

УДК 550.8.01: 550.85
doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-1-55-65

ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ УСЛОВИЙ СЕДИМЕНТАЦИИ В ФУШУНЬСКОМ БАССЕЙНЕ МЕТОДАМИ 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 статье с помощью методов математической статистики установлена взаимосвязь климатических изменений и условий седиментации для 4-х стадий накопления фусинской и шахайской угленосных формаций Фушуньского угольного бассейна в апт-альбское время. В результате было отмечено, что увеличение влажности климата совпало с широко распространенным анонским океаническим событием Паукье (Paquie, OAE1b) в раннеальбское время. Кроме того, выявлено существенное влияние фацальных условий на интенсивность процессов торфо- и угленакопления фусинской и шахайской угленосных формаций.

Активизации процессов торфонакопления и углеобразования способствовали увеличение влажности климата, активизация сноса обломочного материала, понижение уровня воды в пресноводных водоемах Фушуньского бассейна.

Ключевые слова: Фушуньский угольный бассейн, раннемеловой период, угленосные отложения, фаши, регрессионный анализ, дисперсионный анализ, корреляционный анализ

Для цитирования: Сыромятников К.В., Левитан М.А., Габдуллин Р.Р. Палеоклиматические и палеогеографические реконструкции условий седиментации в Фушуньском бассейне методами математической статистики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 1. С. 55–65.

PALEOCLIMATIC AND PALEOGEOGRAPHIC RECONSTRUCTIONS OF SEDIMENTATION CONDITIONS IN THE FUXIN BASIN USING METHODS OF MATHEMATICAL STATISTICS

Kirill V. Syromyatnikov¹✉, Michail 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. In the paper, the relationship between climatic changes and sedimentation conditions for 4 accumulation stages of the Fuxin and Shahai coal-bearing formations of the Fuxin coal basin in the Aptian-Albian time was established using mathematical statistical methods. As a result, it was observed that the increase in climate humidity coincided with the widespread anoxic oceanic Paquie event (Paquie, OAE1b) during the early Albian time. In addition, a significant influence of facies conditions on the intensity of peat and coal accumulation processes of the Fuxin and Shakhai coal-bearing formations was revealed.

Activation of peat accumulation and coal formation processes was promoted by increase of climate humidity, activation of clastic material supply, lowering of water level in freshwater reservoirs of the Fuxin basin.

Keywords: Fuxin coal basin, early Cretaceous period, coal deposits, facies, regression analysis, dispersion analysis, correlation analysis

For citation: Syromyatnikov K.V., Levitan M.A., Gabdullin R.R. Paleoclimatic and paleogeographic reconstructions of sedimentation conditions in the Fuxin basin using methods of mathematical statistics. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 1: 55–65. (In Russ.).

Введение. Исследования, посвященные изменению палеоклимата в период формирования различных месторождений полезных ископаемых, являются весьма актуальными в практическом применении. Это позволяет на основе изучения

климатических изменений в геологическом прошлом предсказывать условия формирования ряда полезных ископаемых в различных регионах. В данной статье с помощью методов математической статистики были изучены изменения палеоклимата

и условия накопления фусинской и шахайской угленосных формаций Фушуньского угольного бассейна (КНР). Кроме того, проведена корреляция между отложениями, богатыми и обедненными угольными пластами. Работы с использованием статистических методов анализа успешно применялись нами в ряде исследований [Левитан, Сыромятников и др., 2014; Сыромятников, Левитан, 2021; Сыромятников, Габдуллин, 2022]. В результате проанализировано влияние климатических условий в апт-альбское время (OAE1b) на процессы седиментации в Фушуньском угольном бассейне.

Изучению палеоклиматических условий угленакопления посвящено множество научных трудов, в одних детально рассмотрен петрографический и литологический состав угленосных отложений и предложена детальная литолого-фациальная классификация их формирования [Тимофеев, Боголюбова, 1998; Тимофеев, Боголюбова и др., 2002], в других на основе молекулярных и микроскопических исследований проведен анализ фитоценозов углей [Киселева, Рождествина и др., 2014]. В этих работах представлены богатые материалы по литологии, вещественному составу угленосных толщ, их палеогеографии, но статистические методы не использовались. В нашей статье на основании статистических методов анализов химического состава фусинской и шахайской формаций, приведенного в [Xu et al., 2020], проанализированы палеоклиматические изменения, происходившие в процессе их формирования в апт-альбское время. Кроме того, выделены химические группы, характеризующие изменения уровня воды в Фушуньском бассейне.

Вопросы, связанные с климатическими изменениями в меловой период времени, были детально рассмотрены в трудах ряда исследователей [Эволюция..., 1981; Найдин и др., 1986; Ясаманов, 1985; Jenkyns, 1999, 2003; Wang et al., 2014; Weissert, 1989; Weissert et al., 2019; Wilson, 2018]. Методы статистического анализа здесь также не применялись.

Материалы и методы исследований. Исходным материалом для написания статьи явились данные по геохимии двух скважин — DY1 и FY1, пробуренных на территории Фушуньского угольного бассейна [Xu et al., 2020] (рис. 1).

Фушуньский угольный бассейн — один из крупнейших угленосных внутриконтинентальных бассейнов северо-восточного Китая (провинция Ляонин). Следует отметить, что угольные пласты максимально развиты в нижнемеловой фусинской

и редко встречаются в шахайской формации (рис. 1). Стратиграфия, палеогеография, эволюция бассейна и угленакопление озерных угленосных толщ фусинской формации были исследованы на основе изучения разрезов обнажений, керна и каротажа скважин. В результате было выделено 15 типов лиофаций, литология которых варьирует от конгломератов, песчаников, алевролитов, аргиллитов до углей. Лиофации сгруппированы в пять фациальных типов: аллювиальные веерные, косые флювиальные, меандрирующие флювиальные, веерные дельтовые и озерные отложения [Xu et al., 2019].

С целью изучения палеоклиматических изменений и условий осадконакопления в Фушуньском угольном бассейне в апт-альбское время было необходимо решить три основные задачи: 1) на основе результатов корреляционного анализа с помощью построения матрицы Пирсона по методике, описанной [Берк, Кэйри, 2005], выделить химические группы оксидов, характеризующие палеоклиматические изменения в апт-альбское время; 2) изучить взаимосвязь между 2 выделенными химическими группами оксидов с помощью одномерного регрессионного анализа; 3) на основе установленной взаимосвязи между 2 химическими группами оксидов рассчитать индекс, характеризующий интенсивность терригенного осадконакопления в Фушуньском бассейне, и сравнить его распределение в пределах 4 стадий формирования фусинской и шахайской угленосных формаций [Xu et al., 2020] с величиной отношения гидролизатного модуля (ГМ) к сумме ($K_2O + Na_2O$) [Юдович, Кетрис, 2000, 2011]; при этом использовался однофакторный дисперсионный анализ.

