

## КОНТАКТОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УГЛЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДОЛЕРИТОВОЙ ДАЙКИ (Кайерканское месторождение, Норильский район)

**В.Н. Меленевский, А.Н. Фомин, А.С. Коньшев, О.Г. Талибова**

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Коптюга, 3, Россия*

В работе с использованием органогеохимических методов исследования рассмотрены результаты воздействия долеритовой дайки мощностью 6.75 м на пластовую залежь угля Кайерканского месторождения (северо-запад Сибирской платформы). Показано, что уголь от исходного состояния (тощая стадия углефикации) преобразовался до антрацита, причем этот переход отмечен в непосредственной близости от дайки. Проведены химико-кинетическое моделирование процессов крекинга органического вещества угля под влиянием дайки и оценка максимальных палеотемператур.

*Уголь, катагенез, пиролиз, витринит, интрузивное воздействие.*

## CONTACT COAL TRANSFORMATION UNDER THE INFLUENCE OF DOLERITE DIKE (Kaierkan deposit, Noril'sk district)

**V.N. Melenevskii, A.N. Fomin, A.S. Konyshev, and O.G. Talibova**

The influence of 6.75 m thick dolerite dike on the sheet coal of the Kaierkan deposit (northwestern Siberian Platform) was studied by organo-geochemical methods. It is shown that initial lean coal was transformed into anthracite in the immediate vicinity of the dike. Chemical kinetic modeling of the dike-induced cracking of coal organic matter was performed, and the maximum paleotemperatures were estimated.

*Coal, catagenesis, pyrolysis, vitrinite, intrusion effect*

### ВВЕДЕНИЕ

Контактный катагенез (метаморфизм) — наиболее наглядно проявляющийся в природе процесс изменений органического вещества (ОВ), вызванных тепловым, эманиционным и динамическим воздействием магматических тел при внедрении их в осадочную толщу. Эти преобразования накладываются на существующий фоновый (региональный) катагенез и отмечаются во многих осадочных бассейнах.

Аномально высокий режим в период внедрения магмы может привести к дополнительному катагенезу ОВ, сместить зоны нефте- и газообразования, изменить фазовый состав и условия сохранности залежей углеводородов [Preggaard, Schiener, 1979; Ревердатто, Меленевский, 1986; Bishop, Abbott, 1995; Канторович, Хоменко, 2001]. При этом уголь претерпевает контактовые изменения, глубина которых зависит от температуры, природы интрузивного тела, близости его к пласту, теплопроводности пород. Наиболее сильное влияние на ОВ оказывают силлы основных пород, внедрившиеся между угольными пластами, а также секущие их крупные интрузии. Изменение химических, физических, петрографических свойств углей при контактовом катагенезе и сопоставление их с изменениями при региональном катагенезе изучалось в работах [Богданова, 1968; Топорец, 1968 и др.]. Преобразование углей под влиянием интрузивов выражается главным образом в улетучивании газообразных веществ, образующихся в процессе крекинга углей, структурном упорядочении и превращении на конечных этапах в кокс и графит. Однако, несмотря на то что проблемы, связанные с контактовым катагенезом (метаморфизмом) углей и ОВ, обсуждаются как в отечественной, так и зарубежной литературе на протяжении длительного времени, некоторые вопросы окончательно не решены. К ним, в частности, относятся причины различия в свойствах контактово- и регионально-измененных углей, заключающиеся в потере спекающихся свойств, понижении теплоты сгорания, повышении удельного веса (для первых), температурные условия контактового преобразования. Поэтому актуальность постановки и проведения работ подобного плана не вызывает сомнений.

В данном сообщении приводятся результаты органогеохимического анализа (пиролиз в варианте Rock-Eval, изотопия  $^{13}\text{C}$ , отражательная способность витринита, рентгенографический анализ) пласта угля (тощая стадия), испытывавшего воздействие долеритовой дайки, дается оценка выхода летучих углеводородов (УВ). В работе в рамках представлений химической кинетики проведено также химико-математическое моделирование процессов преобразования ОВ угля в условиях контактового катагенеза.

**Материал и методика эксперимента.** В качестве объекта исследования взята коллекция образцов, отобранная в 1993 г. из угольного пласта мощностью 2.5 м (карьер вблизи пос. Кайеркан)\*. Кайерканское месторождение расположено в Норильском угленосном районе (23 км западнее г. Норильск), который

