

УДК 552.14:551.82

К.Ю. Васильева<sup>1</sup>, Е.А. Бакай<sup>2</sup>, Е.Б. Ершова<sup>3</sup>, Р.Р. Хуснитдинов<sup>4</sup>,  
А.К. Худoley<sup>5</sup>, Е.В. Козлова<sup>6</sup>, С.А. Соловьева<sup>7</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРУЖЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ОСАДОЧНОГО БАСЕЙНА БАЙКИТСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ

Предпринята попытка оценить уровень погружения и эрозии рифейских отложений на участке Байкинской антеклизы по данным пиролиза RockEval 6. На основе степени катагенетической преобразованности органического вещества представлена модель, согласно которой максимального уровня катагенеза органического вещества достигло еще до начала вендского осадконакопления. Полученные данные показывают, что градация катагенеза для аргиллитов рифейской мадринской толщи Байкинской антеклизы определяется как МК<sub>3</sub>–МК<sub>4</sub>. Приведенные расчеты свидетельствуют, что для достижения такой степени катагенетической преобразованности органического вещества исследованные породы должны были погрузиться на глубину около 7 км или более, поэтому мощность эродированной части рифейской последовательности Байкинской антеклизы в исследованных скважинах можно оценить в 5–7 км.

*Ключевые слова:* рифейские отложения, Байкинская антеклиза, RockEval, термическая история бассейна.

Riphean rocks of Baikite antecline are examined using pyrolysis RockEval 6 to evaluate subsidence history and level of erosion. Investigated Riphean rocks show МК<sub>3</sub>–МК<sub>4</sub> catagenesis rate. Based on catagenesis of organic matter we propose a model of maximum burial before the beginning of Vendian stratum sedimentation. Supplied calculations of subsidence and erosion shown that estimated catagenesis rate could be reached at 7 km depth; erosion level was about 5 to 7 km.

*Key words:* Riphean sediments, Baikite antecline, RockEval, thermal history of sedimentary basin.

**Введение.** Исследования истории погружений и воздыманий — важная задача при изучении бассейнов осадконакопления [Allen, Allen, 2013]. Погружения и воздымания контролируют начало и протекание фаз катагенеза, нефтеобразования, формирования и разрушения залежей углеводородов. Особенно сложна эта задача при подобных исследованиях в древних осадочных толщах, подвергшихся неоднократным постседиментационным преобразованиям. Авторы предприняли попытку воссоздать термическую историю участка Байкинской антеклизы (юго-запад Сибирской платформы) — Курумбинской группы месторождений (рис. 1).

На исследуемой территории архей-нижнепротерозойский фундамент перекрывают породы рифея и венда-палеозоя [Стратиграфия..., 2005;

Харахинов, Шленкин, 2011]. Рифейский комплекс преимущественно карбонатного состава мощностью около 4 км образует нижний структурный этаж, породы которого разбиты многочисленными трещинами и разломами и смяты в складки [Хабаров, Вараксина, 2011]. Складчатость и эрозия происходили после осадконакопления рифейских пород, и на дневную поверхность были выведены породы разных стратиграфических уровней рифея [Конторович и др., 1996]. Верхний структурный этаж (венд-палеозойский мощностью около 2,5–2,6 км) залегает на рифейских породах с угловым несогласием. Основные запасы углеводородов, разрабатываемых в пределах Курумбинского месторождения, сосредоточены в пределах трещинно-кавернового резервуара в верхней части рифейского разреза. Флюидоупоры известны в

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, инженер; *e-mail:* k.vasilyeva@spbu.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* bakay@geol.msu.ru

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра региональной геологии, доцент, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* v.ershova@spbu.ru

<sup>4</sup> ООО «Газпромнефть НТЦ», главный специалист; *e-mail:* Khusnitdinov.RR@gazpromneft-ntc.ru

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра региональной геологии, профессор, доктор геол.-минерал. н.; *e-mail:* a.khudoley@spbu.ru

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии полезных ископаемых, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* miliyakozlova@mail.ru

<sup>7</sup> ООО «Газпромнефть НТЦ», отдел сейсмогеологического моделирования, специалист; *e-mail:* Soloveva.SA@gazpromneft-ntc.ru

