

УДК 541.11

А.Ю. Бычков¹, Г.А. Калмыков², И.А. Бугаев³, Н.С. Балущкина⁴, А.Г. Калмыков⁵

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД БАЖЕНОВСКОЙ И АБАЛАКСКОЙ СВИТ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Представлены результаты исследования состава пород баженовской и абалакской свит Западной Сибири. Показаны корреляции концентрации макро- и микрокомпонентов пород с содержанием основных минеральных компонентов породы и органического вещества. Исследование содержания микроэлементов позволяет определить условия отложения осадков: окислительно-восстановительные условия, сероводородное заражение и источник сноса вещества. Результаты показали, что породы баженовской свиты сформировались в условиях низких потоков обломочного вещества в восстановительных условиях и периодически возникающем сероводородном режиме.

Ключевые слова: баженовская свита, химический состав, содержание микроэлементов.

The composition of Bazhenov and Abalak Formation rocks of Western Siberia is presented. Correlations of macro- and micro-components concentration with the base mineral and organic matter content in rocks are showed. Investigations of trace elements allow determining sedimentation conditions: redox conditions, hydrogen sulfide contamination and the source of the sedimentary material. The results showed that the rocks of the Bazhenov Formation were formed at low flows of clastic material under reducing conditions and a periodic hydrogen sulphide mode.

Key words: Bazhenov formation, chemical composition, trace elements.

Введение. Истощение запасов в традиционных месторождениях углеводородов заставляет искать пути извлечения их из новых источников. Один из таких источников — углеводороды, которые сланцевая порода сгенерировала, но не смогла отдать в традиционный коллектор из-за низкой проницаемости [Ступакова и др., 2015]. Кроме того, возможно развитие новых технологий генерации нефти в пласте [Бычков и др., 2015]. Наибольшие перспективы имеют породы баженовской свиты, которые характеризуются высоким содержанием органического вещества.

Исследован керн скважин, которые относятся к Фроловско-Тамбейскому структурно-фациальному району Обь-Ленской фациальной области, который протягивается в меридиональном направлении более чем на 1000 км. В пределах Широкого Приобья его западная граница разделяет Приобское и Красноленинское месторождения западнее г. Ханты-Мансийск, восточная — проходит между Восточно-Сургутским и Южно-Сургутским (район г. Сургут).

В этом районе прослеживаются три горизонта: васюганский, георгиевский и баженовский. Первые два отвечают абалакской свите, третьему в

полном объеме соответствует баженовская свита. Баженовская свита в изученном районе повсеместно залегает на абалакской свите и перекрыта неокосским клиноформным комплексом [Хамидуллин и др., 2013; Коробова и др., 2015].

В строении абалакской свиты участвуют разнообразные породы, в том числе глинистые, карбонатные, редко обломочные, а также смешанные породы, причем последние преобладают. Для пород абалакской свиты характерно присутствие глауконита.

Баженовская свита здесь сложена кремнистыми породами (силициты), смешанными карбонатно-кремнистыми и кремнисто-карбонатными, кремнисто-глинистыми, глинисто-кремнистыми, в том числе с повышенным содержанием керогена, карбонатными породами, в том числе известняками ступковато-комковатыми, бактериально-водорослевыми, известняками с реликтовой радиоляриевой структурой, известняками кристаллическими и перекристаллизованными [Юрченко и др., 2015], а также доломитами с реликтовой радиоляриевой структурой. Наиболее распространены в отложениях баженовской свиты глинисто-кремнистые породы с повышенным содержанием керогена.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, профессор; *e-mail:* andrewbychkov@rambler.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, вед. науч. с.; *e-mail:* gega64@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, аспирант; *e-mail:* corte-z@ya.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, науч. с.; *e-mail:* gega64@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, инженер; *e-mail:* a.g.kalmykov@gmail.com

