

УДК 552.574:550.4 (571.1)

## МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Рихванов Леонид Петрович,**

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии  
Института природных ресурсов ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский Томский политехнический университет»,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: rikhvanov@tpu.ru

**Усольцев Дмитрий Георгиевич,**

аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: usoltsev\_d@mail.ru

**Ильенок Сергей Сергеевич,**

ассистент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: ilenokss@tpu.ru

**Ежова Александра Викторовна,**

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных  
ископаемых Института природных ресурсов ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский Томский политехнический университет»,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: eav@tpu.ru

Актуальность работы определяется необходимостью исследований потенциально ураноносных черносланцевых образований Западной Сибири с целью расширения минерально-сырьевой базы России.

**Цель работы:** выявить геохимическую и минералогическую специализацию отложений баженовской свиты с использованием современных методов исследований, а также их потенциал в качестве источника урана.

**Методы исследования.** Химический состав определен методом инструментального нейтронно-активационного анализа; для уточнения состава минерализации использовался сканирующий электронный микроскоп HITACHI S-3400N; особенности пространственного распределения урановой минерализации установлены при помощи метода осколочной (f) радиографии.

**Результаты.** Отложения баженовской свиты в 3 и более раза обогащены U, Zn, Sr, Ba и в 1,5 раза – Co и Tb, а также обеднены Au, Sm, La, Cr, Rb относительно мировых черных сланцев. Корреляция между химическими элементами указывает на наличие двух чётких альтернативных геохимических ассоциаций: кластофильной (Na, Sc, Cr, Rb, Cs, La, Sm, Hf) – элементы, связанные с Th и Ta (обычные компоненты терригенной минеральной фракции), и органофильной (Zn, As, Sb, Ba, Au, U) – элементы, связанные с органическим веществом. Обращает на себя внимание низкое содержание Br в этой толще. Оценочное среднее содержание урана в породах составляет 41,2 г/т. Распределение урана в породах крайне неравномерное. Высокие концентрации элемента отчётливо приурочены к остаткам органического материала, представленного радиоляриями и ихтиофауной. Выявленные минеральные агрегаты урана представлены оксидами урана, которые находятся в форме микровключений в кальциево-фосфатно-кремнистой скрытокристаллической массе с высоким содержанием углерода. Ряд химических элементов, Fe, S, Zn, Ba, Sr, As, Sb, U, и редкоземельные элементы, имеющие повышенные концентрации, образуют собственные минеральные формы. Значительным развитием в породах пользуется сульфид железа, находящийся как минимум в трёх морфологических формах. Также широко распространены минеральные формы бария (барит?), стронция (стронцианит?). Цинк встречается как в форме сульфида цинка (сфалерит?), так и в виде интерметаллических соединений с Cu, Sb, As. Иногда встречаются минералы редкоземельных элементов, Sn, Pb. Не выявлены собственные минеральные формы Mo, Ni и V, не смотря на то, что их содержания в породах высокие.

### **Ключевые слова:**

Западная Сибирь, верхняя юра – нижний мел, баженовская свита, черные сланцы, ураноносность.

### **Введение**

Отложения баженовской свиты верхней юры (волжский ярус) – нижнего мела (берриасский ярус) рассматриваются в настоящее время как черносланцевая толща [1–7 и др.]. Черные сланцы –

это геологические образования, отличительной чертой которых является обогащенность органическим веществом. Эти породы повсеместно обладают повышенными концентрациями P, U, Mo, V, As, Zn, Cu, Ni, Au, Pd и некоторых других химиче-

ских элементов [8, 9]. Они являются отчетливыми стратонами, обозначающими некоторые рубежи в истории земли [10]. Многими исследователями они рассматриваются как наиболее вероятные нефтематеринские толщи [11, 12 и др.].

С черными сланцами связаны крупнейшие ресурсы и месторождения фосфора, урана, золота, полиметаллов, редких металлов и других химических элементов. Эти факторы предопределили внимание к баженовской свите широкого круга специалистов наук о Земле: литологов, геохимиков и других, включая геологов-рудников.

Несмотря на значительный объем ранее проведенных работ, выполненных по баженовской толще в основном в 60–80-е гг. XX в. [13–19 и др.], геохимические и минералогические особенности рассматриваемых отложений всё ещё являются недостаточно изученными с точки зрения минерального химического состава, условий и причин формирования повышенных концентраций ряда химических элементов и ряда других вопросов.

С разработкой средств и методов ядерно-физических исследований и современных методов электронной микроскопии появились новые возможности исследования геологических объектов.

Эти методы уже начинают использоваться и для изучения отложений баженовской свиты. Так, Ю.Н. Занин и др. [3] охарактеризовали полный спектр редкоземельных элементов, определённых современным аналитическим инструментальным нейтронно-активационным методом.

### Материалы и методы

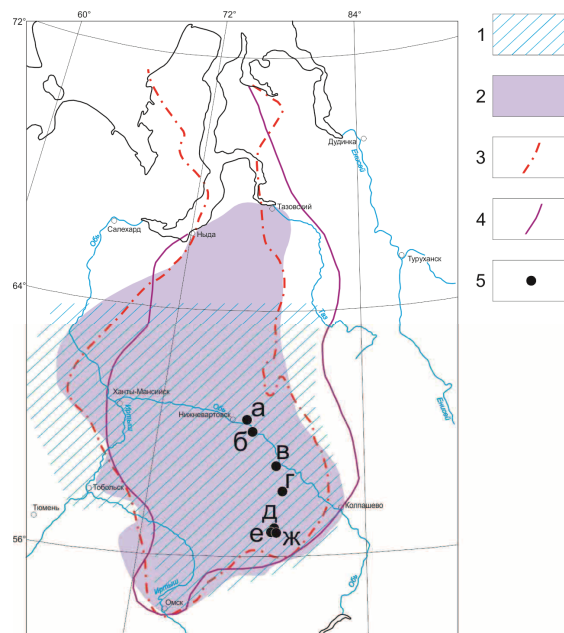
Исходным материалом послужили 18 образцов баженовской свиты Западной Сибири, отобранные из керна скважин, пробуренных на 8 площадях в Томской области (рис. 1), предоставленных А.В. Ежовой.

Химический состав отложений баженовской свиты определялся методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории кафедры ГЭГХ на базе исследовательского ядерного реактора ТПУ по аттестованным методикам (аналитики А.Ф. Судыко, Л.Ф. Богутская). ИНАА является неdestructивным и высокочувствительным видом анализа. Он эффективен для определения редких, редкоземельных и радиоактивных элементов с хорошими метрологическими параметрами.

Процедура статистической обработки включает оценку среднего арифметического на уровне значимости 0,05:  $\bar{X} \pm \Delta X = \bar{X} \pm SE \times t(p, f)$ , где  $\bar{X}$  – среднее арифметическое;  $\Delta X$  – доверительный интервал;  $SE$  – стандартная ошибка среднего;  $t$  – критерий Стьюдента;  $p$  – принятая доверительная вероятность;  $f$  – число степеней свободы.  $f = n - 1$ , где  $n$  – количество проб.

По образцам с максимальными содержаниями урана выполнялись исследования особенностей его распределения в породе методом осколочной (f) ра-

диографии. Метод осколочной (f) радиографии позволяет с высокой чувствительностью и точностью выявить пространственное распределение урана [23]. Метод основан на процессе деления ядер урана-235 под воздействием тепловых нейтронов в ядерном реакторе. Осколки деления ядер оставляют на детекторе дефектные области (треки), которые обнаруживаются под микроскопом после химического травления детектора. В качестве детектора использовалась слюда.



**Рис. 1.** Схематическая карта распространения отложений баженовской свиты, с указанием мест нахождения скважин, по которым проводилось детальное исследование: 1 – границы распространения пород с повышенной радиоактивностью по [5]; 2 – граница области битуминозных пород по [20]; 3 – граница распространения баженовской свиты по [21]; 4 – граница распространения отложений баженовской свиты по [22]; 5 – места отбора образцов (площади): а – Вахская; б – Фобосская; в – Трассовая; г – Ясная; д – Герасимовская; е – Широкая; ж – Северо-Калиновская

**Fig. 1.** Contour map of the Bazhenov formation deposit distribution. The map indicates well locations which were investigated in details: 1 are the boundaries of propagation of rocks with increased radioactivity according to [5]; 2 is the boundary of bituminous rocks area according to [20]; 3 is the boundary of the Bazhenov formation propagation according to [21]; 4 is the boundary of the Bazhenov formation deposits propagation according to [22]; 5 are the sampling points (areas): а – Vakhskaya; б – Foboskaya; в – Trassovaya; г – Yasnaya; д – Gerasimovskaya; е – Shirotnaya; ж – Severo-Kalinovaya

Для получения характеристики минерального состава породы проводилось классическое изучение прозрачных и полированных шлифов.

Для изучения минерального состава использовался сканирующий электронный микроскоп HITACHI S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой Bruker X Flash 4010. Элементная составляющая была получена при фиксировании тормозяще-

го рентгеновского излучения. При этом определялись элементы от Li до U включительно с нижним пределом обнаружения 0,1–0,2 весовых %. Для получения изображения обычно использовались вторичные электроны, дающие топографическое изображение поверхности образца. Использование обратно рассеянных (отраженных) электронов дает информацию о распределении элементов поверхности по среднему атомному номеру макрокомпонентов.

