

МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОГРАФИЯ, ЛИТОЛОГИЯ

УДК (552.578.2+550.42+549+519.237.7):551.762.3(571.1)

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ФАКТОРНЫЕ МОДЕЛИ
БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ В ЦЕНТРАЛЬНЫХ И ЮГО-ВОСТОЧНЫХ РАЙОНАХ
ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ**

Е.А. ПРЕДТЕЧЕНСКАЯ, Л.Д. МАЛЮШКО

*АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья (АО «СНИИГГиМС»)
630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, СНИИГГиМС; e-mail: predel@sniiggims.ru*

Рассмотрена геохимическая специализация баженовской свиты в связи с ее нефтегазоносностью и условиями формирования. Для выявления основных процессов, повлиявших на литолого-минералогические и геохимические особенности пород, применён факторный анализ по методике Г. Хармана. Установлены от четырех до восьми факторов, способствующих формированию современного облика «баженитов». Главные из них — фациальные условия седиментации, содержание в осадках органического углерода, биогенных карбонатов и кремнезёма. Важными факторами являлись механическая дифференциация обломочного материала в осадочном бассейне и аутогенное минералообразование. Выявлены особенности воздействия на осадочную толщу неблагоприятных геохимических условий (периодического сероводородного заражения придонных вод, повышенных концентраций в осадках железа, меди, цинка, кадмия, других тяжелых токсичных металлов и радиоактивных элементов).

Ключевые слова: Западная Сибирь; верхняя юра; баженовская свита; геохимия; литология; нефтегазоносность; факторный анализ.

**GEOCHEMICAL FEATURES AND FACTOR MODELS OF THE BAZHENOV
FORMATION IN THE CENTRAL AND SOUTHEASTERN REGIONS
OF THE WEST SIBERIAN PLATE**

E.A. PREDTECHENSKAYA, L.D. MALYUSHKO

*Joint-stock company «Siberian research institute of geology, geophysics and mineral resources» (AO «SNIIGGiMS»)
630091, Russia, Novosibirsk, Krasnyi Prospekt, 67; e-mail: predel@sniiggims.ru*

The paper considers geochemical features of the Bazhenov Formation in the context of its petroleum potential and formation conditions. The major processes that had an impact on lithomineralogical and geochemical characteristics of the rocks were revealed by applying the G. Kharman's factor analysis method. Four to eight factors were found that contributed to the formation of the current form of "bazhenites". The main factors are facies environment of deposition and content of organic carbon, biogenic carbonate, and silica in deposits. Important factors were also mechanical differentiation of detritus in the sedimentary basin and autogenous mineral formation. The paper discusses possible reasons and results of unfavorable geochemical conditions that influenced the sedimentary strata (periodic contamination of bottom water by hydrogen sulfide, increased concentration of iron, cuprum, zinc, cadmium, and other toxic heavy metals and radioactive elements in deposits).

Keywords: Western Siberia; Upper Jurassic; Bazhenov Formation; geochemistry; lithology; oil and gas content; factor analysis.

Баженовская свита (титон — нижний берриасс), как самостоятельный литостратон, была выделена Ф.Г. Гурари в разрезах скважин, пробуренных в Омской впадине [1]. Свита мощностью 5–40 м залегает на глубине от 1 до 3,5 км. Для неё характерна насыщенность пород сапропелевым органическим веществом (ОВ) — от 8–10 до 22 об. % и биогенным кремнеземом (SiO_2) — от 15–30 до 85–90 мас. %. Углеводороды (УВ), генерированные битуминозными карбонатно-кремнисто-глинистыми породами свиты, составляют основную часть запасов нефти верхнеюрско-нижнемеловых отложений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (НГП). Извлекаемые запасы нефти из пород баженовской свиты, по оценкам Роснефти в 2013 г. [22, 31], составляют 22 млрд. баррелей, максимальные дебиты легкой высококачественной нефти — 370 м³/сут. [27]. В то же время интенсивность освоения этих ресурсов недостаточно высокая [16].

Актуальность детальных литолого-геохимических исследований баженовской свиты предопределяется её *региональной нефтегазоносностью*, которая связана со специфическим составом и условиями формирования пород [25]. Площадь распространения битуминозных пород свиты, согласно схеме И.И. Нестерова [14], составляет 1,1 млн. км², объём пород — 33 тыс. км³, объём ОВ — $15,4 \cdot 10^{12}$ т. Её промышленная нефтеносность, по данным [14], приурочена к центральным районам плиты — к зоне распространения отложений псевдобатиали и нижней сублиторали осадочного бассейна (рис. 1). Залежи и нефтепроявления в трещиноватых аргиллитах баженовской свиты известны в Шаимском, Красноленинском, Салымском районах, на ряде площадей Сургутского, Нижневартовского, Александровского сводов, Васюганского, Мыльджинского, Варь-Еганского поднятий, Тундринской впадины. Промышленные притоки нефти из отложений баженовской свиты (пласт Ю₀) в центральных и западных районах Томской области получены на Весенней, Восточно-Моисеевской, Катыльгинской, Ломовой, Озерной, Оленьей, Саймовской и других площадях [25].

На территории Западной Сибири свита традиционно считается основной *нефтематеринской* толщей и покрывкой высокого качества. В свете флюидодинамической концепции происхождения УВ она рассматривается как «*промежуточный коллектор УВ*» [17, 21]. В то же время И.И. Нестеров [14, 15] и другие исследователи считают, что баженовская свита — это уникальный пример того, что нефть и газ в осадочных толщах образуются на месте природного залегания. В связи с этим выяснение условий формирования битуминозных отложений и залежей УВ «баженовского» типа весьма актуально. Известно, что в пределах баженовского регионального флюидоупора имеются трещиноватые коллекторы, заполненные нефтью [1, 2, 11, 14,

21, 23, 25]. Впервые карбонатно-кремнисто-глинистые породы этой свиты проявили себя как коллектор трещинного типа на Салымском месторождении, где разрезы характеризуются аномалиями гамма-активности (ГК), кажущегося удельного электрического сопротивления (КС) и потенциала собственной поляризации (ПС) [1, 19, 21, 25].

Баженовская свита может служить также *концентратором ряда ценных металлов, редких и рассеянных элементов* [29]. По данным И.Н. Ушатинского [26], В.М. Гавшина и В.А. Боброва [6], в породах свиты содержания молибдена в 60 раз, урана в 10 раз, ванадия в 5 раз, хрома, кобальта, никеля, меди, бария в 3 раза, а также цинка и мышьяка превышают таковые в перекрывающих и подстилающих глинистых толщах (табл. 1). В то же время породы баженовской свиты заметно обеднены галлием, стронцием и цирконием.

В составе пород свиты В.М. Гавшиным и В.А. Бобровым [6] спектроскопически определены 32 элемента. Для 16 из них наблюдается хорошее совпадение средних концентраций с ранее полученными оценками А.Э. Конторовича, Б.А. Лебедева и др. С помощью метода полуколичественного спектрального анализа Л.Д. Малюшко и М.А. Анурьева обнаружили 38 элементов, в том числе основные породобразующие Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Al, Si, P, Ti, металлы Cr, Ni, V, Mo, Sn, Pb, Cd, Zn, Cu, Ag, Co, As, Ga, Ge, а также Ba, B, Li, As, Bi, редкие и рассеянные Be, Nb, Zr, Sc, Sr, Tl, Ce, La, Y. По данным лаборатории Томского филиала СНИИГГиМС, в составе свиты в незначительных количествах ($n \cdot 10^{-4}$ — $n \cdot 10^{-5}$ %) обнаружены также U (до $300 \cdot 10^{-4}$ %) и тяжелый лантаноид Yb ($n \cdot 10^{-4}$ — $n \cdot 10^{-5}$ %). Все выявленные элементы следующим образом распределяются по периодам и группам таблицы Д.И. Менделеева (табл. 2) в современной редакции [24].

