

**КОРИСНІ КОПАЛИНИ ОСАДОВИХ БАСЕЙНІВ;
СУЧАСНІ МЕТОДИ ЛІТОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ /
ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ ОСАДОЧНЫХ БАСЕЙНОВ;
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 553. 98. 041:551. 735. 735. 1 (477)

В.С. Куриленко, С.А. Мачулина, Е.П. Олейник

ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ГЕНЕРАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ВИЗЕЙСКОЙ ДОМАНИКОИДНОЙ ТОЛЩИ ДДВ

V.S. Kurilenko, S.A. Machulina, O.P. Oleynik

GRAPH-ANALYTIC METHOD OF THE ASSESSMENT OF THE GENERATING POTENTIAL OF THE VISEAN DOMANIC-LIKE SEDIMENTS IN THE DNIPRO-DONETS DEPRESSION

Описано схему перетворення органічної речовини і генерації вуглеводнів в умовах катагенезу із супровідними геохімічними характеристиками. За методом емпіричного балансового моделювання зроблено оцінку генераційного потенціалу візейських доманікоїдних порід — основної нафтогазопродукуючої товщі Дніпровсько-Донецької западини. Відповідно розрахункам, на межі МК₃–МК₄ перетворюється 59,5% органічної речовини, із якої лише 41,4% витрачається на утворення нафти і газу.

Ключові слова: катагенез, органічна речовина, вуглеводневий потенціал, доманікоїдна товща, балансовий метод, Дніпровсько-Донецька западина.

Описана схема преобразования органического вещества и генерации углеводородов в условиях катагенеза с сопутствующими геохимическими характеристиками. Методом эмпирического балансового моделирования произведена оценка генерационного потенциала визейских доманикоидных пород — основной нефтегазопроизводящей толщи Днепровско-Донецкой впадины. Согласно расчетам, на рубеже МК₃–МК₄ преобразуется 59,5% органического вещества, из которого всего 41,4% расходуется на образование нефти и газа.

Ключевые слова: катагенез, органическое вещество, углеводородный потенциал, доманикоидная толща, балансовый метод, Днепровско-Донецкая впадина.

The authors describe the transformation ways of organic matter and hydrocarbon generation under catagenesis conditions with corresponding geochemical characteristics. Using the empiric balance method, the assessment is made for the generating potential of the Visean domanik-like sediments, main oil and gas producing formation in the Dnipro-Donets Depression. It has been calculated that 59.5% of organic matter is transformed at the МК₃–МК₄ boundary but only 41.4% serve for oil and gas generation.

Keywords: catagenesis, organic matter, hydrocarbon potential, domanik-like sediments, balance method, Dnipro-Donets Depression.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование катагенетического преобразования осадочных пород имеет важное значение в нефтегазовой геологии, так как с ним связаны не только изменения физико-литологических и геохимических свойств нефтегазосодержащих комплексов, но и генерация углеводородов (УВ) из захороненного органического вещества (ОВ) в нефтегазопродуцирующих толщах. В результате исследований получены факты, описывающие **качественную** сторону процессов образования УВ, миграции и аккумуляции их в залежах. Для оценки потенциальных ресурсов нефти и газа новых перспективных геологических объектов (регионов, площадей, толщ), в том числе на больших глубинах, разработаны и широко применяются в практике методы сравнительного анализа, обладающие, однако, низкой точностью. Разработана новая методи-

ка прогноза и оценки ресурсов УВ, основанная на **количественном балансовом моделировании** процессов генерации нефти и газа [9]. Методика опробована при оценке ресурсов УВ Западно-Сибирского и Тимано-Печорского нефтегазоносных бассейнов с использованием количественной информации на всех этапах катагенеза [1]. Такой подход, основанный на эмпирическом балансовом моделировании с использованием **графической принципиальной схемы**, изложен в данной работе.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ УВ ПРИ КАТАГЕНЕЗЕ

В процессе геохимического преобразования ОВ на стадии **катагенеза** генерация углеводородных и негорючих газов, битумоидов и водорастворенных органических веществ характеризуется определенной стадийностью

и многофазностью, которым в вертикальном разрезе осадочных толщ отвечает зональность в образовании УВ. В связи с этим стадию катагенеза делят на начальную, среднюю и завершающую подстадии (прото-, мезо- и апокатагенез — ПК, МК и АК), которые, в свою очередь, подразделяют на градации, сопоставляемые с определенными марками углей Донбасса [4, 5]. Процессы генерации УВ по подстадиям детально описаны в специальной литературе [1, 2, 4, 6–10] и отражены на рис. 1. Отметим, что с подстадиями ПК и МК₁ связана **верхняя зона газообразования**; выделения метана здесь имеют двойственную природу в результате биохимического и термического разложения ОБ.