### Результаты и их обсуждение

Результаты исследования химического состава пород баженовской свиты по данным ИНАА представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Статистические оценки химического элементного состава отложений баженовской свиты

**Table 1.** Statistic estimates of chemical elemental composition of the Bazhenov formation deposits

| Элемент<br>Element | Среднее, г/т<br>Average, g/t | Диапазон<br>Range  |
|--------------------|------------------------------|--------------------|
| Na                 | 0,75 ± 0,13                  | 0,09–1,19          |
| Ca                 | 1,42 ± 0,03                  | 0,5–9,65           |
| Sc                 | 14,6 ± 1,7                   | 5,88–20,2          |
| Cr                 | 78,3 ± 11,4                  | 15–132,4           |
| Fe                 | 5,77 ± 3,59                  | 1,41–32,43         |
| Co                 | 27,6 ± 7,6                   | 7,76–73,2          |
| <b>Zn</b>          | <b>463 ± 168</b>             | <b>75,4–1177</b>   |
| <b>As</b>          | <b>41,8 ± 12,3</b>           | <b>0,25–86,9</b>   |
| Br                 | <0,9                         | <0,9               |
| Rb                 | 71 ± 13,1                    | 4,9–121,4          |
| <b>Sr</b>          | <b>589 ± 359</b>             | <b>40–3423</b>     |
| Ag                 | <0,7                         | <0,7               |
| <b>Sb</b>          | <b>3,62 ± 0,97</b>           | <b>1,2–8,13</b>    |
| Cs                 | 6,28 ± 1,14                  | 0,44–9,49          |
| <b>Ba</b>          | <b>1726 ± 1217</b>           | <b>650–10967</b>   |
| La                 | 17,08 ± 6,43                 | 0,05–39,5          |
| Ce                 | 49,4 ± 7,7                   | 13,3–84,2          |
| Nd                 | 24,2 ± 3,6                   | 7,6–40             |
| Sm                 | 3,12 ± 0,96                  | 0,08–5,7           |
| Eu                 | 1,52 ± 0,31                  | 0,35–3,47          |
| Tb                 | 0,99 ± 0,22                  | 0,26–2,25          |
| Yb                 | 3,46 ± 0,63                  | 1,49–7,31          |
| Lu                 | 0,47 ± 0,08                  | 0,21–0,93          |
| Hf                 | 3,09 ± 0,45                  | 0,16–4,48          |
| Ta                 | 0,54 ± 0,13                  | 0,04–0,97          |
| <b>Au</b>          | <b>0,006 ± 0,003</b>         | <b>0,001–0,018</b> |
| Th                 | 5,97 ± 1,08                  | 0,9–9,8            |
| <b>U</b>           | <b>41,2 ± 20,8</b>           | <b>2,37–171</b>    |

Примечание: Содержание Fe, Ca, Na даны в %, остальные – в г/т. Доверительные интервалы отвечают уровню значимости 0,05. Выделены элементы с повышенной концентрацией относительно состава пелагических глин по [24].

Note: Fe, Ca, Na contents are in %, the rest values are in g/t. Confidence intervals satisfy the significance level 0,05. The elements with increased concentration relative to pelagic clays according to [24] are highlighted in bold.

Сравнительный анализ представленных данных по изученным нами элементам с данными для чёрных сланцев, ранее приведенными М.П. Кетрис и Я.Э. Юдовичем [24], обращает внимание,

что отложения баженовской свиты в 3 раза обогащены U, Zn, Sr, Ba и в 1,5 раза – As, Co и Tb, а также обеднены Au, Sm, La, Cr, Rb (рис. 2).

Наиболее близким современным аналогом баженовских отложений по полученным данным являются сапропелевые илы Черного моря (рис. 3) [26, 27].

Как видно из рис. 3, отложения баженовской свиты значительно обогащены Zn (в 9 раз), а также Fe, As, Sr, Cs, Eu, Ta, U (в 1,5–2 раза). Средние содержания близки для Sc, Cr, Co, Rb, Sb, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Yb, Lu, Hf, Au, Th. По сравнению с осадками Черного моря породы баженовской свиты обеднены Na и Ca.

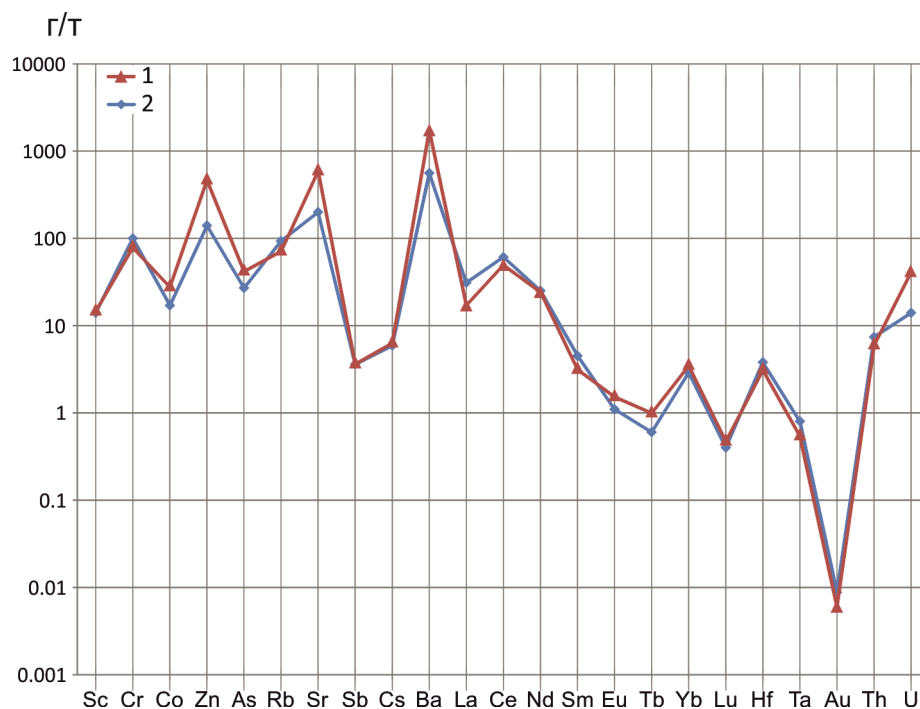
Обращает на себя внимание чрезвычайно низкая концентрация брома в изученных отложениях (<0,9 г/т), что представляется удивительным для нефтематеринских образований. Данный геохимический феномен требует специального рассмотрения.

Авторами была сделана попытка выделить геохимические ассоциации элементов с помощью корреляционного анализа. При этом мы отдавали себе отчёт в том, что количество проб для этого недостаточно. Тем не менее, в силу качественной аналитики, была получена достаточно чёткая картина с выделением групп элементов, образующих естественные геохимические ассоциации (рис. 4). Корреляция между химическими элементами указывает на наличие двух чётких альтернативных геохимических ассоциаций: кластофильной – элементы, связанные с Th и Ta (обычные компоненты терригенной минеральной фракции), и органофильной – элементы, связанные с органическим веществом. Некоторые элементы, которые размещены между двумя ассоциациями, вероятно, зависят от обеих из них, а также от других факторов. Органофилы не обязательно подразумевают химическую связь между металлом и органическим веществом, а скорее только сосуществование металлов и органического вещества в осадках. Можно еще обратить внимание на поведение Ca и Sr, которые обособленно расположились на графике. Видимо, они соответствуют карбонатфильной группе В.М. Гавшина (1996), который, на основании генерализованных статистических оценок химических элементов в илах Чёрного моря, выделил три группы ассоциаций химических элементов: кластофильную, тяготеющую к глинистому веществу; органофильную, сопутствующую сапропелевому материалу, и карбонатфильную, соответствующую карбонатной группе.

Как мы видим, существование всех трёх выделенных В.М. Гавшиным групп химических элементов намечается и в отложениях баженовской свиты.

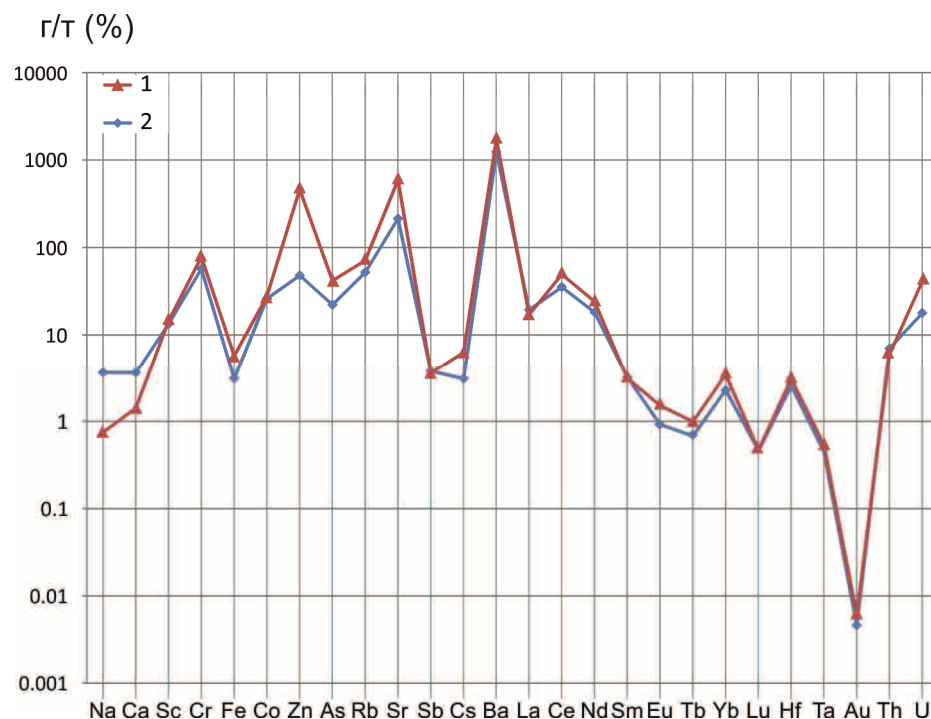
Полученные оценки содержаний 7 из 14 редкоземельных элементов близки к таковым, полученным ранее Ю.Н. Заниным и др. [3].

Отношение La/Th, рассматриваемое некоторыми исследователями как некоторая константа для



**Рис. 2.** Среднее содержание химических элементов в отложениях баженовской свиты (1) и в мировых черных сланцах (2) [25]

**Fig. 2.** Average content of chemical elements in deposits of the Bazhenov formation (1) and in black shale in the world (2) [25]



**Рис. 3.** Среднее содержание химических элементов в отложениях баженовской свиты (1) и в сапропелевых илах Черного моря (2) [26]

**Fig. 3.** Average content of chemical elements in deposits of the Bazhenov formation (1) and in sapropel of the Black Sea (2) [25]

морских осадочных отложений, принимаемая в среднем за 2,8 [24], в баженовских отложениях практически полностью соответствует таковому (La/Th=2,86), что еще раз подчеркивает проис-

хождение данных пород.