В изученных разрезах баженовской свиты в породах обычно повышены концентрации Si, Al и Fe по сравнению с другими элементами. По средним содержаниям Si, Al, Fe породы баженовской свиты приближаются или почти точно соответствуют глубоководным глинам Тихого и Индийского океанов [32], по содержаниям Fe и Al близки к глубоководным пелагическим красным глинам Тихого океана [7] и к карбонатно-кремнисто-глинистым гемипелагическим современным илам [7, 12]. В сравнении с последними породы баженовской свиты существенно обогащены также Ti, As, Ni, Mg, V, Mo, Zn, Ba и U. Сравнительный анализ показал, что средние концентрации K, Na, Si, Al, Ti, Co, Cr, Cu, Sn, Ag, Ga, Sc, Yb в породах свиты близки к таковым в речной взвеси и (или) осадочных породах континентов [7, 9, 32]. Концентрации B, Mn и Pb значительно ниже, чем в породах континентов и глинах пелагиали [11, 26]. На Салымской площади

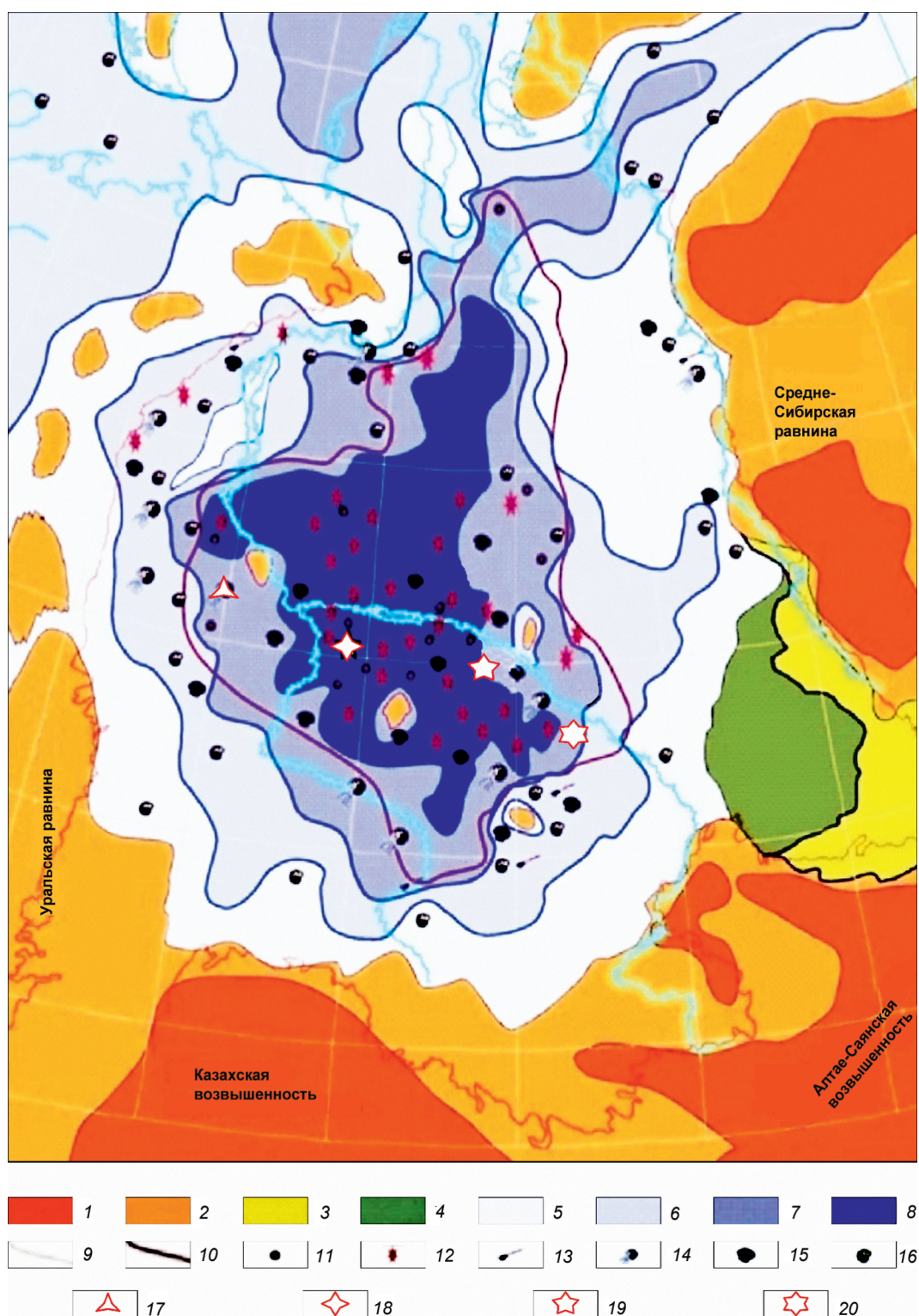


Рис. 1. Палеогеографическая карта Западной Сибири в поздневоловское время, по [2]: палеогеографические обстановки: 1 – плато, нагорья, горные области (> 600 м); 2 – области денудации (холмистое плато 200–600 м); 3 – аллювиально-озёрно-болотные равнины (до 200 м); 4 – марши, лагуны; 5 – верхняя сублитораль (< 100 м); 6 – средняя сублитораль (100–200 м); 7 – нижняя сублитораль (200–400 м); 8 – псевдобатияль (> 400 м); границы: 9 – Западной Сибири; 10 – битуминозных отложений; органические остатки: 11 – кокколитофориды; 12 – радиолярии; 13 – белемниты; 14 – аммониты; 15 – двустворчатые моллюски; 16 – фораминиферы; площади: 17 – Даниловская; 18 – Салымская; 19 – Медведовская; 20 – Чкаловская

Средние концентрации химических элементов в породах баженовской свиты

Площадь, скважина	Содержание, %				
	$n \cdot 10^{-2}$ и >	$n \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-6}$
Салымская, 116	K, Na, (Ca), Mg, Si, Al, Ti	(V), (Sr), Ba, Mn, Zn, Nb, Zr	Pb, As, Cu, Cr, Ni, Co, (P), U, B, Ga, Y	Cd, (Mo), Be, Ge, Yb, Sc, Ti	Ag
Чкаловская, 9	K, (Na), (Ca), Mg, Si, Al, Ti	V, Sr, (Ba), Mn, Cr, Zr	Pb, As, Cu, Cr, Ni, Co, (P), U, (Mo), Nb, Cd, Li, Sc, B, Ga, Y	Be, Ge, Sn, Yb	Ag
Медведевская, 1	K, Na, (Ca), Mg, Si, Al, Ti, Fe	Sr, Ba, Mn, As, Ni	Pb, Cu, Cr, Ni, Co, (P), B, Zn, Sc, (Zr)	(Cd), (Mo), (Ge), Yb, Sn, Li, Ti, Ga, Y	

Примечание. В скобках — элемент, концентрация которого в разрезе заметно варьирует; цветом отмечены повторяющиеся парагенезы элементов; составила Е.А. Предтеченская по данным полуколичественного спектрального анализа на 45 элементов (аналитик М.А. Анурьева, СНИИГТИМС).

породы свиты резко обогащены Ag, As, Cd, Ni, V, Zn, Ca, Ba и U по сравнению с речной и океанской взвесью [5, 7, 12, 32]. На Медведевской площади заметно повышены концентрации Co и Cr, на Чкаловской и Салымской — Co, Cr и Y, элементов, типичных для темноцветных и акцессорных минералов эффузивных и интрузивных пород. В центральной части баженовского бассейна на Ачимовской, Рагозинской, Махнинской, Ноябрьской и других площадях в кремнистых аргиллитах и радиоларитах близ подошвы свиты повышены концентрации железа и величина отношения

Fe+Mn /Ti. Там же обнаружены мелкие таблички свежих плагиоклазов и остроугольные, оскольчатые обломки кварца. Все это позволяет предполагать, что на вышеупомянутых площадях и западнее, в Салымском, Шаимском, Красноленинском и Северо-Сосьвинском районах на Кондырской, Тугровской и других площадях, при формировании баженовской свиты участвовал материал пеплопадов, который сохранился в основном в депрессиях дна бассейна седиментации [3, 25].