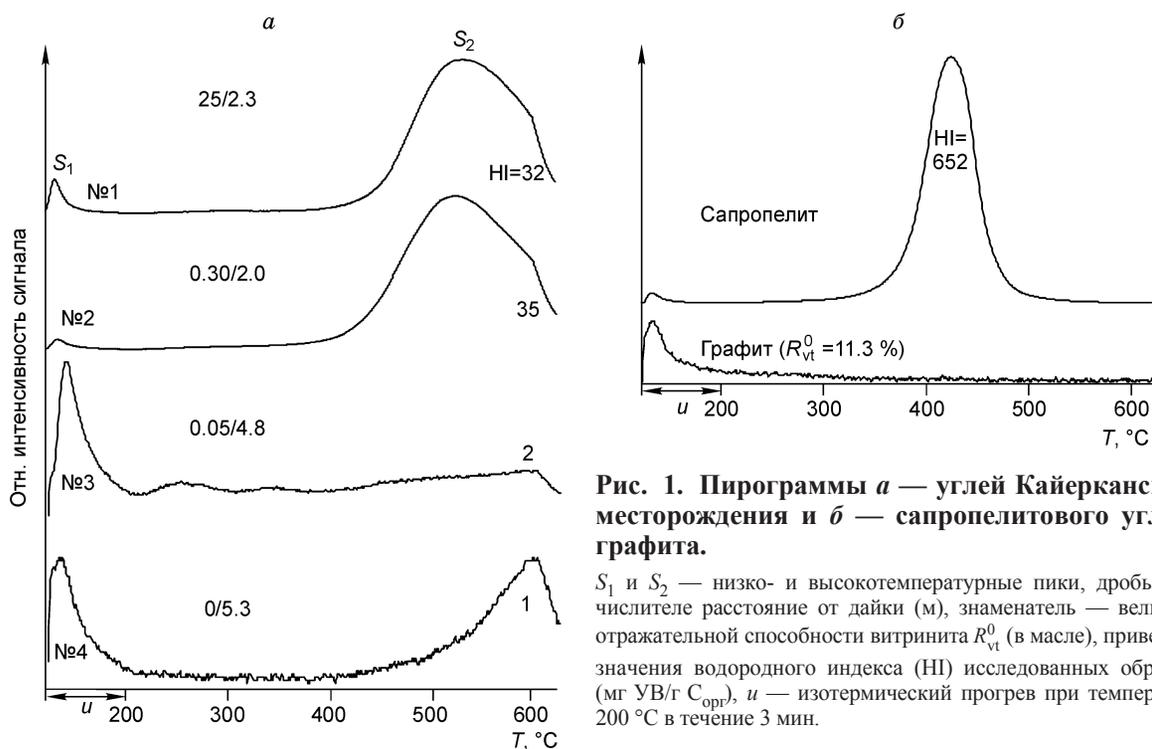
\* Авторы приносят глубокую благодарность В.В. Рябову за предоставление образцов для исследования.

представляет собой крайнюю западную часть Тунгусского бассейна. Угли этого месторождения относятся к тунгусской серии, накопление которой происходило в позднепалеозойское время (период  $C_2$ — $P_2$ ). Сведения о свойствах углей Кайерканского месторождения приведены в работе [Угольная база..., 2001]. По величине отражательной способности витринита (1.64—1.78 %) эти угли относятся к отошено-спекающейся стадии (обозначения стадий катагенеза даны по углемарочной шкале). Выход летучих ( $V^{daf}$ ) в них колеблется от 14 до 23 %, атомное отношение (H/C) изменяется в интервале 0.42—0.62.

Угольный пласт пересекает долеритовая дайка мощностью 6.75 м. Изучены образцы, находящиеся на расстоянии 25.4 м, 30 см, 5 см от дайки, и один образец непосредственно на контакте. Были проанализированы также сапропелитовый уголь силурийского возраста с р. Правый Атырдак, детальная физико-химическая характеристика которого приведена в работе [Кириченко и др., 1983], и графит с рудника Курейский. Пиролиз в варианте Rock Eval [Peters, 1986] осуществлялся на пиролизаторе SR Analyzer™. Высокая эффективность этого метода применительно к углям, испытавшим высокотемпературное воздействие «природного» пиролиза в процессе горения угольных отвалов, проиллюстрирована данными работы [Меленевский и др., 2006]. Анализ проводился с использованием температурной программы нагрева образца: двухминутный изотермический нагрев при температуре 200 °С, затем линейный нагрев со скоростью 25 °С/мин до 610 °С и выдержка при этой температуре 1 мин. В этом методе в качестве детектора используется пламенно-ионизационный датчик, поэтому при нагреве в токе инертного газа образца, содержащего органическое вещество (ОВ), детектируется только углеводородная компонента. До температуры 300 °С выделяются углеводороды (УВ), присутствующие в породе в свободном или адсорбированном состоянии (пик  $S_1$ ), при температурах выше 300 °С происходит крекинг ОВ (пик  $S_2$ ). Рентгенографический анализ проведен на дифрактометре ДРОН-3М, излучение  $CuK_{\alpha}$ . Изотопный состав органического углерода исследовался на системе Finnigan-MAT 253. Для расчета энергии активации и предэкспоненциального множителя реакции крекинга керогена, а также химико-кинетических расчетов использовалась программа Kinetics-2000™.

**Результаты** пиролитического и рентгеновского анализов приведены на рис. 1, 2. Обычно количество «высокотемпературных» УВ (пик  $S_2$ ) рассчитывается в миллиграммах на грамм органического углерода (мг УВ/г  $C_{орг}$ ). Эта величина называется водородным индексом (HI) и уменьшается в процессе природного катагенеза за счет генерации УВ органическим веществом. В первом приближении водородный индекс равен «выходу летучих веществ» ( $V^{daf}$ ). По определению, в состав летучих входят вода и углекислый газ, выделяющиеся при прогреве за счет гидроксильных и карбоксильных группировок, входящих в состав ОВ, поэтому  $V^{daf} > HI$ . Различие между этими величинами уменьшается к концу мезокатагенеза ввиду преимущественного выхода этих компонентов из структуры керогена на начальных этапах катагенеза.