В **мезокатагенезе** процессы генерации УВ достигают максимума для всех типов ОБ. На градации МК₁–МК₃ приходится **главная фаза нефтеобразования** (ГФН — по Н.Б. Вассоевичу), главная зона нефтегенерации (ГЗНГ — по П.Ф. Шпаку) или «нефтяное окно» («oil window») [2, 4, 5, 6]. Температурный интервал для условий Днепровско-Донецкой нефтегазоносной области (ДДНГО) — от 90 до 190° С [5]. В конце мезокатагенеза (МК₄–МК₅) и начале апокатагенеза (АК₁) главными продуктами генерации становятся метан, его гомологи и легкие жидкие УВ — составные компоненты газоконденсатных природных систем. С данными градациями связана **главная (нижняя) зона газообразования** (рис. 1-А).

Основным фактором катагенетического изменения ОБ является температура [4, 10]. Кроме того, катагенетическое влияние имеют: геологическое время (учитывают при сравнении продуктивности разновозрастных толщ [6]), давление (сказывается на разных этапах катагенеза неоднозначно и в целом его роль негативна [4]), вмещающие породы (максимальной каталитической активностью обладают глины).

ОБОСНОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Важным аспектом проблемы УВ является определение количественных соотношений между жидкими и газообразными продуктами генерации ОБ на конкретных стадиях катагенеза. Основные направления исследований данного аспекта — эмпирико-аналитическое и экспериментальное. По первому направлению анализируют элементный состав ОБ и путем подбора вероятных образующихся подвижных соединений составляют уравнения материального ба-

ланса. Для контроля теоретических расчетов используют лабораторные данные по составу и количественным соотношениям продуктов генерации ОБ [4, 9].

В данной работе предложен *графо-аналитический способ* количественной оценки генерационного потенциала ОБ, в основу которого положена схема вертикальной зональности генерации УВ (рис. 1). Схема составлена для расчета УВ-потенциала визейских доманикоидных пород (так наз. рудовских слоев тульского горизонта), являющихся основной нефтегазопроизводящей толщей нижнекаменноугольных отложений ДДНГО [3]. При составлении схемы использованы материалы Б.Н. Вассоевича, В.А. Успенского и А.Э. Конторовича, а также С.Г. Неручева с соавторами, И.И. Нестерова и др. [1, 2, 4, 8, 9, 10], а из украинских геологов — Б.П. Кабышева, А.Е. Лукина, П.Ф. Шпака, В.С. Яценко и др. [5].

В расчетах используют не числовые значения интенсивности генерации УВ (они индивидуальны для каждого объекта), а относительное изменение ее уровня по мере погружения и прохождения нефтегазопродуцирующей толщей последовательных этапов катагенеза. Поэтому горизонтальная ось не градуирована, ее размерность — некоторое количество УВ (%), сгенерированных при увеличении температуры на 1° С (рис. 1-А). Смысловую нагрузку несут площади фигур, заключенные между кривыми интенсивности и вертикальной осью температур. Эти площади пропорциональны полному генерационному потенциалу ОБ и его составляющим — произведенному количеству жидких и газообразных УВ и сумме негорючих газов. Части этих фигур, разделенные горизонтальными температурными границами, пропорциональны потенциалу ОБ на каждом этапе катагенеза.

Баланс веществ рассчитан для всех градаций катагенеза (от кровли ПК до подошвы АК₃), при прохождении которых ОБ в результате деструкции и геохимических преобразований теряет 80% своей массы (по В.А. Успенскому [4]), в том числе на генерацию жидких и газообразных УВ — 20 и 40% соответственно, негорючих газов — 20%. ОБ на стадии диагенеза и подстадии ПК, теряет 24,5% своей массы, на подстадиях МК и АК — соответственно 50 и 5,5%. Приведенные процентные соотношения находят отражение в площадях фигур на рис. 1-А и на кумулятивных кривых рис. 1-Б.