Для битуминозных баженовских пород характерно аномальное обогащение железом, молибденом и ураном независимо от их положения в разрезе. Это, очевидно, можно объяснить тем, что в отложениях, обогащенных органическим веществом, Fe, Mo и U находятся в виде органо-минеральных соединений [12]. В периферической зоне баженовского бассейна резко повышены концентрации бора и лития, что позволяет рассматривать в качестве их возможных источников кислые и щелочные продукты интрузивного магматизма в районах обрамления плиты.

На первом этапе исследований авторами были составлены литолого-геохимические разрезы по данным бурения трёх скважин: Салымской 116-Р, Медведевской 1-Р и Чкаловской 9-Р (рис. 2—4), расположенных в различных структурных и фациальных условиях (рис. 1). Вопросам расчленения разрезов, выделения и корреляции литотипов баженовской свиты на территории Западно-Сибирской плиты по керну и комплексу геофизических исследований скважин (ГИС) будет посвящена следующая статья.

На Салымской и Чкаловской площадях в составе свиты преобладают глинисто-кремнистые породы и радиолариты, которые сформировались в пределах иловых впадин зоны псевдобатиали и нижней—средней сублиторали (рис. 2, 4). В этих условиях в породах резко повышены концентрации органического углерода, Si, Al, Fe, P, V, Ni, V, Cu, Zn, Cd, As, а также содержания пирита и кальция по остаткам радиоларитов. Количество общего Si несколько выше на Салымской и Чкаловской

Таблица 2

Распределение химических элементов в составе пород баженовской свиты по периодам и группам современной таблицы Д.И. Менделеева*

Период	Элементы
2	Li, Be, B
3	Na, Mg, Al, Si, P
4	K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As
5	Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn
6	Ba, La, Ce, Eu, Yb, Tl, Pb, Bi
7	U

Группа	Элементы
1	Li, Na, K
2	Be, Mg, Ca, Sr, Ba
3	Sc, Y, La, Ce, Eu, Yb
4	Ti, Zr, Sn, Pb
5	V, Nb
6	Cr, Mo
7	Mn
8	Fe
9	Co
10	Ni
11	Cu, Ag
12	Zn, Cd
13	Al, Ga, Tl
14	Si, Ge, Sn, Pb
15	P, As, Bi

Примечание. * [24]

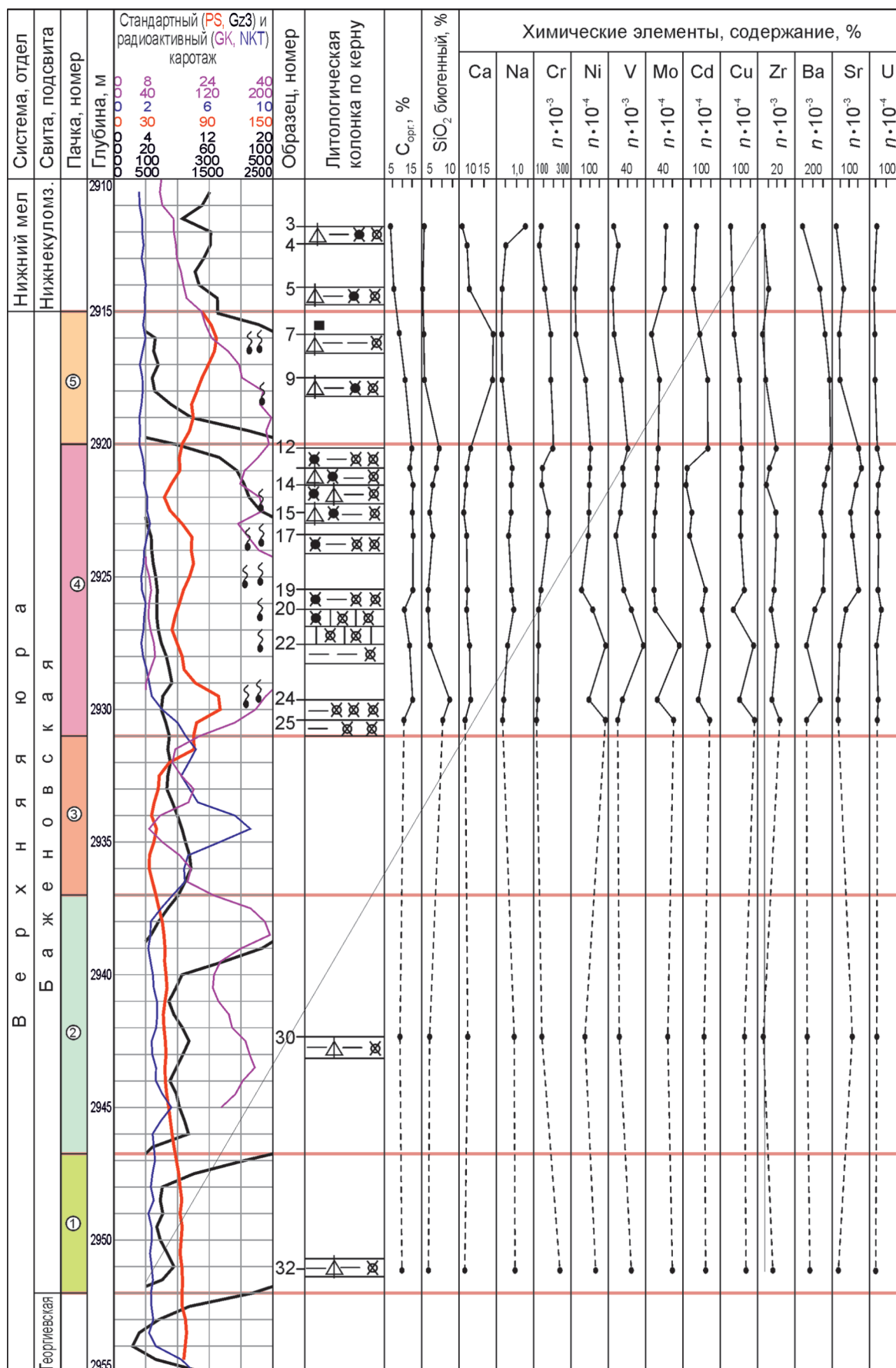


Рис. 2. Литолого-геохимическая характеристика баженовской свиты, вскрытой скважиной Салымская 116-Р:
усл. обозн. см. рис. 3