Одномерный регрессионный и однофакторный дисперсионный анализ были выполнены в программе Statgraphics plus v.5.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате построения корреляционной матрицы Пирсона на основе данных (табл. 1) удалось выделить две химические группы оксидов, коррелирующие между собой с 95% уровнем значимости (табл. 2). Первая группа оксидов: SiO_2 , TiO_2 и Al_2O_3 ; вторая группа представлена CaO , MnO и MgO . Рассмотрим коэффициенты корреляции между оксидами внутри выделенных групп. SiO_2 положительно коррелирует с TiO_2 и Al_2O_3 (коэффициенты корреляции, соответственно, равны 0,42 и 0,58 (табл. 2)). CaO имеет сильную отрицательную корреляцию с SiO_2 , TiO_2 и Al_2O_3 , соответствующие коэффициенты корреляции составляют -0,84; -0,68; -0,78.

Рис. 1. А — Схематическая карта расположения Фушуньского угольного бассейна (северо-восточный Китай, провинция Ляонин) (Xu et al., 2020); Б — Литолого-стратиграфическая схема Фушуньского угольного бассейна: 1 — конгломераты; 2 — песчанистые конгломераты; 3 — грубо- и крупнозернистые песчаники; 4 — среднезернистые песчаники; 5 — мелкозернистые песчаники; 6 — алевролиты; 7 — глинистые алевролиты; 8 — алевритистые глины; 9 — аргиллиты; 10 — глинистые известняки; 11 — уголь; 12 — магматические породы; 13 — местные географические названия; 14 — скважины; 15 — разломы; 16 — Фушуньский угольный бассейн; 17 — Желтая река; 18 — суньцзыянская формация; 19 — фусинская формация; 20 — шахайская формация; 21 — цзюфотангская формация; 22 — ийксинская формация; 23 — презинская формация; 24 — магматические породы. В — Схематическая стратиграфическая шкала Фушуньского угольного бассейна: I, II, III, IV — подформации; A, B, C, D — стадии формирования шахайской и фусинской угольных формаций

