Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им.Г.В.Плеханова, т.XVIII, вып. 2, 1975 г.

ТЕРМАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ УГЛЕНОСНЫХ ТОЛЩ

О.И.ГАВРИЛОВА, А.Б.ГУРЕВИЧ, С.А.ТОПОРЕЦ

В угольных бассейнах и месторождениях с интенсивным проявлением магматизма, наряду с отчетливыми, но локальными контактовыми изменениями вблизи интрузий, намечается площадная и вертикальная зональность в распределении углей различного качества. Однако эта зональность не подчиняется тем закономерностям, которые давно установлены для регионального метаморфизма [8,14,15] . В частности, в платформенном Тунгусском бассейне при малых (200-1100 м) мощностях угленосных отложений и незначительном в целом градиенте изменения их мощности и глубины погружения развиты угли всех стадий углефикации, от бурых до антрацитов. Это привело ряд исследователей к мысли о необходимости выделения особого вида метаморфизма, получившего название термального [5,16.], регионального термометаморфизма [20] , пропорционального термального метаморфизма [17] , термического метаморфизма [23] и т.п.

Термальный метаморфизм рассматривается нами как весь комплекс изменений углей и углевмещающих пород на достаточно обширной площади под влиянием повышенных температур, обусловленных, как будет показано ниже, аномально высоким геотермическим градиентом, тогда как контактовый метаморфизм – это комплекс изменений углей и углевмещающих пород, вызванных тепловым, эманационным и динамическим воздействием интрузивного тела или группы тел. Термальный метаморфизм характерен для таких бассейнов, как Тунгусский, Сучанский, Сахалинский и др., где занимает место регионального метаморфизма в обычном его понимании.

Обобщенная характеристика углей регионального (Донбасс), термального (Тунгусский, Сахалинский бассейн, Суматра) и контактового (Тунгусский, Сахалинский, Сучанский бассейны, месторождения Центрального Казахстана) метаморфизма (рис. 1, табл. 1, рис.2) показывает.

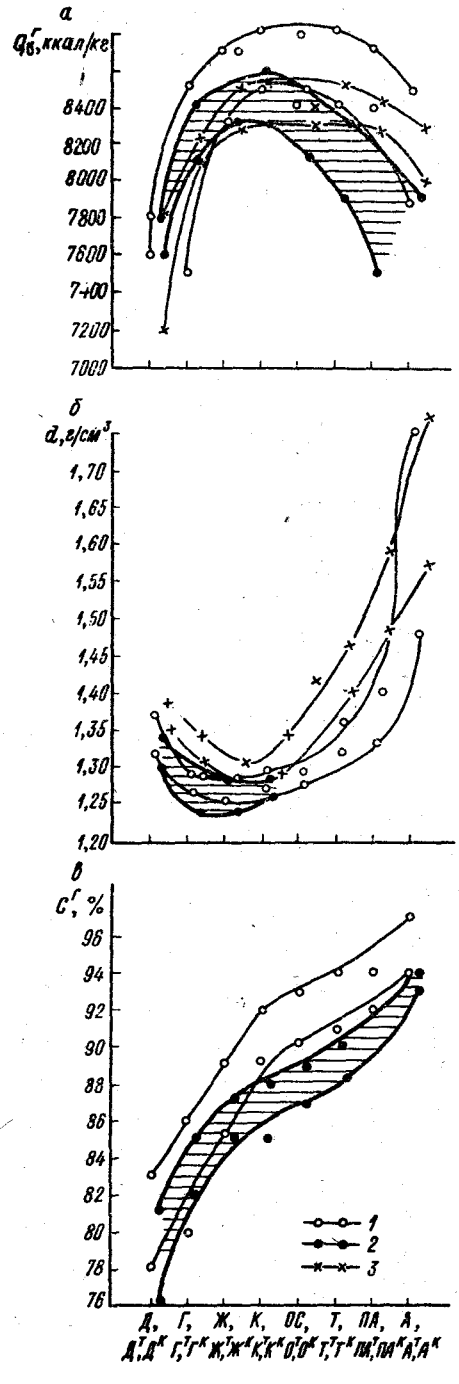


Рис. 1. Изменение в углях различных рядов метаморфизма: а – теплоты сгорания $Q_б^г$; б – удельного веса d; в – содержания углерода $C^г$
1 – регионгальный; 2 – термальный; 3 – контактовый

что угли отличаются от региональнометаморфизованных пониженной теплотой сгорания, худшей спекаемостью, значительно меньшей обуглероженностью, большими величинами скоростей распространения ультразвука и коэффициента акустической анизотропии, особенно для второй половины гаммы метаморфизма. От контактовоизмененных углей их отличает спекаемость и устойчиво пониженный удельный вес.