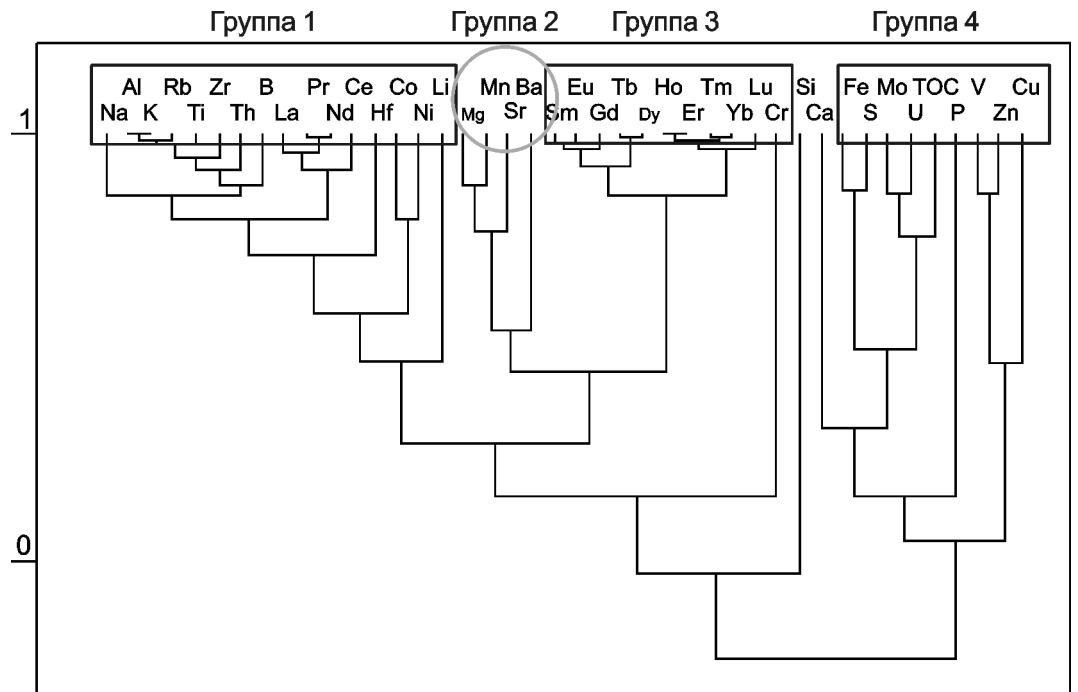


Рис. 1. Корреляционная дендрограмма содержания элементов в породах баженовской свиты

Часто они образуют ритмы, которые сложены тонким (от 0,5 до 2-3 мм) чередованием глинисто-кремнистых и глинисто-кремнисто-карбонатных, кремнистых, карбонатно-кремнистых пород, в различной степени насыщенных керогеном. Такие породы обладают полосчатой и тонко-полосчатой текстурой.

Методы исследования. Анализ главных оксидов и микроэлементов в пробах выполнен рентгеноспектральным флуоресцентным методом по методикам, утвержденным научным советом по аналитическим методам Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья (НСАМ ВИМС). Для анализа применялся вакуумный рентгенофлуоресцентный спектрометр последовательного действия (с дисперсией по длине волны, модель «Axios mAX Advanced» (PANalytical) в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН.

Для определения элементного состава использован метод ICP-MS. Анализ проводился на масс-спектрометре высокого разрешения с ионизацией в индуктивно-связанной плазме ELEMENT2 (Thermo Finnigan) в лаборатории экспериментальной геохимии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Методика подготовки проб к анализу детально изложена в работе [Бычкова и др., 2016].

Рентгенофазовый анализ выполнен на рентгеновском дифрактометре «Дрон-3м», рабочий ток 20 мА, рабочее напряжение 30 кВ, съемка производилась с рентгеновской трубкой с Со-антикатодом. По данным рентгеноструктурного анализа в изученных образцах пород обнаружены следующие кристаллические фазы: минералы группы кремнезема (халцедон, кварц — основные рефлексы 4,24 и 3,34 Å), глинистые мине-

ралы (гидрослюда — 10 Å, смешанослойные с чередованием пакетов гидрослюда и монтмориллонита — >10 Å, каолинит — >7,14 и >3,56 Å, хлорит — 14,1–14,4, 4,72 и <3,55 Å), карбонатные минералы (кальцит — 3,02–3,03; доломит — 2,89; сидерит — 2,798–2,8 Å), пирит — 2,69–2,71; альбит — 3,17–3,20; калиевый полевой шпат — 3,23–3,25; гетит — 4,18; магнетит — 3,53 Å.

Определение органического вещества проводилось на пиролизаторе RockEval-6 с независимой 2-уровневой обработкой образцов (в пламенно-ионизационном детекторе и печи окисления) [Козлова и др., 2015]. В ходе пиролиза пламенно-ионизационный детектор фиксирует выделение трех пиков органических соединений при программируемом разогреве образцов горной породы от 30 до 650 °С. В интервале температуры до 300 °С (пик S₁ (S₀+S₁)) происходит десорбция свободных (C₁–C₇) и сорбированных (C₈–C₃₃) углеводородов (УВ), входящих в состав попутных газов и нефтей (углеводороды метанового ряда, ароматические углеводороды и др.). В интервале термического разложения керогена при 300–650 °С (пик S₂) происходит собственно пиролиз, в результате которого органическое вещество (ОВ) превращается в газообразные углеводороды (сумма смолисто-асфальтеновых компонентов свободных битумов и УВ, образовавшихся при высокотемпературном крекинге). Третий пик (S₃), измеряемый детектором теплопроводности при 300–390 °С, фиксирует количество двуокиси углерода. Продукты пиролиза, соответствующие вышеуказанным пикам, измеряются в единицах мг/г породы. В печи окисления происходит программированный нагрев породы (300–850 °С) в атмосфере кислорода. Общее содержание углерода (TOC, Total Organic Carbon) вычисляется, учиты-