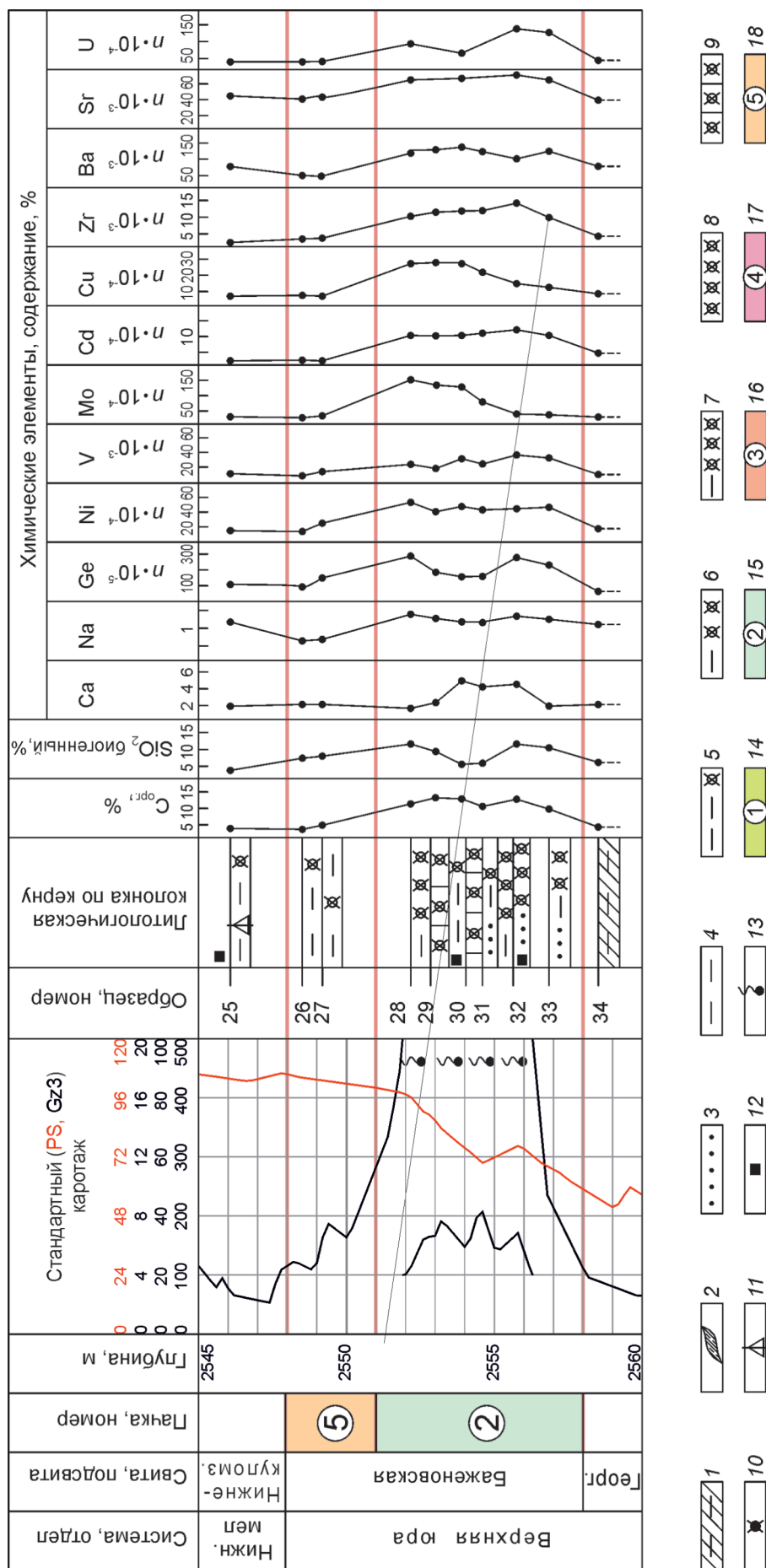


Рис. 3. Литолого-геохимическая характеристика баженовской свиты, вскрытой скважиной Мелведовская 1-Р: 1 – алевролиты глинистые; 2 – прослой и линзы алевролитов; 3 – алевритовый материал; 4 – аргиллиты; 5 – 1–5% реликтов радиоларий; 6 – 5–15% реликтов радиоларий; 7 – 15–30% реликтов радиоларий; 8 – силициты радиолариевые (радиоларии); 9 – вторичные известняки и доломиты по радиолариям; 10 – биоморфозы пирита по радиолариям; 11 – биоморфозы кальцита (доломита) по радиолариям; 12 – вкрапленность пирита; 13 – признаки нефтенасыщения в керне и шлифах; 14–18 – пачки по данным ГИС

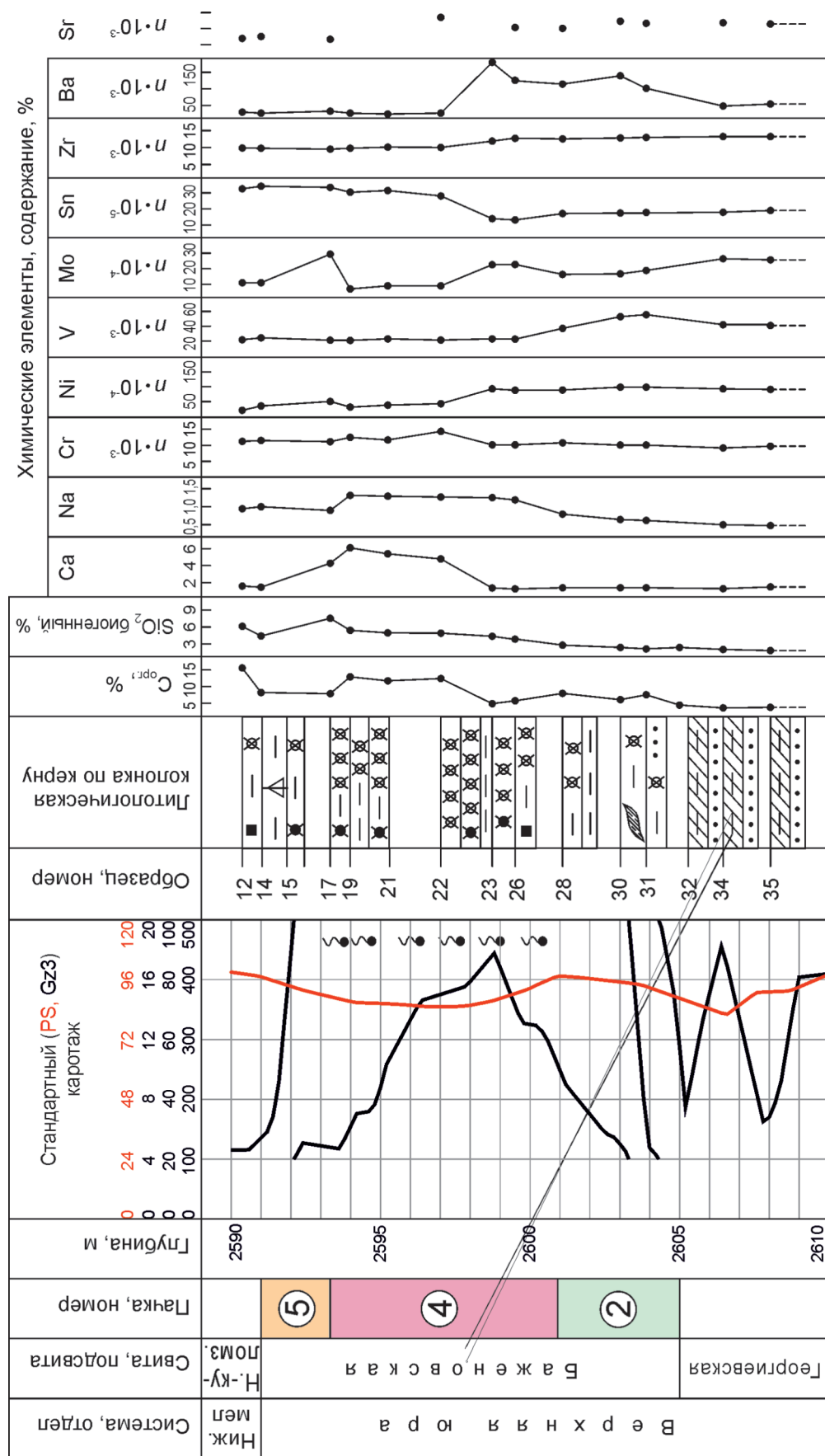


Рис. 4. Литолого-геохимическая характеристика баженовской свиты, вскрытой скважиной Чкаловская 9-Р: усл. обознач. см. рис. 3

площадях и составляет соответственно 40—68 и 58—65 %. На Салымской площади также повышены концентрации Ca, Ba и Sr, а концентрации P, Mg и Mn по разрезу существенно не меняются, как и концентрации Ga, Ge, Be и Ti. Содержание Na и Zr повышено на Медведевской площади (рис. 3), что обусловлено её расположением в пределах подводной возвышенности баженовского моря.