Как видно из данных, приведенных на рис. 1, а, величина водородного индекса остается постоянной в интервале 0.3—25 м от контакта с дайкой, резкое падение ее до 1—2 мг УВ/г  $C_{орг}$  происходит для



**Рис. 1.** Пирограммы *а* — углей Кайерканского месторождения и *б* — сапропелитового угля и графита.

$S_1$  и  $S_2$  — низко- и высокотемпературные пики, дробь — в числителе расстояние от дайки (м), знаменатель — величина отражательной способности витринита  $R_{vt}^0$  (в масле), приведены значения водородного индекса (HI) исследованных образцов (мг УВ/г  $C_{орг}$ ),  $u$  — изотермический прогрев при температуре 200 °С в течение 3 мин.

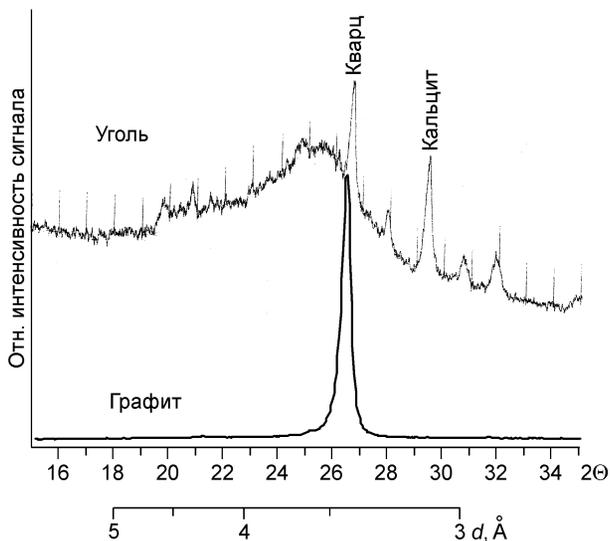


Рис. 2. Дифрактограммы угля (10 м от дайки) и графита.

образцов, находящихся в 5 см от контакта и на самом контакте. Отражательная способность витринита резко возрастает вблизи дайки (менее 5 см) до 4.8—5.3 % (антрацитовая стадия), а на расстоянии 0.3—25 м от нее она составляет 2.0—2.3 % (тощая стадия). Температура максимальной скорости выделения УВ в высокотемпературной области ( $T_{\max}$ ) является пиролитическим параметром, отражающим уровень катагенеза ОВ. Для образцов, удаленных от интрузии на расстояние более 30 см, величина  $T_{\max}$  равна 515—530 °С. Согласно данным [Teichmuller, Durand, 1983], это соответствует отражательной способности витринита  $\approx 2.1$  %, что отвечает реальным замерам этой величины. Характерной особенностью пирограмм этих образцов

является то, что при температуре 610 °С плавное уменьшение сигнала переходит в его резкое снижение. Это вызвано тем, что в соответствии с техническими особенностями анализатора при достижении температуры 610 °С (в режиме ее линейного роста) происходит переключение в изотермический режим, что и приводит к наблюдаемому «перелому» интенсивности сигнала на пирограммах. Для приконтактных образцов высокотемпературный пик в явном виде отсутствует. Для них отмечено непрерывное возрастание сигнала до 610 °С, после чего наблюдается резкий спад. Отсюда следует вывод, что величина температуры  $T_{\max}$  для этих образцов должна быть выше 610 °С.

На рис. 1, б в качестве примера, иллюстрирующего «незрелое» и метаморфизованное ОВ угольного ряда, приведены пирограммы образцов сапропелита и графита. Сапропелит был выбран, поскольку для Кайерканского месторождения в нашем распоряжении отсутствовали незрелые угли гумусовой природы. Для сапропелита (см. рис. 1, б) значение водородного индекса равно 652 мг УВ/г  $C_{\text{орг}}$ , а температура  $T_{\max}$  — 421 °С, что по шкале отражательной способности витринита эквивалентно приблизительно 0.5 % (длиннопламенная стадия), при достижении коксовой стадии, согласно полученным данным, из него выделится более 60 мас.% УВ. В графите (см. рис. 1, б) полностью отсутствует высокотемпературный пик  $S_2$ , что свидетельствует в пользу того, что летучие вещества (углеводородной природы) выделились из его структуры в процессе метаморфизма.

Дифрактограммы изученных образцов угля практически одинаковы, одна из них показана на рис. 2. Структурное состояние углерода в этих образцах может быть отнесено к турбостратному или разупорядоченному графиту (*d-graphite*, по [Landis, 1971]). Для удаленных от дайки образцов максимум рефлекса на дифрактограммах отвечает значению угла  $2\Theta_{330^\circ\text{C}} \approx 25.5^\circ$ . Для приконтактных образцов этот максимум смещается в область больших углов ( $2\Theta_{330^\circ\text{C}} \approx 25.6^\circ$ ) и меньших межплоскостных расстояний  $d_{002}$  (см. рис. 2). Кристаллического графита в изученных образцах не установлено.