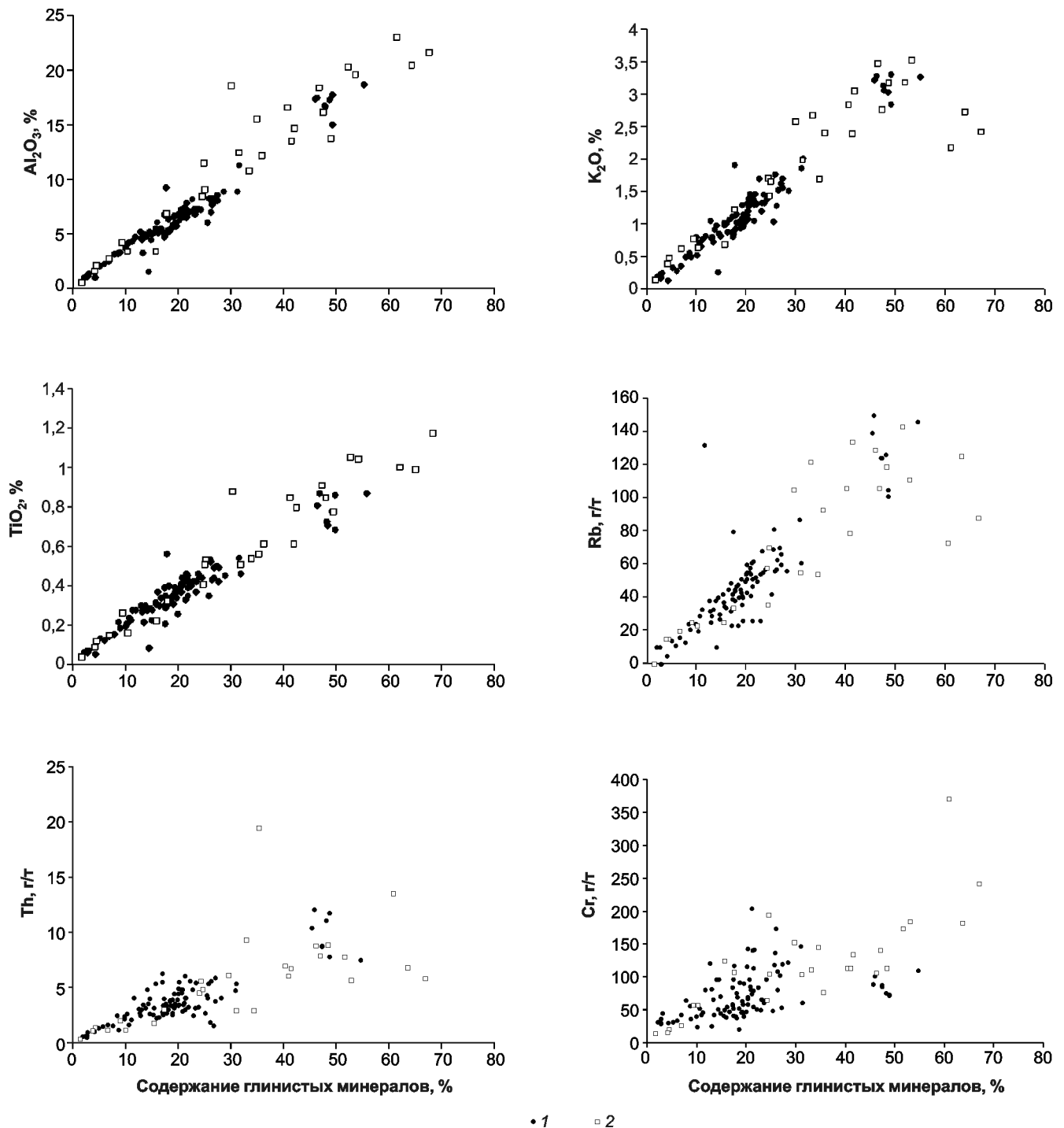


Рис. 2. Корреляции концентрации макро- и микрокомпонентов с содержанием глинистых минералов: 1 — баженовская свита, 2 — абалакская свита

вая, что в элементном составе УВ пиков S_1 , S_2 83% приходится на углерод.

Результаты исследований. Осадочные породы баженовской и абалакской свит содержат несколько основных групп минералов, различающихся по генезису и химическому составу. Определение количественно-минеральных соотношений при помощи рентгенофазового анализа позволило установить соотношения количества глинистых, карбонатных минералов, кварца, пирита. Важная особенность пород — высокое содержание керогена, которое можно

оценить по общему содержанию органического углерода. Распределение минеральных компонентов в породе определяется условиями осадкообразования, градационной сепарацией, биотурбированием, диагенетическими преобразованиями. Как правило, породы имеют ритмическую слоистость, что приводит к большой дисперсии содержания разных групп минералов. Это позволяет определить преимущественное концентрирование конкретного элемента в минеральных компонентах методом построения корреляционных диаграмм.