Битуминовые породы баженовской свиты в среднем содержат урана 41,2 г/т, при разбросе частных значений от 2,4 до 171 г/т, а тория – 6 г/т

в интервале значений 0,9–9,8 г/т, что согласуется с ранними оценками их содержания, выполненными И.И. Плуманом [5], В.М. Гавшиным [19], В.В. Хабаровым [6] и др.

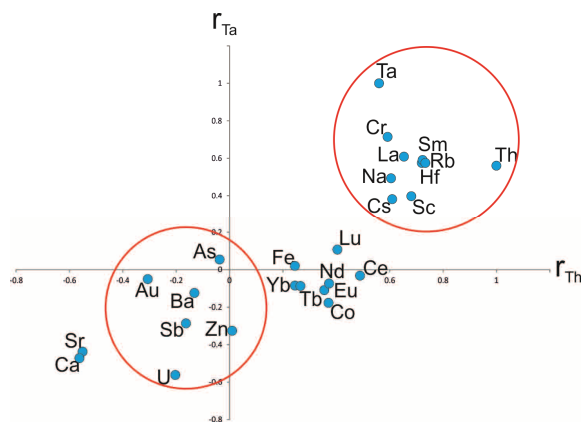


Рис. 4. Корреляция химических элементов с Ta и Th в изученных отложениях баженовской свиты

Fig. 4. Correlation of chemical elements with Ta and Th in the deposits of the Bazhenov formation

Выше среднего содержание урана установлено в основном на площадях: Северо-Калиновская, Герасимовская и Широкая, которые находятся в непосредственной близости друг к другу (рис. 1).

Практически во всех образцах радиоактивность имеет ярко выраженную урановую природу ( $Th/U < 1$ ), за исключением трех проб, в которых содержание урана соответствует среднему содержанию в осадочных породах.

Содержание Th остается практически постоянным, изменяясь в небольших пределах. Видимо, торий содержится только в терригенной массе, тогда как для накопления урана необходимым условием являлось наличие органического углерода. Следует отметить, что во всех без исключения породах, разной степени литификации и метаморфизма, в том числе в современных илах, обогащенных органическим веществом сапропелевого типа, наблюдается положительная значимая корреляционная связь урана и органического углерода [5, 6, 10, 15–19, 25 и др.]. Каких-либо других значимых корреляционных связей урана с другими элементами, в том числе с редкоземельными, за исключением некоторой прямой положительной связи с Yb, установлено не было. Существование некоторой корреляционной связи U и Yb косвенно подтверждает вывод Ю.Н. Занина и др. [3] о том, что органическое вещество концентрирует Yb и Lu более активно, чем другие редкоземельные элементы.

Исследование особенностей распределения урана в породах баженовской свиты методом осколочной (f) радиографии показало, что распределение урана в породах крайне неравномерное. Высокие концентрации урана отчетливо приурочены к остаткам органического вещества, представленного радиоляриями и ихтиофауной (рис. 5). На вероят-

ность концентрации урана на остатках органических образований в баженовской свите обращали внимание И.И. Плуман [5], Ю.В. Щепеткин и др. [28]. Иногда отмечается приуроченность урана к битуминозному веществу, наблюдаемому в виде тонких прожилков, иногда секущих слоистость, или отдельных изометричных образований.

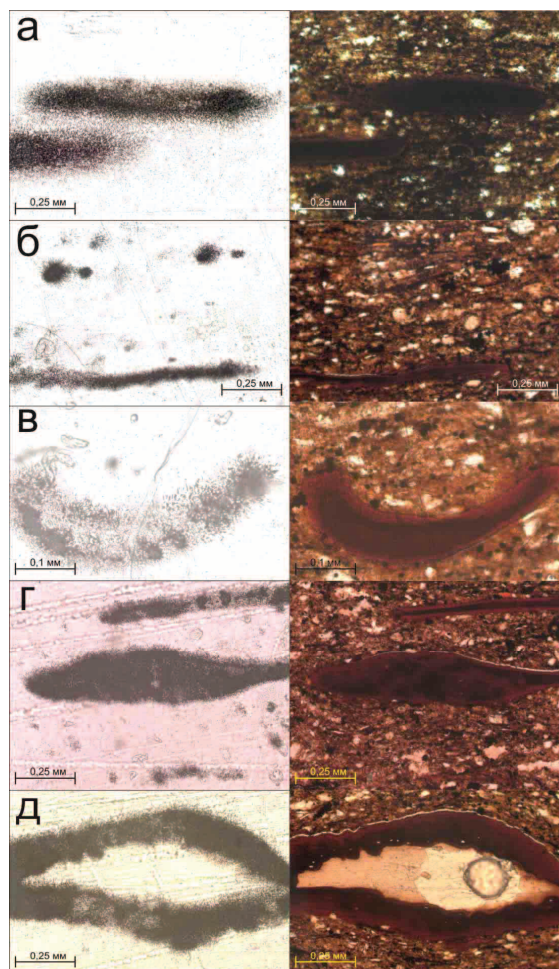
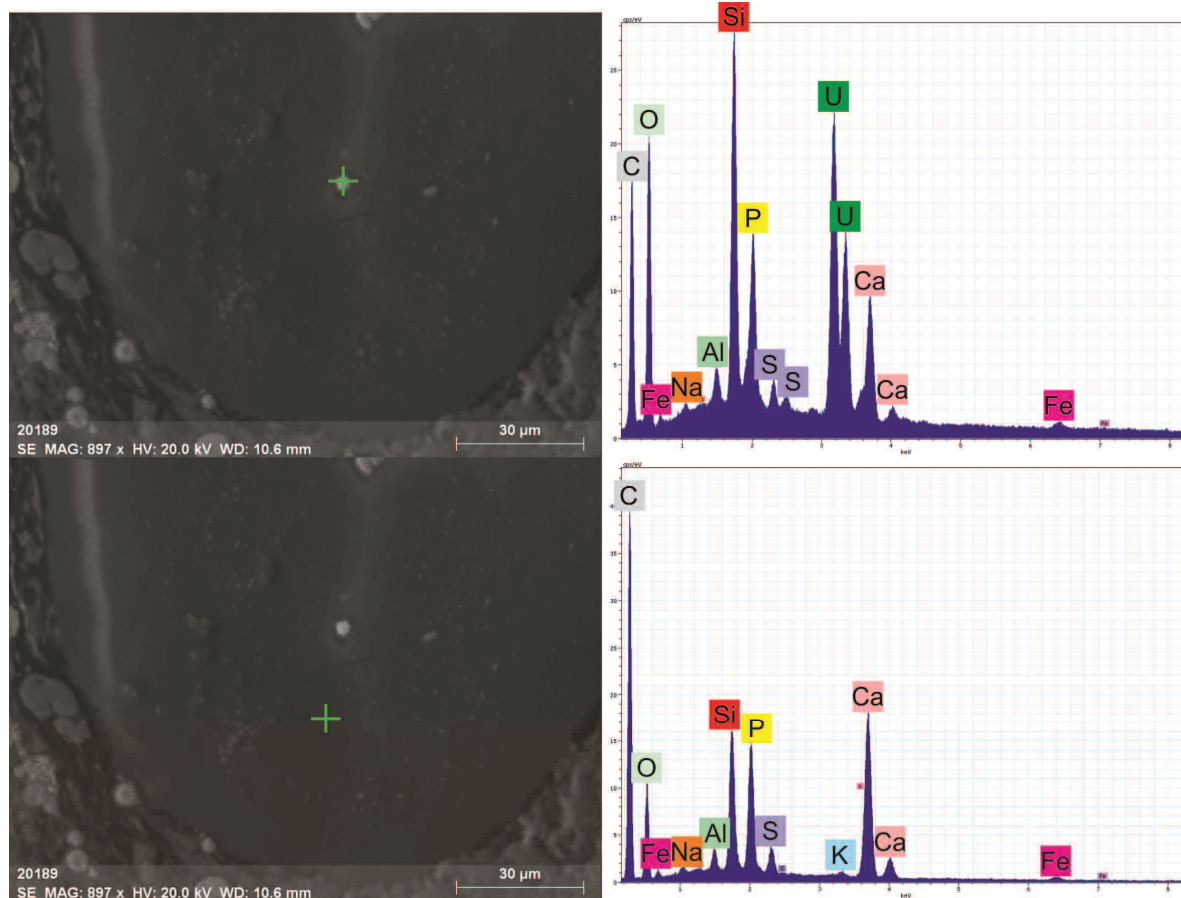


Рис. 5. Характерные особенности распределения урана в отложениях баженовской свиты по данным осколочной (f) радиографии. Снимки: слева осколочной радиографии, справа – участка породы, для которого сделана осколочная радиография. Николи параллельны

Fig. 5. Features of uranium distribution in the Bazhenov formation deposits by the data of fission radiography. Images of fission radiography are on the left; images of rock area are on the right. Fission radiography was made for this area. Nicols are parallel

Содержание урана в таких скоплениях составляет 0,0n–0, n %. Это предполагает нахождение на этих участках собственных минералов урана, что и было выявлено при исследовании на электронном микроскопе.

Минеральные агрегаты урана обнаруживаются в форме микровключений в кальциево-фосфатно-кремнистой массе с высоким содержанием углерода (рис. 6, табл. 2, 3).