Отмечено, что с ростом глубины бассейна седиментации в породах существенно возрастают концентрации Cu, V, Ni, As, Cd, Nb, и особенно Zn (рис. 2). Значительное обогащение более глубоководной части бассейна этими элементами может быть связано с биохимической деятельностью организмов. Ранее А.П. Виноградовым [5], В.В. Гордеевым и А.П. Лисицыным [9], А.И. Перельманом [18] установлено, что обогащение отложений Ca, Mg, Ba, Sr, As, Cd, P, V, Ni, Fe и Mg зависит от интенсивности биогеохимической деятельности организмов. По А.И. Перельману [18], P, Ca, Sr являются элементами *биологического накопления*; Ca, Ba, As и Ni — *биологического захвата*. По данным А.И. Вернадского [4] и А.П. Лисицына [13], P, Ca, Fe, Mg, Zn входят в состав клеток, а Sr, Ba, Ti, V и Ni выполняют *важные физиологические функции* живого вещества. В то же время As, Cd, Fe, Ni и Zn легко вступают в реакцию с серой в восстановительных условиях, образуя диагенетические сульфиды.

В [1, 2, 6, 14, 25] показано, что зоны максимального обогащения битуминозных пород свиты микроэлементами связаны с участками *промышленной нефтегазоносности*, где резко возрастают концентрации Cu, Zn, V, Mo, Ni и других металлов. Так, в Шаимском нефтегазоносном районе в скважине

Даниловская 10167 в породах верхнеданиловской подсвиты даниловской свиты (аналога баженовской) концентрации Cu, Cr, V, Ni, Cd, Mo и других металлов (табл. 3) существенно выше кларковых [4].

Ф.Г. Гурари, И.И. Нестеровым, И.Н. Ушатинским [2, 11, 14, 25, 26] и другими отмечено, что обогащенность доманикитов микроэлементами тесно связана с содержанием в породах планктоногенного ОВ и определяется первичными условиями седиментации. В.М. Гашиным и В.А. Бобровым [6] составлена сводная таблица генерализованных среднестатистических оценок элементного состава пород баженовской свиты. В [6] выделены элементы, *накапливающиеся на ОВ* (Mo, P, U, Cu, V, Ni, As, Sb), *индифферентные к ОВ* (Co, Zr, Se, Eu, Ce, La и др.) и *антагонисты ОВ* (K, Na, Ti, Th, Hf, Ta и Mn). Первые тесно положительно связаны одни с другими, с $C_{орг.}$ и с минералами биогенного генезиса. Элементы-антагонисты ОВ положительно коррелируют между собой, с алевроитовой и пелитовой составляющей пород, а Mn — с карбонатными минералами. Установлено, что концентрации элементов, накапливающихся на ОВ, в 3—6 раз выше их концентраций в обычных глинистых породах [6, 25, 26].

Специфической особенностью свиты служит её обогащение тяжелыми лантаноидами — *иттрием и иттербием* ($n \cdot 10^{-4} - n \cdot 10^{-5} \%$), а также повышенное содержание *бария* (от 400 до $1100 \cdot 10^{-3} \%$) в породах центральных районов плиты, в частности, на Салымской площади. При этом барий входит в число 10 основных породообразующих элементов. Новообразования барита часто фиксируются рентгенографически и наблюдаются в шли-

Таблица 3

Результаты атомно-абсорбционного анализа верхнеюрских отложений верхней подсвиты даниловской свиты (аналог баженовской свиты) Шаимского района, вскрытых скважиной Даниловская 10167

Глубина отбора пробы, м	Содержание элементов, г/т										Отношения			
	Ba	Cu	Cr	Co	Mn	Ni	Sr	Cd	V	Mo	Sr/Ba	Mo/Mn	Ni/Co	V/(V+Ni)
1748,0	509	67	118	15	379	97	138	4,00	192	21,0	0,27	0,055	6,47	0,66
1748,5	358	59	154	22	400	144	157	3,40	146	42,0	0,44	0,105	6,55	0,50
1749,0	378	45	122	17	1390	124	182	2,40	135	44,0	0,48	0,032	7,29	0,52
1750,4	394	67	139	18	384	104	139	2,20	170	18,0	0,35	0,047	5,78	0,62
1751,0	485	61	160	19	642	134	145	2,50	197	30,0	0,30	0,047	7,05	0,60
1752,3	438	65	136	20	654	160	144	4,00	191	46,0	0,33	0,070	8,00	0,54
1756,0	447	54	137	23	412	131	146	1,80	155	30,0	0,33	0,073	5,70	0,54
1758,0	735	57	163	18	397	78	144	0,45	128	6,3	0,20	0,016	4,33	0,62
1761,8	1160	62	132	32	938	100	168	0,70	152	4,0	0,14	0,004	3,13	0,60
1766,4	439	73	142	32	684	118	154	0,70	172	4,0	0,35	0,006	3,69	0,59
1767,4	763	70	154	36	721	170	200	1,20	185	10,0	0,26	0,014	4,72	0,52
Кларковые содержания в осадочных породах (по А.П. Вино- градову)	800	57	100	20	670	95	450	0,03	130	2	0,56	0,003	4,75	0,58

Примечание. Красным цветом выделены значения, превышающие кларковые содержания элементов, синим — элементы, концентрация которых выше, чем в породах баженовской свиты Салымского района.

фах как в виде самостоятельных зёрен, так и в качестве биоморфоз по органическим остаткам. Возможно, барий, присутствующий, как изоморфная примесь в кристаллических решетках полевых шпатов и биотита, освобождается в процессе их разрушения и переотложения и переходит в раствор в виде сульфата бария BaSO_4 . Как практически нерастворимый в воде сульфат, он накапливается в более глубоководной части бассейна в виде барита. Не исключено также, что барит мог сформироваться в породах свиты и в результате действия подводных гидротерм типа «белых курильщиков» в тектонически активных зонах [20, 25].

Концентрации некоторых элементов (Cu, Zn, Cr, Ni, As, V, Cd, Ce, Tl, Ag) и их парагенезы на изученных площадях резко меняются (табл. 1). Это, очевидно, может свидетельствовать об изменении источников сноса или интенсивности биохимических процессов в баженском бассейне, а также о поступлении в осадок эксгальвативного или пирокластического материала.

Итак, Si, Ca, Mg, Sr, Ba, P, Co, Ni, Cu, Zn, V, As, Cd, Pb, Ag, Y, Yb, Cr и Fe, участвующие в составе пород баженской свиты, являются элементами биогенного генезиса, а K, Na, Li, Al, Ti, B, Ga, Ge, Mn, Sc, Cr, Sn, Zr — элементами терригенного генезиса. Внутри каждой из выделенных групп существуют тесные значимые связи элементов, а также определённые парагенетические ассоциации элементов.

Известно [4, 10], что свойства и поведение элементов в физико-химических процессах определяются главным образом строением электронных оболочек атомов. По данному критерию все элементы периодической системы Д.И. Менделеева подразделяются на элементы *s*-, *p*-, *d* и *f*- групп, что соответствует группам щелочных и щелочно-земельных металлов (*s*), неметаллов и металлоидов (*p*), собственно металлов (*d*) и благородных газов (*f*). Исходя из конфигураций электронных оболочек атомов, можно расшифровать специфику геохимического поведения элементов как биогенного, так и терригенного накопления в процессах седименто-, диа- и катагенеза, поскольку как самостоятельные энергетические системы атомы элементов чрезвычайно чувствительны к любым изменениям термодинамических и окислительно-восстановительных условий среды.

Среди элементов, доминирующих в породах баженской свиты, по типу электронных структур атомов можно выделить парагенетические ассоциации и ряды элементов-аналогов. Так, с позиций однотипного строения внешних электронных оболочек атомов в группе элементов-«органогенов» близкие свойства имеют Fe, Co и Ni, Y, Yb и Ti, P, V и As и др. Полными аналогами являются Cu и Ag, Ca и Sr, Zn и Cd и др. Этим можно объяснить тесную корреляцию этих элементов между собой.

Как упоминалось, большая часть минералов-«органогенов» связана с живым веществом, входя в состав клеток, панцирей, протоплазмы, или выполняла важные физиологические функции организмов, прежде всего Ca, Ba, Sr, Si, Fe, Mg, P, V, Ni, Co, As, Mo, Y, Cd, Tl.