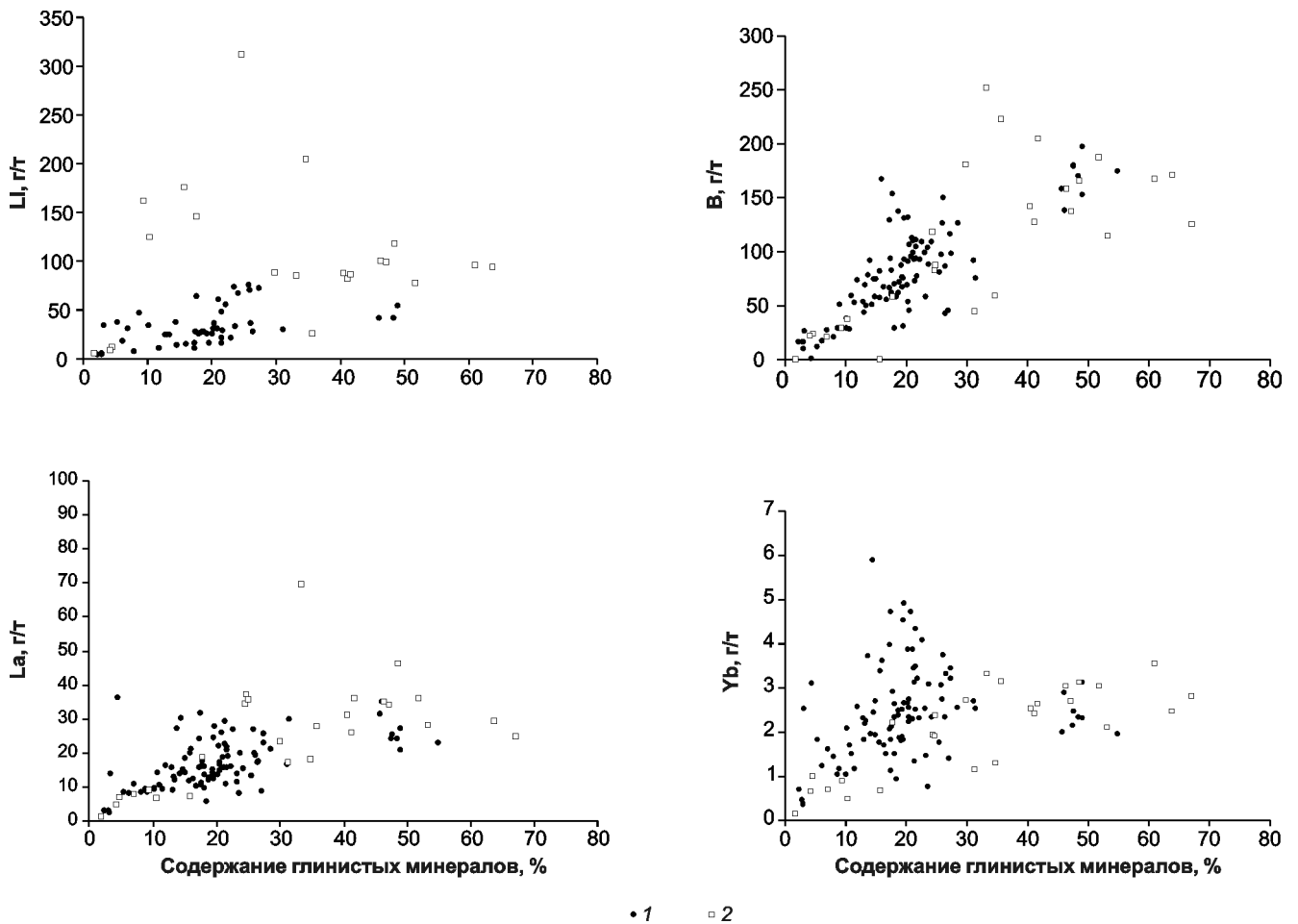


Рис. 2. (Окончание) Корреляции концентрации макро- и микрокомпонентов с содержанием глинистых минералов:
 1 — баженовская свита, 2 — абалакская свита

Дендродиаграмма содержания микро- и макрокомпонентов приведена на рис. 1, компоненты образуют 4 группы с близким геохимическим поведением. В первой группе, имеющей высокие корреляционные связи с калием и алюминием, элементы, связанные с глинистыми минералами, представлены Rb, Ti, Zr, Th, B, Ni, Co и лантаноидами цериевой группы. Вторая группа включает элементы, входящие в карбонаты, — Mg, Mn, Sr, Ba (кроме Ca). Третья группа включает лантаноиды иттриевой группы, самарий и европий, для которых характерна сорбция из морской воды. Четвертая группа элементов имеет корреляции с ОВ, к ним относятся U, Mo, Fe, S. Корреляционные связи P, V, Zn и Cu с ОВ ниже уровня значимости, Si и Ca не коррелируют с другими элементами.

Распределение микроэлементов в породах контролируется минеральным составом породы, но для пород с высоким содержанием ОВ кероген также нужно рассматривать как фазу. Таким образом, геохимическая модель породы представляет собой смесь фазовых компонентов, а не минералов. Можно выделить следующие фазовые компоненты породы: кремнеземные, глинистые, карбонатные, сульфидные и ОВ.

Глинистые минералы. Глинистые минералы включают в себя смешанослойные минералы ряда

иллит–сметит с соотношением пакетов 85:15–65:35, гидрослюды, каолинит и хлорит. В целом эти минералы отвечают терригенной составляющей, но их состав подвергается изменениям в результате биоконцентрирования и адсорбции из морской воды. Важнейшими главными компонентами этих минералов, помимо SiO₂, являются Al₂O₃, K₂O, Na₂O. На рис. 2 показаны корреляции содержания глинистых минералов с концентрацией этих оксидов в породе. Корреляция с содержанием Al₂O₃ — однозначная функция содержания суммы глинистых минералов, что можно использовать для расчета количественно-минерального состава породы по данным рентгенофлуоресцентного анализа с достаточной точностью. Вместе с тем корреляции с щелочными металлами (K₂O, Na₂O) не столь однозначны, поскольку зависят от соотношения различных глинистых минералов. Кроме того, в ходе диагенетических преобразований часть натрия может переходить в альбит. Титан традиционно рассматривается как признак терригенной составляющей и обнаруживает значимую корреляцию с содержанием глинистых минералов (рис. 2).