**Рис. 6.** Минеральная фаза урана (светлое) в матрице скрытокристаллической кремнисто-фосфатно-кальцевой массы с чрезвычайно высокой концентрацией углерода (>56 %). Здесь и далее на рисунке слева – электронно-микроскопический снимок, на котором показано точка исследования; справа – энергодисперсионный спектр в данной точке

**Fig. 6.** Mineral phase of uranium (light) in the matrix of cryptocrystalline siliceous-phosphate-calcium mass with extremely high carbon concentration (>56 %). Hereinafter: electron micrograph which shows the investigation point is on the left; energy-dispersive spectrum in this point is on the right

**Таблица 2.** Химический состав минеральной фазы урана (весовые проценты) (обр. СК-31-535)

**Table 2.** Chemical composition of uranium mineral phase (wt. %) (sample CK-31-535)

| Элемент/Element        | Весовые проценты/Wt. % |
|------------------------|------------------------|
| Углерод*/Carbon*       | 12,8                   |
| <b>Кислород/Oxygen</b> | <b>23,9</b>            |
| Натрий*/Sodium*        | 0,3                    |
| Магний*/Magnesium*     | 0,1                    |
| Алюминий*/Aluminum*    | 0,8                    |
| Кремний*/Silicon*      | 7,7                    |
| Фосфор*/Phosphorus*    | 4,4                    |
| Сера*/Sulfur*          | 0,3                    |
| Кальций*/Calcium*      | 6,9                    |
| Железо*/Iron*          | 0,9                    |
| <b>Уран/Uranium</b>    | <b>41,9</b>            |
| Сумма/Total            | 100                    |

Примечание: здесь и далее жирным шрифтом выделены элементы, образующие собственные микроминеральные фазы. Звездочкой отмечены элементы матрицы.

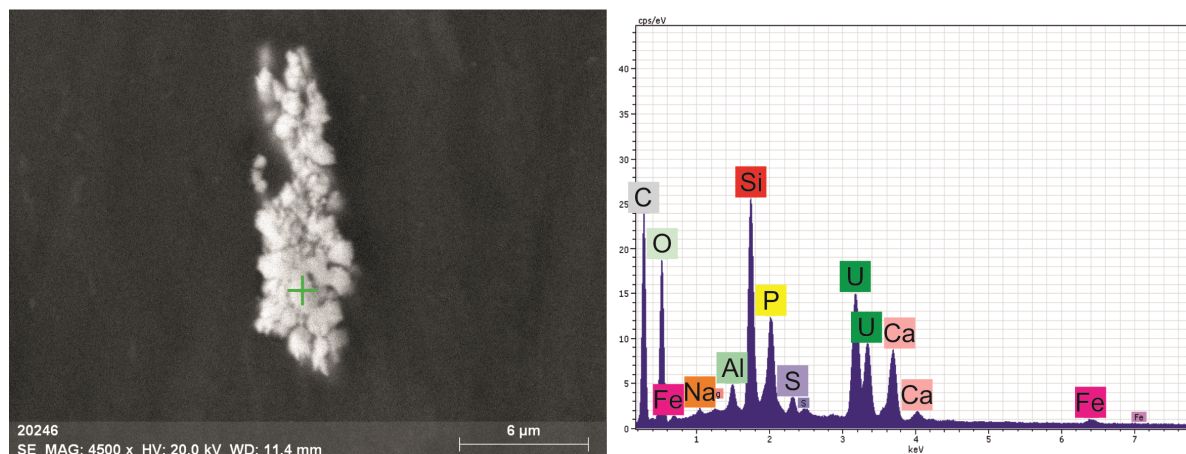
Note: hereinafter the elements forming their own micro-mineral phases are highlighted in bold. Elements of the matrix are marked with an asterisk.

**Таблица 3.** Химический состав матрицы (весовые проценты) (обр. СК-31-535)

**Table 3.** Chemical composition of the matrix (wt. %) (sample CK-31-535)

| Элемент/Element   | Весовые проценты/Wt. % |
|-------------------|------------------------|
| Углерод/Carbon    | 56,9                   |
| Кислород/Oxygen   | 23,2                   |
| Натрий/Sodium     | 0,4                    |
| Магний/Magnesium  | 0,1                    |
| Алюминий/Aluminum | 0,6                    |
| Кремний/Silicon   | 3,4                    |
| Фосфор/Phosphorus | 4                      |
| Сера/Sulfur       | 0,8                    |
| Калий/Potassium   | 0,2                    |
| Кальций/Calcium   | 9,9                    |
| Железо/Iron       | 0,5                    |
| Сумма/Total       | 100                    |

Иногда отмечаются оксиды урана в виде гроздевидных скоплений (рис. 7, табл. 4) и отдельных почковидных выделений в высокоуглеродистой кремниво-фосфатно-кальцевой скрытокристаллической массе, образующих чётко выдержанные слои мощностью 50–60 мкм.



**Рис. 7.** Гроздевидный агрегат минеральной фазы урана (светлое) в кремнисто-фосфатно-кальциевой скрытокристаллической массе с чрезвычайно высокой концентрацией углерода (обр. СК-31–535)

**Fig. 7.** Botryoidal Aggregate of uranium mineral phase (light area) in siliceous-phosphate-calcium cryptocrystalline mass with extremely high carbon concentration (sample CK-31–535)

**Таблица 4.** Химический состав минеральной фазы урана (весовые проценты) (обр. СК-31–535)

**Table 4.** Chemical composition of uranium mineral phase (wt. %) (sample CK-31–535)

| Элемент/Element        | Весовые проценты/Wt. % |
|------------------------|------------------------|
| Углерод*/Carbon*       | 24,3                   |
| <b>Кислород/Oxygen</b> | <b>25,1</b>            |
| Натрий*/Sodium*        | 0,8                    |
| Магний*/Magnesium*     | 0,4                    |
| Алюминий*/Aluminum*    | 1,4                    |
| Кремний*/Silicon*      | 7,7                    |
| Фосфор*/Phosphorus*    | 4,7                    |
| Сера*/Sulfur*          | 0,7                    |
| Кальций*/Calcium*      | 6,4                    |
| Железо*/Iron*          | 0,8                    |
| <b>Уран/Uranium</b>    | <b>27,7</b>            |
| Сумма/Total            | 100                    |

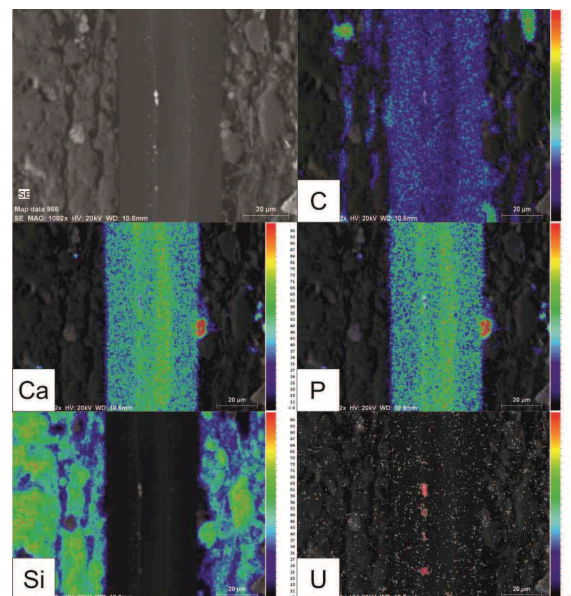
Минеральный состав отложений баженовской свиты сравнительно хорошо исследован при её литологических описаниях [1, 2].

Так, отмечается, что породы свиты при анализе их в керне, в шлифах и по химическому составу отчетливо подразделяются на четыре группы: низкоглинистые высококремнистые, высокоглинистые низкокремнистые, карбонаты, а также глинисто-алевритопесчаные породы аномальных разрезов [1, 2].

В составе «баженовитов» на долю глинистых минералов приходится в среднем около 22 % всей терригенной составляющей, кварца около 42 %, карбонатов – 2–6 %, пирита – 7–8 %, апатита – 0,8 %. Планктоногенная компонента (по  $C_{org}$ ) составляет 11–12 % [1]. По данным И.И. Плумана [5], на тяжёлую фракцию минералов приходится от 0,5 до 25 % от общей массы породы. Из них 80–90 % приходится на аутигенный пирит. В следовых количествах отмечались акцессорные минералы типа рутила, лейкоксена, анатаза, турмалина, эпидота и циркона.

При исследовании на электронном микроскопе акцессорных минералов, формирующих тяжёлую фракцию, нами подтверждено присутствие пирита, оксидов

Ti с его средним содержанием в минералах около 34 %, обломочного циркона с хорошо сохранившимися формами кристаллов и не содержащего каких-либо примесей, в том числе Hf, в количествах более 0,1 %. Кроме того, из минералов-концентраторов редкоземельных элементов в породах обнаружен монацит ( $CePO_4$ ) с примесью La и Th до 11,2 и 2,2 %, соответственно.



**Рис. 8.** Характер распределения C, Ca, P, Si, U по данным изучения на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, с энергодисперсионной приставкой Bruker в высокоуглеродистой кремниевом-фосфатно-кальциевой скрытокристаллической массе с тонкими микровкраплениями минерала урана, образующего чечевицеобразный микропрожилок. Образец СК-31–535, Северо-Калиновья площадь

**Fig. 8.** Way of C, Ca, P, Si, U distribution by the investigation data on scanning electron microscope Hitachi S-3400N with energy-dispersive adaptor Bruker with high-carbon siliceous-phosphate-calcium cryptocrystalline mass with thin contaminations of uranium mineral forming finch-shaped micro-vein. Sample CK-31–535, Severo-Kalinovaya area