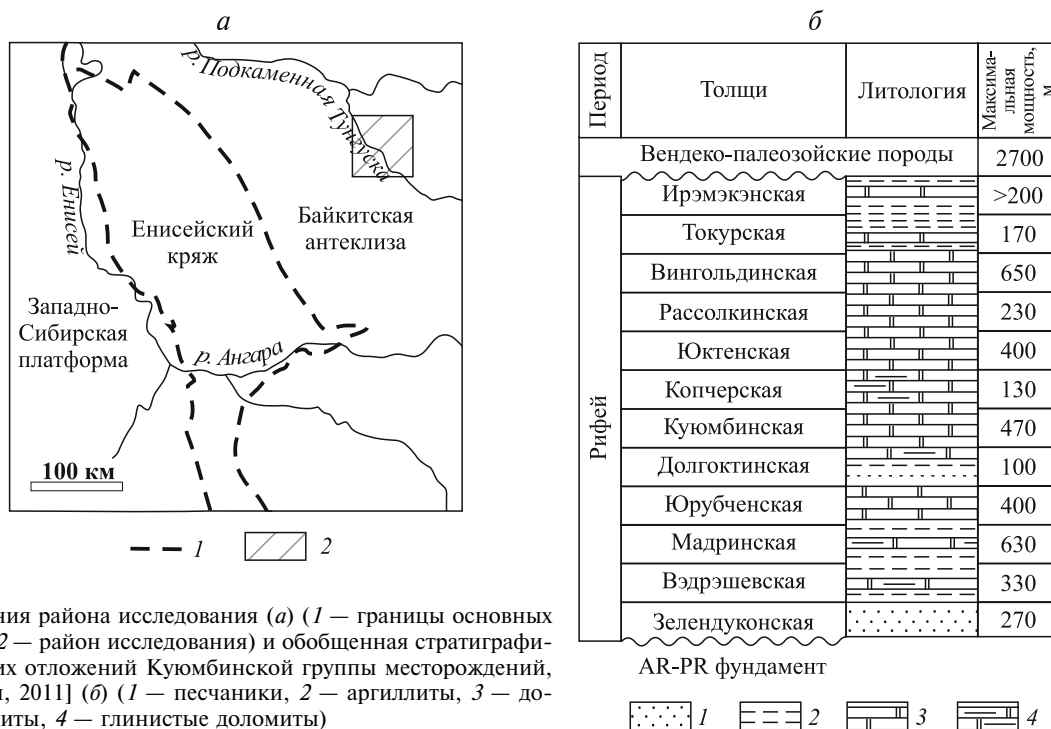


Рис. 1. Схема расположения района исследования (а) (1 — границы основных тектонических структур, 2 — район исследования) и обобщенная стратиграфическая колонка рифейских отложений Куюмбинской группы месторождений, по [Харахинов, Шленкин, 2011] (б) (1 — песчаники, 2 — аргиллиты, 3 — доломиты, 4 — глинистые доломиты)

отложениях венда-кембрия, тогда как отложения вэдрэшевской, мадринской и ирэмэкэнской толщ рассматриваются в качестве нефтематеринских [Филипцов и др., 1999; Frolov et al., 2015].

Рифейский разрез Куюмбинского месторождения представлен в основном карбонатными и глинистыми породами, в которых стадии катагенеза

установить традиционными петрографическими методами сложно [Япаскурт, 2008]. Существует несколько подходов к оценке глубины погружения осадочных комплексов, а следовательно, и степени их катагенетической преобразованности [Allen, Allen, 2013; Аммосов и др., 1980; Юдович, Кетрис, 2011]. Для богатых органическим веще-