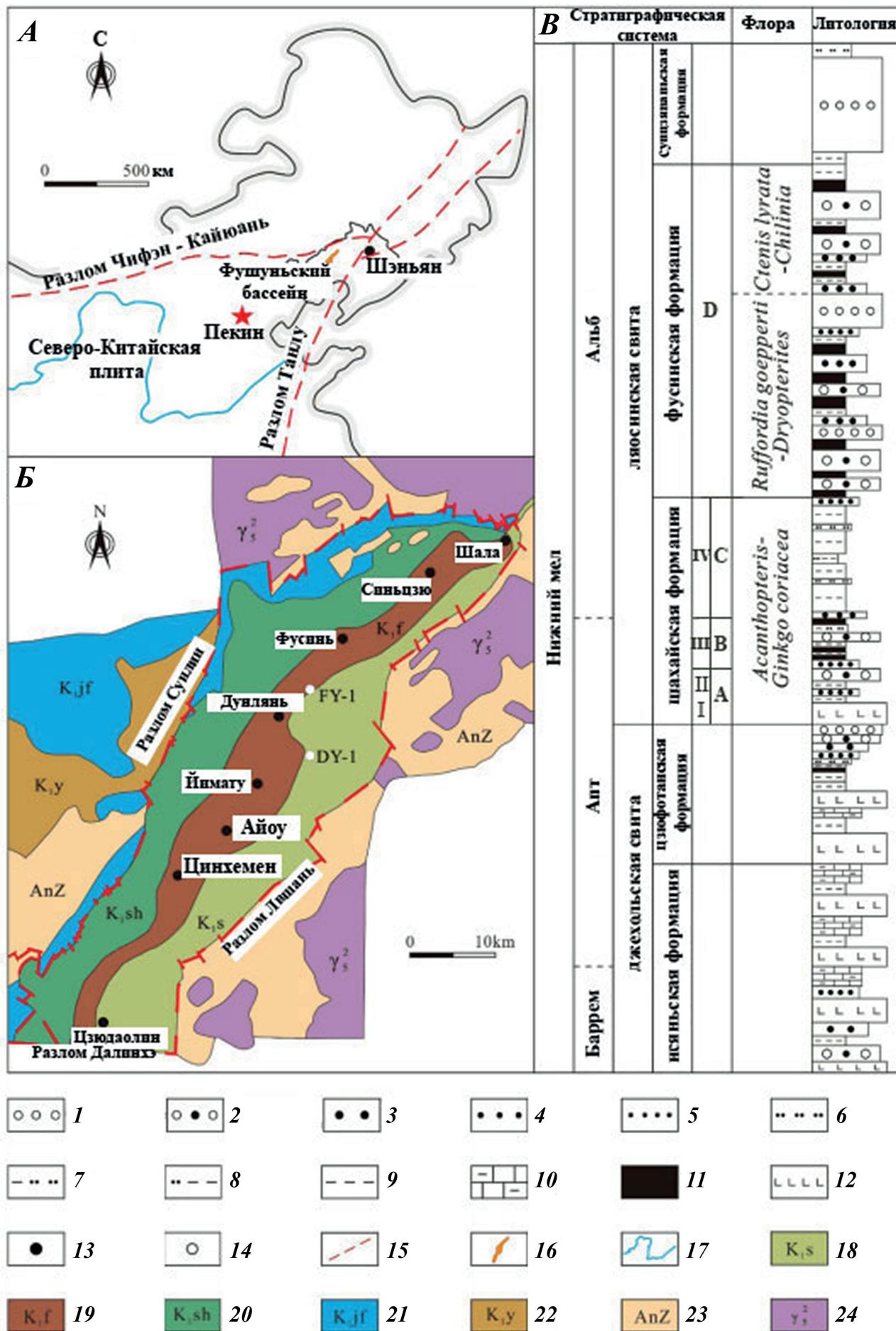


Таблица 1

Химический состав оксидов скважин DY1 и FY1 Фушуньского угольного бассейна

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 , %	<i>I</i> _{итс}	<i>I</i> _{гк}	Стадии	Формации
Скважина DY1														
144	58,36	0,68	14,24	7,36	0,11	3,90	1,36	2,69	3,92	0,14	7,33	5,80	1	1
170	59,70	0,78	14,33	8,00	0,12	2,84	0,83	2,30	3,50	0,04	5,07	6,71	1	1
195	65,50	0,63	14,04	6,18	0,15	2,98	0,86	2,26	3,29	0,13	4,98	5,78	1	1
226	61,59	0,71	15,50	6,64	0,16	3,05	0,60	1,67	3,93	0,02	4,90	6,67	1	1
251	60,15	0,65	14,93	7,31	0,11	5,11	0,62	1,19	3,80	0,10	7,71	7,66	1	1
293	60,00	0,75	16,31	6,55	0,04	3,14	0,82	2,44	3,46	0,34	5,19	6,68	1	1
343	60,59	0,74	16,15	6,76	0,03	3,31	0,57	1,85	3,96	0,22	5,05	6,73	1	1
413	59,79	0,82	15,95	5,82	0,02	1,93	0,69	1,86	3,04	0,18	3,45	7,72	1	1
459	57,99	0,80	15,62	6,06	0,06	2,15	1,54	1,85	2,93	0,23	5,04	8,13	1	1
473	56,90	0,73	14,79	5,46	0,17	1,85	0,79	1,91	2,79	0,18	3,88	7,91	1	1
510	60,42	0,80	15,11	6,28	0,03	2,06	1,23	2,00	2,71	0,21	4,35	7,81	1	1
527	60,59	0,74	16,22	5,59	0,05	2,19	0,52	1,89	3,47	0,16	3,56	6,96	2	2
529	59,95	0,74	16,78	5,04	0,03	1,99	0,50	2,10	3,46	0,13	3,25	6,78	2	2
532	59,83	0,65	15,60	5,19	0,02	2,08	0,43	2,03	3,20	0,10	3,33	6,86	2	2
537	58,69	0,75	14,89	5,54	0,06	2,50	1,50	1,92	3,21	0,20	5,46	7,05	2	2
540	58,01	0,81	16,12	5,67	0,02	1,99	0,73	2,06	3,41	0,17	3,66	7,13	2	2
545	57,10	0,78	16,11	6,36	0,03	2,49	0,67	1,97	3,53	0,15	4,31	7,41	2	2
551	60,00	0,79	16,06	5,34	0,02	2,10	0,74	2,27	3,41	16,00	3,72	6,52	2	2
552	59,97	0,82	15,57	6,60	0,03	2,13	0,83	1,87	3,30	0,22	3,92	7,42	2	2
553	59,12	0,70	14,32	5,45	0,02	2,19	0,79	1,78	2,99	0,15	4,05	7,27	2	2
571	59,96	0,70	15,15	5,37	0,03	2,07	0,93	2,61	2,57	0,17	4,00	6,84	2	2
580	59,35	0,80	15,48	5,39	0,02	2,03	1,38	2,50	2,93	0,22	4,54	6,73	2	2
586	58,96	0,75	15,35	5,77	0,03	2,18	1,21	2,46	2,80	0,19	4,56	7,06	2	2
592	57,35	0,74	15,24	6,10	0,06	2,39	1,28	2,15	3,13	0,21	5,09	7,31	2	2
595	58,42	0,74	15,52	5,98	0,05	2,52	1,25	1,96	3,32	0,22	5,12	7,23	2	2
656	55,55	0,74	15,15	6,18	0,12	2,34	2,87	1,65	2,86	0,33	7,46	8,86	2	2
715	53,77	0,69	16,66	4,67	0,08	2,48	2,99	1,54	2,82	0,25	7,80	9,43	2	2
770	54,86	0,79	16,60	5,23	0,14	2,91	2,30	2,04	3,11	0,21	7,40	8,06	2	2
800	53,07	0,74	16,24	5,76	0,14	3,09	2,64	1,65	3,13	0,25	8,38	9,02	2	2
856	54,79	0,56	14,47	5,65	0,11	2,34	4,47	1,66	2,74	0,29	9,91	8,62	2	2
949	45,97	0,61	12,40	6,35	0,18	2,67	8,80	1,30	2,62	0,64	19,75	10,84	2	2
1000	50,62	0,65	14,24	5,32	0,11	2,85	7,08	1,60	2,79	0,23	15,33	9,14	2	2
1031	51,38	0,69	15,09	5,42	0,09	2,89	5,48	1,58	3,23	0,22	12,60	8,61	2	2
1081	54,22	0,72	16,35	6,15	0,09	3,03	2,59	2,08	3,45	0,22	8,01	7,77	2	2
1124	53,58	0,72	15,36	6,26	0,12	2,31	3,78	1,58	3,57	0,28	8,91	8,14	2	2
1124	53,58	0,72	15,36	6,26	0,12	2,31	3,78	1,58	3,57	0,28	8,91	8,14	2	2
1158	49,69	0,77	15,00	6,42	0,10	2,37	6,17	1,56	3,79	0,32	13,20	8,38	2	2
1176	57,00	0,76	15,95	6,53	0,06	2,68	1,61	1,68	3,65	0,20	5,90	7,67	2	2
1203	57,14	0,73	14,69	5,74	0,09	2,42	3,43	1,90	2,55	0,22	8,19	8,36	2	2
1248	58,22	0,84	17,28	4,42	0,09	1,96	2,02	1,33	4,07	0,26	5,33	7,20	2	2
1281	49,24	0,64	13,86	4,39	0,10	1,09	8,17	1,46	3,35	0,31	14,68	8,02	2	2
1322	61,82	0,83	16,51	4,40	0,07	1,67	1,93	1,69	3,59	0,24	4,64	6,68	3	2
1379	60,68	0,79	15,39	3,43	0,02	1,46	1,70	2,26	3,08	0,13	4,14	6,06	3	2
1496	55,71	0,84	19,02	4,15	0,04	1,92	1,45	1,41	4,75	0,17	4,51	7,01	3	2
1564	55,18	0,69	13,46	5,44	0,14	3,22	5,04	1,22	3,86	0,24	12,12	7,04	3	2
1578	52,20	0,59	11,99	4,96	0,13	3,06	7,53	0,89	3,46	0,42	16,55	7,78	3	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 , %	$I_{\text{итс}}$	$I_{\text{тк}}$	Стадии	Формации
1612	59,46	0,64	12,71	3,92	0,08	3,36	4,06	0,84	3,97	0,10	10,30	6,07	4	2
1673	54,24	1,06	18,99	4,32	0,03	3,00	1,76	2,40	5,06	0,27	6,45	6,03	4	2
1705	51,35	0,76	14,15	7,14	0,07	4,36	3,63	2,70	3,84	0,22	12,16	6,59	4	2
1761	54,63	0,90	15,42	6,75	0,05	3,28	1,65	2,34	5,13	0,23	7,02	5,67	4	2
1822	55,99	0,64	13,17	4,58	0,04	5,04	2,59	1,95	4,79	0,13	10,99	4,88	4	2
Скважина FY1														
228,50	52,42	0,61	13,22	7,15	0,12	3,62	7,06	2,02	2,59	0,2	16,30	8,73	1	1
255,50	63,41	0,54	13,76	5,4	0,06	2,15	2,24	2,62	2,72	0,15	5,73	5,84	1	1
301,50	60,08	0,51	13,62	5,04	0,11	1,95	4,72	2,72	2,55	0,19	9,14	6,09	1	1
370,50	58,8	0,66	14,78	5,05	0,12	1,78	4,39	2,28	2,7	0,14	8,47	7,04	1	1
595,50	67,28	0,7	15,72	4,68	0,06	1,38	1,35	3,33	2,98	0,15	3,33	4,98	1	1
701,50	61,31	0,72	15,72	5,35	0,05	1,59	1,36	2,05	2,71	0,12	3,86	7,48	1	1
743,50	61,28	0,64	14,57	5,64	0,08	1,46	2,12	2,36	2,77	0,14	4,78	6,66	1	1
789,50	61,96	0,75	15,79	5,23	0,05	1,54	1,49	2,26	3,18	0,13	3,92	6,47	1	1
828,50	52,89	0,66	14,15	6,19	0,09	1,86	1,35	1,68	2,57	0,14	4,87	9,38	1	1
862,50	58,01	0,67	14,52	5,95	0,09	1,89	3,31	1,98	2,72	0,16	7,23	7,79	1	1
910,50	47	0,6	11,55	11,64	0,5	1,57	7,13	1,27	2,22	0,31	15,55	14,81	2	2
940,00	57,42	0,76	15,28	5,57	0,05	1,88	1,37	1,64	2,89	0,12	4,49	8,33	2	2
971,50	58,46	0,72	15,36	5,33	0,06	1,7	1,32	1,8	2,88	0,15	4,13	7,85	2	2
1000,00	57,7	0,71	15	6,53	0,06	1,79	0,88	1,8	2,96	0,12	3,72	8,12	2	2
1000,00	57,7	0,71	15	6,53	0,06	1,79	0,88	1,8	2,96	0,12	3,72	8,12	2	2
1060,00	59,68	0,72	14,99	5,06	0,11	1,65	2,2	2,21	2,95	0,14	5,25	6,78	2	2
1080,00	59,31	0,77	15,66	6,11	0,08	2,4	1,75	1,99	2,99	0,2	5,58	7,66	2	2
1319,50	54,96	0,6	13,45	5,39	0,1	2,95	4,75	1,88	2,86	0,22	11,30	7,50	2	2
1365,50	55,51	0,7	14,92	5,89	0,1	2,4	3,25	1,56	3	0,24	8,08	8,54	2	2
1420,00	55,36	0,72	14,59	6,5	0,1	2,39	3,19	1,53	2,85	0,22	8,04	9,04	2	2
1488,50	49,81	0,68	13,87	6,45	0,07	1,67	6,22	1,42	3,04	0,21	12,37	9,48	2	2
1540,00	50,82	0,6	12,91	5,29	0,17	2,25	8,07	1,64	2,58	0,2	16,31	8,85	3	2
1605,50	57,58	0,74	16,02	6,58	0,13	2,47	2,37	1,57	3,12	0,21	6,69	8,69	3	2
1660,00	56,4	0,69	15,61	6,46	0,09	2,03	1,89	2,04	2,84	0,23	5,52	8,30	3	2
1726,50	46,55	0,49	10,87	4,8	0,1	8,38	8,55	1,33	2,51	0,16	29,41	9,10	3	2
1760,00	45,65	0,47	10,03	4,89	0,11	8,23	9,76	1,14	2,42	0,15	32,24	9,54	3	2
1840,00	47,96	0,56	12,26	5,21	0,11	4,2	6,49	2,86	3,4	0,18	17,77	6,04	4	2
1908,00	55,38	0,62	14,11	4,87	0,08	2,8	3,53	3,89	3,6	0,15	9,14	4,74	4	2
1926,00	48,4	0,61	12,6	5,11	0,12	4,97	6,69	2,68	3,25	0,12	19,12	6,42	4	2
1944,00	46,66	0,5	10,55	4,6	0,12	6,31	10,03	2,67	3,2	0,15	28,52	5,76	4	2
1980,00	45,87	0,45	10,25	4,44	0,13	6,2	12,11	2,79	2,47	0,13	32,60	6,33	4	2