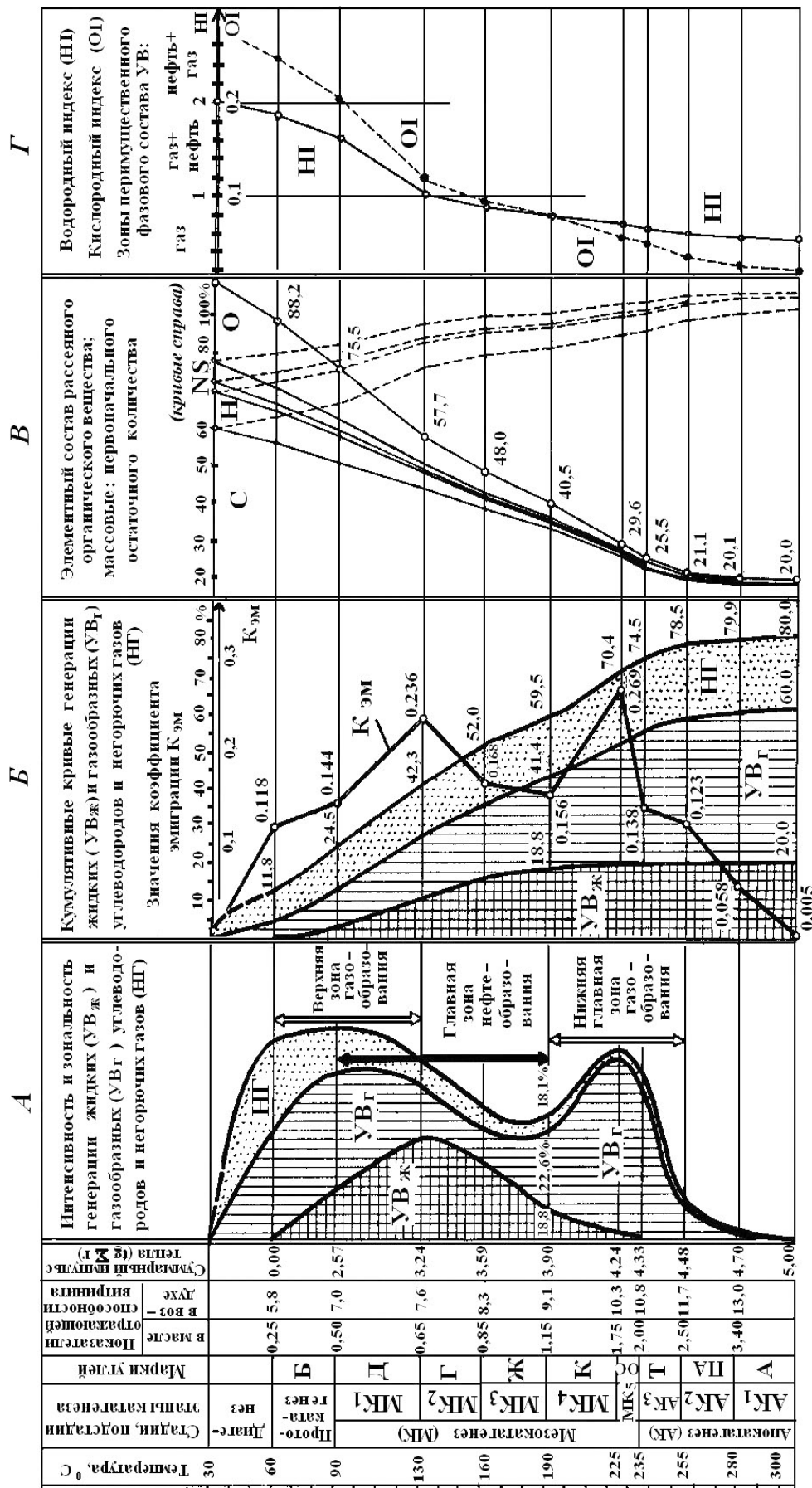


Рис. 1. Схема зонального преобразования органического вещества в жидкие и газообразные углеводороды и негорючие газы с сопутствующими характеристиками (А, Б), элементный состав (В), водородный и кислородный индексы (Г)

Коэффициент эмиграции, рассчитанный по формуле

$$K_{эм} = (УВ_{ж} + УВ_{г} + НГ) / ОВ,$$

имеет максимальные значения для границ МК₁–МК₂ (0,236) и МК₄–МК₅ (0,269), которые соответствуют главным зонам нефте- и газообразования (рис. 1-Б). В данной формуле: УВ_ж, УВ_г и НГ — количества жидких и газообразных УВ, а также негорючих газов, сгенерированных в конце каждой градации катагенеза; ОВ — количество ОВ в начале данной градации. Элементный состав ОВ соответствует результатам исследований В.В. Ильинской и Т.П. Кулаевой [7]: содержание углерода — 72–75%, водорода — 6,7–7,5% в условиях катагенеза ПК–МК₂ свидетельствует о смешанном типе керогена с преобладанием сапропеля.