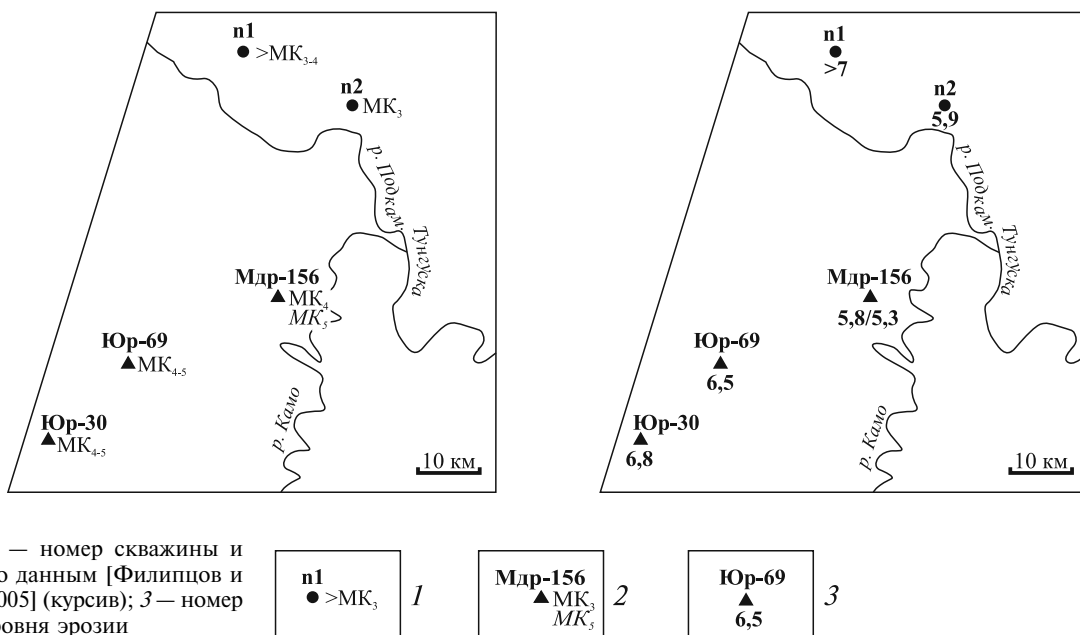
Результаты исследований пород из двух скважин методом RockEval

Таблица 1

| Номер образца | Глубина отбора, м | Толща* | Литологический состав      | S1, мг НС/г | S2, мг НС/г | S3, мг НС/г | ТОС, масс. % | T <sub>max</sub> , °С | Н1, мг НС/г ТОС | О1, мг CO <sub>2</sub> /г ТОС | Градации катагенеза ОВ    |
|---------------|-------------------|--------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-----------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|
| n1            | 2307,5            | dlg    | песчаный доломит           | 0,1         | 0,29        | 0,31        | 0,37         |                       | 78              | 84                            |                           |
| n1            | 2381,9            | jrb    | вторичный песчаный доломит | 0,28        | 0,59        | 0,28        | 1,44         |                       | 41              | 19                            |                           |
| n1            | 2394,96           | jrb    | то же                      | 0,38        | 0,64        | 0,2         | 1,38         |                       | 46              | 14                            |                           |
| n1            | 2513,82           | mdr    | аргиллит                   | 0,2         | 0,62        | 0,14        | 1,29         |                       | 47              | 11                            | не ниже МК <sub>3-4</sub> |
| n1            | 2514,44           | mdr    | то же                      | 0,16        | 0,49        | 0,17        | 2,26         |                       | 21              | 7                             | не ниже МК <sub>3-4</sub> |
| n1            | 2514,59           | mdr    | то же                      | 0,14        | 0,6         | 0,16        | 1,75         |                       | 34              | 9                             | не ниже МК <sub>3-4</sub> |
| n1            | 2515,02           | mdr    | то же                      | 0,17        | 0,7         | 0,14        | 2,23         |                       | 31              | 6                             | не ниже МК <sub>3-4</sub> |
| n1            | 2515,91           | mdr    | то же                      | 0,21        | 0,88        | 0,19        | 2,5          |                       | 35              | 7                             | не ниже МК <sub>3-4</sub> |
| n1            | 2527,31           | mdr    | то же                      | 0,18        | 0,51        | 0,27        | 0,93         |                       | 54              | 29                            | не ниже МК <sub>3-4</sub> |
| n2            | 3556,71           | mdr    | то же                      | 0,09        | 0,46        | 0,19        | 0,59         | 464                   | 77              | 32                            | МК <sub>3-4</sub>         |
| n2            | 3556,77           | mdr    | то же                      | 0,12        | 0,68        | 0,12        | 1            | 462                   | 67              | 11                            | МК <sub>3-4</sub>         |

\* Толщи рифея: dlg — долгоктинская, jrb — юрубченская, mdr — мадринская.