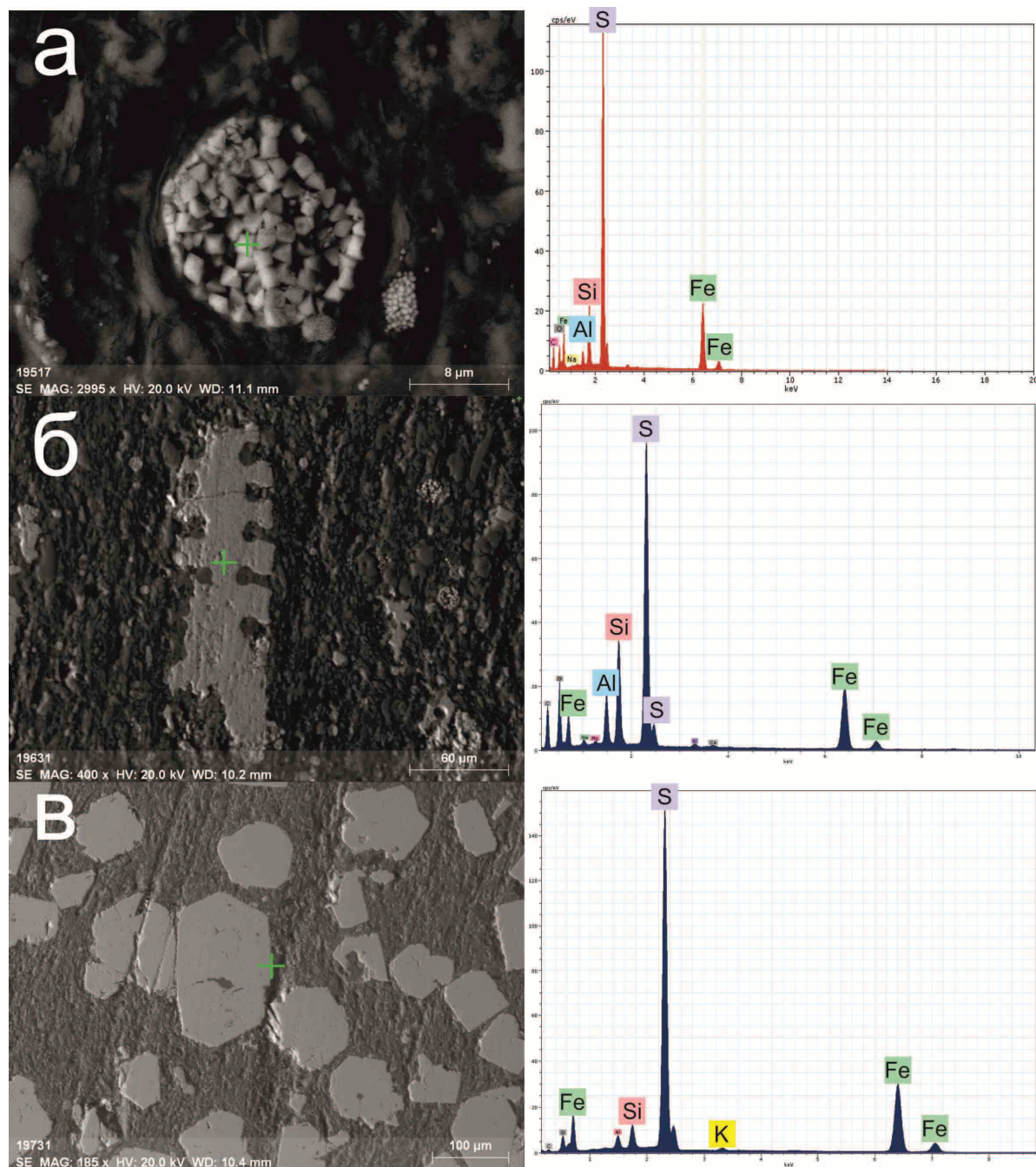


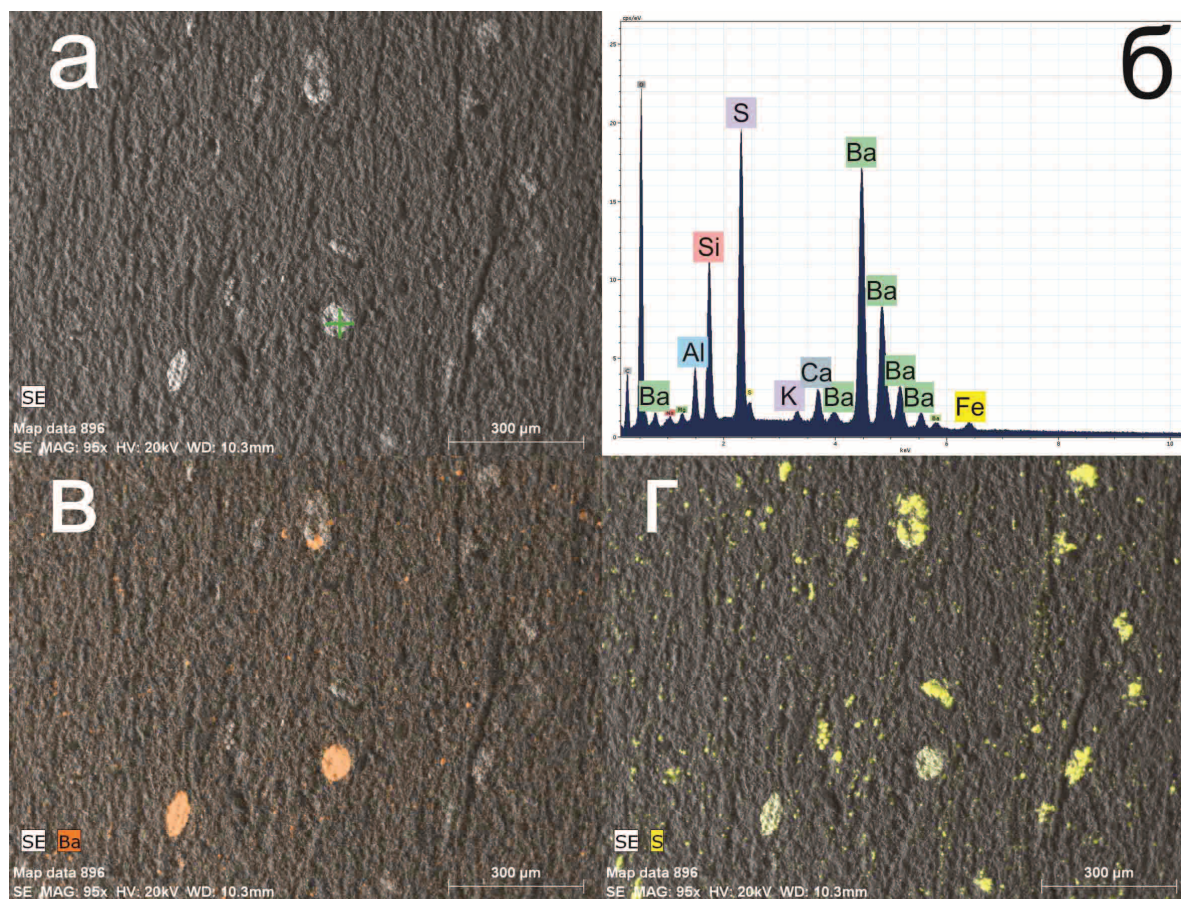
Рис. 9. Основные формы минеральных агрегатов сульфида железа (пирит-мельниковит) и их энергодисперсионный спектр

Fig. 9. Principle forms of mineral aggregates of sulfur sulfides (pyrite-melnicovite) and their energy-dispersive spectrum

Повсеместно обнаруживается минеральные фазы железа. Содержание железа по данным ИНАА в исследованных образцах находится в пределах от 1,4 до 32,4 % (сульфидные линзы) при среднем содержании в 5,8 %. Железо наблюдается в ассоциации с серой, скорее всего образуя собой сульфид железа, предположительно пирит-мельниковита (структура вещества не выяснялась). Минерал образует различные агрегаты: микроскопические шарики и стяжения, так называемый глобулярный пи-

рит, сформировавшийся как продукт жизнедеятельности бактерий (рис. 9, а); минеральные агрегаты, по всей вероятности, заместившие скелетные организмы (рис. 9, б), а также наблюдается в виде эвгедральных образований с ярко выраженной формой, соответствующей пириту (рис. 9, в, табл. 5).

В минеральном составе баженовских пород было выявлено обилие минеральных образований Ва с серой (рис. 10, табл. 6), что позволяет с высокой долей вероятности утверждать, что это барит.



**Рис. 10.** Серосодержащая минеральная фаза бария: а) общий вид под электронным микроскопом; б) ее энерго-дисперсионный спектр в точке; в) характер распределения Ba в породе; г) характер распределения S в породе (обр. 413–2922.09)

**Fig. 10.** Sulfur-containing barium mineral phase: a) general view in electron microscope; б) its energy-dispersive spectrum in the point; в) way of Ba distribution in the rock; г) way of S distribution in the rock (sample 413–2922.09)

**Таблица 5.** Химический состав минеральной фазы эвгедральных кристаллов пирита (весовые проценты) (обр. BE-5976–28)

**Table 5.** Chemical composition of mineral phase of euhedral pyrite crystals (wt. %) (sample BE-5976–28)

| Элемент/Element     | Весовые проценты/Wt. % |
|---------------------|------------------------|
| Углерод*/Carbon*    | 5,3                    |
| Кислород*/Oxygen*   | 9,1                    |
| Алюминий*/Aluminum* | 1,8                    |
| Кремний*/Silicon*   | 2,5                    |
| <b>Серa/Sulfur</b>  | <b>43,9</b>            |
| Калий*/Potassium*   | 0,4                    |
| <b>Железо/Iron</b>  | <b>37</b>              |
| Сумма/Total         | 100                    |

Этому достаточно широко распространённому минералу в породах сопутствуют микроминеральные фазы Sr (рис. 11, табл. 7), присутствующие в соединении с кислородом и кальцием (вероятно стронцианит).

Минеральные фазы цинка в породах свиты встречаются постоянно, и они представлены разными по составу образованиями. Наиболее широко и постоянно наблюдаемой разновидностью является цинк-серосодержащая фаза, соответствующая сфалериту (рис. 12, табл. 8).