Вторичные изменения заключающих термальнометаморфизованные угли пород, резко отличаясь от таковых в экзоконтактах интрузий, где развиваются роговики, метасоматиты, скарны, бухиты и т.п., являются, по сути дела, эпигенетическими, близкими к изменениям в бассейнах с региональным типом метаморфизма. Вместе с тем имеются различия, заключающиеся в замедленном темпе структурных и особенно минералогических преобразований в интервале, отвечающем углефикационному ряду от жирных и коксовых до тощих, и, наоборот, более существенном изменении пород на антрацитовой стадии [4].

Таблица 1

Обобщенная химическая характеристика углей

Стадия метаморфизма	$V^г$,%	y,мм	$Q_б^г$, ккал/кг	d, г/см^3	$C^г$,%	$H^г$, %
Д	38–45	6	7500–8000	1,32–1,37	78–83	4,7–5,8
$Д^т$	40–47	0–4	7600–7800	1,30–1,32	76–82	5,0–6,0
$Д^к$	30–39	0	7200–7800	1,35–1,40	76–79	4,5–5,3
Г	35–45	6–23	7500–8500	1,27–1,29	80–86	4,5–6,2
$Г^т$	33–43	10–17	8100–8400	1,24–1,29	82–85	4,6–5,9
$Г^к$	31–34	0	8100–8200	1,30–1,32	82–84	5,3–5,5
Ж	27–37	13–38	8300–8700	1,25–1,29	85–89	4,5–5,8
$Ж^т$	29–35	7–25	8300–8600	1,24–1,29	85–87	4,5–5,3
$Ж^к$	27–31	0	8300–8500	1,27–1,30	84–87	5,0–5,3
К	18–27	14–26	8500–8750	1,27–1,29	89–92	4,0–5,5
$К^т$	21–26	9–13	8300–8600	1,27–1,28	85–88	4,0–4,9
$К^к$	19–24	0	8200–8500	1,29–1,35	87–88	4,6–5,0
ОС	14–22	6–13	8400–8800	1,29–1,30	90–93	4,0–4,9
$О^т$	13–17	0	8100–8500	1,41	87–90	3,6–4,7
$О^к$	12–17	0	8300–8400	1,37–1,42	87–90	3,8–4,4
Т	9–17	0	8400–8800	1,32–1,36	91–94	3,1–4,6
$Т^т$	7–12	0	7900–8300	1,41–1,43	88–90	3,2–3,4
$Т^к$	7–12	0	8300–8500	1,41–1,46	89–92	3,3–3,9
ПА	6–9	0	8400–8700	1,33–1,40	92–94	2,9–3,6
$ПА^к$	5–7	0	8300–8400	1,48–1,60	92–94	2,6–3,0
А	1–7	0	7900–8500	1,48–1,75	94–97	1,0–2,9
$А^т$	1–4	0	7900	1,75–1,81	93–94	1,4–2,0
$А^к$	2–5	0	8200–8300	1,57–1,77	94–97	0,7–2,5

Примечание. Д, $Д^т$, $Д^к$... А, $А^т$, $А^к$ – стадии метаморфизма углей соответственно регионального, термального и контактового рядов.