Корреляции содержания глинистых минералов с концентрациями микроэлементов приведены на рис. 2. Среди компонентов, геохимия которых в осадочных породах контролируется глинистыми

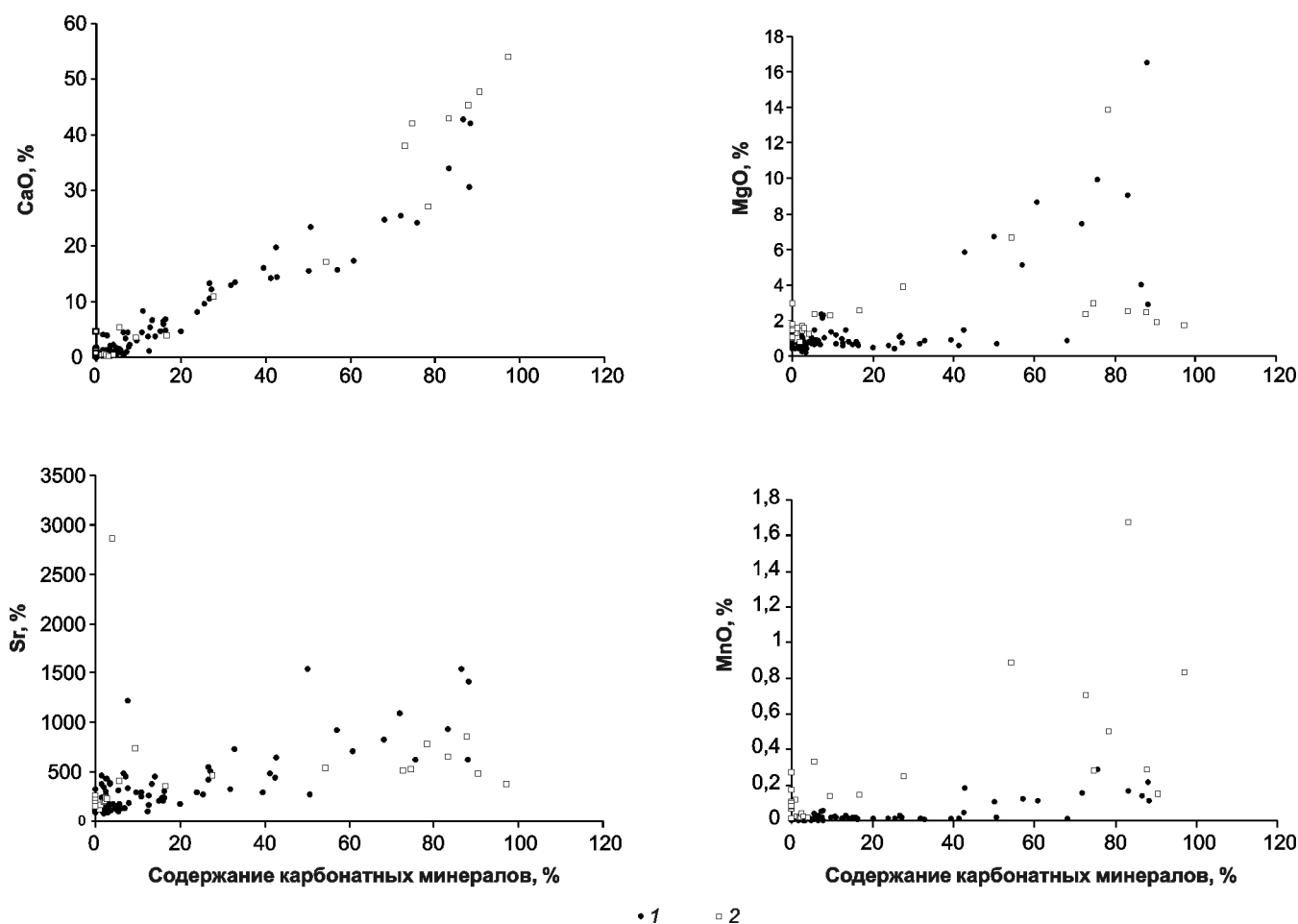


Рис. 3. Корреляции концентрации компонентов в породах баженовской и абалакской свит с содержанием карбонатных минералов: 1 — баженовская свита, 2 — абалакская свита

минералами, — Rb, Th, Cr, Li, В, редкоземельные элементы.

Рубидий — геохимический аналог калия, поэтому можно было ожидать корреляцию такого же уровня, как для калия, однако на рис. 2 видна широкая дисперсия, которая требует объяснения. Возможно, больший разброс для абалакской свиты определяется более сложным составом комплекса глинистых минералов по сравнению с породами баженовской свиты. Кроме того, такая дисперсия отражает изменчивость источника вещества и условий седиментогенеза при формировании пород абалакской свиты.

Торий характеризуется малой водной миграцией, его поведение контролируется преимущественно захватом взвеси. Высокая дисперсия для пород абалакской свиты подтверждает вывод об изменчивости условий седиментогенеза и источников вещества в это время.