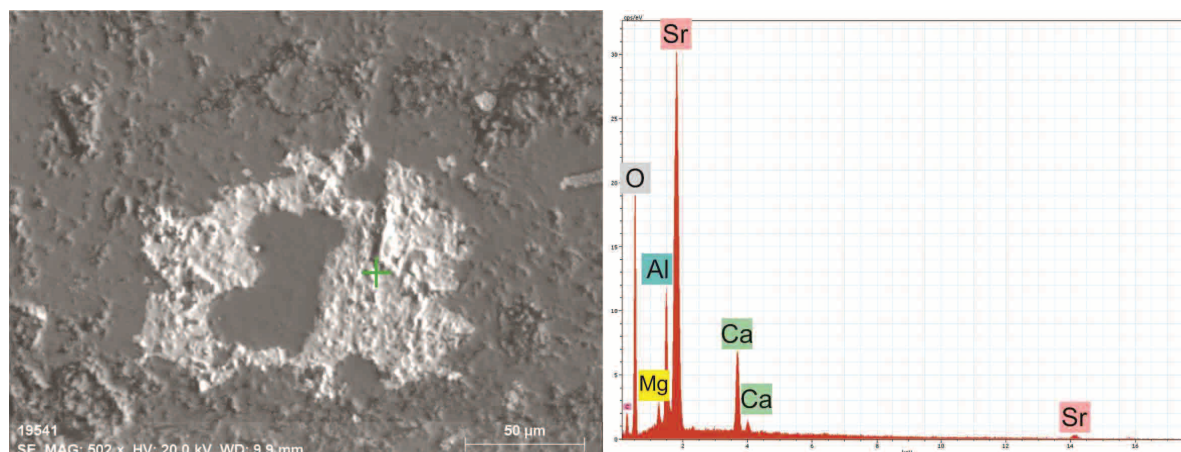
**Таблица 6.** Химический состав минеральной фазы бария (весовые проценты) (обр. 413–2922.09)

**Table 6.** Chemical composition of barium mineral phase (wt. %) (sample 413–2922.09)

| Элемент/Element     | Весовые проценты/Wt. % |
|---------------------|------------------------|
| Углерод*/Carbon*    | 8,1                    |
| Кислород*/Oxygen*   | 25,5                   |
| Натрий*/Sodium*     | 0,4                    |
| Магний*/Magnesium*  | 0,4                    |
| Алюминий*/Aluminum* | 2,1                    |
| Кремний*/Silicon*   | 5                      |
| <b>Серa/Sulfur</b>  | <b>9,9</b>             |
| Калий*/Potassium*   | 0,4                    |
| Кальций*/Calcium    | 1,8                    |
| Железо*/Iron        | 0,9                    |
| <b>Барий/Barium</b> | <b>45,5</b>            |
| Сумма/Total         | 100                    |

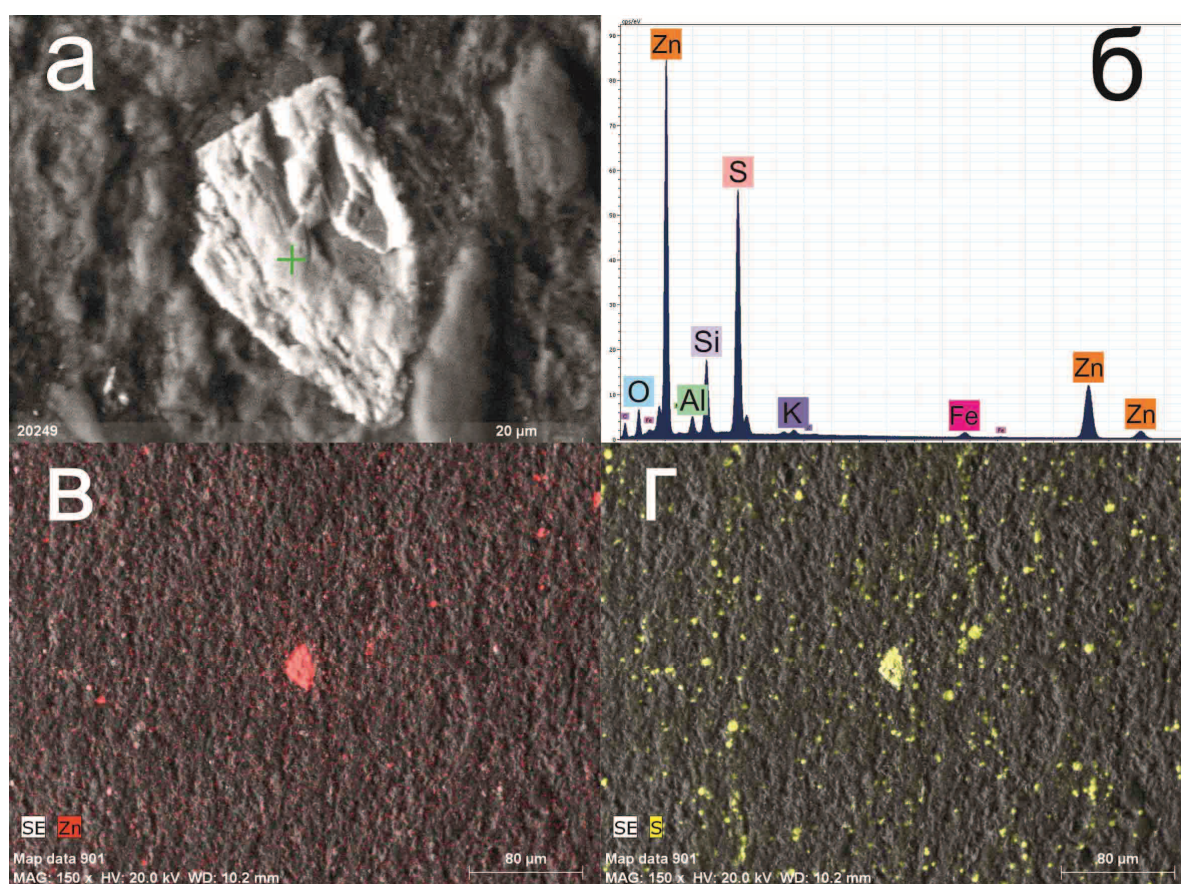
Кроме того, Zn встречается в сложных соединениях с Cu, Sb, As, S или с Cu и S.

Кроме часто встречающихся минеральных образований, представленных выше, в породах баженовской свиты, также эпизодически обнаруживаются минеральные формы таких элементов, как: олово, свинец, медь, сурьма, мышьяк.



**Рис. 11.** Стронциевая минеральная фаза (светлое), имеющая ярко выраженный эпигенетический характер развития. Образец Ф-18

**Fig. 11.** Strontium mineral phase (light area) which has strongly pronounced epigenetic developmental character. Sample Ф-18



**Рис. 12.** Минеральная фаза цинка в терригенной массе образца Т-318–13: а) общий вид под электронным микроскопом; б) энерго-дисперсионный спектр в точке; в) характер распределения Zn в породе; г) характер распределения S в породе

**Fig. 12.** Zinc mineral phase in terrigenic mass of the sample T-318–13: а) general view in electron microscope; б) energy-dispersive spectrum in the point; в) way of Zn distribution in the rock; г) way of S distribution in the rock

Таким образом, высокие содержания ряда элементов, выявленные в результате нейтронно-активационного анализа, находят свое подтверждение при исследовании образцов пород под электронным микроскопом. Во многих случаях Fe, S,

Zn, Ba, Sr, As, Sb, U и редкоземельные элементы находятся в собственных минеральных формах.

В процессе исследования под электронным микроскопом образцов баженовской толщи не удалось обнаружить минеральных фаз Mo, Ni и V, хо-

тя их повышенные содержания в отложениях баженовской свиты отмечаются многими исследователями [29, 30]. По-видимому, эти элементы образуют органо-минеральные формы и их содержания в этих комплексах ниже предела выявления используемым методом (0,1 %).

**Таблица 7.** Химический состав минеральной фазы стронция (весовые проценты) (обр. Ф-18)

**Table 7.** Chemical composition of strontium mineral phase (wt. %) (sample Ф-18)

| Элемент/Element           | Весовые проценты/Wt. % |
|---------------------------|------------------------|
| Углерод*/Carbon*          | 8,6                    |
| Кислород*/Oxygen*         | 46                     |
| Магний*/Magnesium*        | 0,9                    |
| Алюминий*/Aluminum*       | 4,5                    |
| <b>Кальций/Calcium</b>    | <b>5,7</b>             |
| <b>Стронций/Strontium</b> | <b>34,3</b>            |
| Сумма/Total               | 100                    |

**Таблица 8.** Химический состав минеральной фазы цинка (весовые проценты) (обр. Т-318–13)

**Table 8.** Chemical composition of zinc mineral phase (wt. %) (sample Т-318–13)

| Элемент/Element     | Весовые проценты/Wt. % |
|---------------------|------------------------|
| Углерод*/Carbon*    | 15                     |
| Кислород*/Oxygen*   | 9,5                    |
| Магний*/Magnesium*  | 0,3                    |
| Алюминий*/Aluminum* | 1,9                    |
| Кремний*/Silicon*   | 5,8                    |
| <b>Сера/Sulfur</b>  | <b>22,7</b>            |
| Калий*/Potassium*   | 0,5                    |
| Железо/Iron         | 1,6                    |
| <b>Цинк/Zinc</b>    | <b>42,7</b>            |
| Сумма/Total         | 100                    |

### Заключение

С использованием современных ядерно-физических методов анализа вещества и электронной микроскопии выполнены исследования пород баженовской свиты Западной Сибири с целью выявления новых геохимических и минералогических особенностей баженовских отложений. Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- отложения баженовской свиты по своей геохимической специализации относятся к формации металлонесных черных сланцев. Ближайшим наиболее полным современным аналогом отложений баженовской свиты являются сапропелевые илы Черного моря;
- породы баженовской свиты по сравнению со средними данными для черных сланцев мира в 3 раза обогащены U, Zn, Sr, Ba и в 1,5 раза – As, Co и Tb;

- ряд элементов, U, Zn, Sr, Ba, As и другие, образуют геохимическую ассоциацию, тяготеющую к органическому веществу;
- содержания урана в породах колеблется от 2 до 171 г/т, при среднем его содержании в 40,9 г/т, что близко к ранее полученным оценкам. Исходя из современных геологических параметров распространения этих пород (мощность, площадь, объёмный вес пород) и генерализованных средних параметров содержания U, можно ориентировочно оценивать ресурсы этого металла на уровне 3 млрд т;
- уран в породах распределён крайне неравномерно. Главная его масса приурочена к планктонным органическим остаткам. Высокие концентрации урана приурочены к высокоуглеродистой кремниво-фосфатно-кальциевой скрытокристаллической массе, образующей нодулы и микропрослойки. В её пределах фиксируется собственная минеральная фаза урана, представленная, по всей вероятности, оксидом урана;
- высокие содержания ряда элементов, выявленные в результате нейтронно-активационного анализа, находят свое подтверждение при исследовании образцов пород под электронным микроскопом. Во многих случаях они (Fe, S, Zn, Ba, Sr, As, Sb, U и редкоземельные элементы) образуют собственные минеральные формы. Значительным распространением в породах пользуется сульфид железа (пирит-мельниковит?), находящийся как минимум в трёх морфологических формах. Также широко распространены минеральные формы бария (барит?), стронция (стронцианит?) и цинка (сфалерит?) и др.
- первоочередным направлением дальнейших исследований рассматриваемых отложений следует считать минералого-геохимическое изучение отложений по системно отобраным образцам по площади и мощности развития баженовской свиты, с разделением их по типам пород, что позволит выявить латеральную и вертикальную закономерности изменения вещественных параметров данного уникального резервуара органического материала с комплексом сопутствующих элементов (U, V, Mo, РЗЭ, платиноиды и др.), что в конечном итоге позволит определиться с возможной моделью накопления урана и других элементов в этом геологическом образовании.