Количественно эти различия отчетливо проявляются в характере изменения плотности и пористости однотипных песчаников Тунгусского бассейна и Донбасса. Вплоть до стадии, отвечающей коксовым углям, плотность и пористость в обоих случаях изменяется одинаково. Начиная со стадии ОС ($О^т$) плотность донецких песчаников возрастает до 2,65–2,69 г/см^3 в области развития тощих углей и 2,70–2,74 г/см^3

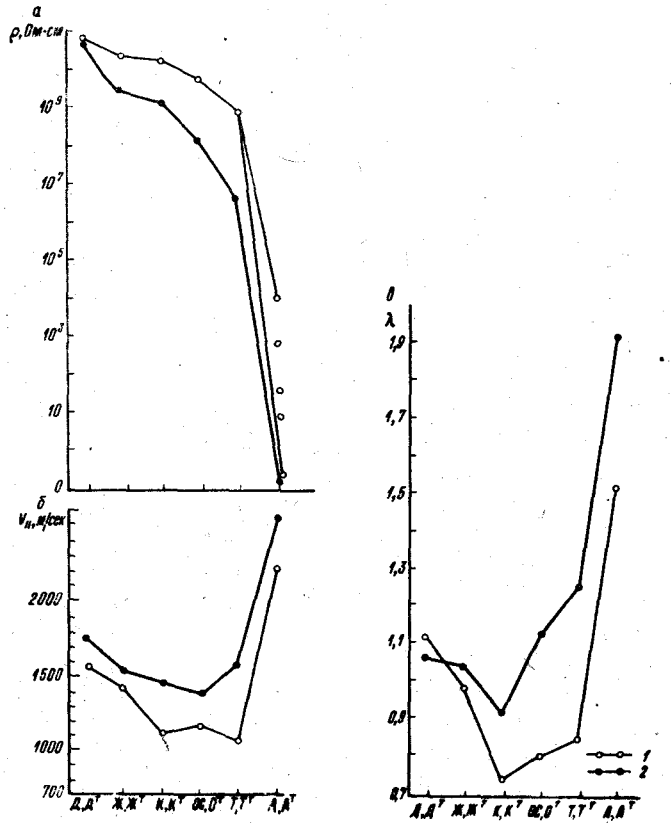


Рис.2. Изменение в углях различных рядов метаморфизма: а – удельного электрического сопротивления ρ ; б – скорости распространения ультразвука $V_п$; в – коэффициента акустической анизотропии $\lambda = \frac{V_п}{V_т}$
1 – региональный; 2 – термальный

на антрацитовой стадии. Для песчаников Тунгусского бассейна характерно сохранение плотности на уровне 2,60–2,64 г/см^3 до стадии тощих углей и понижение ее в антрацитовой зоне до 2,50–2,54 г/см^3 при постоянном удельном весе. Соответственно пористость песчаников Донбасса в области развития антрацитов уменьшается до 0,5–2%, а в Тунгусском бассейне, наоборот, увеличивается до 4–8%.

Таким образом, угли термального ряда и вмещающие их породы обладают характерными признаками, отличающими их как от продуктов контактового изменения, так и от углей и пород бассейнов с региональным типом метаморфизма. Очевидно, это связано со своеобразием геологической ситуации, т.е. с иными, чем при контактовом и региональном метаморфизме, величинами и соотношением основных факторов метаморфизма – температуры, давления и времени.

Д а в л е н и е. Сравним предельную глубину погружения в метрах (числитель) и общее (статическое) давление в барах (знаменатель) при образовании углей различных стадий метаморфизма:

Бассейн	Б и БД	Д	Г	Ж	К	ОС	Т	ПА	А
Тунгусский [x]	1300 325	2500 625	3000 750	3500 900	3200 800	3400 850	3400 850	3400 850	3400 850
Донецкий [xx]	1400 325	2500 625	3500 900	4000 1000	4400 1100	4800 1200	5300 1300	6400 1600	>6400 >1600

[x] В Тунгусском бассейне при малой мощности угленосных осадков (от 160 до 800–1200 м) глубина погружения определяется в основном мощностью перекрывающих угленосные отложения туфолавовых образований.

[xx] Данные заимствованы у М.Л.Левенштейна [9] для случая пологозалегающих пластов (сходные условия с Тунгусским бассейном) и характеризуют максимальные глубины, при которых существуют угли данной стадии.

Дефицит статического давления в Тунгусском бассейне по стадиям: Г – 150; Ж – 100; К – 300; ОС – 350; Т – 450; ПА – 750; А – >750 бар.

