

Геол. ан. Балк. полуос. Ann. Geol. Penins. Balk.	62	439–454	Београд, децембар 1998 Belgrade, Decembre 1998
---	----	---------	---

УДК 550.4:552.578:66.09:551.78(497.11) Оригинални научни рад

ГЕОЛОШКО–ГЕОХЕМИЈСКИ МОДЕЛ МАТУРАЦИЈЕ КЕРОГЕНА У МАРКОВАЧКОЈ ДЕИРЕСИЈИ (СРБИЈА)

од

Александра Костића* и Марка Ерцеговца*

У циљу утврђивања положаја потенцијалних матичних стена Марковачке депресије у времену и простору, одређен је степен зрелости керогена из пребаденских, баденских и сарматских седимената помоћу интегралног геолошко–геохемијског модела. У моделу су коришћени подаци о савременим температурама, измереним (%Rt) и прорачунатим (Easy %Ro) вредностима рефлексije витринита, као и подаци о временско–температурном индексу (ТТI). За реконструкцију конседиментационе историје и израчунавање индекса ТТI коришћена је "backstripping" реконструкција издвојених стратиграфских јединица са извршеном декомпакцијом. Корелација примењених метода одређивања степена зрелости указује на валидност и репрезентативност израђеног геолошко–геохемијског модела Марковачке депресије.

Кључне речи: геологија, геотермија, матурација, матичне стене, кероген, EASY % Ro, ТТI, рефлексija витринита, "backstripping", терцијар, Марковац, Србија.

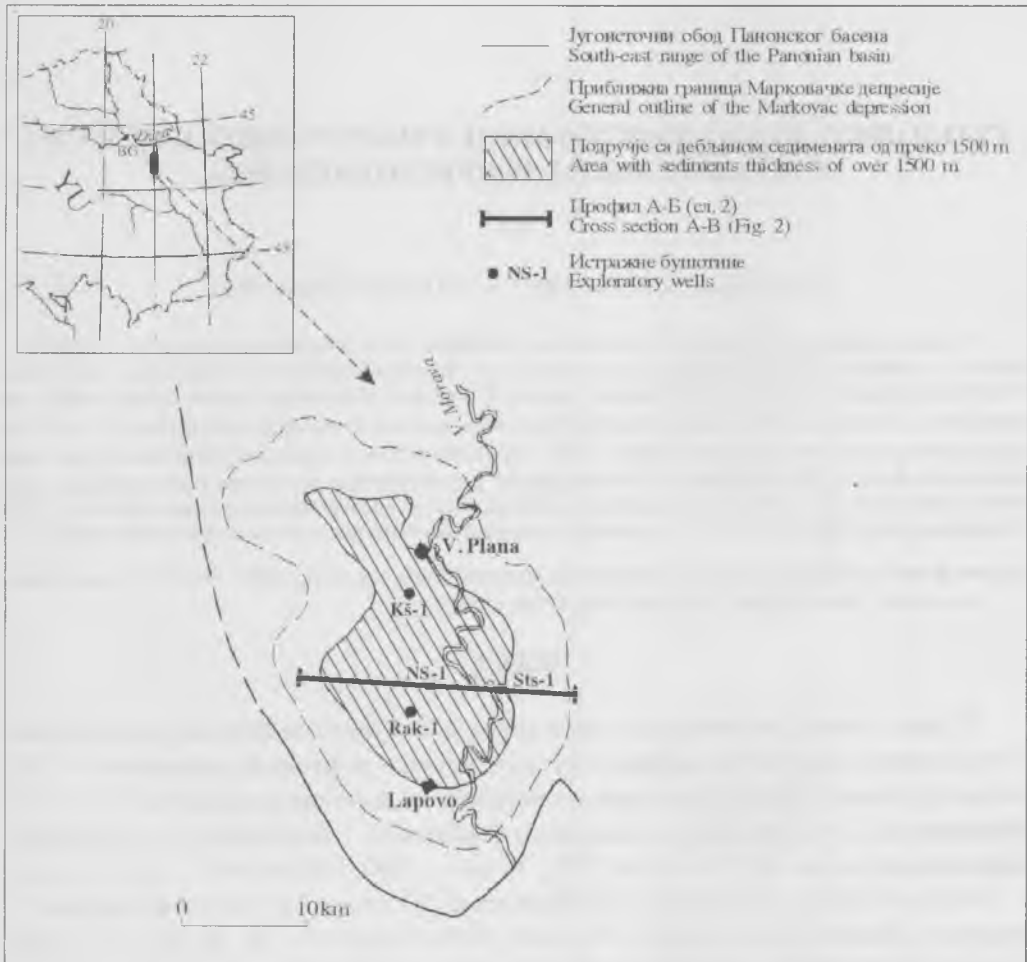
УВОД

У циљу ближег дефинисања зоне и времена могућег генерирања угљоводоника у Марковачкој депресији, извршена су нова мерења рефлексije витринита (% Rr), реконструисана је конседиментациона историја по методици израде 1D (ТТI) и 2D ("backstripping") модела, са декомпакцијом седимената, а израђени су и нови модели сазревања керогена (ТТI: Lopatin, 1971, Waples, 1980, 1985 и EASY %Ro: Sweeney & Burnham, 1990). Временско–температурни ТТI модели су већ примењивани за депресију Дрмно (Ерцеговац и Костић, 1994, Ercegovac & Kostić, 1996), док се модел EASY %Ro код нас први пут користи. Оба ова модела су израђена за већи број локација, укључујући и све истражне бушотине на овом подручју: NS–1 (Ново Село), Rak–1 (Ракинац), StS–1 (Старо Село), Kš–1 и Kš–2 (Крушево), чиме су обухваћени како средишњи, тако и периферни делови депресије (сл. 1).