Примечание. Данные по оксидам приведены в мас. % (Hu et al., 2020). 1. Индекс интенсивности терригенного сноса: $I_{\text{итс}} = [(CaO + MnO + MgO) / (SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3)] \times 100$; 2. Индекс гумидности климата: $I_{\text{тк}} = [\Gamma M / (K_2O + Na_2O)] \times 100$, где $\Gamma M = [(TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MnO) / SiO_2]$ [Юдович, Кетрис, 2000]; Стадии: А — 4; В — 3; С — 2; D — 1. Формации: 1 — фусинская; 2 — шахайская.

С MgO и MnO у CaO положительная корреляция, коэффициенты корреляции, соответственно, равны 0,53 и 0,49 (табл. 2; рис. 2). Следует отметить, что выборка равна почти 100 образцам, поэтому приведенные коэффициенты корреляции достаточно высокие. По данным литологического описания [Xu et al., 2019, 2020] и результатам корреляционного анализа первая группа оксидов (SiO_2 , TiO_2 и Al_2O_3) входит в состав терригенного материала, а вторая группа (CaO , MnO и MgO) — в основном в состав

хемогенной составляющей отложений фусинской и шахайской угленосных формаций.

Для исследования взаимосвязи между первой и второй химическими группами оксидов обеих формаций был выполнен одномерный регрессионный анализ 82 образцов. В результате была установлена обратная нелинейная регрессионная взаимосвязь между суммой терригенных оксидов — SiO_2 , TiO_2 и Al_2O_3 и суммой хемогенных оксидов — CaO , MnO и MgO , с уровнем достоверности 99%, P-value < 0,01.

Таблица 2

Корреляционная матрица Пирсона на основе данных по содержанию оксидов по скважинам DY1 и FY1 [Xu et al., 2020] Фушуньского угольного бассейна

	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
SiO ₂	1,00	0,42	0,58	-0,07	-0,45	-0,53	-0,84	0,25	0,12	0,07
TiO ₂		1,00	0,84	0,05	-0,40	-0,49	-0,68	-0,01	0,51	0,10
Al ₂ O ₃			1,00	-0,07	-0,46	-0,60	-0,77	0,04	0,41	0,09
Fe ₂ O ₃				1,00	0,52	-0,09	-0,11	-0,12	-0,11	-0,03
MnO					1,00	0,11	0,49	-0,25	-0,28	-0,11
MgO						1,00	0,53	-0,01	0,08	-0,06
CaO							1,00	-0,16	-0,28	-0,08
Na ₂ O								1,00	0,00	0,05
K ₂ O									1,00	0,04
P ₂ O ₅										1,00

Примечание. Полужирным и курсивом показаны коэффициенты корреляции, отвечающие 95% уровню значимости. Полужирным — положительные, а курсивом — отрицательные значения коэффициентов корреляции.