Хром также плохо мигрирует в морской воде. На осаждение взвеси влияет гранулометрическая сепарация, при которой тяжелая фракция, в которой присутствуют хромсодержащие минералы, может обогащать отдельные прослои без прямой корреляции с содержанием глинистых минералов. Такой процесс наблюдается как для пород абалакской, так и баженовской свит (рис. 2).

Литий хотя и накапливается в глинистых минералах (рис. 2), но отдельные пробы абалакской свиты аномально им обогащены. Это может быть связано с поступлением вещества слабой степени выветривания (вулканических пеплов) или с условиями специфической сорбции лития из морской воды.

Геохимия бора контролируется адсорбцией из морской воды на поверхности глинистых минералов, причем при диагенезе он может частично высвободиться. Процесс адсорбции—десорбции зависит от pH морской воды и поровых вод в процессе формирования породы. Сложные преобразования глинистых минералов в илах могут приводить к перераспределению бора, что определяет большую дисперсию в зависимости от содержания глинистых минералов.

Корреляция редкоземельных элементов с глинистыми минералами значима для элементов цериевой группы. Она показана на примере лантана (рис. 2) и сильно отличается от таковой для элементов иттриевой группы, например, иттербия, рис. 2.

Карбонатные минералы. Главные карбонаты, определенные рентгенофазовым анализом, — кальцит, доломит и сидерит, соответственно, демонстрируют четкую корреляцию между концентрацией кальция и карбонатных минералов

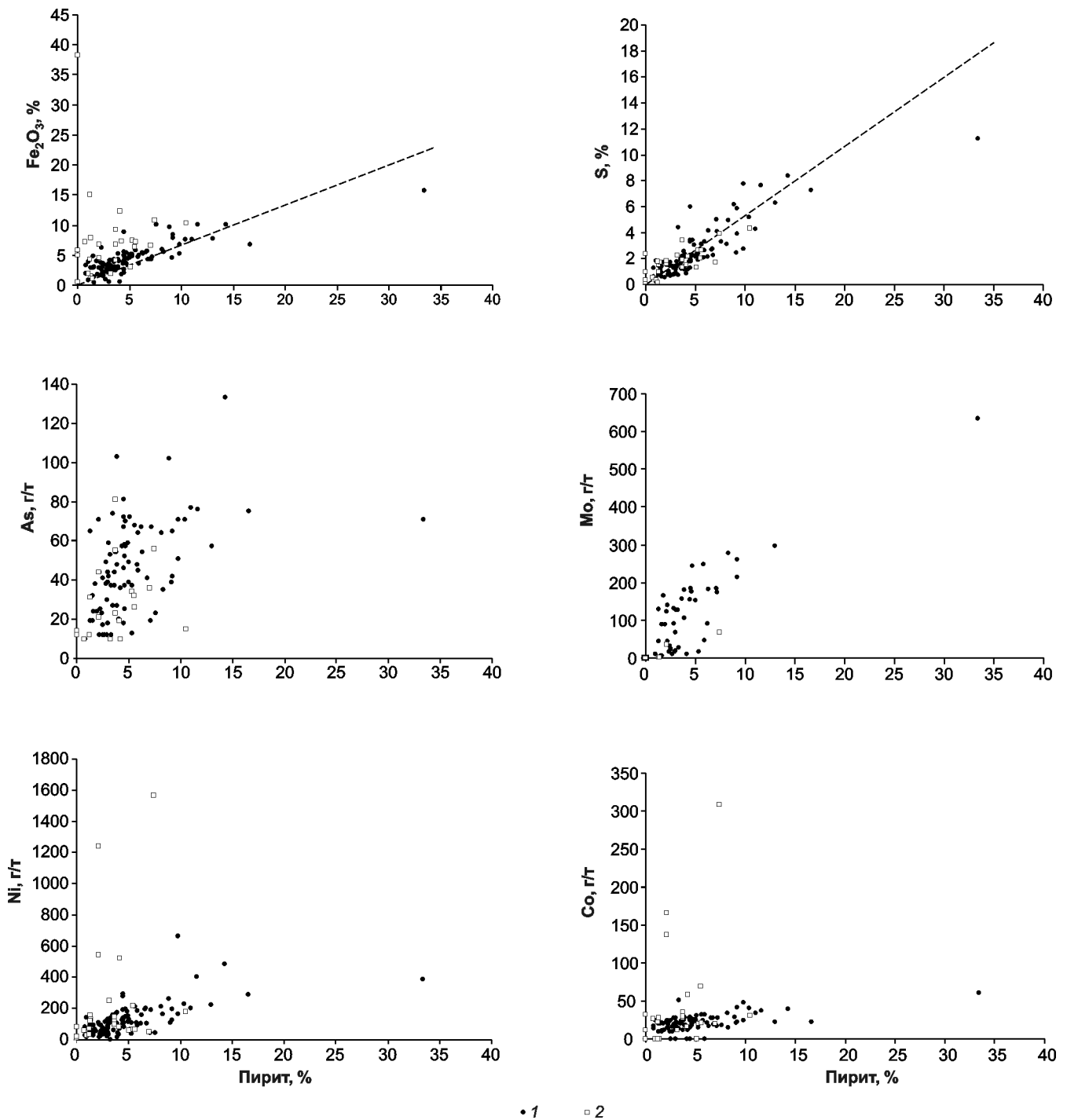


Рис. 4. Корреляция концентрации компонентов в породах баженовской и абалакской свит с содержанием пирита:
 1 — баженовская свита, 2 — абалакская свита

(рис. 3). Это позволяет пересчитать количественно-минеральный состав породы, используя данные рентгенофлуоресцентного анализа. Сопоставление концентрации MgO с содержанием карбонатных минералов позволяет увидеть два тренда накопления, связанных с доломитизацией (рис. 3). Количество MgO в породе дает возможность установить относительное количество доломита. Совместно с карбонатными минералами накапливается стронций (рис. 3), одна проба с аномальным содержанием стронция, вероятно, связана с горизонтом замора рыб.