Следовательно, существенные различия в давлении (и глубине погружения) в Тунгусском и Донецком бассейнах проявляются лишь со стадии коксовых углей и достигают максимума (от свыше 750 до 2000–2500 бар) в антрацитах. Прямым указанием на дефицит давления при образовании углей стадий $К^Т - А^Т$ является пониженная плотность одновозрастных в фациальном отношении песчаников Тунгусского бассейна по сравнению с Донбассом.

Т е м п е р а т у р а. Общепринято представление о том, что повышенная температура – ведущий фактор термального метаморфизма. Причиной этого является аномально высокий геотермический градиент [11], либо суммарный тепловой эффект траппов, внедрившихся в угленосные отложения [20], либо совместное воздействие того и другого [1,23].

Прямая зависимость между степенью метаморфизма углей и насыщенностью угленосных отложений интрузивными телами (табл. 2) в Тунгусском бассейне отсутствует. Приближенная количественная оценка суммарного теплового эффекта интрузий, по графикам прогрева М.Н.Годлевского и др. [3], показала, что если даже допустить одновременность внедрения всех траппов (в действительности интервал их внедрения составляет 10–15 млн.лет, а тепловые эффекты не перекрывались), то максимальное повышение температуры в пределах продуктивных горизонтов тунгусской серии $С_2 - Р_2$ не могло превысить 20–

Таблица 2

Содержание интрузий в разрезе угленосной толщи Норильского и Котуйского районов Тунгусского бассейна

Месторождение	Стадия метаморфизма	Мощность угленосной толщи, м	Суммарная мощность интрузивных тел, м	Относительная насыщенность интрузивными телами, %
Каякское	$Д^{т}$	290	1,2	0,4
Имангдинское	$Ж^{т}$	460	140,0	32,5
Хенюлях-Иенче	$К^{т}$	150	18,0	12,0
Горы Шмидта	$К^{т}$	160	80,0	50,0
Горы Надежда	$К^{т}$	255	93,6	36,7
Кайеркан	$О^{т}$	390	23,0	6,0
Кайеркан	$Т^{т}$	290	66,0	22,6
Фокина	$А^{т}$	410	115,0	28,2
Среднее значение	—	300	—	23,0

40^{o}С. Эти расчеты и данные табл. 2 позволяют пренебречь ролью "решетки" траппов в создании общей зональности метаморфизма углей Тунгусского бассейна. В таком случае можно полагать, что главной и, вероятно, единственной причиной образований гаммы углей Тунгусского бассейна, во всяком случае со стадии жирных или коксовых углей, является повышенный палеогеотермический градиент.

В областях современного или недавнего вулканизма геотермический градиент достигает $13,3^{o}$С/ 100 м у подножья горы Мацук на Кавказе [18] и 150^{o}С/100 м в Норис Бейсин (США) [7] , тогда как на платформах он не превышает $1,1–1,2^{o}$С/100 м, в Донбассе его значения сегодня находятся в пределах $1,2–3,4^{o}$С/100 м, в Кузбассе – $1,9–3,8^{o}$С/100 м по вертикали [12,13,22] .

Территория Тунгусского бассейна с конца палеозоя по средний триас включительно представляла собой арену интенсивной вулканической деятельности, поэтому, несомненно, в тот период существовали аномально высокие (по сравнению с нормальным платформенным) геотермические градиенты. Количественная же оценка палеогеотермических градиентов может быть выполнена лишь в первом приближении, для чего принимаются следующие исходные положения: 1) температура образования углей термального ряда является промежуточной между температурами контактово- и региональнометаморфизованных углей; 2) температура образования жирных и коксовых термальных углей не превышает 200^{o}С [3] , поскольку при более высоких температурах они теряют спекающие свойства; 3) в зоне развития антрацитов температура во вмещающих породах превышала $300–400^{o}$С, свидетельством чего служит

их существенная альбитизация и появление граната, эпидота, биотита, рутила и т.п. Для метасоматического процесса альбитизации необходим геотермический градиент от 10 до 15°С/100м [18] ; 4) температура образования углей Д и $Д^{т}$ близка из-за совпадения геологических условий. Температура образования углей регионального [9], термального и контактового [2] рядов метаморфизма, °С:

Б и БД	55–60	–	–	–	–
Д	70–90	$Д^{т}$	60–120	$Д^{к}$	>300
Г	100–120	$Г^{т}$	120–150	$Г^{к}$	>300
Ж	120–140	$Ж^{т}$	>150	$Ж^{к}$	>300
К	135–160	$К^{т}$	<200	$К^{к}$	375–430
ОС	150–180	$О^{т}$	250–350	$О^{к}$	420–480
Т	170–210	$Т^{т}$	–	$Т^{к}$	450–520
ПА	190–240	$ПА^{т}$	–	$ПА^{к}$	520–600
А	300–350	$А^{т}$	350–450	$А^{к}$	600–700

Величина палеогеотермического градиента начала мезозоя для северной части Тунгусского бассейна, очевидно, составляла 2,8–3,5°С/100 м в зоне распространения длиннопламенных углей , 5–6°С/100 м для жирных и коксовых углей и 10–15°С/100 м для антрацитов. Для зон углей, находящихся между длиннопламенными и спекающимися, а также между коксовыми и антрацитами, характерны, по-видимому, средние значения градиентов и температур.

Аномально высокие (для платформы) значения геотермического градиента в перми и триасе Сибирской платформы, вероятно, были обусловлен неглубоко расположенными, промежуточными магматическими очагами (резервуарами), реальность существования которых в областях современного вулканизма на небольших глубинах (от 2,5 до 7–10 км) доказана. Повышение уровня магмы в пределах Сибирской платформы в направлении с востока на запад, к более мобильной ее западной окраине, является вполне вероятным, что привело к повышению в том же направлении палеогеотермического градиента. При этом абсолютные значения последнего, очевидно, не выходили за пределы, характерные для градиентов в областях современного вулканизма.

Фактор времени при термальном метаморфизме. Для возникновения магматических очагов, согласно расчетам Кудрявцева и др. [6], требуется от 2–3 до 10–15 млн.лет, а после становления они существовали 20–30 млн.лет. Эти расчетные величины достаточно близки к геологическим данным. Так, в пределах западной окраины Тунгусского бассейна вулканизм проявлялся с верхнего карбона до среднего триаса включительно. В этом случае длительность

существования магматических очагов и повышенных геотермических градиентов может быть оценена от 20–25 до 60–70 млн.лет, что соизмеримо с длительностью процессов доинверсионного метаморфизма в Донбассе (50–55 млн.лет). При локальном термальном метаморфизме, например в пределах Октябрьского и Медвежского месторождений Сахалина, вызванном изолированным магматическим очагом (гипотетическим гранитным плутоном размерами 2–2,5х40 км), время теплового воздействия значительно сокращается. Плутон залегает на глубине 2–3 км, вероятная температура гранитной магмы на этой глубине составляет 800–850°С, температура вмещающих пород 70–90°С. Тогда, используя расчеты Хори [21], максимальный прогрев (53°С) на расстоянии 10 км достигается за 1 млн.лет. На таком расстоянии бурые угли должны перейти в длиннопламенные, а длиннопламенные в газовые, что хорошо согласуется с реальным распределением углей этих стадий метаморфизма на рассматриваемых месторождениях [17]. На расстоянии 1 км максимальный прогрев в 180°С достигается через 100 тыс.лет и здесь должны образоваться и, действительно, образуются тощие и отощенные угли (температура в этой зоне превышает 250–270°С) со свойствами, близкими к углям контактового ряда. Можно полагать, что тепловое воздействие в 100 тыс.лет характеризует тот предел, ниже которого скорость прогрева настолько велика, что приводит к возникновению углей, сходных с продуктами контактового метаморфизма, полукоксования и коксования. При меньших скоростях (большей длительности прогрева) образуются угли термального ряда, в том числе со спекающими свойствами.