При этом коэффициент корреляции составляет 0,92. Вместе с тем коэффициент детерминации R^2 , равный 85%, показывает долю уменьшения суммы терригенных оксидов первой группы относительно второй хемогенной группы оксидов. Стандартная ошибка регрессии (среднеквадратическое отклонение регрессионных остатков) составляет всего 0,0005. Данный показатель показывает среднее расстояние, на которое наблюдаемые значения отклоняются от линии регрессии. В связи с весьма малым значением стандартной ошибки полученная модель регрессии

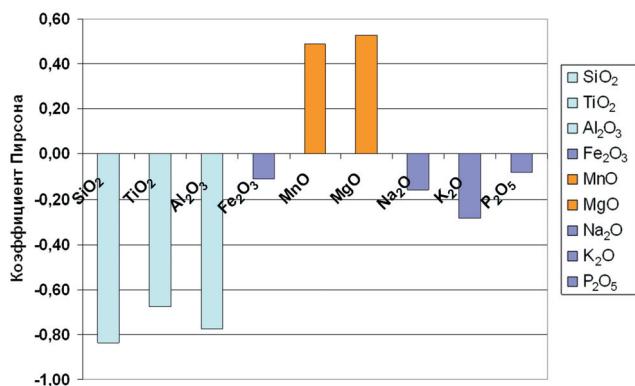


Рис. 2. Диаграмма корреляционной взаимосвязи CaO с другими основными оксидами фусинской и шахайской формаций скважин DY1 и FY1 на основе данных корреляционного анализа Пирсона. Голубым цветом показаны значимые отрицательные коэффициенты корреляции с уровнем достоверности 95%. Оранжевым цветом значимые положительные коэффициенты корреляции с уровнем достоверности 95%. Фиолетовым цветом показаны нейтральные коэффициенты корреляции

обладает высокой точностью. Таким образом, можно утверждать, что при увеличении роли терригенного сноса в Фушуньский бассейн интенсивность процессов хемогенного осаждения веществ из растворов резко сокращалась (рис. 3; табл. 3).

Как известно [Юдович, Кетрис, 2000], степень гумидности климата может быть хорошо охарактеризована с помощью гидролизатного модуля (ГМ) и суммы щелочей ($K_2O + Na_2O$). При этом увеличение гумидизации климата связано с увеличением ГМ в сторону значений равных — 0,5 с одновременным уменьшением суммы ($K_2O + Na_2O$), а для процессов аридизации характерны одновременно повышенные значения ГМ и суммы ($K_2O + Na_2O$). В настоящей статье индекс гумидности (I_{rk}) рассчитан как от-

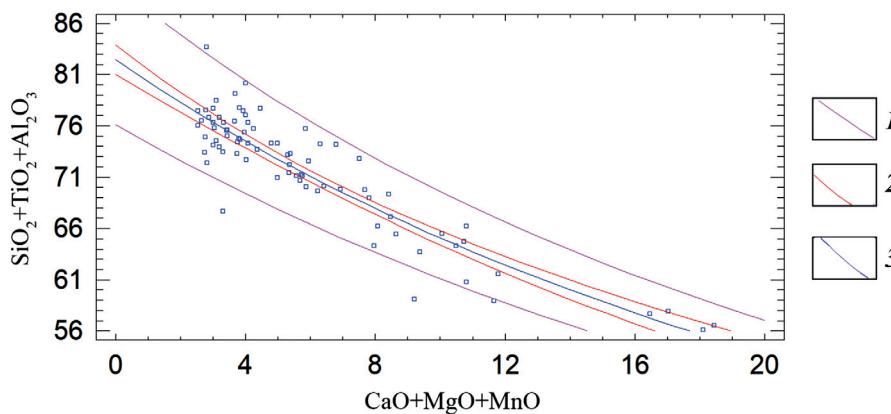


Рис. 3. Результаты регрессионного анализа обратной нелинейной взаимосвязи суммы терригенных оксидов — $SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3$ с суммой хемогенных оксидов — $CaO + MgO + MnO$. 1 — доверительный интервал, соответствующий предсказанному значению регрессии; 2 — доверительный интервал для среднего значения предсказанных значений регрессии; 3 — линия регрессии

Таблица 3

Основные данные одномерного регрессионного анализа по взаимосвязи суммы оксидов первой $\Sigma(SiO_2+TiO_2+Al_2O_3)$ и второй $\Sigma(CaO+MgO+MnO)$ геохимических групп фусинской и шахайской угленосных формаций Фушуньского угольного бассейна

Уравнение регрессии	Количество исследуемых образцов	Коэффициент корреляции R	Коэффициент детерминации R^2 , %	Стандартная ошибка регрессии	P-value
$\Sigma(SiO_2+TiO_2+Al_2O_3) = 1/[0,0121 + 0,000324 \times \Sigma(CaO+MgO+MnO)]$	82	0,92	85%	0,0005	0,00

ношение ГМ к сумме оксидов ($K_2O + Na_2O$) с умножением на 100, т.е. $I_{rk} = [GM/(K_2O + Na_2O)] \times 100$. Кроме того, на основе полученных данных корреляционного и одномерного регрессионного анализов был вычислен индекс интенсивности терригенного сноса, который также характеризует уровень воды в бассейне седиментации [Хазиев, Фахрутдинов, 2015], который тесно связан с возрастанием или убыванием обломочного материала в Фушуньском бассейне. Следует отметить, что с увеличением терригенної составляющей и ростом содержаний SiO_2 , TiO_2 и Al_2O_3 , уровень воды в пресноводных водоемах Фушуньского бассейна понижался, а с увеличением хемогенной составляющей и ростом содержаний CaO , MnO и MgO в осадке — повышался. Данный индекс интенсивности терригенного сноса (I_{itc}) был рассчитан как отношение суммы CaO , MnO и MgO к сумме SiO_2 , TiO_2 и Al_2O_3 с умножением на 100, т.е. $I_{itc} = [(CaO + MnO + MgO) / (SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3)] \times 100$. Изучение палеоклиматических изменений и условий седиментации в Фушуньском угольном бассейне в апт-альбское время было проведено на основе однофакторного дисперсионного анализа распределения обоих индексов в пределах четырех выделенных стадий накопления фусинской и шахайской угленосных формаций Фушуньского угольного бассейна. В результате было установлено закономерное распределение индекса гумидности в пределах четырех стадий с уровнем достоверности 95%. При этом индекс гумидности климата расстет от стадии А позднеаптского времени к стадии В и С, соответственно, от 5,85 до 8,07%, в 1,4 раза, к раннеальбскому периоду. К стадии D (альбский период времени) наблюдается некоторое уменьше-