Марковачка депресија се налази у најјужнијем делу Панонског басена, а заједно са Дрмљанском и Смедеревском депресијом представља најинтересантније подручје за нафтно–геолошка истраживања у Србији јужно од Дунава, што показују и ре-

* Рударско–геолошки факултет Универзитета у Београду, Бушина 7, 11 000 Београд.

на основу сеизмичких података процењено је да максимална дебљина седимената у њој износи 5 000 метара (Kurbaliја i dr., 1989). Најдубља бушотина у овом подручју – NS-1, лоцирана у самом средишту депресије, из техничких разлога није завршена до краја (до палеорељефа), већ је достигла дубину од само 3 300 метара. Досадашњим истражним бушењем у Марковачкој депресији, вршеним у периоду 1977–1980. ("НИС–Нафтагас"), нису откривена комерцијална налазишта угљоводоника, али је у бушотини StS-1 добијен слабији доток нафте.



Сл. 1. Географски приказ Марковачке депресије са положајем истражних бушотина.
Fig. 1. Geographical sketch of the Markovac depression with location of exploratory wells.

У геолошкој грађи Марковачке депресије учествују кластични седименти пребадена (олиго–миоцен ?), бадена, сармата, панона и квартара (Kurbaliја i dr., 1982). Бушењем је констатовано да палеорељеф представљају палеозојски шкриљци, а за сада нема индикација о постојању евентуално мезозојских седимената у подлози терцијара. У току 1983. године, извршена су детаљна нафтно–геолошка истраживања терцијарних седимената Поморавља и Подунавља која су обухватила шири

простор између Смедерева, Азање и Велике Плана (Mojsilović i dr., 1983). У оквиру поменутих истраживања, посебно су рађене органско-петрографске и геохемијске анализе керогена и битумена из пребаденских, баденских и сарматских седимената из свих пет истражних бушотина (Ерцеговац и Виторовић, 1984). Новијим истраживањима у току 1995. године, добијени су потпунији подаци о зрелости керогена из поменутих истражних бушотина на основу мерења рефлексије витринита.

За реконструкцију конседиментационе историје терцијарних седимената Марковачке депресије, коришћени су подаци о стратиграфским границама из истражних бушотина, расположива структурна карта по подини терцијара (Bundaleski, 1986), као и резултати новијих сазнања о максималној дебљини терцијарног комплекса (Kurbalija i dr., 1989). На основу анализе каротажних дијаграма из ширет истражног подручја, одређени су коефицијенти декомпакције и почетне површинске порозности издвојених хроностратиграфских чланова, а процењено је и учешће пелита и псамита у најдубљим (бушењем незахваћеним) деловима депресије. На основу тога, и направљеног компјутерског програма по алгоритму који су публиковали Allen & Allen (1990), извршена је декомпакција седимената и израда једнодимензионалних (сл. 3) и дводимензионалних "backstripping" модела (сл. 2).

РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Мерење рефлексије витринита (%Rr)

Сви резултати мерења рефлексије хуминита/витринита приказани су у табели 1 и на сл. 5.

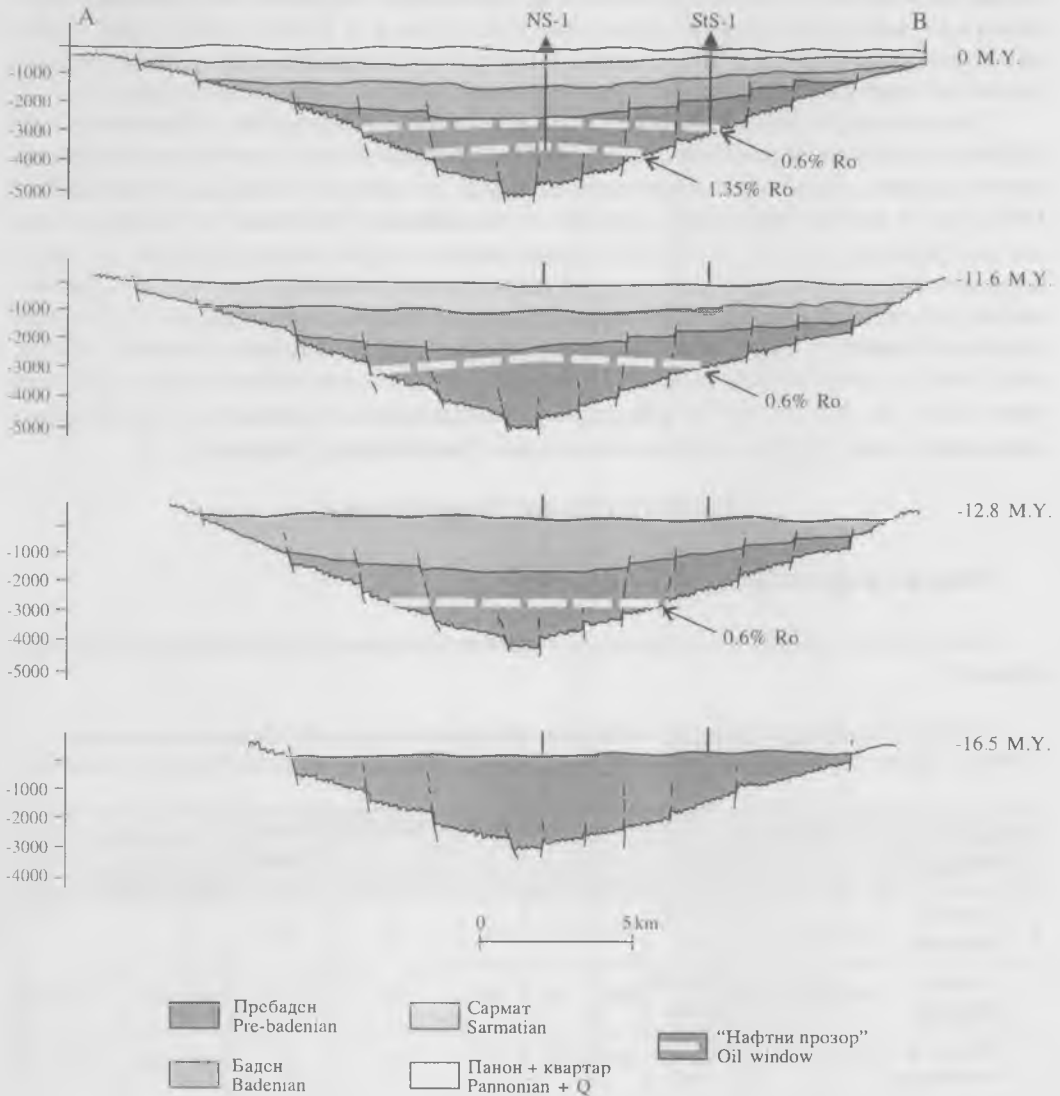
Табела 1. Резултати геохемијског испитивања терцијарних седимената Марковачке депресије
Table 1. Results of the geochemical investigations of the Tertiary sediments in the Markovac depression

