., Koč N., Rasmussen T.L., et al. Time-slice reconstructions of ocean circulation changes on the continental shelf in the Nordic and Barents Seas during the last 16,000 cal. yr B.P. // Quaternary Sci. Reviews. 2008. V. 27. P. 1476–1492.

Talwani M., Udintsev G.B., White S.M. Init. Repts. DSDP. Washington DC, U.S. Govt. Print. Office. 1976. V. 38. P. 1243.

Vogt P.R. Sea floor topography, sediments and paleoenvironments // The Nordic seas / Ed. by B.G. Hurdle. Berlin: Springer-Verlag, 1986. P. 237–412.

Wadhams P. The ice cover // The Nordic seas / Ed. by B.G. Hurdle. Berlin: Springer-Verlag, 1986. P. 21–84.

Статья поступила в редакцию 23.03.2024,
одобрена после рецензирования 03.06.2024,
принята к публикации 18.08.2024