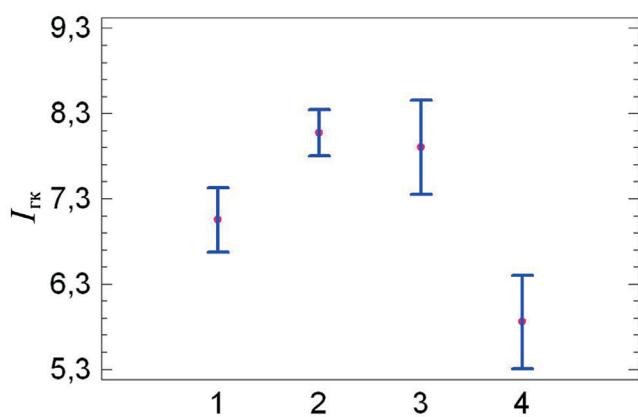


Рис. 4. Данные дисперсионного анализа закономерности распределения индекса гумидности климата: $I_{rk} = [GM/(K_2O + Na_2O)] \times 100$ в пределах 4-х стадий фусинской и шахайской угленосных формаций по скважинам DY1 и FY1 с уровнем достоверности 95%, где $GM = [(TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MnO)/SiO_2]$. 1 — стадия D; 2 — стадия C; 3 — стадия B; 4 — стадия A

ние индекса гумидности климата до 7,05% (рис. 4; табл. 4 и 5). Как известно, большее значение среднеквадратического отклонения показывает больший разброс значений в представленном множестве. В нашем случае повышенные значения среднеквадратического отклонения (табл. 5) в стадиях В, С и D, равные 1,16, 1,42 и 1,08%, соответственно, свидетельствуют о существовании климатических изменений при общей тенденции к гумидизации климата в этот период времени.

Стадии накопления фусинской и шахайской угленосных формаций по скважинам DY1 и FY1: 1 — стадия D, 2 — стадия C, 3 — стадия B, 4 — стадия A.

Таблица 4

Результаты дисперсионного анализа распределения показателя гумидности климата I_{rk} в пределах 4-х стадий накопления фусинской и шахайской угленосных формаций Фушуньского угольного бассейна

Исследуемые параметры	Источник	Сумма квадратов, SS	Степени свободы, Df	Средние квадраты	F-отношение	P-значение
I_{rk}	Между группами	46,513	3	15,50	10,13	0,00
	Внутри групп	119,431	78	1,53		
	Общее значение	165,944	81			

Таблица 5

Распределение показателя гумидности климата — $(GM/K_2O + Na_2O) \times 100$ в пределах 4-х стадий накопления фусинской и шахайской угленосных формаций Фушуньского угольного бассейна с уровнем достоверности 95%

Исследуемые параметры	Группы	Коли-чество образцов	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение	Минимальное значение	Максимальное значение	95% доверительный интервал для среднего*	
							нижняя граница	верхняя граница
I_{rk}	1	21	7,05	1,08	4,98	9,38	6,67	7,43
	2	41	8,08	1,42	6,52	14,81	7,80	8,35
	3	10	7,91	1,17	6,06	9,54	7,35	8,46
	4	10	5,85	0,62	4,74	6,59	5,30	6,40
	Общее значение	82	7,52	1,43	4,74	14,81		

Примечание.* При большом числе выборок из генеральной совокупности 95% средних значений этих выборок попадут в интервал, определяемый нижней и верхней границами.

Рассмотрим распределение индекса интенсивности терригенного сноса ($I_{итс}$) в Фушуньском бассейне на протяжении 4-х стадий накопления фусинской и шахайской угленосных формаций от А до Д. В результате проведения однофакторного дисперсионного анализа была доказана закономерность его распределения с уровнем достоверности 95%. В отличие от индекса гумидности климата данный индекс заметно уменьшается от стадии А к стадиям С и D. При этом его среднее значение от стадии А к стадии В уменьшается от 15,4 до 7,4%, т.е. в 2,1 раза (рис. 5; табл. 6 и 7). Следует отметить, что повышенный уровень воды в пресноводных во-

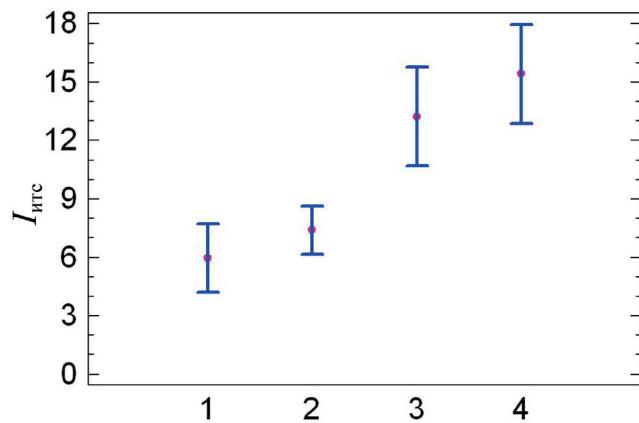


Рис. 5. Данные дисперсионного анализа закономерности распределения индекса интенсивности терригенного сноса $I_{итс} = [(CaO + MnO + MgO) / (SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3)] \times 100$ в пределах 4-х стадий фусинской и шахайской угленосных формаций по скважинам DY1 и FY1 с уровнем достоверности 95%. 1 — стадия D; 2 — стадия C; 3 — стадия B; 4 — стадия A

доемах Фушуньского бассейна типичен для стадий А и В в позднеаптское время, что соответствовало развитию озерных фаций и процессам хемогенного осаждения веществ из растворов. Тем не менее, в этот период времени характерны значительные колебания уровня воды в пресноводных водоемах Фушуньского бассейна, среднеквадратическое отклонение здесь составляет 9,02 и 10,43, что привело к смене обстановок на аллювиально-озерные и аллювиально-озерно-болотные. В то же время, относительно стабильные условия, а также активное поступление терригенного материала в водоемы Фушуньского бассейна и понижение уровня их вод наблюдаются в стадиях С и D в раннеальбское время, среднеквадратические отклонения уменьшаются до значений, соответственно, равных 4,07 и 2,88 (табл. 7). Для данного этапа характерна смена озерных обстановок на аллювиально-озерно-болотные и болотные.