Стратиграфија Stratigraphy	Дубина Depth (m)	Corg (%)	% Rr -ср- -mean-	Екстракт* Extract		Угљоводоници C ₁₀ * HC		Алкани* Alkanes (%)	Rock-Eval			
				ppm	%/Corg	ppm	mg/gCorg		S2	S1+S2	HI	PI
Сармат Sarmatian	723-941	0.61	0.31-0.32 -0.32-	352	10.9	63	18	51				
Баден Badenian	900-2206	0.62	0.36-0.65 -0.48-	369	7.4	90	19	57	0.67	0.74	103	0.08
Пребаден Pre-Badenian	1698-3308	0.60	0.37-0.67 -0.50-	358	5.4	204	28	64	0.35	0.49	85	0.30

* Напомена (Remarks): Ерцеговац и Виторовић, 1984

Пребаденски седименти карактеришу се средњом рефлексијом витринита од 0,50 % Rr. Ова средња вредност односи се на нерашчлањене пребаденске творевине које се налазе на дубини од 1 698–3 308 метара. Седименти бадена одликују се сличним степеном термичких промена органске супстанце као и пребаденски; он износи око 0,48 % Rr. Овај степен термичких промена органске супстанце односи се на баденске творевине које се налазе на дубини 900–2 206 метара. Иако сарматски седименти нису посебно разматрани, ради праћења степена термичких промена керогена

на с дубином, утврђено је да се органска супстанца налази у фази ране дијагенезе (са рефлексијом хуминита од 0,32 % Rr).



Сл. 2. Стратиграфски ("backstripping") профили Марковачке депресије.

Fig. 2. Backstripped sections of the Markovac depression.

Реконструкција конседиментационе и термичке историје

На основу досадашњих сазнања о геологији Марковачке депресије закључено је да се током већег дела миоцена на овом простору одвијала континуирана седиментација и продубљавање депресије, праћено раседањем различитог интензитета и старости. Крајем панона је, међутим, наступио хијатус, а седиментација је поново обновљена тек у квартару. С обзиром на то да нема индикација да је у овом под-

ручју било већих издизања или интензивније ерозије, при изради кривих конседиментационе историје (сл. 3) узет је у обзир само не–ерозиони хијатус од краја паноа до почетка квартара.

Имајући у виду одсуство ерозионих фаза и индикација о магматској активности у подручју Марковачке депресије, а евентуално повишене топлотне токове само у почетној фази еволуције депресије (када се седименти нису налазили на већим дубинама), закључено је да су савремене температуре истовремено и максималне палеотемпературе, као и да је данашњи просечан геотермални градијент довољно репрезентативан. Стога је при интерпретацији термичке еволуције истражног простора конструисана униформна температурна мрежа са подједнаким дубинским интервалима.

Поуздани подаци о геотермичким карактеристикама Марковачке депресије добијени су на основу мерења дотока флуида из два интервала у бушотини StS–1. У њој је на дубини од 1 430 m измерана температура од 80°C, а на 2 025 m 106,8°C. С обзиром на то да просечна годишња површинска температура на овом подручју износи 12°C, одређен је просечни геотермални градијент од 4,7°C/100 m (геотермални степен 21,28 m/1°C) и извршена екстраполација до дубине од 5 000 m (сл. 3). Овај градијент је усвојен за целу депресију, односно за све појединачне моделе.

Дебљине, релативне дубине, температуре и апсолутна старост издвојених хроностратиграфских јединица, који су послужили као параметри за израду модела, приказани су у табели 2.

Траса стратиграфских профила Марковачке депресије пролази кроз бошотине NS–1 (Ново Село) и StS–1 (Старо Село), а обухвата целу депресију (сл. 1). Реконструкција еволуције депресије (сл. 2) је сходно броју издвојених хроностратиграфских јединица извршена за следеће временске периоде: крај пребадена (–16,5 мил. год), крај бадена (–12,8 мил. год.), крај сармата (–11,6 мил. год.) и холоцен. Апсолутне старости издвојених јединица одговарају новијој важећој подели за централни Паратетис (Steininger et al., 1990). Из стратиграфских профила могу се пратити промене положаја и дебљина седимената издвојених хроностратиграфских јединица. Истовремено, на профилима су приказане промене положаја и границе зоне могућег генерирања нафте ("нафтног прозора"). Границе "нафтног прозора" дефинисане су према измереним (%R_г) и прорачунатим вредностима рефлексije витринита (EASY %R_o) као и преко TTI вредности.