Рис. 2. Градации катагенеза для пород мадринской толщи (слева) и уровень эрозии в ряде скважин Куюмбинского месторождения (справа): 1 — номер скважины и градация катагенеза ОВ по нашим данным; 2 — номер скважины и градация катагенеза по данным [Филипцов и др., 1999; Тимошина, 2005] (курсив); 3 — номер скважины и оценка уровня эрозии



ством аргиллитов на сегодняшний день основной метод, который (с некоторыми оговорками) можно использовать для оценки степени катагенетической преобразованности исследуемых отложений, — пиролиз органического вещества методом RockEval.

**Методика и материалы исследования.** Характеристика нефтематеринских толщ осуществлялась по результатам пиролиза (RockEval 6), выполненного для 9 образцов аргиллитов мадринской толщи на кафедре геологии и геохимии горючих полезных ископаемых МГУ имени М.В. Ломоносова. Методика пиролиза на аппаратуре RockEval разработана во Французском институте нефти и подробно описана в ряде работ, например, в [Espitalie, Vordenave, 1993]. Дополнительным материалом для оценки погружения и эрозии послужили данные, опубликованные в работах Ю.А. Филипцова с соавторами [1999] и И.Д. Тимошиной [2005].

**Результаты исследований и оценка погружения и эрозии рифейских пород.** Полученные нами данные (табл. 1) показали, что лишь в двух образцах присутствует пиролизуемое органическое вещество, градация катагенеза определяется как конец стадии МК<sub>3</sub> — начало стадии МК<sub>4</sub>, это соответствует прогреву примерно в 200–210 °С (согласно расчетам [Аммосов и др., 1980]). Породы, для которых невозможно установить  $T_{\max}$  (в скважине n1), исчерпали свой нефтематеринский потенциал, т.е. были преобразованы на стадии выше МК<sub>3</sub>. Содержание органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) довольно высокое для рифейских пород и достигает 2,50 масс.% при среднем значении в рифейских породах 0,24 масс.% в глинистых породах [Справочник..., 1998; Неручев, Rogozina, 2010]. Замеренные значения общего содержания углерода (ТОС) — остаточные, они значительно ниже исходных вследствие расхода органического

вещества (ОВ) на образование углеводородов (УВ). Генерационный потенциал практически нацело израсходован —  $S_2 < 1$  мг УВ/г породы. Остаточны также значения водородного индекса ( $HI < 100$  мг УВ/г ТОС). Параметры находятся в соответствии между собой и отвечают практически полной выработанности керогена.

Обобщенные результаты степени катагенеза ОВ мадринской толщи показаны в табл. 2 и на рис. 2. Степень катагенеза ОВ в целом близка по площади и колеблется от МК<sub>3</sub> до МК<sub>5</sub>.

Известно, что степени катагенеза соответствует определенный диапазон температуры [Аммосов и др., 1980], которая в свою очередь (при отсутствии дополнительных источников тепла, например, прогрева при внедрении интрузий) определяется глубиной залегания пород. На основе уровня катагенеза исследуемых образцов мы рассчитали палеоглубину, на которой находились изучаемые породы. При этом исследования проводились для образцов, отобранных из скважин с известной современной глубиной их залегания. Степень катагенеза ОВ рассматриваемых рифейских отложений при этом была достигнута на большей глубине, чем современная, это позволило нам рассчитать, на какую глубину были погружены отложения. Значение теплового потока в рифее было, по оценкам специалистов [Watson, 1978; Beardsmore & Cull, 2001], близко к современному. Результаты подсчетов представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Приведенные расчеты показывают, что для достижения катагенетической преобразованности органического вещества рифейские породы должны были погрузиться на глубину около 7 км или более. Достигнуть такого уровня катагенеза ОВ могло при погружении во время накопления либо рифейских, либо венд-палеозойских пород. Венд-палеозойский комплекс в настоящее вре-