Данные по результатам анализа изотопного состава углерода углей приведены в таблице.

Изотопный состав углерода углей Кайерканского месторождения	
Удаленность образца от контакта с дайкой, м	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰
0.3	-24.5
4	-24.8
8	-25.1
25	-24.9

**Обсуждение.** Преобразование ОВ под воздействием повышенных температур включает деструкцию сложных молекул и взаимодействие продуктов распада при возможном участии катализаторов. Тем не менее этот химический процесс, с известной условностью, может рассматриваться как необратимая реакция первого порядка [Tissot, 1969]. Для изотермического процесса количественной мерой протекания реакции является степень завершения реакции (степень превращения)  $\alpha$ , которая записывается как

$$\alpha = 1 - \exp(-kt), \quad (1)$$

где  $\alpha = C/C_0$ ,  $C_0$  — концентрация реагирующего вещества в начальный момент времени,  $C$  — текущая концентрация во время  $t$  (при использовании пиролитических данных степень превращения рассчиты-

вается через величину водородного индекса:  $\alpha = 1 - HI/HI_0$ ,  $k$  — константа скорости реакции, связанная с температурой ( $T$ ) уравнением Аррениуса

$$k = A \exp(-E/RT), \quad (2)$$

где  $A$  — предэкспоненциальный множитель ( $1/c$ ),  $E$  — энергия активации (ккал/моль),  $R$  — газовая постоянная (ккал/моль · град),  $T$  — температура (в градусах Кельвина).

Процесс разложения ОВ обычно описывается в рамках полихромной модели. В этом случае предполагается, что в структуре керогена имеется дискретный набор функциональных группировок, обладающих различной энергией связи ( $E$ ) с поликонденсированным ядром керогена. Каждый генетический тип ОВ (морское, континентальное, озерное) характеризуется своим, присущим только ему распределением энергии активации (крекинга керогена) [Tissot, Espitalie, 1975]. При крекинге керогена в первую очередь разрываются связи с меньшими величинами энергии  $E$ .

В настоящее время химико-кинетическое моделирование (ХКМ) генерации УВ в различных вариантах программ «Бассейнового моделирования» используется для оценки перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов, претерпевших региональный катагенез. В качестве неизвестной (рассчитываемой) величины фигурирует степень превращения ( $\alpha$ ), а исходными данными для расчета служат: кинетические параметры (распределение энергии активации, предэкспоненциальный множитель), начальное значение водородного индекса ( $HI_0$ ) и палеотектоническая история бассейна ( $H = f(t)$ ,  $T = f(t)$ ,  $H$  — глубина).

В данной работе ХКМ использовано для исследования динамики процесса контактового преобразования ОВ. Как видно из представленных данных, рассматриваемый случай отвечает не менее чем двух-этапному термическому воздействию на уголь. Действительно, обычно «незрелое» ОВ, находящееся на Б—Д стадиях катагенеза, претерпевает химические изменения за счет прогрева от дайки на расстояниях от контакта, не превышающих мощность дайки [Bishop, Abbott, 1995]. Поскольку преобразование ОВ до тощей стадии прослеживается на расстояниях, значительно превышающих мощность интрузивного тела, то можно полагать, что время достижения этой стадии углефикации было более ранним, чем внедрение дайки. Конкретизировать условия, в которых протекал этот этап — региональный или термальный катагенез под влиянием интрузивной активности, пока не представляется возможным. По крайней мере, если бы это происходило в условиях регионального катагенеза, то в зависимости от палеотермических условий изучаемый пласт угля должен был бы погрузиться до глубин 4—5 км. Эта оценка произведена на основе данных по глубинной зональности катагенеза в скв. Тюменская сверхглубокая № 6 (Западная Сибирь) [Конторович и др., 2001].

Для проведения ХКМ необходимо иметь данные (распределение энергии активации, величина водородного индекса) для исходного «незрелого» угля. Ввиду отсутствия такого образца в качестве исходного распределения энергии активации взяты данные для гумусового угля из программы [Basin..., 1996] (рис. 3, а); они рекомендуются к использованию в подобных случаях «по умолчанию». Начальное значение водородного потенциала принято равным 300 мг УВ/г  $C_{орг}$  [Sykes, Snowdon, 2002]. На тощей стадии углефикации степень превращения угля равняется приблизительно 0.88, при этом будет выделено 260 г УВ/кг  $C_{орг}$ . После внедрения дайки, в приконтактной области степень превращения увеличится до ~0.97 и выделится еще дополнительно приблизительно 30 мг УВ/г  $C_{орг}$ . В результате преобразования ОВ на первом этапе максимум в распределении энергии активации в остаточном керогене (обр. № 1, 2)