Согласно теории молекулярных орбиталей [10], металлы-«органогены» баженской свиты принадлежат в основном к *d*-группе и относятся к числу переходных. Эти элементы чрезвычайно склонны к комплексообразованию с органическими структурами вследствие того, что их *d*-орбитали недоукомплектованы и могут перекрываться с электронными орбиталями органических молекул. Переходные металлы (Fe, Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, V, Co, Ni, Mo и др.), а также U, обогащающие породы свиты, могут создавать сложные и разнообразные комплексные органо-минеральные (ОМ) соединения с олефинами, ароматическими УВ, ацетиленами, присоединяя молекулы оксида углерода, фосфатов, аминов, легко образуя двойные и тройные связи с атомами углерода [29]. У непроводящих металлов (Na, Li, Be, Mg, Al, Ga, Ge) *d*-орбитали полностью укомплектованы, и эти металлы не проявляют таких свойств. По строению электронных орбиталей все элементы терригенного генезиса в породах баженской свиты принадлежат в основном к *s*- и *p*-группам и являются непроводящими металлами. В связи с этим существуют тесные положительные значимые связи между $C_{орг.}$ и элементами-«органогенами» — Co, Cd, As, U, V, Co, Ni и другими элементами с *d*-оболочками и отрицательные — между $C_{орг.}$ и Na, Sc, Zr, Mn и другими элементами-«терригенами» с *s*- и *p*-оболочками.

Одна из важнейших особенностей баженской свиты — аномальные проявления *трещиноватости* и *сланцеватости*, приуроченные к зонам повышенной тектонической активности. Такие зоны хорошо проявляются в геофизических полях и успешно выявляются дистанционными, сейсмическими, геохимическими и другими методами [17, 19]. Из всех имеющихся в настоящее время взглядов на образование трещиноватого и сланцеватого коллектора в доманикитах наиболее приемлемым нам кажется представление о многофакторной модели [17, 25]. Здесь определённую роль играли и тектонические напряжения, и первичный литолого-минеральный состав отложений, и наличие большого количества ОВ, которое в главной зоне нефтеобразования интенсивно генерировало значительные объёмы флюидов, создавшие аномально-высокое пластовое давление (АВПД) и повлекшие флюидоразрыв пород.

Для выявления основных процессов, повлиявших на формирование элементного и минерального составов пород свиты, применён *факторный анализ* по методике Г. Хармана [28]. С помощью

Таблица 4

Средние значения параметров литолого-минерального состава и содержание $C_{орг.}$ в породах баженовской свиты

Параметр	Салымская, 116	Медведевская, 1	Чкаловская, 9
Глубина залегания кровли, м	2923,6	2535,8	2592,4
$C_{орг.}$, %	11,31	3,64	7,25
Глина, %	73,13	61,59	65,24
Фосфат костных останков, %	2,82	0,63	0,67
Кремнезём биогенный, %	13,38	3,09	7,45
Карбонат биогенный, %	2,94	0,23	0,58
Карбонат хемогенный, %	5,41	0,14	3,63
Карбонат аутигенный, %	0,65	1,86	0,83
Пирит по остаткам радиолярий, %	3,56	0,68	1,14
Пирит пелитоморфный, %	3,26	4,56	5,43
Алевритовая примесь, %	4,41	12,04	4,00

Примечание. Красным цветом выделены повышенные содержания отдельных компонентов в породах свиты.

метода главных компонент обработаны результаты изучения керн и шлифов из скважин, пробуренных на Салымской (скв.116), Медведевской (скв.1) и Чкаловской (скв. 9) площадях, расположенных в различных фациальных зонах баженовского бассейна. В качестве исходных параметров использовались: глубина залегания отложений, их литолого-минеральный состав, содержание $C_{орг.}$, Cu, Zn, Mo, U и других элементов (табл. 4). Для каждой из

изученных площадей составлена *факторная модель*, включающая положительные и отрицательные нагрузки (наиболее значимые признаки или параметры) при основных геологических факторах.

На Салымской площади, где мощность свиты составляет 38—40 м, в разрезе скважины Салымская 116-Р в интервале 2910—2955 м по ГИС выделяются пять пачек (рис. 2). Три нижние из них слабо

Таблица 5

Факторная модель для Салымской скважины 116-Р

Нагрузки	1			2	3
	Условия седиментации			Механическая дифференциация материала с глубиной	Содержание $C_{орг.}$, окислительно-восстановительные условия
	Биогенное карбонатонакопление	Биогенное кремненакопление	Глубина залегания пород, содержание глины		
Положительные	0,68 карбонат раковин 0,65 Al 0,62 Ti 0,60 As 0,59 Fe 0,48 Na 0,44 карбонат тонкодисперсный 0,43 U 0,41 Ag	0,43 SiO ₂ биогенный 0,43 Na	0,81 K 0,77 B 0,62 глина 0,58 Na 0,56 Sc 0,52 Cr 0,59 глубина 0,44 P 0,43 Ti 0,42 U 0,40 Be	0,86 Yb 0,82 Ni 0,80 Mo 0,79 Ag 0,76 Cu 0,64 Y 0,64 алевритовая примесь 0,63 глубина 0,57 As, V 0,53 Ni, Cd 0,45 C _{орг.}	0,79 Sr 0,74 $C_{орг.}$ 0,73 Ni 0,64 Be 0,52 Zr 0,50 Al 0,49 0,48 Co 0,46 пирит по остаткам радиолярий
Отрицательные	0,74 Mg 0,66 Zn 0,56 P 0,53 SiO ₂ биогенный 0,43 Ti 0,42 Cd	0,61 Ca 0,57 Mn 0,51 Cr 0,45 Cd 0,44 V	0,52 карбонат тонкодисперсный 0,51 Ca 0,49 пирит тонкодисперсный 0,49 Pb 0,47 SiO ₂ биогенный 0,46 Cu 0,42 алевритовая примесь	0,72 Na 0,52 Ca 0,58 карбонат по остаткам радиолярий 0,52 Zr	0,58 Ge 0,48 P 0,45 Mo
Вес фактора	18,02	7,75	19,29	21,67	13,69

Примечание. 1—3 — порядковый номер главных факторов; средний коэффициент ковариации R 0,45; след матрицы ковариации SPR 45,0; число всех факторов N 4; сумма вкладов всех факторов SP 45,0; суммарный вклад главных факторов SL 41,45; суммарный вес главных факторов SW 81,04; красным цветом выделены параметры, определяющие название каждого фактора.

охарактеризованы керном и представлены (снизу вверх): 1 — малокремнистыми аргиллитами с единичными тонкими прослоями радиоляритов; 2 — слабо битуминозными кремнистыми аргиллитами с прослоями однородных тонкоотмученных аргиллитов и 3 — кремнисто-известковистыми аргиллитами с редкими прослоями карбонатизированных радиоляритов и остатками битой ракуши. Средняя, четвертая пачка мощностью около 20 м, сложена битуминозными известковисто-кремнистыми и кремнисто-известковистыми аргиллитами с прослоями в различной степени карбонатизированных радиоляритов в кровле. Верхняя пачка аналогичной мощности представлена малокремнистыми аргиллитами с единичными остатками радиолярий (рис. 2). По материалам скважины Салымская 116-Р выявлены четыре главных фактора, суммарный вклад (W) которых составил 61,4, суммарный вес (P) — 92,0, средний коэффициент ковариации (R) — 0,45. В табл. 5 приведены три из них.

1. **Фациальные условия седиментации.** Этот фактор (P 45,0) обусловлен тремя составляющими: глубиной залегания отложений и содержанием глинистого материала (P 19,29); биогенным карбонатом и кремненакоплением (P 18,02 и 7,75 соответственно). Наиболее информативными признаками при нём оказались современная глубина залегания отложений, количество карбоната раковин моллюсков, содержание рассеянного тонкодисперсного карбоната (остатки пеллет или «морской снег»), биогенного кремнезема, концентрации элементов биогенного генезиса — Ca, Be, Fe, As, Cd, P, Zn и других, а также Na, Al, Ti, Cr — элементов терригенного и, возможно, пирокластического генезиса.