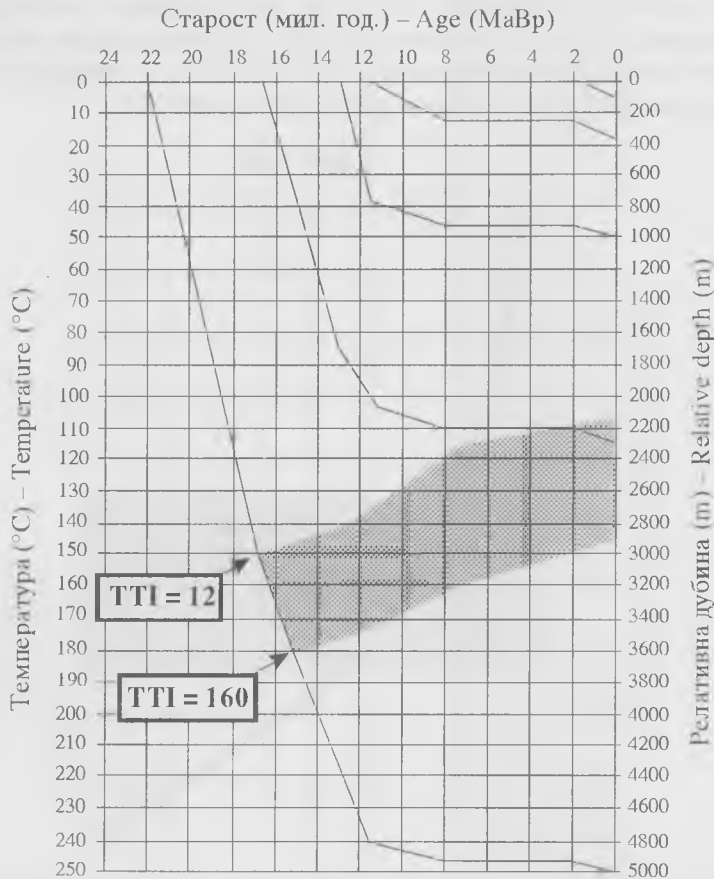
Временско–температурни модели (TTI; EASY %R_o)

У овом раду се осим TTI модела (Lopatin, 1971; Waples, 1980, 1985), по први пут код нас примењују и савремени кинетички модели сазревања витринита "EASY %R_o" (Sweeney & Burnham, 1990) који се последњих година у свету користе као основни модели за прорачун термичке зрелости керогена. Овај модел одређује степен матурације хуминита/витринита на основу података о температури и времену загревања органске супстанце седимената. Његова специфичност је у томе што се одређивање степена трансформације витринита заснива на Аренијусовој једначини првог реда уз коришћење низа паралелних реакција са различитим (одговарајућим) активационим енергијама. Овај модел је посебно прилагођен за рад на РС рачунару.

Табела 2. Геолошке и геотермичке карактеристике терцијарних седимената Марковачке депресије
 Table 2. Geological and geothermal characteristics of the Tertiary sediments in the Markovac depression

Стратиграфска припадност Chronostratigraphy	Авс. старост трајања* (млн год.) Age and duration* (M.Y.)	Литолошки састав Lithology	Средња такојсна Deposition environment	Максимална дебљина *дубина* Max. Thickness and *depth* (m)	T (°C)	TH	EASY %Ro
КВАРТАР QUATERNARY	*1,8*	песак sand	континентална continental	130			
РОМАН ROMANIAN	*1,8*		ХИЈАТУС HIATUS				
ДАК DACIAN	*3,6 *1,6*						
ПОНТ PONTIAN	*5,2 *2,8*						
ПАНОН PANNONIAN	*8,0 *3,1*	песак, глине sand, clay		језерско-брањина lacustrine-brackish	*130* 225	18	0
САРМАТ SARMATIAN	*11,6 *1,2*	пешчари, глине, лапори sandstone, clay, marl	маринска брањина brackish marine	*355* 615	29	<1	0.26
БАДЕН BADENIAN	*12,8 *3,7*	пешчари, лапори, алевролити, глина sandstone, marl, siltstone, shale	маринска marine	*970* 1305	58	<1	0.30
ПРЕБАДЕН PREBADEMIAN	*16,5 *5,5*	конгломерати, пешчари, алевролити, лапори breccio- conglomerate, sandstone, marl, siltstone, marl	језерск, сувакватина до континентална lacustrine, mixed subaquatic to continental	*2275* 2725	119	25	0.62
ПАЛЕОЗОИК PALEOZOIC	*22	кристалнаги шкриљци crystalline schist		*5000*	247	23000	2.86

Израђени модели TTI (сл. 3) и EASY %Ro (сл. 4) указују на то да су у средишњем делу Марковачке депресије пребаденски и најнижи нивои баденских седимената достигли потребну зрелост за генерирање угљоводоника, док се седименти млађег бадена, сармата и панона још увек налазе у фази дијагенезе. За почетну фазу генерирања нафте узета је вредност рефлексије витринита од 0,6%, односно TTI=12 (за кероген типа II–III), а завршна фаза генерирања нафте одговара рефлексији од 1,35%.



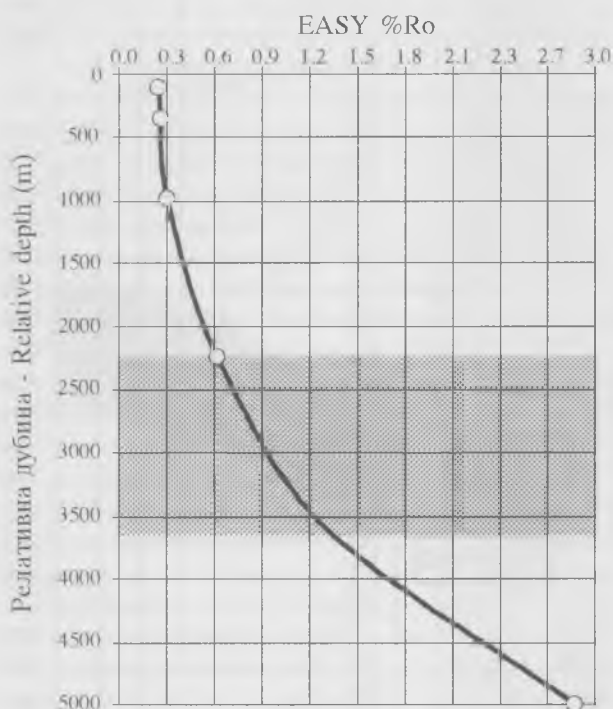
Сл. 3. Репрезентативни TTI модел Марковачке депресије.
Fig. 3. Representative TTI model of the Markovac depression.