Заключение. Таким образом, на основе математических методов статистики было доказано существование палеоклиматических изменений и связанных с ними условий седиментации шахайской и фусинской угленосных формаций Фушуньского угольного бассейна в апт-альбское время. Тенденция к увеличению влажности климата наблюдается от стадии А к стадии С в позднеаптское время с некоторым уменьшением к стадии D в раннеальбский и альбский периоды. При этом резкое понижение уровня воды в пресноводных водоемах Фушуньского бассейна характерно для стадии D, которая характеризует накопление фусинской угольной формации. Увеличение влажности климата в Фушуньском угольном бассейне соответствовало широко рас-

Таблица 6

Результаты дисперсионного анализа распределения индекса интенсивности терригенного сноса $I_{итс}$ в пределах 4-х стадий накопления фусинской и шахайской угленосных формаций Фушуньского угольного бассейна

Исследуемые параметры	Источник	Сумма квадратов, SS	Степени свободы, Df	Средние квадраты	F-отношение	P-значение
$I_{итс}$	Между группами	39599	1	39599	92,9	0,00
	Внутри групп	25150	59	426,3		
	Общее значение	64748,9	60			

Таблица 7

Распределение распределения индекса интенсивности терригенного сноса $I_{итс}$ в пределах 4-х стадий фусинской и шахайской угленосных формаций Фушуньского угольного бассейна с уровнем достоверности 95%

Исследуемые параметры	Группы	Количество образцов	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение	Минимальное значение	Максимальное значение	95% доверительный интервал для среднего*	
							нижняя граница	верхняя граница
$I_{итс}$	1	21	5,93	2,88	3,33	16,3	4,18	7,69
	2	41	7,38	4,07	3,25	19,75	6,13	8,63
	3	10	13,21	10,43	4,14	32,24	10,67	15,75
	4	10	15,41	9,02	6,45	32,6	12,87	17,95
	Общее значение	82	8,699	6,50	3,25	32,6		

Примечание. Стадии накопления фусинской и шахайской угленосных формаций по скважинам DY1 и FY1: 1 — стадия D; 2 — стадия C; 3 — стадия B; 4 — стадия A.

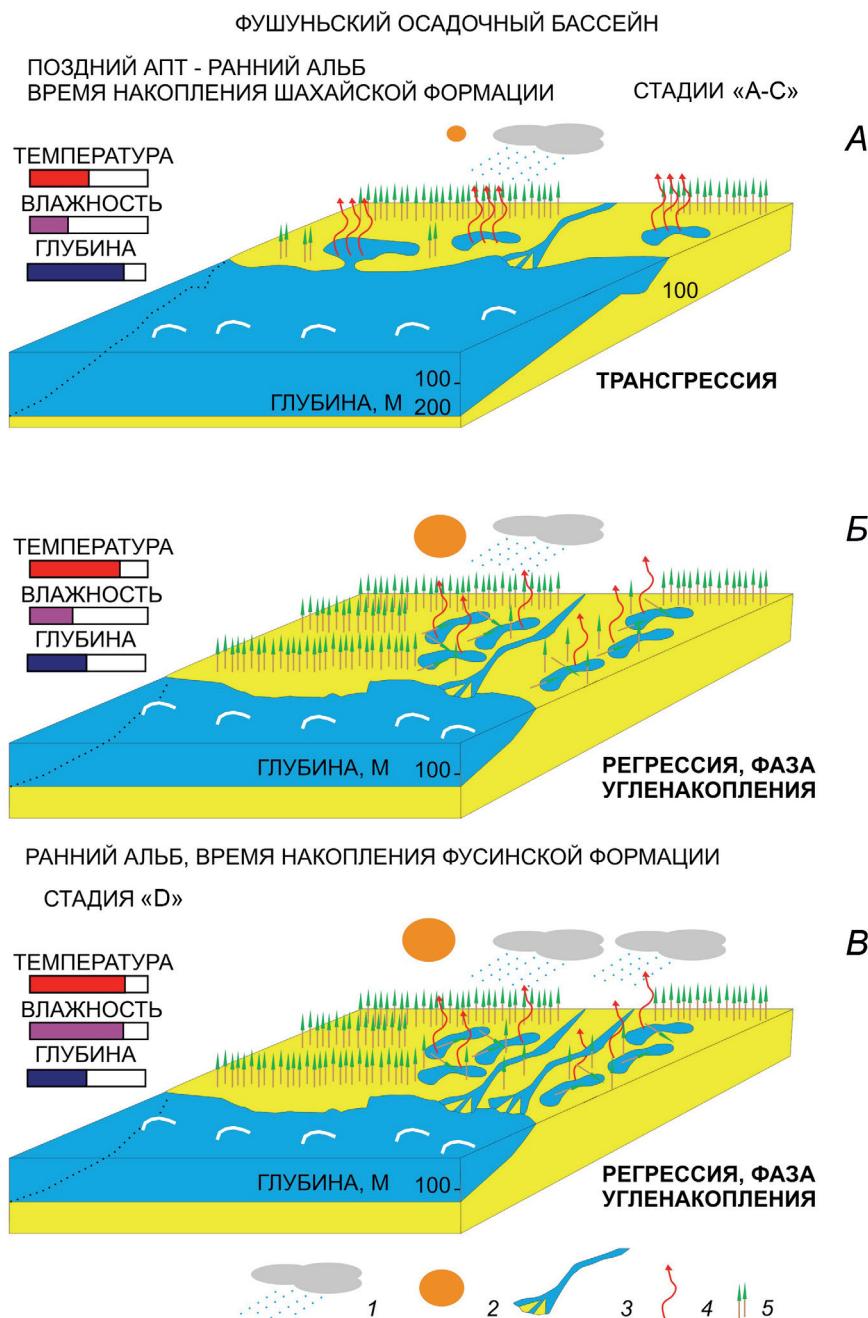


Рис. 6. Схематическая палеогеографическая модель условий седиментации в конце аптского — начале альбского времени в Фушуньском осадочном бассейне. А и Б — конец аптского — начало альбского времени (стадии «А-С»), В — ранний альб (стадия «D»). А — формирование озер и болот на прибрежной аккумулятивной равнине в условиях относительной трансгрессии и относительного похолодания климата. Б — фаза угленакопления на прибрежной аккумулятивной равнине в условиях относительной регрессии и относительного потепления климата. В — фаза угленакопления на прибрежной аккумулятивной равнине в условиях относительной регрессии и относительного потепления климата, относительного увеличения влажности и объема терригенного сноса: 1 — атмосферные осадки; 2 — солнечная инсоляция; 3 — речной сток; 4 — испарение; 5 — наземная растительность

пространенному аноксическому бескислородному событию в раннеальбское время (OAЕ1b, Paque) [Копаевич, 2013; Савельева, 2014; Jenkyns, 1997, 2003]. Наряду с этим, по мере увеличения влажности климата и температуры [Савельева, 2014] наблюдается активизация сноса обломочного материала в Фушуньский бассейн с Северо-Китайской платформы рекой Пра-Желтая. В результате нарастающего поступления терригенного материала с суши в Фу-

шуньский бассейн и одновременного понижения уровня поверхности воды его пресноводных водоемов, в нем создавались благоприятные условия для формирования болот и торфонакопления. В результате все нарастающих масс обломочного материала происходило постепенное уплотнение торфяных пластов и погружение их на глубину в область повышенных давлений и температур с образованием угольных пластов.