2. **Механическая дифференциация материала с глубиной** (P 21,67%). Основными значимыми параметрами при данном факторе оказались современная глубина залегания отложений, содержание в породах глинистого материала, алевритовой примеси, $C_{орг.}$, а также Cu, Ni, Ag, Cd, Mo и других элементов.

3. **Содержание $C_{орг.}$ и окислительно-восстановительный режим в бассейне седиментации** (P 13,69). В структуре этого фактора наиболее четко выделились такие параметры, как содержание в породах $C_{орг.}$, диагенетического пирита по остаткам радиолярий, а также элементов биогенного генезиса: Ni, Be, Zr, Sr, Y, Ge, P, Co, Mo и Al, принимающих участие в обменно-дыхательных процессах (Be, Zr), строении раковин и пигментных оболочек (Sr, P), эпителиальной и соединительной тканей (Al), процессах кроветворения (Co, Ni) и других жизненно важных функциях организма [4, 5, 12].

4. **Аутигенное минералообразование.** Данный фактор (P 16,7) обусловлен процессами аутигенного фосфато-, кремне- и карбонатонакопления, вклады которых в общий вес фактора равноценны. Набор определяющих признаков при процессах фосфато-

и карбонатонакопления говорит о близости времени образования вторичных фосфатов по костным остаткам и карбонатов по раковинному детриту и остаткам радиолярий. Подобные процессы проходили преимущественно в восстановительных условиях и сопровождались накоплением в иловых осадках цинка, свинца и других тяжёлых металлов.

На *Медведевской площади*, расположенной в зоне перехода от псевдобатиали к нижней сублиторали, в скважине Медведевская 1-Р в интервале глубины 2548—2558,5 м свита по ГИС расчленяется на две пачки, которые коррелируют со второй и пятой пачками в разрезе Салымской скважины 116-Р. Нижняя представлена кремнистыми битуминозными аргиллитами с прослоями карбонатизированных радиоляритов и примесью мелкоалевритового материала, верхняя — тонкоотмученными малокремнистыми аргиллитами с единичными остатками радиолярий (рис. 3). По сравнению с Салымской для этой площади, связанной с положительным элементом донного рельефа, характерно резкое сокращение мощности бажендовской свиты (до 7—8 м), значительное повышение в составе пород количества алевритового, тонкодисперсного карбонатного материала, концентраций Na, Ge, Zr, Ba и Sr, тонкодисперсного пирита. В то же время здесь понижены концентрации $C_{орг.}$, пирита и кальцита по радиоляриям, фосфата костных остатков, V, Mo, Cd и Cu. Для данной площади установлено шесть основных факторов, суммарный вклад которых составил 50,9, суммарный вес — 93,1, средний коэффициент ковариации — 0,38 (табл. 6). По геологической природе эти факторы можно объединить в четыре группы.

В первую группу (P 38,54) вошли **фактор накопления в породах $C_{орг.}$** , а также **факторы биогенного фосфато- и кремненакопления**. Вторая группа (P 21,48 и 4,84) интерпретируется, как **группа факторов биогенного карбонатонакопления и аутигенного минералообразования (карбонатизации и пиритизации)**. Третий по значимости (P 14,66) — **фактор механической дифференциации материала с глубиной**. Данный фактор определил содержание в породах алевритового, глинистого материала, а также Na, Li, Ge, Sc и Mn — элементов терригенного генезиса, отрицательно связанных с глубиной залегания пород. Четвертый фактор (P 13,53) интерпретируется как механическая дифференциация обломочного материала в зависимости от глубины бассейна седиментации. В качестве основных определяющих параметров при нём выявлено содержание алевритового и глинистого материала. В отличие от Салымской, на Медведевской площади ослаблены связи литологических параметров с элементами халькофильной группы и тяжёлыми токсичными металлами. В то же время более существенную роль играют химические элементы, типичные для терригенного сноса, что определяется меньшей

Факторная модель для Медведовской скважины 1-Р

Главные факторы	1	2		3	4
Нагрузки	Глубина залегания, количество $C_{орг.}$, биогенное фосфатно-и кремненакопление	Биогенное и аутигенное карбонатонакопление, пиритизация		Аутигенное карбонатонакопление	Механическая дифференциация материала с глубиной
Положительные	0,97 глубина 0,90 $C_{орг.}$ 0,90 SiO_2 биогенный 0,86 фосфат костных остатков 0,81 Ba 0,63 Ca 0,62 Ti, As, Cd 0,59 Pb 0,56 V 0,55 Mo 0,51 Y 0,50 Co	0,87 Cu 0,77 Yb 0,70 Y 0,69 Co 0,68 Ni 0,61 Sn 0,55 Ti 0,51 Cr 0,48 Cd, U, As 0,42 карбонат ракушнякав 0,40 $C_{орг.}$ 0,40 карбонат по остаткам радиолярий	0,76 карбонат тонкодисперсный 0,52 пирит тонкодисперсный	0,70 Ca 0,61As 0,60 Ti 0,42 Pb 0,40 карбонат по остаткам радиолярий	0,54 Pb 0,51 алевроитовая примесь 0,47 Ge 0,45 Sc 0,45 карбонат по остаткам радиолярий
Отрицательные	0,85 K 0,83 Zr 0,80 Cr 0,76 Ga 0,74 карбонат по остаткам радиолярий 0,73 Se 0,71 Ti 0,67 Sn 0,65 B	0,87 Si 0,81 P 0,60 Fe 0,54 Mg, Al 0,53 Na 0,49 карбонат тонкодисперсный	0,54 Si 0,45 Sr	0,79 Mo 0,74 K 0,73 P 0,69 V 0,59 Li 0,53 Fe 0,47 Al, пирит тонкодисперсный 0,46 Yb 0,44 Zn	0,82 Mn 0,70 глина 0,51 карбонат ракушнякав 0,50 Pb 0,47 Na 0,44 B 0,43 Li
Вес фактора	38,54	21,48	4,84	14,66	13,53

Примечание. 1 – 4 – порядковый номер главных факторов; средний коэффициент ковариации R 0,40; след матрицы ковариации SPR 44,0; общее число факторов N 6; сумма вкладов всех факторов SP 44,0; суммарный вклад главных факторов SL 40,94; суммарный вес главных факторов SW 93,1; красным цветом выделены параметры, определяющие название каждого фактора.

глубиной бассейна седиментации и отсутствием стабильного сероводородного заражения придонных вод.

На Чкаловской площади, расположенной в зоне перехода от нижней к средней сублиторали, разрез свиты мощностью 15 м в интервале глубин 2591–2605 м, по ГИС и литолого-петрографическим данным, расчленяется на три пачки (рис. 4). Нижняя, аналогичная пачке 2 Салымской и Медведовской площадей, сложена малокремнистыми слабо битуминозными аргиллитами с редкими прослоями радиоляритов и «чистых» тонкоотмученных аргиллитов. В средней, коррелирующей с пачкой 4 Салымской площади, доминируют битуминозные кремнистые и кремнисто-известковистые аргиллиты с прослоями глинизированных, карбонатизированных и пиритизированных радиоляритов. Породы, слагающие эту пачку, отличаются

повышенными концентрациями Na, Cr, Zr и Sr по сравнению с породами рассматриваемой пачки на Салымской площади. Верхнюю пачку, аналогичную пачке 5 Салымской площади, слагают малокремнистые аргиллиты с единичными остатками радиолярий и редкими тонкими прослоями пеллециповых ракушнякав.