Р о л ь с р е д ы и э ф ф у з и в н о г о п о к р о в а. Ряд исследователей [19] для объяснения специфики углей и пород Тунгусского бассейна привлекают как дополнительный фактор особенности геохимии среды. Полностью отрицать их влияние, очевидно, нельзя, однако сходный характер вторичных изменений вмещающих пород при региональном (Донбасс) и термальном (Тунгусский бассейн) метаморфизме (за исключением антрацитовой стадии) вряд ли позволяет придавать этому фактору существенное значение. Ю.Р.Мазор [10] большое значение отводит газо- и теплоизолирующей роли мощного (до 3 км) покрова эффузивов, сравнивая угленосную толщу под ним с "камерой пропаривания". Однако поскольку тепло- и температуропроводность базальтов того же порядка, что и у вмещающих угли пород, и значительно (на порядок) большие, чем у углей, базальты не могут служить термоизолятором и поддерживать повышенные температуры в угленосных отложениях. Насыщение же последних газами, выделяющимися при метаморфизме углей, должно препятствовать, а не способствовать дальнейшему развитию метаморфических процессов.

Исходя из изложенных выше представлений, можно объяснить специфические особенности изменения вещества углей при термальном метаморфизме. Скорость и направление химических реакций на ранних стадиях метаморфизма определяется количеством и активностью реакционноспособных групп и температурой, являющейся необходимым условием протекания метаморфических процессов в угле, которые ликвидируют энер-

гетически невыгодные неустойчивые боковые группы. Содержание углерода при этом закономерно увеличивается, очевидно, не за счет увеличивания конденсированности (что, кстати, тоже сопровождается ростом углерода), а в результате относительного возрастания доли ароматического углерода в структурных единицах угля. Сохраняя ароматические ячейки невысокой степени конденсированности и освобождаясь от утяжеляющей макромолекулы "бахромы", угольное вещество приобретает внутреннюю подвижность, способствующую возникновению спекающих свойств. Такой путь углефикации, одинаковый и при региональном, и при термальном метаморфизме, можно предполагать вплоть до жирных углей – области, где свойства термально– и региональнометаморфизованных углей совпадают. В дальнейшем, начиная со стадии коксовых углей, пути их преобразования расходятся, что фиксируется в четких различиях химических свойств (см. табл.1) . Для продолжения обуглероживания необходимо усложнить структуру конденсацией, однако дальнейшее воздействие нарастающих температур в условиях терммального метаморфизма не обеспечивает этого процесса, поскольку ведущим фактором, определяющим скорости химических реакций, становится не температура, а небольшое число оставшихся в макромолекулах реакционных групп.

Давление, сопутствующее региональному метаморфизму углей, способствует сближению осколков структурных единиц, обладающих невысокой степенью конденсированности уровня жирных углей ($C^{г} \sim 86\%$), и преобразованию их в более крупные и регулярно построенные макромолекулы, что, естественно, проявляется в нормальном росте содержания углерода в углях стадий К, ОС, Т . Аномально замедленное возрастание содержания углерода на стадиях $К^{т}$, $О^{т}$ и $Т^{т}$(см. табл.1) при термальном метаморфизме можно объяснить только дефицитом давления, поскольку реакции полимеризации и конденсации (в определенном температурном интервале) осуществляются при повышенных давлениях. В условиях же термального метаморфизма при относительном дефиците давления, по-видимому, нужно воздействие еще более высокой температуры ($> 350^{0}C$), чтобы расшатать как бы застывшую на уровне жирных углей структуру, сблизить отдельные ее части и преобразовать в более конденсированную модель, соответствующую полуантрацитам с высоким (91-92%) содержанием углерода.

Итак, специфика свойств углей, углевмещающих пород, а также геологической обстановки, в которой они возникают, является основанием для выделения особого вида метаморфизма – термального. Под последним понимают весь комплекс изменений угленосных отложений, ведущим фактором которого являются повышенные температуры при времени воздействия их от сотен тысяч до десятков миллионов лет и скоростях прогрева, промежуточных между скоростями контактового и регионального метаморфизма. На низких стадиях термального ряда давление имеет те же значения, что и при региональном метаморфизме, а его дефицит на средних и высоких стадиях в значительной мере определяет своеобразие состава и свойств углей и углевмещающих пород.