У подручју Новог Села и Ракинца (средишњи део депресије) органска супстанца најстаријих творевина пребадена (подински делови) достигла је потребну зрелост за генерирање нафте већ пре око 17 милиона година – крајем карпата, а до данас су кроз почетак "нафтног прозора" прошли не само сви пребаденски већ и старији баденски седименти који се сада налазе на дубинама испод 2 180 m (сл. 3). Према овом моделу, завршну фазу генерирања нафте достигли су пребаденски седименти испод дубине од 2 900 метара.

Бушотина Sts-1 се према добијеним резултатима налази у рубном делу потенцијалне генеративне депресије, где су само нижи нивои седимената пребадена до да-

нас остварили потребну зрелост за генерирање нафте. Подручје Крушева (бушотине Кš-1 и Кš-2) се налази изван зоне могућег генерирања нафте, с обзиром на то да достигнута температура и дубина терцијарних седимената није била довољна за сазревање органске материје (максималан ТТТ испод 12).

Тренд пораста рефлексије витринита према кинетичком моделу EASY %Ro за терцијарне седименте депресије Марковац приказан је на дијаграму сл. 4. Из њега се запажа да кероген из седимената на релативној дубини од 2 200 метара има EASY %Ro од 0,6, а на око 3 600 метара 1,35 % Ro, што одговара "нафтном прозору". Седименти панона и сармата се одликују EASY %Ro вредностима испод 0,3 %, седименте бадена карактеришу вредности од 0,3 до 0,62 %, а пребаденски седименти се у депоцентру депресије налазе у опсегу 0,65–2,86 EASY %Ro.



Сл. 4. Репрезентативни EASY %Ro модел за Марковачку депресију (тачке одговарају стратиграфским границама).

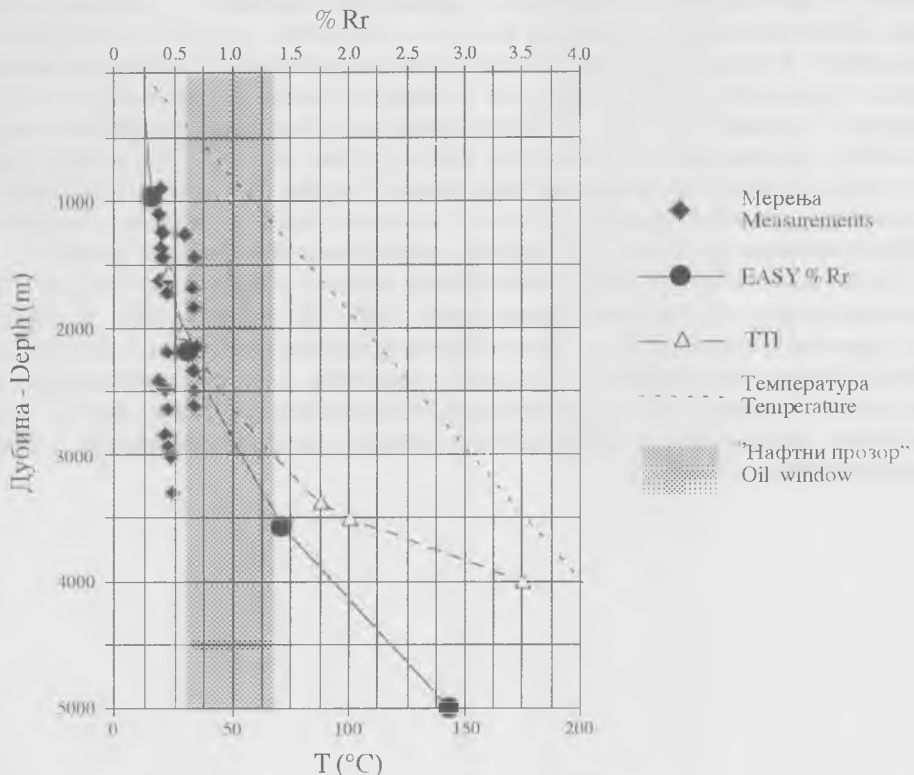
Fig. 4. Representative EASY %Ro model for the Markovac depression (points represents stratigraphic boundaries).

Корелација параметара термичке зрелости

Корелација различитих параметара који су коришћени за одређивање термичке зрелости керогена у Марковачкој депресији приказани на дијаграму сл. 5.

Корелација матурационих параметара у депресији Марковац указује на то да су у погледу релативне дубине горње границе "нафтног прозора" резултати EASY %Ro модела (2 230 m) и ТТТ модела (2 180 m) у потпуној сагласности (разлика само 50 m). Мерења рефлексије (% Rr) су такође добро корелативна са резултатима прорачуна

у првих 2 000–2 500 метара, међутим, у дубљим деловима се не запажа значајнији пораст зрелости органске материје. Ово се за сада може објаснити као последица недостатка репрезентативних популација хуминита/витринита за мерење и/или специфичне турбидитне седиментације. Нажалост, у Марковачкој депресији нема већег броја узорака из седимената са већих дубина који би омогућили израду правилног статистичког тренда пораста измерене рефлексије с дубином.



Сл. 5. Корелација параметара зрелости органске материје.

Fig. 5. Correlation of the obtained maturation parameters.

Резултати добијени за доњу границу "нафтног прозора" моделом TTI и EASY %Ro се разликују за 700 метара. Наиме, EASY %Ro модел показује да зона генерирања завршава на око 3 600 метара, а TTI модел (уколико се усвоји вредност од 160; по Warles-y, 1980, 1985) ову границу индицира на 2 900 метара. Важно је, међутим, нагласити да је за свако истражно подручје потребно да се посебно калибришу вредности TTI у односу на рефлексију витринита, а нарочито доња граница "нафтног прозора".