На рис. 1-В показано изменение элементного состава начального и остаточного количеств ОВ, а на рис. 1-Г — изменение водородного (НI) и кислородного (ОI) индексов, позволяющих прогнозировать фазовый состав УВ [6]. Индексы вычислены с учетом атомных масс водорода (A_H=1), кислорода (A_O=16) и углерода (A_C=12) по формулам

$$НI = (q_H : A_H) / (q_C : A_C) \quad \text{и} \quad ОI = (q_O : A_O) / (q_C : A_C),$$

где q_H, q_O, q_C — содержание соответствующих элементов в пробе битумоида (%).

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

Основная масса рудовской толщи прошла ГЗНГ (градации МК₁–МК₃) [3, 5]. Поэтому нами рассмотрен баланс веществ на рубеже этапов МК₃ и МК₄. На этом рубеже 59,5% ОВ уже превратилось в жидкие и газообразные УВ (соответственно 18,8 и 22,6%) и негорючие газы (18,1%). Остаточное количество ОВ в породе — 40,5%.

Рудовская доманикоидная толща по каротажным данным четко прослеживается почти по всей территории ДДНГО (рис. 2). Ее мощность составляет 35–65 м. Сравнительный анализ рудовской толщи с нефтегазоматеринскими толщами Западной Сибири (баженитами), Тимано-Печорской провинции (доманикитами) и Северной Америки (сланцы Чаттануга, Вудфорд) подтверждает её нефтегазоматеринскую природу. Толща представлена тонкослоистыми кремнисто-глинистыми породами черного цвета с прослоями силицитов (фтанитов), реже — известняков. Аргиллиты этих пород тонко-

дисперсные, неравномерно известковистые, алевропелитовой структуры. Среди глинистых минералов преобладают гидрослюды, монтмориллонит. Содержание пирита колеблется от 5 до 15%, реже до 30%, что свидетельствует о восстановительных и резковосстановительных геохимических условиях осадконакопления. Для всех литотипов характерны повышенная радиоактивность и содержание рассеяного ОВ гумусово-сапропелевого типа. Содержание C_{орг} в них колеблется от 3,5 до 8%, в кремнисто-глинистых разностях — 6–8%, реже — 10–13%.

Для расчетов приняты: содержание органического углерода в породе C_{орг}=4,5%, битумоидов в органическом веществе — 3,0%; остаточное количество битумоидов в породе — 0,135%. Согласно карте изопахит рудовской толщи (составлена С.А. Мачулиной), площадь распространения ее составляет 40 тыс. км² (рис. 2). При средней толщине 35 м объем равен 1400 км³, а масса при средней плотности пород 2,3 т/м³ — 3220·10⁹ т. Остаточная масса битумоидов при их содержании 0,135% — 4,35·10⁹ т. Из пропорции

$$4,35 \cdot 10^9 / 40,5 = ОВ_{ген} / 59,5 = УВ_{ж} / 18,8 = УВ_{г} / 22,6$$

следует, что масса преобразованных ОВ составляет 6,39·10⁹ т, в том числе сгенерировано жидких УВ — 2,02·10⁹ т и газообразных — 2,43·10⁹ т.

Из этих огромных количеств сгенерированных УВ концентрируется в ловушках лишь незначительная часть (от 1–2 до 20% [4, 8]), а преобладающая — рассеивается на путях миграции в породах и пластовых водах. Находясь в ловушках, УВ продолжают убуывать под воздействием множества факторов. Вопросы миграции, формирования и сохранности залежей УВ составляют самостоятельную и не менее сложную проблему, чем генезис УВ. Поэтому данную работу и приведенные в ней балансовые расчеты следует считать начальной и составной частью комплекса количественного определения потенциальных ресурсов УВ применительно к условиям ДДНГО.