Таблица 2

Оценка палеоглубин залегания мадринской толщи и уровней эрозионного среза

| Номер образца или скважины           | Современная глубина отбора образца, м | Глубина отбора образца от границы с вендом, м | Степень катагенеза        | Температура катагенеза по Амосову, °С | Палеоглубина, км | Соответствующий эрозионный срез, км |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| Данные авторов                       |                                       |   |                           |                                       |                  |                                     |
| n1-28                                | 2514                                  | 214   | не ниже МК <sub>3-4</sub> | >200                                  | > 7              | > 7 (?)                             |
| n1-30                                | 2515                                  | 215   | не ниже МК <sub>3-4</sub> | >200                                  | > 7              | > 7 (?)                             |
| n1-33                                | 2515                                  | 215   | не ниже МК <sub>3-4</sub> | >200                                  | > 7              | > 7 (?)                             |
| n1-34                                | 2527                                  | 227   | не ниже МК <sub>3-4</sub> | >200                                  | > 7              | > 7 (?)                             |
| n2-51                                | 3556                                  | 1142  | МК <sub>3-4</sub>         | 200–215                               | 7                | 5,9                                 |
| n2-52                                | 3556                                  | 1142  | МК <sub>3-4</sub>         | 200–215                               | 7                | 5,9                                 |
| Данные работы [Филипцов и др., 1999] |                                       |   |                           |                                       |                  |                                     |
| Мдр-156                              | 3940–3948                             | 1720  | МК <sub>4</sub>           | 210–220                               | 7                | 5,8                                 |
| Бдш-1,<br>Юр-30,<br>Юр-45            | 2479–2487                             | 200   | МК <sub>4-5</sub>         | 210–220                               | 7                | 6,8                                 |
| Юр-69                                | 2681–2874                             | 321–514                                       | МК <sub>4-5</sub>         | 210–220                               | 7                | 6,5                                 |
| Данные работы [Тимошина, 2005]       |                                       |   |                           |                                       |                  |                                     |
| Мдр-156                              | 3941–4003                             | 1721  | МК <sub>5</sub>           | 210–220                               | 7                | 5,3                                 |

мя не достигает столь значительной мощности, кроме того, в работе [Филипцов и др., 1999] зафиксировано катагенетическое несогласие между рифейским и венд-палеозойским структурными этапами. Однако исследованные образцы залегают на глубине несколько сотен, редко тысячи метров от поверхности предвендского несогласия и не более чем в 4 км от дневной поверхности. Это позволяет считать, что катагенетическую зрелость породы рифея достигли еще до начала формирования венд-палеозойского чехла.

Таким образом, можно предположить, что значительная по мощности часть рифейских отложений была эродирована в предвендское время; тогда же на отдельных участках наибольшего прогибания породы мадринской толщи полностью выработали свой нефтегазоносный потенциал. Наши расчеты показали, что мощность эродированных пород варьирует в пределах исследуемого района и составляет 5,3–7 км (рис. 2, табл. 2). В пределах изучаемой территории наиболее молодая сохранившаяся толща рифея — ирэмэкэнская, но не во всех скважинах сохранилась полная стратиграфическая последовательность, известная в пределах Байкитской антеклизы. Если для каждой скважины, данные о которых приведены в табл. 2, достроить разрез, включая все известные рифейские толщи, и оценить мощность комплексов, эродированных выше ирэмэкэнской толщи — наиболее молодой из сохранившихся в пределах Байкитской антеклизы, то оказывается, что для всех скважин эта величина будет варьировать от 4 до 4,7 км.

Следовательно, полная реализация нефтегазового потенциала мадринской толщи связана с

тем, что в довендское время ирэмэкэнскую толщу перекрывал мощный осадочный комплекс, эродированный позднее. Существует несколько стратиграфических схем, по-разному оценивающих возрастную диапозон рифейских комплексов Байкитской антеклизы, например [Краевский и др., 1997; Стратиграфия..., 2005; Хабаров, Вараксина 2011]. Но в последние годы в результате изотопных и изотопно-геохимических исследований установлено, что, вероятно, возраст всей последовательности рифейских отложений Байкитской антеклизы лежит в диапазоне 1,5–1,1 млрд лет [Хабаров и др., 2002, Хабаров, Вараксина 2011], в то время как на соседнем Енисейском кряже разрез нижнерифейских отложений надстроен многокилометровой толщей среднего-верхнего рифея [там же]. Приведенные нами здесь значения степени катагенетической зрелости ОБ подтверждают предположение [Хабаров, Вараксина, 2011; Frolov et al., 2011] о значительной эрозии, уничтожившей верхнерифейские отложения в пределах Байкитской антеклизы.