На дијаграму са сл. 5, могу се такође корелисати поменуте вредности за прорачунати степен термичких промена керогена са трендом пораста савремених температура с дубином. Према тим подацима, модел TTI указује на то да се нафтни прозор у Марковачкој депресији данас налази у температурном опсегу 115–148 °C, док према моделу EASY %Ro овај опсег износи 117–181 °C.

На основу свих наведених резултата испитивања матурације органске супстанце, може се констатовати да данашњи положај "нафтног прозора" генерално

одговара интервалу релативне дубине 2 200–3 600 метара, односно температурном интервалу 116–180 °C.

ЗАКЉУЧАК

На основу примене геолошко–геохемијских модела одређен је степен зрелости керогена из пребаденских, баденских и сарматских седимената у Марковачкој депресији. Добијени резултати указују на то да су потребну зрелост за генерирање угљоводоника у Марковачкој депресији достигли пребаденски и најнижи нивои баденских седимената (у депоцентру), док се млађи седименти још увек налазе у фази дијагенезе. То уједно значи да се потенцијалне матичне стене терцијарне старости могу паћи у средишњем делу депресије испод дубине од око 2 200 метара, односно првенствено у оквиру пребаденског комплекса. Старији баденски седименти који су у депоцентру достигли потребну зрелост, налазе се тек у почетном катагенетском стадијуму који није довољан за значајнију трансформацију керогена у нафту.

У интегралном геолошко–геохемијском моделу, утврђена је у целини добра корелација између коришћених параметара – %R_r, TTI и EASY %R_o. Добијени подаци о термичкој зрелости се, уз претходно моделирање квалитета и заступљености могућих ефективних матичних стена, могу користити за волуметријске прорачуне и оцену укупног нафтно–гасног потенцијала Марковачке депресије чиме се доказује и практични значај примене интегралних геолошко–геохемијских модела у нафтно–геолошким истраживањима.

Геол. ан. Балк. полуос. Ann. Geol. Penins. Balk.	62	439–454	Београд, децембар 1998 Belgrade, Decembre 1998
---	----	---------	---

UDC 550.4:552.578:66.09:551.78(497.11)

Original scientific paper

GEOLOGICAL–GEOCHEMICAL MODEL OF KEROGEN MATURATION IN THE MARKOVAC DEPRESSION (SERBIA)

by

Aleksandar Kostić* and Marko Ercegovac*

The maturity determination of kerogen from the Pre-Badenian, Badenian and Sarmatian sediments from the Markovac depression was performed by the integral geological–geochemical model in order to determine the position of potential source rocks in space and time. The model is based on the present-day temperature observations, measured (%Rr) and calculated (Easy %Ro) values of the vitrinite reflectance and the calculated Time–Temperature Index (TTI) data set. The backstripping technique with decompaction in time and space was applied for the reconstruction of the burial history and calculation of TTI for all relevant lithostratigraphic units. The correlation of the applied methods for the determination of maturity indicates that the constructed geological–geochemical model of the Markovac depression is valid and representative one.

Key words: geology, geothermy, maturation, source rocks, kerogen, EASY %Ro, TTI, vitrinite reflectance, backstripping, Tertiary, Markovac, Serbia

INTRODUCTION

In order to identify the zone and time of possible petroleum generation in the Markovac depression, new vitrinite reflectance measurements (%Rr) were made, burial history was reconstructed by the methodology of 1D (TTI) and 2D (backstripped section) models, with decompaction performed, and new maturity models were constructed (TTI: Lopatin, 1971, Waples, 1980, 1985 and EASY %Ro: Sweeney & Burnham, 1990). The TTI models have already been applied for the Drmno depression (Ercegovac & Kostić, 1994, Ercegovac & Kostić, 1995), while the EASY %Ro model is applied in Yugoslavia for the first time. Both models were constructed for a number of locations, including all the exploratory wells in the area: NS–1 (Novo Selo), Rak–1 (Rakinac), StS–1 (Staro Selo), Kš–1 and Kš–2 (Kruševo), which comprise the central and the fringe parts of depression as well (Fig. 1).

The Markovac depression is located in the southernmost part of the Pannonian basin, and it represents, together with the Drmno and Smederevo depressions, the most in-

* University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Djušina 7, 11000 Belgrade.

teresting area for petroleum exploration in Serbia south of the Danube, which is also shown by the results of our research. The Markovac depression covers an area of about 250 km², and seismic evidence indicates that the maximum thickness of the sediments is 5000 m (Kurbalija et al., 1989). The deepest well in this area – NS-1, located in the center of the depression, has not been drilled to the basement because of technical reasons, but only to the depth of 3300 m. The wildcat drilling in the Markovac depression, carried out in the period 1977–1980 (NIS–Naftagas), have led to no commercial discoveries of hydrocarbons, however, the StS-1 well yielded a small quantity of oil.

The stratigraphic column of the Markovac depression is represented by Pre-Badenian, Badenian, Sarmatian, Pannonian and Quaternary clastic sediments. Drilling has shown that the basement consists of Paleozoic schists; so far no evidence has been found of the existence of Mesozoic sediments. In 1983, a detailed petroleum-geological survey of the Tertiary sediments in the Morava–Danube region was conducted, and it included the area between Smederevo, Azanja and Velika Plana (Mojsilovic et al., 1983). During that research, organo-petrographic and geochemical analyses of kerogen and bitumen were made of the Pre-Badenian, Badenian and Sarmatian sediments from all five exploratory wells (Ercegovac & Vitorovic, 1984). During 1995, new kerogen maturity data was obtained by vitrinite reflectance measurements.