Авторы выражают благодарность д-ру геол.-минерал. наук, профессору Н.П. Запивалову за любезное предоставление информации по баженовской свите, д-ру геол.-минерал. наук, профессору И.В. Гончарову за высказанные ценные замечания и пожелания при просмотре рукописи статьи, д-ру геол.-минерал. наук, профессору Ю.Н. Занину за помощь в ознакомлении со статьями по данной проблеме, а также А.Ф. Судыко и Л.В. Богутской за высококачественное выполнение анализов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г. Некоторые аспекты формирования баженовской свиты в центральных районах Западно-Сибирского осадочного бассейна // *Литосфера*. – 2005. – № 4. – С. 118–135.
2. Zanin Yu.N., Eder V.G., Zamirailova A.G. Composition and formation environments of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous black shale Bazhenov Formation (the central part of the West Siberian Basin) // *Marine and Petroleum Geology*. – 2008. – V. 25. – P. 289–306.
3. Редкоземельные элементы в баженовской свите Западно-Сибирского осадочного бассейна / Ю.Н. Занин, А.Г. Замирайлова, В.Г. Эдер, В.О. Красавчиков // *Литосфера*. – 2011. – № 6. – С. 38–54.
4. Models of the REE distribution in the black shale Bazhenov Formation of the West Siberian marine basin, Russia / Yu.N. Zanin, V.G. Eder, A.G. Zamirailova, V.O. Krasavchikov // *Chemie der Erde – Geochemistry*. – 2010. – V. 70. – № 4. – P. 363–376.
5. Плуман И.И. Ураноносность черных битуминозных аргиллитов верхней юры Западно-Сибирской плиты // *Геохимия*. – 1971. – № 11. – С. 1362–1368.
6. Уран, калий и торий в битуминозных породах баженовской свиты Западной Сибири / В.В. Хабаров, О.М. Нелепченко, Е.Н. Волков, О.В. Барташевич // *Сов. геология*. – 1980. – № 10. – С. 94–105.
7. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. *Геохимия черных сланцев*. – Л.: Наука, 1988. – 272 с.
8. Коробейников А.Ф. Особенности распределения золота в породах черносланцевой формации // *Геохимия*. – 1995. – № 12. – С. 1747–1757.
9. Schultz R.B., Coveney R.M. (Jr.), Time-dependent changes for Midcontinent Pennsylvania black shales, U.S.A // *Chemical Geology*. – 1992. – V. 99. – P. 83–100.
10. Неручев С.Г. Уран и жизнь в истории Земли. – Л.: Недра, 1982. – 208 с.
11. Черников К.А., Запывалов Н.П. К вопросу о выделении нефтематеринских пород в разрезе мезо-кайнозоя Западно-Сибирской низменности // *Вестник Западно-Сибирского и Новосибирского геологических управлений*. – 1958. – Вып. 2. – С. 12–24.
12. Вассоевич Н.Б. Исходное вещество для нефти и газа // *Происхождение нефти и газа и формирование их месторождений*. – М.: Недра, 1972. – С. 39–70.
13. Запывалов Н.П. Геохимическая характеристика нефтепроявлений в мезозое юго-восточной части Западно-Сибирской низменности // *Вестник Западно-Сибирского и Новосибирского геологических управлений*. – 1961. – Вып. 3. – С. 36–44.
14. Запывалов Н.П. Органическое вещество и битумы в юрских и валанжинских породах Назинской площади // *Тр. СНИИГ-ГИМС*. – 1961. – Вып. 14. – С. 59–73.
15. Плуман Н.И., Запывалов Н.П. Условия образования битуминозных аргиллитов волжского яруса Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* – 1977. – № 9. – С. 1138–1143.
16. Гавшин В.М., Бобров В.А. Закономерности распределения микроэлементов в баженовской свите // *Доманикиты Сибири и их роль в нефтегазоносности*. – Новосибирск: СНИИГТМС. – 1982. – С. 76–91.
17. Гавшин В.М., Гурари Ф.Г. *Геохимия сланцевосных формаций Сибири* // *Геология угленосных и горючесланцевых формаций Сибири*. – Новосибирск: СНИИГТМС, 1987. – С. 50–56.
18. Геохимия морских терригенных отложений Западно-Сибирской плиты / В.М. Гавшин, В.А. Бобров, Р.Г. Демина, Л.М. Дорогиницкая, В.С. Пархоменко, Л.Н. Смертина // *Геохимия платформенных и геосинклинальных осадочных пород*. – М.: Наука. – 1983. – С. 48–56.
19. Gavshin V.M., Zakharov V.A. Geochemistry of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous Bazhenov Formation, West Siberia // *Econ. Geol.* – 1996. – V. 91. – P. 122–133.
20. Баженовский горизонт Западной Сибири (Стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность) / Ю.В. Брадучан, Ф.Г. Гольберт, Ф.Г. Гурари и др. – Новосибирск: Наука, 1986. – 217 с.
21. Филина С.И., Корж М.В., Зонн М.С. Палеогеография и нефтеносность баженовской свиты Западной Сибири. – М.: Наука, 1984. – 35 с.
22. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2002. – 253 с.
23. Флеров Г.Н., Берзина И.Г. Радиография минералов, горных пород и руд. – М.: Атомиздат, 1979. – 224 с.
24. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. *Континентальная кора, ее состав и эволюция*. – М.: Мир, 1988. – 379 с.
25. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimates of Clarkes of Carbonaceous biolithes: World averages for trace elements in black shales and coals // *Intern. J. Coal. Geol.* – 2009. – V. 78. – № 2. – P. 135–148.
26. Геохимия литогенеза в условиях сероводородного заражения / В.М. Гавшин, А.С. Лапухов, С.В. Сараев и др. – Новосибирск: Наука, 1988. – 129 с.
27. Батурич Г.Н. Геохимия сапропелей Черного моря // *Геохимия*. – 2011. – № 5. – С. 531–535.
28. Щепеткин Ю.В., Рыльков А.В. Формы нахождения и распределения урана в мезозойских толщах Западной Сибири // *Тр. Зап.-Сиб. н.-и. геол.-развед. нефт. ин-т*. – 1984. – № 195. – С. 118–120.
29. Гончаров И.В. Геохимия нефтей Западной Сибири. – М.: Недра, 1987. – 181 с.
30. Твердые битумы баженовской свиты Западно-Сибирской плиты и главные особенности их геохимии / А.Э. Конторович, Ю.Н. Занин, В.Н. Меленевский, А.Г. Замирайлова, А.Н. Фомин, Д.Ю. Давыдов // *Геохимия*. – 1999. – № 8. – С. 888–896.

Поступила 05.11.2014 г.

UDC 552.574:550.4 (571.1)

## MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF THE BAZHENOV FORMATION, WEST SIBERIA, ACCORDING TO NUCLEAR-PHYSICS AND ELECTRON-MICROSCOPIC METHODS OF RESEARCH

**Leonid P. Rikhvanov,**

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: rikhvanov@tpu.ru

**Dmitry G. Usoltsev,**

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050,  
Russia. E-mail: usoltsev\_d@mail.ru

**Sergey S. Ilenok,**

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050,  
Russia. E-mail: ilenokss@tpu.ru

**Alexandra V. Ezhova,**

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: eav@tpu.ru

*The research relevance consists in determining the demand in investigation of potential uranium-bearing black shales in West Siberia, which, in its turn, would expand the existing Russian mineral resources.*

**The main aim of the study** is to identify geochemical and mineralogical specialization of the Bazhenov formation, using modern research methods, and potential of the Bazhenov formation as a source of uranium.

**The methods used in the study.** Chemical composition was determined by instrumental neutron activation analysis; to clarify the composition of mineralization a scanning electron microscope HITACHI S-3400N was used; the spatial distribution of uranium mineralization was identified by the fragmentation (f) radiography method.

**The results.** The Bazhenov Formation contains U, Zn, Sr, Ba in 3 times more and As, Co, Tb in 1,5 times more than average black shales, these rocks contain less Au, Sm, La, Cr, Rb as well. The correlations between chemical elements shows two alternative geochemical associations: «clastophile» (Na, Sc, Cr, Rb, Cs, La, Sm, Hf) – elements related to Th and Ta (the usual components of terrigenous mineral fraction), and «organophile» (Zn, As, Sb, Ba, Au, U) – elements related to the organic matter. Br content in these rocks is very low. Gross content of U in bituminous rocks of the Bazhenov Formation is 41,2 ppm. Uranium distribution in the rocks is extremely unequal. High concentrations of uranium are clearly linked to the remnants of organic matter, represented by radiolarians and ichthyofauna. Mineral aggregates of U, represented by uranium oxides, are detected in the form of microinclusions in Ca-P-Si cryptocrystalline weight with high carbon content. A number of chemical elements Fe, S, Zn, Ba, Sr, As, Sb, U, and rare earth elements with higher concentrations, form their own mineral forms. Iron sulfide is extended greatly in the rocks. It has, at least, three morphological forms. Mineral forms of barium (barite?) and strontium (strontianite?) are widespread as well. Zinc is found in the form of zinc sulfide (sphalerite?) and in the form of intermetallic compounds with Cu, Sb, As. Sometimes there are minerals of rare earth elements, Sn and Pb. Own mineral forms of Mo, Ni and V are not identified, despite the fact that their content is high in the rocks.