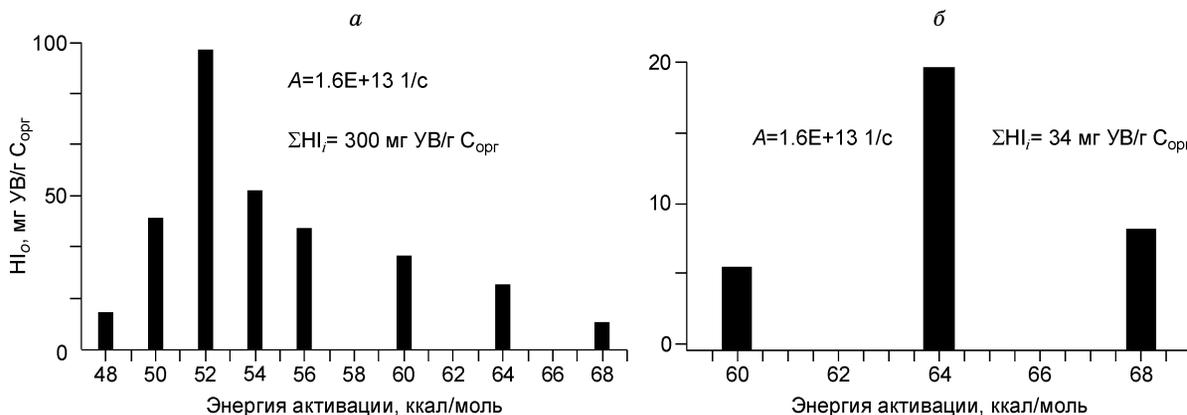
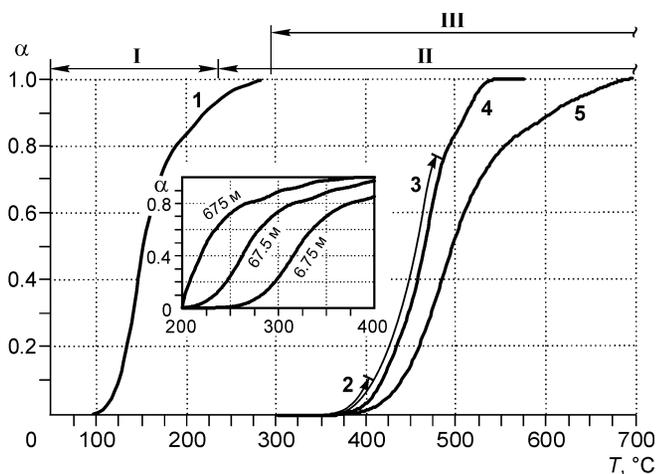


Рис. 3. Распределение энергии активации для исходного угля (а) и для углей (обр. № 1, 2, см. рис. 1, а), преобразованных до А-МА стадии углефикации (б).



**Рис. 4. Графическое представление результатов химико-кинетического моделирования преобразования угля в виде зависимости степени превращения ( $\alpha$ ) от температуры для условий:**

1 — регионального катагенеза при скорости подъема температуры ( $v_T$ ) 5.3 °C/млн лет; 2—4 — контактового метаморфизма (расстояние от контакта с дайкой 2 — 45 см, 3 — 30 см, 4 — 15 см); 5 — лабораторного эксперимента ( $v_T = 25$  °C/мин); температурные интервалы протекания реакций крекинга ОВ: I — для регионального катагенеза, II — для контактового метаморфизма, III — лабораторного эксперимента. На врезке показаны результаты расчета для трех интрузивных тел различной мощности на расстоянии от дайки (относительном), равном 7 %.

сместится с 52 на 64 ккал/моль (рис. 3, б, расчетные данные), а после прогрева (обр. № 3, 4) дайкой в распределении останется только одно значение энергии активации, равное 68 ккал/моль.

Проиллюстрируем возможности метода ХКМ для гипотетического случая регионального катагенеза угля, погружающегося с постоянной скоростью и при постоянном геотермическом градиенте (модель компенсированного осадконакопления). При этом скорость возрастания температуры ( $v_T$ , °C/млн лет) в погружающейся толще связана со скоростью погружения ( $v_H$ , км/млн лет) и геотермическим градиентом ( $\Delta T$ , °C/км) простым соотношением  $v_T = v_H \cdot \Delta T$ . При скорости подъема температуры 5.3 °C/млн лет результат ХКМ в графическом виде  $\alpha = f(T)$  представлен на рис. 4. При меньших скоростях нагрева кривая будет сдвинута в область более низких температур, при больших — в сторону высоких температур. Если принять поверхностную температуру равной 25 °C, то для геотермического градиента 25 °C/км степень превращения, равная 0.88, будет достигнута на глубине 7.6 км (215—25 °C)/25 °C/км), а при геотермическом градиенте 50 °C/км — на 3.8 км. Полученные расчетные значения глубин находятся в удовлетворительном соответствии с природными данными по глубинной зональности катагенеза в скв. Тюменская СГ-6 [Конторович и др., 2001].

Процессы нагревания осадочных пород вблизи внедрившихся интрузивов обычно исследуются при помощи уравнения Фурье для теплопроводности и выведенных из него формул [Ingerson, 1955]. Расчеты температурно-временных профилей вблизи интрузивов в Норильском районе приведены в работе М.Н. Годлевского и других [1962]. В качестве исходных данных для ХКМ из нее были взяты максимальные температуры прогрева и время их достижения после внедрения интрузива. При этом для нормирования результатов использовалась закономерность Ингерсона, согласно которой при сравнении двух интрузивов пластиновидной формы различной мощности  $H_1$  и  $H_2$  расстояние от контакта изменяется в  $n$  раз ( $n = H_1/H_2$ ), а время — в  $n^2$ .