The reconstruction of burial history of the Markovac depression's Tertiary sediments has been made on the basis of the evidence of the stratigraphic boundaries from exploratory wells, of the available structure contour map on the base of Tertiary (Bundaleski, 1986) and of the recent data concerning the maximum thickness of the Tertiary complex (Kurbalija et al., 1989). On the basis of the well-logs analysis from the broader exploration area, the porosity–depth coefficients and initial surface porosity of the relevant stratigraphic units were determined, and the pelites/psamites ratio was estimated for the deepest (undrilled) part of the depression. With these data and a computer program made according to the algorithm published by Allen & Allen (1990), the decompaction of sediments was performed and a 1D (Fig. 3) and a 2D backstripping models were made (Fig. 2).

RESULTS OF THE INVESTIGATION

Vitrinite Reflectance (%Rr) Measurements

All the results of the vitrinite reflectance measurements are shown in the Table 1 and Fig. 3.

The Pre-Badenian sediments are characterized by the mean reflectance of 0.50 %Rr. This is the mean value for the undivided Pre-Badenian deponates that are found at the depth interval of 1698–3308 meters. The Badenian sediments have a similar maturity level which corresponds to the reflectance of some 0.48 %Rr for the depth interval of 900–2206 meters. Although the Sarmatian sediments were not analyzed in detail, it was found that the organic matter in them is in the phase of early diagenesis (huminite reflectance of 0.32 %Rr).

Reconstruction of the Burial and Thermal History

The present knowledge on the geology of the Markovac depression indicates that the sedimentation in this area was generally continual, with faulting of varying intensity and age. At the end of the Pannonian, however, a hiatus occurred, and the sedimentation was re-established only in the Quaternary. Since there is no indication of any significant up-lifting or erosion in this area, the only specific event taken into consideration in the reconstruction of the burial history was the non-erosional hiatus from the end of Pannonian to the beginning of Quaternary.

In view of the absence of erosional phases, the lack of evidence of magmatic activity in the Markovac depression, and the fact that high heat flows may have existed only in the initial phase of the depression forming (when the sediments were at relatively small depth), it was concluded that the present-day temperatures are the maximum paleotemperatures as well, and that the present-day average geothermal gradient is representative enough. Hence, a uniform temperature grid was constructed for the reconstruction of the thermal maturity of the exploration area.

The most reliable data on the geothermal characteristics of the Markovac depression have been obtained from two DST measurements in the StS-1 well. They showed a temperature of 80 °C at the depth of 1430 m, and 106.8 °C at the depth of 2025 m (Fig. 3). Since the average annual surface temperature in this area is about 12 °C, the average geothermal gradient adopted for the whole depression is 4.7 °C/100 m (geothermal degree of 21.28 m/1°C) and the extrapolation was performed to the depth of 5000 meters.

Table 2 shows the thickness, relative depth, present-day temperatures and absolute age of the relevant chronostratigraphic units used for the model's parameters.

The backstripping section line of the Markovac depression passes through NS-1 and StS-1 wells and it comprehends the entire depression (Fig. 1). The burial history reconstruction, based on the established chronostratigraphic units, has been divided into the following periods: end of Pre-Badenian (16.5 MaBp), end of Badenian (12.8 MaBp), and of Sarmatian (11.6 MaBp) and Holocene (present). Absolute ages was established according to a valid scale for Central Paratethyan (Steininger et al., 1990). The backstripped sections make it possible to trace changes in the position and thickness of sediments of the individual chronostratigraphic units. The sections also show the changes of the position and the boundaries of the zone of possible petroleum generation (oil window). The boundaries of the oil window have been defined on the basis of the measured (%Rr) and calculated (EASY %Ro) values of vitrinite reflectance and of the TTI values.

Time–Temperature models (TTI, EASY %Ro)

Besides the TTI models (Lopatin, 1971; Waples, 1980, 1985), this paper presents the results of the first application in Yugoslavia of the modern kinetic approach "EASY %Ro" (Sweeney & Burnham, 1990), which is a new world-wide adopted basic model for the calculation of the maturity of kerogen. This model determines the huminite/vitrinite maturation degree on the basis of the temperature and duration of heating of the organic substance in sediments. Its specific feature is the use of the Arrhenius's first

order parallel reaction equation, each with its separate activation energy. This model was prepared for the use on the PC computers.

The constructed TTI models (Fig. 3) and EASY %Ro (Fig. 4) shows that the Pre-Badenian and deepest levels of the Badenian sediments in the Markovac depression have reached the sufficient maturity level for petroleum generation, while the later Badenian, Sarmatian and Pannonian sediments are still in the diagenesis stage. The vitrinite reflectance of 0.6 %Rr and TTI=12 was used for the onset of petroleum generation (kerogen type II-III), and 1.35 %Rr corresponds to the termination of petroleum generation.

In the area of Novo Selo and Rakinac (the central part of the depression) organic matter of earliest Pre-Badenian layers reached sufficient maturity for the oil generation 17 million years ago – during the Karpatian, and by now, the katagenetic stage has been reached not only by the Pre-Badenian but also by the earlier Badenian layers, now at the depth of over 2180 meters (Fig. 3). According to the TTI model, the Pre-Badenian sediments bellow 2900 meters has reached the final stage of oil generation as well.

StS-1 well is according to obtained results located at the fringe area of potentially generative depression, where only the deepest Pre-Badenian layers have reached sufficient maturity. The Kruševo wells (Kš-1 and Kš-2) are outside of the potential generation zone, since the maximum temperature and depth of the Tertiary sediments was not sufficient for the maturation of organic matter (maximum TTI is bellow 12).

The increase of vitrinite reflectance with depth, for the Tertiary sediments of the Markovac depression, according to the kinetic EASY %Ro model, is given in Fig. 4. It shows that the kerogen from the sediments at the relative depth of 2200 m has EASY %Ro of 0.6 %, and that the value at 3600 m is 1.35 %Ro, which corresponds to the oil window. The Sarmatian and Pannonian sediments have EASY %Ro values bellow 0.3 %, the Badenian sediments are characterized by range of from 0.3 to 0.62 %Ro, and Pre-Badenian sediments in the depocentre of depression have the maturity level of from 0.62 to 2.86 %Ro.