Концентрация MnO обнаруживает слабую корреляцию с содержанием карбонатных минералов, при этом породы абалакской свиты существенно богаче этим компонентом по сравнению с породами баженовской свиты (рис. 3).

Сульфидные минералы. Пирит — типичный минерал пород баженовской и абалакской свит, его образование связано с процессами бактериальной сульфатредукции. Как правило, при этом происходит перераспределение серы и железа, а также концентрирование халькофильных элементов. Концентрация железа и серы в породах полностью

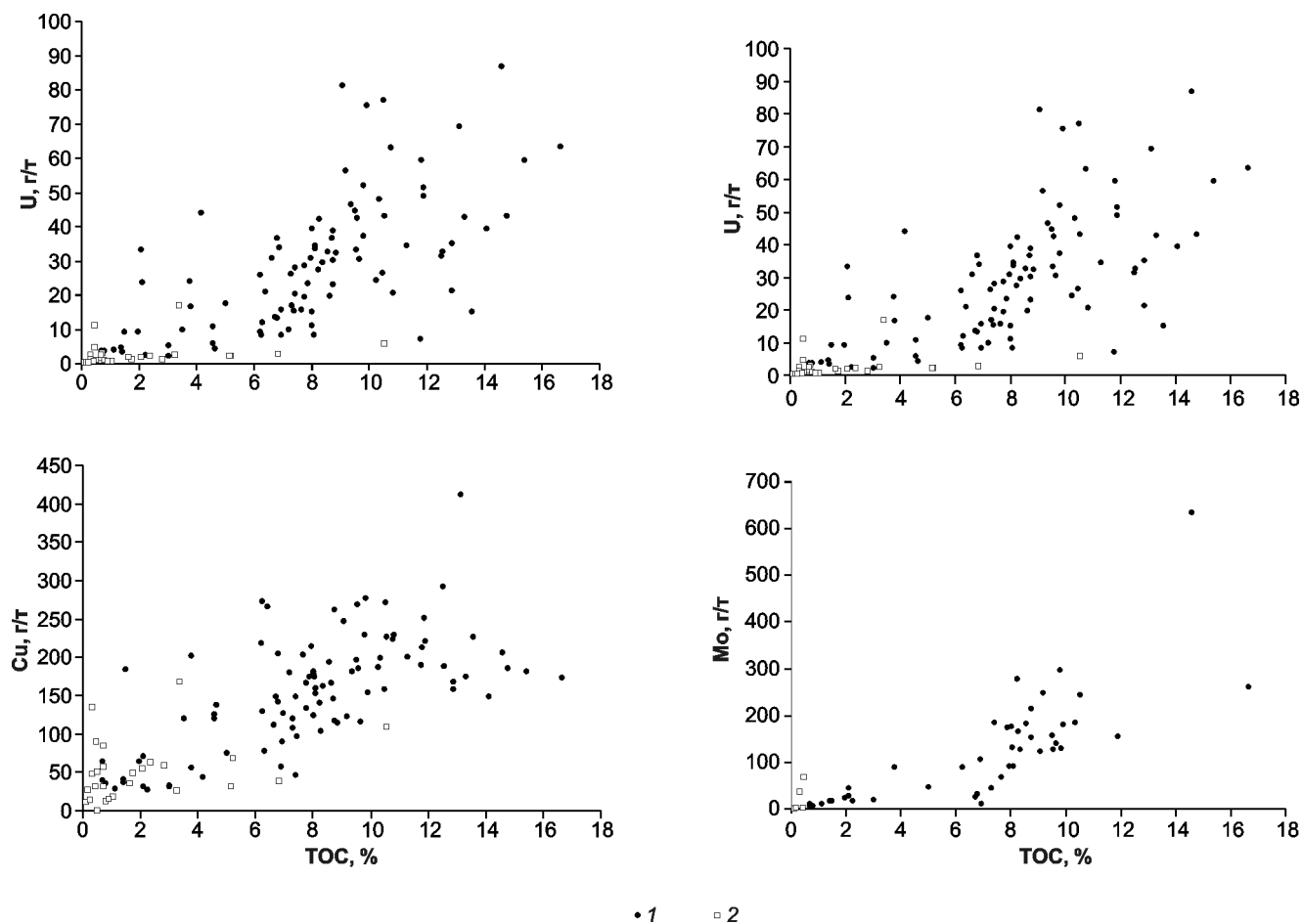


Рис. 5. Корреляция концентрации компонентов в породах Баженовской и Абалакской свит с содержанием органического вещества: 1 — баженовская свита, 2 — абалакская свита

контролируются пиритом для пород баженовской свиты (рис. 4). Для пород абалакской свиты в группе проб содержание железа значительно выше, чем рассчитанное по пириту, что объясняется присутствием сидерита и глауконита. Концентрация серы в породах баженовской свиты в целом отвечает содержанию пирита, что можно использовать для расчета количественно-минерального состава по данным рентгенофлуоресцентного анализа.