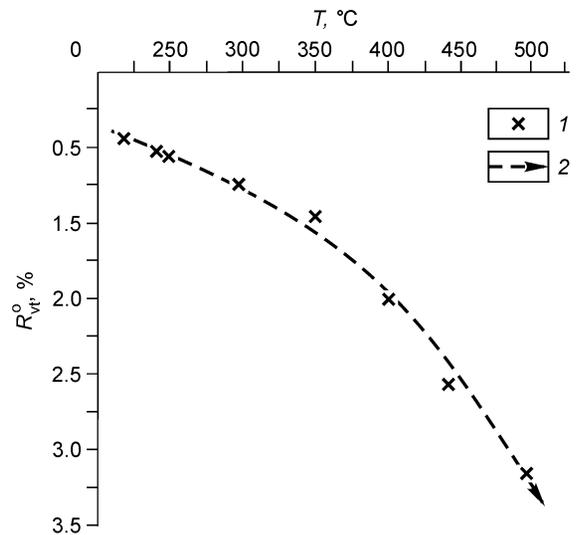
Расчет термического воздействия интрузива (долеритовая дайка мощностью 6.75 м) на уголь проводился с учетом того, что угольный пласт в момент внедрения интрузива уже находился на тощей стадии углефикации, величина водородного индекса для него равна 34 мг УВ/г  $C_{орг}$ , а распределение энергии активации соответствовало данным рис. 3, б. Расчет проведен для расстояния от контакта 45, 30 и 15 см, и его результаты показаны на рис. 4. Оказалось, что потери летучих УВ для угля на расстоянии 45 см от интрузии составляют приблизительно 10 % (см. рис. 4, кривая 2), на расстоянии 30 см степень превращения уже составляет приблизительно 75 % (см. рис. 4, кривая 3) и только для угля, находящегося на расстоянии 15 см от дайки (см. рис. 4, кривая 4), согласно проведенным расчетам, происходит практически полная деструкция ОВ ( $\alpha = 100$  %).

Как следует из расчета, выделение «остаточных» УВ из угля под воздействием дайки начинается с расстояния, равного приблизительно 50 см, и заканчивается на расстоянии ~15 см от дайки. В относительных единицах (в процентах от мощности дайки) это соответствует интервалу 2—7 %. Сравнение с фактическим материалом показывает, что в действительности этот интервал должен быть еще меньше, поскольку для обр. № 2 (30 см от дайки, см. рис. 1, а) отсутствуют изменения как в отражательной способности витринита, так и в выходе летучих — величине водородного индекса в сравнении с образцом, удаленным от дайки на 25.4 м.

Авторы работы [Годлевский и др., 1962], данные которых использовались нами для сравнения расчетов с геологическими наблюдениями термометаморфизма углей около трапповых интрузивов в

**Рис. 5. Изменение отражательной способности витринита в эксперименте по моделированию преобразования органического вещества:**

1 — экспериментальные точки после гидротермального одномесячного прогрева [Bostick, 1974], 2 — тренд изменения отражательной способности витринита.



Норильском районе, оценили точность своих температурно-временных построений в 20—30 %. С учетом этого полученные в данном сообщении результаты можно признать удовлетворительными.

Моделирование катагенетических реакций подразумевает подобие результатов длительных, медленно протекающих при низких температурах геологических процессов и кратковременных лабораторных экспериментов при повышенных температурах. В основе метода лежит аррениусовская зависимость скорости химических реакций от температуры. Справедливость экстраполяции макрокинетических данных лабораторного нагрева на природные условия, отличающиеся между собой в температурах на сотни градусов, а в скоростях нагрева приблизительно в  $10^{12}$  раз (см. рис. 4), вызывает сомнение исследователей [Snowdon, 1979]. Критерием истинности рассматриваемого подхода служит близость рассчитанных температур начала и максимума генерации УВ с их величинами в терминах общепринятой геохимической интерпретации процессов нефтеобразования. К сожалению, насколько соблюдение этих условий является действительно критерием истинности метода, а не простым совпадением, пока остается под вопросом. Однако при переходе к контактовому преобразованию ОВ эта неопределенность снимается, поскольку температурный интервал его протекания практически совпадает с экспериментальным (см. рис. 4). Разница заключается только в скоростях нагрева: для интервала 15—45 см скорости нагрева были приняты равными 1050—350 °C/год, в эксперименте они могут варьировать от  $5 \cdot 10^4$  до  $2.5 \cdot 10^7$  °C/год.

Обычно для оценки максимальных палеотемператур прогрева осадочных пород под воздействием интрузива используется отражательная способность витринита. Для этих целей, в частности, используются данные работы [Bostick, 1974] по прогреву углей в гидротермальных опытах (в автоклавном исполнении), в графическом виде представленные на рис. 5. Согласно этим данным, преобразование угля на первом этапе прогрева могло происходить при температурах 400—430 °C, а для приконтактных образцов, преобразованных до антрацитовой стадии, возможна только приблизительная оценка —  $T_{\max} > 500$  °C. О.И. Гаврилова [1968а,б] из сопоставления экспериментальных данных по термической деструкции углей в интервале 350—900 °C и данным по результатам химического изучения (элементный состав, плотность) контактово-метаморфизованных углей дала оценку возможных температур их образования. В частности, температура образования антрацитовых углей соответствует интервалу 640—700 °C.