**Заключение.** Полученные нами данные с учетом данных предшественников [Филипцов и др., 1999; Тимошина, 2005; Frolov et al., 2011] показали, что степень катагенеза ОБ мадринской свиты в пределах Байкитской антеклизы в целом близка и колеблется от МК<sub>3</sub> до МК<sub>5</sub>. Генерационный потенциал практически нацело израсходован — S<sub>2</sub><1 мг УВ/г породы. Остаточными являются также значения водородного индекса (HI<100 мг УВ/г ТОС). Наши расчеты, основанные на результатах пиролиза ОБ, показали, что для достижения такой высокой катагенетической

зрелости породы мадринской толщи должны были быть погружены на глубину 7 км и более. При этом в настоящее время глубина залегания исследуемых пород не превышает 4 км. Учитывая катагенетическое несогласие, установленное между рифейским и венд-палеозойским комплексами Байкитской антеклизы, мы показали, что в исследованных скважинах было эродировано от 5,3–7 км рифейских отложений. При этом, учитывая мощность всей последовательности

рифейских отложений Байкитской антеклизы и рассчитанную мощность эродированных комплексов, мы предполагаем, что некогда породы самой молодой ирэмээнской толщи были перекрыты средне-верхнерифейскими отложениями мощностью 4–4,7 км, их стратиграфические аналоги в настоящее время известны в пределах Енисейского кряжа. Причина и интенсивность деформаций, повлекших столь значительную эрозию, остаются дискуссионными.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Аммосов И.И., Горшков В.И., Гречишников Н.П.* Палеотемпературы преобразования нефтегазоносных отложений. М.: Наука, 1980. 112 с.

*Конторович А.Э., Изосимова А.Н., Конторович А.А.* и др. Геологическое строение и условия формирования гигантской Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазонакопления в верхнем протерозое Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 8. С. 166–195.

*Краевский Б.Г., Пустыльников А.М., Краевская М.К.* О рифогенной докембрийской формации центральной части Байкитской антеклизы // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 10. С. 1620–1624.

*Неручев С.Г., Рогозина Е.А.* Геохимические основы прогноза нефтегазоносности. СПб.: ВНИГРИ, 2010. 280 с.

Справочник по геохимии нефти и газа. СПб.: Недра, 1998. 576 с.

Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления / Под ред. Н.В. Мельникова. Новосибирск: ГЕО, 2005. 428 с.

*Тимошина И.Д.* Геохимия органического вещества нефтепроизводящих пород и нефтей верхнего докембрия юга Восточной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал ГЕО, 2005. 166 с.

*Филипцов Ю.А., Петришина Ю.В., Богородская Л.И.* и др. Оценка катагенеза и нефтегазогенерационных свойств органического вещества отложений рифея и венда Байкитской и Катангской нефтегазоносных областей // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 9. С. 1362–1374.

*Хабаров Е.М., Вараксина И.В.* Строение и обстановки формирования мезопротерозойских нефтегазоносных

карбонатных комплексов запада Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 8. С. 1173–1198.

*Хабаров Е.М., Пономарчук В.А., Морозова И.П.* и др. Вариации уровня моря и изотопного состава карбонатного углерода в рифейском бассейне западной окраины Сибирского кратона (Байкитская антеклиза) // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 3. С. 211–239.

*Харахинов В.В., Шленкин С.И.* Нефтегазоносность докембрийских толщ Восточной Сибири на примере Куюмбинско-Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазонакопления. М.: Научный мир, 2011. 420 с.

*Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Литологические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.

*Янаскурт О.В.* Литология: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2008. 336 с.

*Allen Ph.A., Allen J.R.* Basin Analysis. Principles and Applications. Third ed. Blackwell Publishing, 2013. 619 p.

*Beardsmore G.R., Cull J.P.* Crustal Heat Flow. A Guide to Measurement and Modelling. Cambridge University Press, 2001. 334 p.

*Espitalie J., Bordenave M.L.* RockEval pyrolysis // Applied Petroleum Geochemistry. Paris, 1993.

*Frolov S.V., Akhmanov G.G., Bakay E.A.* et al. Meso-Neoproterozoic petroleum systems of the Eastern Siberian sedimentary basins // Precamb. Res. 2015. Vol. 259. P. 95–113.

*Frolov S.V., Akhmanov G.G., Kozlova E.V.* et al. Riphean basins of the central and western Siberian platform // Marine and Petroleum Geol. 2011. Vol. 28, N 4. P. 1–15.

*Watson J.V.* Precambrian thermal régimes // Philosoph. Transactions of the Royal Soc. of London. Ser. A. Mathematical and Physical Sci. 1978. Vol. 288, N 1355. P. 431–440.

Поступила в редакцию  
09.12.2015