Литература

1. Быкадоров В.С. Некоторые вопросы метаморфизма и зонального распределения углей различного качества в районе р.Нижней Тунгуски. В кн.: Геология углей Сибири и Дальнего Востока. "Наука", 1965.

2. Гаврилова О.И. К вопросу о возможных температурах при контактовом метаморфизме углей. В кн.: Вопросы метаморфизма углей и эпигенеза вмещающих пород. "Наука", 1968.

3. Годлевский М.Н., Кравцов Г.С., Сливко В.М. Вопросы теплообмена интрузива и вмещающих пород и контактовый термометаморфизм углей вблизи траповых интрузий. "Геология и геофизика", 1962, № 2.

4. Гуревич А.Б., Топорец С.А. Об эпигенезе песчаных пород тунгусской серии северной части Тунгусского бассейна. В кн.: Вопросы метаморфизма углей и эпигенеза вмещающих пород. "Наука", 1968.

5. Думлер Л.Ф. Термальный метаморфизм углей Центрального Казахстана. "Наука", 1960.

6. Кудрявцев В.А., Меламед В.Г., Шарапов В.Н. Плавление пород в условиях слоистонеоднородной среды и градиента температур. "Геология и геофизика", 1967, № 12.

7. Лавринг Т.С. Температура внутри и вблизи интрузий. В кн.: Проблемы рудных месторождений. ИЛ, 1958.

8. Левенштейн М.Л. Закономерности метаморфизма углей Донецкого бассейна. "Советская геология", 1962, № 2.

9. Левенштейн М.Л. О генетических закономерностях изменения качества углей в Донецком бассейне. В кн.: Геология месторождений углей и горючих сланцев СССР, т. 1. "Недра", 1963.

10. Мазор Ю.Р. Некоторые общие вопросы метаморфизма углей Тунгусского бассейна. Изв. вузов, геология и разведка, 1969, № 12.

11. Матвеев А.К., Мазор Ю.Р. О региональном метаморфизме углей бассейна р.Курейки. В кн.: Геология углей Сибири и Дальнего Востока. "Наука", 1965.

12. Орда В.Я. Геотермический режим средней части Донбасса. В кн.: Проблемы геотермии и практическое использование тепла Земли, т. 1. Изд. АН СССР, 1959.

13. Пах Э.М., Сендерзон Э.М. Геотермические условия. В кн.: Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР, т.7. "Недра", 1969.

14. Погребицкий Е.О. О факторах метаморфизма углей Донецкого бассейна. "Химия твердого топлива", 1937, т.УШ, вып. 5.

15. Погребицкий Е.О. К вопросу метаморфизма углей Донбасса. "Советская геология", 1964, № 11.

16. Порфирьев В.Б. Метаморфизм ископаемых углей. Изд. Львовск.гос.ун-та, 1948.

17. Посыльный В.Я. О термальном метаморфизме углей. "Геология и геофизика", 1960, № 6.

18. Рундквист Д.В. О влиянии распределения температур горных пород на процессы метасоматического гидротермального минералообразования. Зап. ВМО, вторая серия, 1966, ч. 95, вып. 5.

19. Связь между типом углефикации и составом вмещающих угли пород. В кн.: Геология углей Сибири и Дальнего Востока. "Наука", 1965. Авт.: А.И.Гусева, А.И.Бочарникова, Т.М.Пчелина, Г.П.Арсеньева.

20. У р в а н ц е в Н.Н. Проблема газоносности месторождений полезных ископаемых северо-западной части Сибирской платформы. Тр. НИИГА, 1959, т.105, вып.11.

21. Х о р и Ф. Термальная история контактовых ореолов на основе вычислений теплопроводности. В кн.: Вопросы математической геологии. "Наука", 1968.

22. Ч е р е м е н с к и й Г.А. Результаты геотермических исследований в Сибири. В кн.: Проблемы геотермии и практического использования тепла Земли, т.1. Изд. АН СССР, 1959.

23. Я к о в л е в И.К. Закономерности распространения углей различной степени метаморфизма в пределах западной окраины Тунгусского бассейна. Тр. ВСЕГЕИ, 1963, вып.92.