Для исходного угля на рис. 4 (на врезке) приведены результаты расчета ХКМ ( $\alpha = f(T)$ ) в точке, удаленной от дайки на 7 % (относительно мощности дайки), для интрузивных тел разной мощности — 6.75, 67.5 и 675 м. Как видно из представленных данных, степень превращения зависит от мощности интрузии и температуры — при увеличении мощности температура достижения углем заданной степени превращения уменьшается. Поскольку отражательная способность витринита, как показано в работе [Burnham, Sweeney, 1989], определяется степенью превращения  $\alpha$ , то из вышеизложенного можно сделать заключение о том, что отражательная способность витринита ( $R_{vt}^0$ ) не может выступать в качестве абсолютного геотермометра. Впрочем, это в общем виде вытекает из самой сути рассматриваемого процесса. Действительно, метаморфизм (катагенез) углей — это необратимый, неравновесный процесс, в котором изначально «незрелое» ОВ через ряд промежуточных стадий углефикации в конечном счете превращается в графит и метан. Завершенность этого процесса в каждой промежуточной точке ( $\alpha$ ) является функцией температуры и времени —  $\alpha = f(T, t)$ .

К сожалению, приходится констатировать, что для высокопреобразованного ОВ ( $R_{vt}^0 > 4—5$  %), на данный момент отсутствуют органогеохимические методы, позволяющие определять максимальные палеотемпературы. Это, в частности, можно объяснить тем, что на этом этапе происходит полная деструкция ОВ с потерей летучих, и его дальнейшее «созревание» протекает по пути чисто твердофазных процессов структурного упорядочения и ароматизации остаточного углеродистого вещества.

Из данных по изотопии углерода, приведенных в таблице, следует, что на расстоянии 0.3 м от контакта с дайкой произошло незначительное утяжеление угля изотопом  $^{13}\text{C}$  (до  $-24.5$  ‰) по сравнению

с образцами, находящимися на большем расстоянии от интрузии (–24.8...–25.1 ‰). В качестве одного из объяснений этого явления можно предположить, что в области повышенных температур, которые для этого образца, согласно расчетам, достигали величины порядка 500 °С, происходит изотопный обмен между изотопно тяжелым (<sup>13</sup>C) диоксидом углерода и углем. В пользу этого, в частности, свидетельствуют данные по коксам и графитам северо-запада Сибирской платформы, для которых в работе [Рябов и др., 2006] также отмечено утяжеление изотопом <sup>13</sup>C. Однако для подтверждения этой гипотезы необходимо проведение дополнительных исследований.

Повсеместное присутствие в изученных углях УВ-составляющей в низкотемпературном пике S<sub>1</sub> (см. рис. 1) на уровне 0.1—0.01 мас. % так же, как и в работе [Меленевский и др., 2006], объясняется за счет их миграции на этапе охлаждения интрузива и сорбции их углями. Пути миграции в этом случае выступает система открытых макро- и микропор в тектонически-активных зонах среди долеритов [Старобинец, 1981].

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- катагенетическое формирование изученных углей происходило не менее чем в два этапа — на первом исходный слой угля претерпел первичное преобразование до тощей стадии углефикации, а на завершающем этапе его приконтактовая часть под воздействием дайки преобразовалась до антрацита;
- по данным пиролиза, выделение основной массы летучих УВ, являющихся продуктом термического разложения угля, в количестве, равном приблизительно 260 кг УВ/т ОВ, произошло на первом этапе;
- как показали результаты химико-кинетического моделирования процессов крекинга угля, величина отражательной способности витринита не может быть использована в качестве абсолютного геотермометра, а может применяться только для оценки возможных максимальных значений палеотемператур в связи с конкретной температурно-временной предысторией изучаемого объекта.

Авторы благодарны рецензентам, конструктивные замечания которых позволили существенно улучшить первоначальный вариант рукописи.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Богданова Л.А.** Результаты петрографического изучения контактово-метаморфизованных углей северной части Тунгусского бассейна // Вопросы метаморфизма углей и эпигенеза вмещающих пород. Л., Наука, 1968, с. 205—221.

**Гаврилова О.И.** Химические свойства и метаморфизм углей из зон контактов с секущими интрузиями // Вопросы метаморфизма углей и эпигенеза вмещающих пород. Л., Наука, 1968а, с. 163—181.

**Гаврилова О.И.** К вопросу о возможных температурах при контактовом метаморфизме углей // Вопросы метаморфизма углей и эпигенеза вмещающих пород. Л., Наука, 1968б, с. 182—187.

**Годлевский М. Н., Кравцов Г.С., Сливко В.М.** Вопросы теплообмена интрузива и вмещающих пород и контактовый термометаморфизм углей вблизи трапповых интрузивов // Геология и геофизика, 1962 (2), с. 6—24.