С увеличением содержания пирита в целом увеличивается концентрация мышьяка и молибдена (рис. 4). Для пород баженовской свиты (в отличие от абалакской) накопление никеля и кобальта также возрастает с увеличением содержания пирита. Для меди и цинка такая корреляция не наблюдается.

Органическое вещество. Оценить содержание ОВ можно по ТОС. Корреляции концентрации микроэлементов с содержанием ОВ имеют большую дисперсию, но позволяют различить геохимические особенности пород баженовской и абалакской свит.

Концентрация урана в породах баженовской свиты в целом возрастает при увеличении содержания ОВ (рис. 5). Особенно этот эффект заметен для ядерного материала из некоторых скважин — при нанесении всех данных дисперсия возрастает.

Это свидетельствует о изменении состава ОВ при диагенетических преобразованиях. При этом для пород абалакской свиты увеличение концентрации урана с повышением содержания ОВ заметно ниже; аналогично поведение ванадия (рис. 5). Для пород абалакской свиты заметная корреляция между концентрацией ванадия и содержанием ОВ не наблюдается. Таким образом, можно говорить о том, что существенное накопление урана и ванадия в ОВ баженовской свиты является ее типоморфным признаком и характеризует условия ее образования, в отличие от нижележащих пород. Соотношение урана и общего $C_{\text{орг}}$ можно использовать в качестве геохимического индикатора для оценки степени преобразования керогена.

Накопление меди в ОВ (рис. 5) происходило в породах баженовской и абалакской свит схожим образом. Большой разброс значений не позволяет выявить существенные различия. При увеличении содержания ОВ возрастает концентрация молибдена в породах баженовской свиты. Высокое содержание молибдена и низкое марганца в осадочных породах — признак сероводородного заражения, способствующего восстановлению молибдена из морской воды и сосаждению его с сульфидами железа. Процессы восстановления также способствуют накоплению урана и ванадия

на геохимическом барьере. Вопрос о первичном или наложенном обогащении ими ОВ нельзя однозначно решить только на основе корреляций.

Концентрация редкоземельных элементов в породах не имеет четкой корреляции с содержанием ОВ, по-видимому, их поведение определяется группой факторов, которые требуют специального рассмотрения.

Другие минералы в осадочных породах. Среди элементов, не обнаруживающих существенных корреляций с основными минералами, выделяются фосфор и барий. Фосфор может образовывать апатит, который может иметь как биогенное (захороненные части скелета), так и хемогенное происхождение (фосфоритные конкреции). Поскольку фосфор не обнаруживает значимой корреляции с минеральным составом породы, то очевидно, что накопление фосфорита не оказывает существенного влияния на концентрацию других элементов.

Барий не имеет явно выраженной корреляции ни с основными породообразующими компонен-

тами, ни с микроэлементами. Возможно, высокое содержание бария связано с загрязнением проб буровым раствором, где барит используется в качестве утяжелителя, что вызвано производственной необходимостью использовать такие растворы, поэтому до уточнения геохимия бария должна обсуждаться с осторожностью.

Заключение. Проведенные исследования показали наличие зависимостей между содержанием некоторых элементов с основными минералами баженовской и абалакской свит, что позволяет рассчитать минерально-компонентный состав пород по данным о количестве элементов и оксидов, определенных рентгеноспектральным флуоресцентным методом и с помощью ICP-MS. Эта информация необходима для оценки причин образования коллекторов и признаков нефтегазонасыщенности, что позволит повысить точность прогнозирования запасов в этих свитах.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект № 15-17-00010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бычков А.Ю., Калмыков Г.А., Бугаев И.А. и др. Экспериментальные исследования получения углеводородных флюидов из пород баженовской свиты при гидротермальном воздействии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 4. С. 34–39.

Бычкова Я.В., Сеницын М.Ю., Петренко Д.Б. и др. Методические особенности мультиэлементного анализа горных пород методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2016. № 6.

Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.

Козлова Е.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А. и др. Технология исследования геохимических параметров органического вещества керогеносыщенных отложений (на примере баженовской свиты, Западная Сибирь) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 44–53.

Коробова Н.И., Макарова О.М., Калмыков Г.А. и др. Основные типы разрезов нефтеносной баженовской свиты на северо-востоке Сургутского свода // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 54–61.

Ступакова А.В., Калмыков Г.А., Фадеева Н.П. и др. К оценке ресурсов и запасов сланцевой нефти // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 3. С. 3–10.

Хамидуллин Р.А., Калмыков Г.А., Корост Д.В. и др. Фильтрационно-емкостные свойства пород баженовской свиты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2013. № 5. С. 57–64.

Юрченко А.Ю., Балушкина Н.С., Калмыков Г.А. и др. Строение и генезис известняков на границе абалакской и баженовской свит в центральной части Западно-Сибирского бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 62–68.

Поступила в редакцию
04.04.2016