### Key words:

Western Siberia, Upper Jurassic – Lower Cretaceous, the Bazhenov Formation, black shales, uranium-bearing.

*The authors give thanks to N.P. Zapivaylov, Dr. Sc., professor, for information on the Bazhenov formation, to I.V. Goncharov, Dr. Sc., professor, for precious corrections and requests to the authors of the paper, to Yu.N. Zanin, Dr. Sc., professor, for help in getting acquainted with the articles on this topic, as well as to A.F. Sudyko and L.V. Bogutskaya for high-quality analyses.*

### REFERENCES

1. Zanin Yu.N., Zamiraylova A.G., Eder V.G. Nekotorye aspekty formirovaniya bazhenovskoy svity v tsentralnykh rayonakh Zapadno-Sibirskogo osadochnogo basseyna [Some aspects of generation of the Bazhenov Formation in the central regions of the West Siberian sedimentary basin]. *Lithosphere*, 2005, no. 4, pp. 118–135.
2. Zanin Yu.N., Eder V.G., Zamirailova A.G. Composition and formation environments of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous black shale Bazhenov Formation (the central part of the West Siberian Basin). *Marine and Petroleum Geology*, 2008, vol. 25, pp. 289–306.
3. Zanin Yu.N., Zamiraylova A.G., Eder V.G., Krasavchikov V.O. Redkozemelnye elementy v bazhenovskoy svite Zapadno-Sibirskogo osadochnogo basseyna [Rare earth elements in the Bazhenov Formation of the West Siberian sedimentary basin]. *Lithosphere*, 2011, no. 6, pp. 38–54.
4. Zanin Yu.N., Eder V.G., Zamirailova A.G., Krasavchikov V.O. Models of the REE distribution in the black shale Bazhenov Formation of the West Siberian marine basin, Russia. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 2010, vol. 70, no. 4, pp. 363–376.
5. Pluman I.I. Uranonosnost chernykh bituminoznykh argillitov verkhney yury Zapadno-Sibirskoy plity [Uranium-bearing of black bituminous mudstone of the Upper Jurassic of the West Siberian Plate]. *Geochemistry International*, 1971, no. 11, pp. 1362–1368.
6. Khabarov V.V., Nelepchenko O.M., Volkov E.N., Bartashevich O.V. Uran, kaliy i toriy v bituminoznykh porodakh bazhenovskoy svity Zapadnoy Sibiri [Uranium, potassium and thorium in the bituminous rocks of Bazhenov Formation of West Siberia]. *Sovetskaya geologiya*, 1980, no. 10, pp. 94–105.
7. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geokhimiya chernykh slantsev* [Geochemistry of black shales]. Leningrad, Nauka Press, 1988. 272 p.

8. Korobeynikov A.F. Osobennosti raspredeleniya zolota v porodakh chernoslantsevoy formatsii [Features of gold distribution in rocks of black shale formation]. *Geochemistry International*, 1995, no. 12, pp. 1747–1757.
9. Schultz R.B., Coveney R.M. (Jr.) Time-dependent changes for Midcontinent Pennsylvania black shales, U.S.A. *Chemical Geology*, 1992, vol. 99, pp. 83–100.
10. Neruchev S.G. *Uran i zhizn v istorii Zemli* [Uranium and life in Earth's history]. Leningrad, Nauka Press, 1982. 208 p.
11. Chernikov K.A., Zapivalov N.P. K voprosu o vydelenii neftematernitskikh porod v razreze mezo-kaynozoya Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [On the issue of selecting source rocks in a section of the Meso-Cenozoic deposits of West Siberian Lowland]. *Vestnik Zapadno-Sibirskogo i Novosibirskogo geologicheskikh upravleniy*, 1958, vol. 2, pp. 12–24.
12. Vassoevich N.B. Ishodnoye veshchestvo dlya nefti i gaza [The starting material for oil and gas]. *Proiskhozhdeniye nefti i gaza i formirovaniye ikh mestorozhdeniy* [The origin of oil and gas and the formation of deposits]. Moscow, Nedra Press, 1972. pp. 39–70.
13. Zapivalov N.P. Geokhimicheskaya kharakteristika nefteproyavleniy v mezozoysskikh otlozheniyakh yugo-vostochnoy chasti Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [Geochemical characteristics of oil shows in the Mesozoic deposits of the south-eastern part of the West Siberian Lowland]. *Vestnik Zapadno-Sibirskogo i Novosibirskogo geologicheskikh upravleniy*, 1961, vol. 3, pp. 36–44.
14. Zapivalov N.P. Organicheskoye veshchestvo i bitumy v yurskikh i valanzhinskikh porodakh Nazinskoy ploshchadi [Organic matter and bitumen in the Jurassic and Valanginian rocks of Nazinskaya area]. *Trudy Sibirskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta geologii, geofiziki i mineralnogo syr'ya*, 1961, vol. 14, pp. 59–73.
15. Pluman N.I., Zapivalov N.P. Usloviya obrazovaniya bituminoznykh argillitov volzhskogo yarusy Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provintsii [Conditions of formation of bituminous shales of Volgian of West Siberian oil and gas province]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1977, no. 9, pp. 1138–1143.
16. Gavshin V.M., Bobrov V.A. Zakonomernosti raspredeleniya mikroelementov v bazhenovskoy svite [Patterns of distribution of trace elements in the Bazhenov Formation]. *Domanikity Sibiri i ikh rol v neftegazonosnosti* [Domanics of Siberia and their role in the oil and gas potential]. Novosibirsk, Sibirskiy nauchno-issledovatel'skiy institut geologii, geofiziki i mineralnogo syr'ya, 1982. pp. 76–91.
17. Gavshin V.M., Gurari F.G. Geokhimiya slantsenosnykh formatsiy Sibiri [Geochemistry of shale formations in Siberia]. *Geologiya uglestoyannykh i goryuchestantsevykh formatsiy Sibiri* [Geology of coal and oil shale formations of Siberia]. Novosibirsk, Sibirskiy nauchno-issledovatel'skiy institut geologii, geofiziki i mineralnogo syr'ya, 1987. pp. 50–56.
18. Gavshin V.M., Bobrov V.A., Demin R.G., Doroginitskaya L.M., Parkhomenko B.C., Smertina L.N. Geokhimiya morskikh terri-gennykh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy plity [Geochemistry of marine clastic sediments of the West Siberian Plate]. *Geokhimiya platformennykh i geosinklinalnykh osadochnykh porod* [Geochemistry of platform and geosynclinal sedimentary rocks]. Moscow, Nauka Press, 1983. pp. 48–56.
19. Gavshin V.M., Zakharov V.A. Geochemistry of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous Bazhenov Formation, West Siberia. *Econ. Geol.*, 1996, vol. 91, pp. 122–133.
20. Braduchan Yu.V., Golbert F.G., Gurari F.G. *Bazhenovskiy gorizont Zapadnoy Sibiri (Stratigrafiya, paleogeografiya, ekosistema, neftenosnost)* [Bazhenov horizon of West Siberia (stratigraphy, paleogeography, ecosystem, oil)]. Novosibirsk, Nauka Press, 1986. 217 p.
21. Filina S.I., Korzh M.V., Zonn M.S. *Paleogeografiya i neftenosnost bazhenovskoy svity Zapadnoy Sibiri* [Paleogeography and oil-bearing of Bazhenov Formation of West Siberia]. Moscow, Nauka Press, 1984. 35 p.
22. Kontorovich V.A. Tektonika i neftegazonosnost mezozoyssko-kaynozoysskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri [Tectonics and petroleum potential of the Mesozoic and Cenozoic deposits in southeastern West Siberia]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Press, Branch «Geo», 2002. 253 p.
23. Flerov G.N., Berzina I.G. *Radiografiya mineralov, gornykh porod i rud* [Radiography of minerals, rocks and ores]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 224 p.
24. Taylor S.R., McLennan S.M. *Kontinentalnaya kora, ee sostav i evolyutsiya* [Continental crust, its composition and evolution]. Moscow, Mir Publ., 1988. 379 p.
25. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimates of Clarkes of Carbonaceous biolithes: World averages for trace elements in black shales and coals. *Intern. J. Coal. Geol.*, 2009, vol. 78, no. 2, pp. 135–148.
26. Gavshin V.M., Lapukhov A.S., Saraev S.V. *Geokhimiya litogeneza v usloviyakh serovodorodnogo zarazheniya* [Geochemistry of lithogenesis under hydrogen sulphide contamination]. Novosibirsk, Nauka Press, 1988. 129 p.
27. Baturin G.N. Geokhimiya sapropely Chernogo morya [Geochemistry of the Black Sea sapropel]. *Geochemistry International*, 2011, no. 5, pp. 531–535.
28. Shchepetkin Yu.V., Rylkov A.V. Formy nakhozheniya i raspredeleniya urana v mezozoysskikh tolshchakh Zapadnoy Sibiri [Forms of occurrence and distribution of uranium in the Mesozoic strata of Western Siberia]. *Trudy Zapadno-Sibirskogo nauchno-issledovatel'skogo geologorazvedochnogo neftyanogo institute*, 1984, no. 195, pp. 118–120.
29. Goncharov I.V. *Geokhimiya neftey Zapadnoy Sibiri* [Geochemistry of oil in West Siberia]. Moscow, Nedra Press, 1987. 181 p.
30. Kontorovich A.E., Zanin Yu.N., Melenevskii V.N., Zamiraylova A.G., Fomin A.N., Davydov D.Y. Tverdye bitumy bazhenovskoy svity Zapadno-Sibirskoy plity i glavnye osobennosti ikh geokhimi [Solid bitumen of Bazhenov Formation of West Siberian plate and the main features of their geochemistry]. *Geochemistry International*, 1999, no. 8, pp. 888–896.

Received: 5 November 2014.