**Кириченко А.А., Лопатин Г.Г., Лопатина Л.А.** О первой находке сапропелитового угля и горючих сланцев (?) в нижнем силуре на севере Сибирской платформы // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Красноярского края и Тувинской АССР. Красноярск, 1983, с. 87—91.

**Конторович А.Э., Хоменко А.В.** Теоретические основы прогноза нефтегазоносности осадочных бассейнов с интенсивным проявлением траппового магматизма // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (11—12), с. 1764—1773.

**Конторович А.Э., Фомин А.Н., Дочкин Д.А.** Глубинная зональность катагенеза органического вещества и перспективы нефтегазоносности глубокопогруженных толщ юры и триаса в северных районах Западно-Сибирского мегабассейна // Критерии оценки нефтегазоносности ниже промышленно освоенных глубин и определение приоритетных направлений геолого-разведочных работ / Под ред. М.Б. Келлера и А.В. Липилина. Пермь, КамНИИКИГС, 2001, кн. 1, с. 41—56.

**Меленевский В.Н., Сокол Э.В., Фомин А.Н.** Преобразование угля в процессе высокотемпературного катагенеза // Геология и геофизика, 2006, т. 45, (9), с. 1005—1012.

**Реведратто В.В., Меленевский В.Н.** Влияние магматического тепла на генерацию и дегенерацию углеводородов вблизи интрузивных тел базальтов // Докл. АН СССР, 1986, т. 286, с. 409—411.

**Рябов В.В., Пономарчук В.А., Талибова А.Г.** Актуальные вопросы рудообразования и металлогении // Тез. докл. Междунар. совещания (г. Новосибирск, 10—12 апреля, 2006 г.), Новосибирск, Академическое изд-во «Гео», 2006, с. 189—190.

**Старобинец И.С., Тихомирова Е.С., Стативко Г.С., Ломейко Н.Н., Мурогова Р.Н.** Литолого-геохимические барьеры Тунгусского нефтегазоносного бассейна и их роль при миграции углеводородов (в связи с геохимическими поисками залежей нефти и газа) // Литология и геохимия нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. М., Наука, 1981, с. 149—158.

**Топорев С.А.** Физические свойства контактово-метаморфизованных углей Тунгусского бассейна // Вопросы метаморфизма углей и эпигенеза вмещающих пород. Л., Наука, 1968, с. 205—221.

**Угольная база России.** Т. IV. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири / Ред. В.Ф. Череповский. М., ЗАО «Геоинформмарк», 2001, 604 с.

**Basin Mod 1-D,** a basin analysis modeling system (Version 5.41). Platte River Associates, 1996.

**Bishop A. N., Abbott G. D.** Vitrinite reflectance and molecular geochemistry of Jurassic sediments: the influence of heating by Tertiary dykes (northwest Scotland) // Org. Geochem., v. 22, № 1, 1995, p. 165—177.

**Bostick N. H.** Phytoclasts as indicators of thermal metamorphism, Franciscan assemblage and Great Valley sequence (Upper Mesozoic), California // Geol. Soc. Amer. Special Paper 153, 1974, p. 1—17.

**Burnham A.K., Sweeney J.J.** A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance // Geochim. Cosmochim. Acta, 1989, v. 53, p. 2649—2657.

**Ingerson E.** Methods and problems of geological thermometry // Econ. Geol., 1955, v. 1, pt. 1, p. 341—410.

**Landis C. A.,** Graphitization of disordered carbonaceous material in metamorphic rocks // Contr. Miner. Petrol., 1971, v. 30, p. 34—45.

**Perregaard J., Schiener E.J.** Thermal alteration of sedimentary organic matter by a basalt intrusive (Kimmeridgian shales, Milne land, East Greenland) // Chem. Geol., 1979, v. 26, № 3/4, p. 331—343.

**Peters K.** Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis // AAPG Bull., v. 70, № 3, 1986, p. 318—329.

**Snowdon L.R.** Errors in extrapolation of experimental kinetic parameters to organic geochemical systems // AAPG Bull., 1979, v. 63, p. 1128—113.

**Sykes R., Snowdon L.R.** Guidelines for assessing the petroleum potential of coaly source rock using Rock-Eval pyrolysis // Org. Geochem., 2002, v. 33, p. 1441—1455.

**Teichmuller M., Durand B.** Fluorescence microscopical rank studies on liptinites and vitrinites in peat, coals, and comparison with results of Rock-Eval pyrolysis // Int. J. Coal Geol., 1983, v. 2, № 3, p. 197—230.

**Tissot B.P.** Premieres Jonnees sur les mecanismes et la cinetique de la formation du petrole dans les sediments: Simulation d'un schema reactionnel sur ordinateur // Rev. Inst. Francais du Petrole, 1969, v. 24, p. 470—501.

**Tissot B.P., Espitalie J.** L'evolution thermique de la matiere organique des sediments, application d'une simulation mathematique // Rev. Inst. Franc. du Petrole, 1975, v. 30, p. 743—777.

*Рекомендована к печати 31 января 2008 г.  
В.Н. Шароповым*

*Поступила в редакцию 20 апреля 2007 г.,  
после доработки — 21 января 2008 г.*