В апт-альбское время территория Фушуньского бассейна седиментации представляла собой обширную аллювиально-озерно-дельтовую равнину (рис. 6), которая была сформирована в процессе эрозионно-аккумулятивной деятельности реки Пра-Желтая. Процессы заболачивания и торфонакопления были связаны с понижением уровня воды в пресноводных водоемах Фушуньского бассейна с формированием многочисленных болот (рис. 6, А), что коррелирует с глобальным эвстатическим понижением уровня Мирового океана с середины апта до середины альба в интервале 117–105 млн лет назад [van der Meer, Scotese, Mills, 2022] и моментами относительного похолодания климата, связанного с моментом совмещения в интервале 115–114 млн лет назад [Габдуллин, 2023].

В периоды повышения уровня воды в водоемах Фушуньского бассейна (рис. 6, Б) формировались благоприятные условия для формирования озер, характерных для стадий А, В и С в условиях относительной регрессии и относительного потепления климата. Стадия Д, соответствующая накоплению фусинской угленосной формации (рис. 6, В), сформировалась в условиях понижения уровня воды

в водоемах Фушуньского бассейна и увеличения роли терригенного материала, поступающего с прилегающей суши. Для нее характерно максимальное развитие аллювиально-озерно-болотных обстановок осадконакопления по сравнению со стадиями А, В и С, что обусловило ее максимальную угленосность. В это время угленакопление на прибрежной аккумулятивной равнине проходило в условиях относительной регрессии и относительного потепления климата, относительного увеличения влажности и объема терригенного сноса.

Активизации процессов торфонакопления и углеобразования способствовали: 1) увеличение влажности климата; 2) активизация сноса обломочного материала; 3) понижение уровня воды в пресноводных водоемах Фушуньского бассейна, вызванное глобальным понижением уровня Мирового океана.

Финансирование. Участие К.В. Сыромятникова и М.А. Левитана осуществлялось при финансовой поддержке госзаказа ГЕОХИ РАН. Участие Р.Р. Габдуллина осуществлялось при финансовой поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Математические методы анализа сложных систем».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берк К., Кэйри П. Анализ данных с помощью Microsoft Excel / Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. 560 с.
2. Габдуллин Р.Р. Высокоточная циклическая корреляция разрезов фанерозоя Северной Евразии как основа для актуальных палеогеографических и палеоклиматических реконструкций: Дисс. ... докт. геол.-минерал. наук. М., 2023. 550 с.
3. Киселева А.А., Рождествина В.И., Сорокин А.П. и др. Палеореконструкция условий угленакопления Сергеевского буроугольного месторождения // Вестник АмГУ. Вып. 67. 2014. С. 145–150.
4. Копаевич Л.Ф. Обстановки дефицита кислорода и их влияние на морфологию раковин меловых планктонных фораминифер // Систематика организмов. Ее значение для биостратиграфии и палеобиогеографии. Материалы LIX сессии палеонтологического общества. СПб., 2013. С. 64–66.
5. Левитан М.А., Сыромятников К.В., Роцкина И.А. и др. 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.
6. Найдин Д.П., Похиалайнен В.П., Кац Ю.И. и др. Меловой период. Палеогеография и палеоокеанология. М.: Наука, 1986. 262 с.
7. Савельева О.Л. Меловые аноксические события в Тихом океане // Природа. 2014. № 14. С. 17–23.
8. 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.
9. 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.
10. Тимофеев П.П., Боголюбова Л.И., Копорулин В.И. Седиментогенез и литогенез отложений интинской свиты юга Печорского угольного бассейна. М.: Наука, 2002. 224 с.
11. Тимофеев П.П., Боголюбова Л.И. Седиментогенез и ранний литогенез голоценовых отложений в областях приморского торфонакопления (Колхида, Южная Прибалтика, Западная Куба, Флорида). М.: Наука, 1998. 412 с.
12. Хазиев Р.Р., Фахрутдинов Э.И., Нургалиева Н.Г. Литохимическая зональность и циклическое строение пермских отложений на северо-восточном склоне Южно-Татарского свода // Георесурсы. Казань. 2015. Т. 1, № 3 (62). С. 27–32.
13. Эволюция организмов и биостратиграфия середины мелового периода // Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1981. 144 с.
14. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 472 с.
15. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (Литологическая геохимия). Сыктывкар, 2011. 740 с.
16. Ясманов Н.А. Древние климаты Земли. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 296 с.
17. Jenkyns H.C. Mesozoic anoxic events and palaeoclimate // Zentralblatt für Geologie und Paläontologie 1997 (7–9). 1999. P. 943–949.
18. Jenkyns H.C. Evidence for rapid climate change in the Mesozoic-Paleogene greenhouse world. // Philosophical Transactions of the Royal Society. 2003. № 361. P. 1885–1916.
19. Meer D. G. van der, Scotese Ch. R., Mills B. J. W., et al. Long-term Phanerozoic global mean sea level: Insights from strontium isotope variations and estimates of continental glaciation // Gondwana Research. 2022. Vol. 111. P. 103–121.

20. Wang Y.D., Huang C.M., Sun B.N., et al. Paleo-CO₂ variation trends and the Cretaceous greenhouse climate // *Earth-Science*. 2014. Vol. 129. P. 136–147.
21. Weissert H. C-isotope stratigraphy, a monitor of paleoenvironmental change: A case study from the Early Cretaceous // *Surveys in Geophysics*. 1989. Vol. 10. P. 1–61.
22. Weissert H., Lini A. Ice age interludes during the time of Cretaceous greenhouse climate // *Controversies in modern geology* / Ed. D.W. Mueller, J.A. McKenzie, and H. Weissert. London: Academic Press, 2019. P. 173–191.
23. Wilson M.J. Weathering of the primary rock-forming minerals: Processes, products and rates // *Clay Minerals*. 2018. Vol. 39. P. 233–266.
24. Xu X.-T., Shao L.-Yi, Lan B., et al. Continental chemical weathering during the Early Cretaceous Oceanic Anoxic Event (OAE1b): a case study from the Fuxin fluvio-lacustrine basin, Liaoning Province, NE China // *Journal of Palaeogeography*. 2020. Vol. 9. P. 1–21.
25. Xu X., Shao L., Fu Y., Wang D., et al. Sequence palaeogeography, lacustrine basin evolution, and coal accumulation in the Lower Cretaceous Fuxin continental faulted basin, China // *Geological journal*. 2019. Vol. 55(1). P. 1–21.

Статья поступила в редакцию 14.11.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 05.03.2024