Обнаружено влияние четырех групп факторов, суммарный вклад которых составил 55,1, суммарный вес — 89,6, средний коэффициент ковариации — 0,32. В первую группу (P 31,5) вошли **фациальные условия седиментации**. Вторая группа (P 21,3) проинтерпретирована как **накопление $C_{орг.}$ и биогенное осадконакопление**. Наиболее информативными признаками при ней оказались биогенные карбонаты, кремнезем (коэффициенты ковариации R 60 и 0,74), $C_{орг.}$, Li, Ti, Mo, Sn, Ga и особенно U и As (R 0,81 и 0,90). В состав третьей группы (P 13,7)

вошли **факторы механической дифференциации материала с глубиной и гидродинамический режим бассейна седиментации**, которые обусловили накопление в породах *мелкопесчаной и алевроитовой примеси*. Четвертая группа **факторов аутигенного минералообразования** (Р 13,9) объединила процессы аутигенных *пиритизации, кремнения и карбонатизации*. Кроме того, выявлен менее значимый фактор — **окислительно-восстановительные условия в бассейне седиментации** (Р 9,2), определяющими параметрами при котором оказались диагенетический пирит по остаткам радиолярий, тонкодисперсный пирит, глауконит, а также концентрации в породах Cu, Ag, Pb, P, V и Ti.

Выводы

1. Выделены две основные группы элементов — биогенного и терригенного генезиса, геохимические свойства и поведение которых в процессе формирования баженовской свиты определялись: для первой — связью с ОВ осадков и живыми организмами, химическим родством, процессами биоседиментации, биоассимиляции, сорбции микроэлементов на биогенном детрите, способностью к комплексообразованию, а также к образованию сернистых соединений. В качестве возможного дополнительного источника для ряда элементов (Si, Fe, Mg, Al, Na и, возможно, Y и Yb) предполагается

примесь пирокластического или эндогенного материала (пеплопады, подводные эксталяции).

2. Основными факторами, обусловившими состав и геохимические особенности баженовской свиты, являлись *фациальные условия седиментации, содержание в осадках $C_{орг.}$, биогенных карбонатов и кремнезема*. Важными факторами также служили *механическая дифференциация обломочного материала, морфология дна осадочного бассейна и аутигенное минералообразование в процессах седиментации, диа- и катагенеза*.

3. Косвенными индикаторами неблагоприятных геохимических условий (периодического сероводородного заражения придонных вод, повышенной концентрации тяжёлых токсичных металлов и радиоактивных элементов), особенно в зонах депрессий дна бассейна, повлекших неоднократную гибель популяций двустворчатых моллюсков и другой бентосной фауны [1, 2, 25], могут служить интенсивная пиритизация органических остатков и пород в целом, аномальные концентрации в породах токсичных элементов — As, Hg, Cd, Sb, Pb и U, а также повышенные значения петрохимических модулей (в частности, Fe+Mn/Ti). При этом следует учитывать возможное периодическое воздействие подводных эманаций в связи с гидротермальным подтоком в зонах дизъюнктивных нарушений [20, 25].

ЛИТЕРАТУРА

- Баженовский горизонт Западной Сибири / Ю.В. Брадучан, А.В. Гольберт, Ф.Г. Гурари, В.А. Захаров и др. // Тр. ИГиГ СО АН СССР. В. 649. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1986. 216 с.
- Баженовская свита: седиментационная модель, палеоэкологическая обстановка / Ф.Г. Гурари, Л.А. Кроль, Г.Н. Перо-зио, Е.А. Предтеченская, В.В. Сапьянник / Среда и жизнь в геологическом прошлом: Матер. Всерос. симпозиума. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, 2000. С. 32–33.
- Ван А.В., Предтеченская Е.А., Злобина О.Н. Продукты вулканизма в юрских отложениях Приуральской части Западно-Сибирской плиты // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2011. № 4. М.: ВНИИОЭНГ, 2011. С. 15–22.
- Вернадский В.И. Живое вещество. М.: Наука, 1978. 356 с.
- Виноградов А.П. Введение в геохимию океана. М.: Наука, 1967. 215 с.
- Гавшин В.М., Бобров В.А. Закономерности распределения микроэлементов в баженовской свите // Доманикиты Сибири и их роль в нефтегазоносности. Новосибирск: СНИИГиМС, 1982. С. 76–91.
- Геохимия осадочных пород и руд / Под ред. Н.М. Страхова. М.: Наука, 1966. 423 с.
- Геохимия юрских и нижнемеловых отложений Западно-Сибирской низменности / А.Э. Конторович, Е.Л. Берман, Л.И. Богородская и др. М.: Наука, 1971. 251 с.
- Гордеев В.В., Лисицын А.П. Средний химический состав взвесей рек мира и питание океанов речным осадочным материалом // Доклады АН СССР. 1978. Т. 238. № 1. С. 215–223.
- Грей Г. Электроны и химическая связь (Пер. с англ.). М.: Мир, 1967. 235 с.
- Гурари Ф.Г. Доманикиты и их нефтегазоносность // Советская геология. 1981. № 11. С. 3–12.
- Дегенс Э.Т. Геохимия осадочных образований (Пер. с англ.). М.: Мир, 1967. 299 с.
- Лисицын А.П. Биогеохимия океана. М.: Наука, 1983. 368 с.
- Нестеров И.И. Нефтегазоносность битуминозных глин баженовской свиты Западной Сибири // Советская геология. 1980. № 11. С. 3–10.
- Нестеров И.И. Генезис и формирование залежей углеводородного сырья // Геология нефти и газа. 2004. № 2. С. 38–47.
- Нестеров И.И. Проблемы геологии нефти и газа второй половины XX века. Новосибирск: СО РАН, 2007. 605 с.
- Новые подходы к освоению нефтегазового потенциала баженовского горизонта Западной Сибири / В.В. Харахинов, С.И. Шленкин, М.В. Берин, А.А. Вашкевич, А.В. Олюнин, Т.Н. Шевчук // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2015. № 1. М.: ВНИИОЭНГ, 2015. С. 37–51.
- Перельман А.И. Геохимия. М.: Высш. шк., 1979. 422 с.
- Петров А.И., Шеин В.С. Геодинамическая модель резервуара с кремнисто-глинистым коллектором (на примере баженовской свиты Салымского нефтяного месторождения Западной Сибири) // Геология нефти и газа, 1999. № 9–10. С. 7–13.
- Предтеченская Е.А., Злобина О.Н., Бурлева О.В. Минералогические и геохимические аномалии как индикаторы флюидодинамических процессов в юрских нефтегазоносных отложениях Западно-Сибирской плиты // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2015. № 1. М.: ВНИИОЭНГ, 2015. С. 11–24.
- Прозорович Г.Э., Соколовский А.П., Малых А.Г. Новые данные о трещиноватых коллекторах баженовской свиты // Тр. ЗапСибНИГНИ «Проблемы нефти и газа Тюмени». В. 18, Тюмень, 1973. С. 7–9.
- Роснефть — Нефть из сланца (http://www.rosneft.ru/news/news_about/240620132.html) — дата обращения — 20.05.2016.
- Тимурзиев А.И. Флюидодинамическая природа «аномального бажена» Западной Сибири // Бурение и нефть, 2014. № 1. С. 24–29.
- Сайфуллин Р.С., Сайфуллин А.Р. Новая таблица Менделеева // Химия и жизнь. 2003. № 12. С. 14–17.

25. Условия формирования и методика поисков залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты / Ф.Г. Гурари, Э.Я. Вайц, В.Н. Меленевский, В.И. Москвин, Г.Н. Перозио, Е.А. Предтеченская и др. М.: Недра, 1988. 197 с.
 26. Ушатинский И.Н. Литология и перспективы нефтеносности юрско-неокомских битуминозных отложений Западной Сибири // Советская геология, 1981. № 2. С. 11–22.
 27. Хавкин А.Я. Работа скважин баженовской свиты Салымского нефтяного месторождения /Тр. ВНИИ, 1986. № 6. С. 26–29.
 28. Харман Г. Современный факторный анализ (Пер. с англ.). М.: Статистика, 1972. 489 с.
 29. Цудзи Д. Органические синтезы с участием комплексов переходных металлов (Пер. с англ.). М.: Химия, 1979. 256 с.
 30. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.
 31. Igor Sechin. New age of oil (http://www.rosneft.com/attach/0/02/99/cera_week_en.pdf). Rosneft, March 2013. Дата обращения — 20.05.2016.
 32. Turekian K.K., Wedepohl K.H. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth Crust // Bull. Geol. Soc. Am., 1961. № 72. P. 175–192.
-