Correlation of the Thermal Maturity Parameters

The diagram in Fig. 5 shows the correlation of the various parameters applied in the determination of kerogen maturity in the Markovac depression.

The correlation of the maturation parameters in the Markovac depression shows that the results concerning the position of the upper limit of the oil window, obtained by the EASY %Ro model (2230 m) and TTI model (2180 m) are in full agreement (the difference of only 50 m). The vitrinite reflectance measurements (%Rr) also show good correlation with calculations in the first 2000–2500 meters, however, at greater depth there is no significant increase of reflectance. This could be explained at present as a consequence of the lack of representative huminite/vitrinite particles for the measurements and/or of specific turbidity sedimentation. Unfortunately, owing to the lack of deeper samples it has been impossible to construct a more representative statistical trend.

The results of the TTI and EASY %Ro models concerning the lower limit of oil window differ for some 700 meters. The EASY %Ro model indicate that this boundary is at around 3600 m, while the TTI model (if a value of 160 is adopted, as recommend-

ed by Waples, 1980, 1985) indicates the termination of oil generation at the depth of 2900 meters. It is important, however, to stress out that each exploration area requires specific calibration of TTI values with vitrinite reflectance, and in particularly for the higher maturity values.

At the diagram on the Fig. 5, organic matter maturity levels can also be correlated with a present–day temperature–depth increase. According to these data, the TTI model indicates that the present–day oil window in the Markovac depression corresponds to the temperature interval of 115–148 °C, while according to the EASY %Ro model, this range is 117–181 °C.

On the basis of all cited results, it can be concluded that present position of oil window generally corresponds to the relative depth interval 2200–3600 meters, that is to the temperature interval 116–180 °C.

CONCLUSION

By the application of an integral geological–geochemical model, the maturity of kerogen from the Pre–Badenian, Badenian and Sarmatian sediments in the Markovac depression was determined. The obtained results indicate that the Pre–Badenian and the deepest layers of the Badenian sediments (in the depocentre) have reached sufficient maturity for petroleum generation, while the sediments of the later Badenian, Sarmatian and Pannonian are still in the diagenetic stage. This also means that potential Tertiary source rock may be found in the central part of the depression below the depth of 2200 m, i.e. primarily within the Pre–Badenian complex. The earliest Badenian sediments which have reached sufficient maturity in the depocentre are only at the initial katagenetic stage, which is not conducive to a more substantial transformation of kerogen into petroleum.

The integral geological–geochemical model has shown, on the whole, good correlation between parameters used: %Rr, TTI and EASY %Ro. The obtained data on thermal maturity can now be applied for the calculation of overall volume of potential source rocks and the estimate of the total petroleum potential of the Markovac depression, which proves the practical value of the application of the integral geological–geochemical models in petroleum exploration.

Translated by A. Kostić

ЛИТЕРАТУРА – REFERENCES

- Allen P. & Allen J., 1990: Basin Analysis – Principles and Applications.– Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1–451.
- Bundaleski, 1986: Podunavlje–Pomoravlje – Strukturna karta po podini tercijara.– Tehnička dokumentacija "Jugopetrol–nafta", Beograd (nepublikovano – unpublished).
- Ерцеговац М. и Костић А. (=Ercegovac & Kostić), 1994. Геолошко–геохемијски модел матурације керогена у депресији Дрмно (Србија).– Геол. ан. Балк. полуос., 58/1, 215–232. Београд.
- Ercegovac M. i Kostić A., 1996: The kerogen maturity of the Neogene sediments in the Dmno depression (Kostolac, Serbia).– J. Serb. Chem. Soc. 61 (11), 1063–1069.

- Ерцеговац М. и Виторовић Д. (=Ercegovac & Vitorovic), 1984: Могућност генезе угљоводоника у терцијарним седиментима Поморавља и Подунавља (Србија).– Геол. ан. Балк. полуос., 48, 215–230. Београд.
- Kurbalija J., Pantic N., Jankovic P., Secerov P., Markovic V. i Bundaleski M., 1982: O tercijaru na osnovu dubokog bušenja između reka Jasenice i Rase.– Zbornik radova sa X jubilarnog kongresa geologa Jugoslavije, 1, 45–56, Budva.
- Kurbalija J., Maksimcevic S., Vdoviac B. i Kirin Z., 1989: Pregled rezultata i pravci budućih istraživanja na naftu i gas u SR Srbiji, južno reke Save i Dunava – Strucni casopis DIT "Naftagas", 15–16, 29–33, Novi Sad.
- Lopatin N. V., 1971: Temperature and geologic time as factors in coalification.– Akad. Nauk SSSR, Izv. Ser. Geol., 3, 95–106, Moskva, (prevod na engleski N. H. Bostic, Illinois State Geol. Survey, 1972).
- Mojzilovic S., Rakic M., Pavlovic Z. i Malešević M., 1983: Detaljna naftno–geoloska istraživanja na prostoru Smederevo–Azanja–Velika Plana u 1982–1983 godini.– Fond dokumenata Geoloskog zavoda, Beograd (nepublikovano – unpublished).
- Steininger F.F., Bernor R.L. and Fahlbusch V., 1990: European Neogene marine/continental chronological correlations. In: Lindsay et al. (Ed.) European Neogene Mammal Chronology.– Plenum Press, New York, 15–46.
- Sweeney & Burnham, 1990: Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics.– AAPG Bulletin, 74, 10, 1559–1570.
- Waples D. W., 1980: Time and Temperature in Petroleum Exploration: Application of Lopatin's Method to Petroleum Exploration.– AAPG Bull., 64/6, 916–927.
- Waples D. W., 1985: Geochemistry in Petroleum Exploration – International Human Resources Development Corporation, Boston, 154.