ВЫВОДЫ

1. Составлена схема вертикальной зональности генерации УВ (в сумме и отдельно по фазам) и сопутствующих продуктов. Принципиально новым является графо-аналитический способ количественной оценки объемов продуктов генерации — по площадям фигур

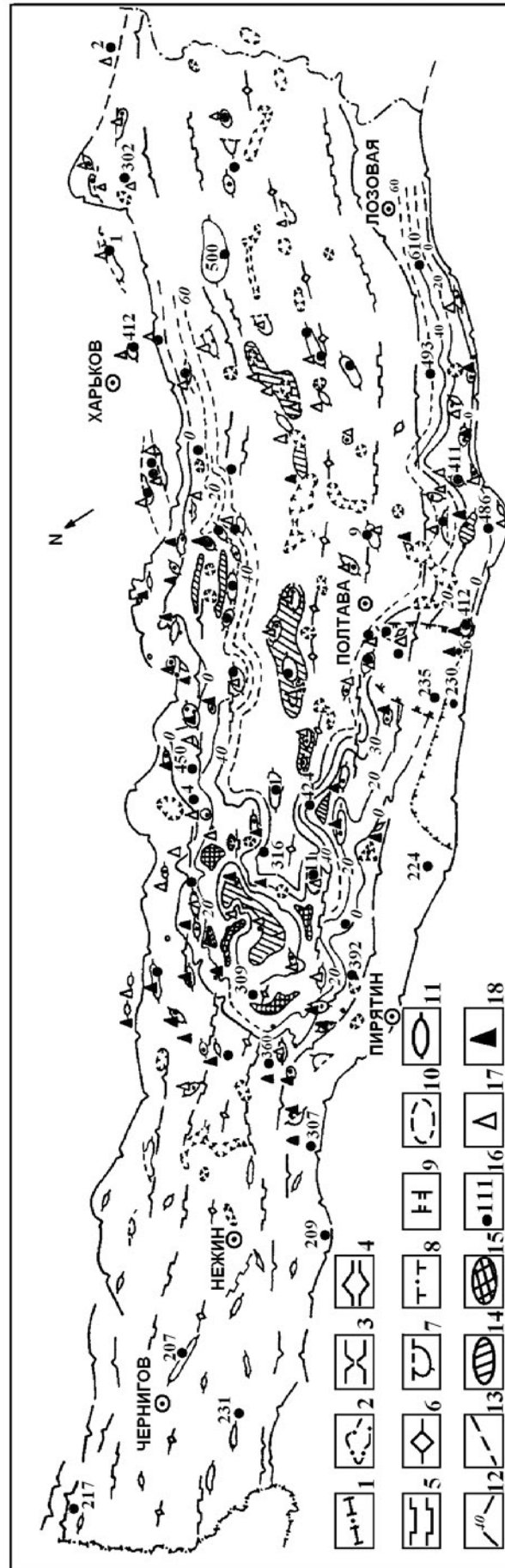


Рис. 2. Карта изопакит рудовской доманикоидной толщи (по Мачулиной С.А.)

1 — граница с Беларусью; 2 — областная граница. Глубинные разломы: 3 — южный и северный краевые; 4 — внутренние разломо-пары; 5 — приосевые; 6 — осевой; 7 — разрывные нарушения; 8 — разлом Белоцерковского выступа фундамента; 9 — зона размыва рудовских слоев; 10 — контур соляного штока; 11 — положительная структура; изопакиты: 12 — достоверные; 13 — требующие уточнения; 14 — участки с толщинами 15-25 м; 15 — участки с толщинами 40-50 м; 16 — скважина и ее номер. Основные месторождения: 17 — газоконденсатное; 18 — нефтяное и нефтегазоконденсатное.

между кривыми интенсивности генерации и градационными границами. Зная остаточную массу органического вещества в породе, можно оценить количество сгенерированных УВ. Путем эмпирического балансового моделирования определен элементный состав остаточного ОВ поэтапно. Рассчитаны значения водородного и кислородного индексов.

2. Разработанный способ впервые опробован при расчете баланса веществ на рубеже градаций $МК_3$ – $МК_4$ для рудовской доманикоидной толщи Днепровско-Донецкой впадины. Согласно расчетам масса преобразованных ОВ равна $6,39 \cdot 10^9$ т (59,5% начального количества ОВ), в том числе жидких и газообразных УВ — $2,02 \cdot 10^9$ т и $2,43 \cdot 10^9$ т соответственно. Остаточная масса ОВ — 40,5%.

3. Большая часть сгенерированных УВ разрушается от воздействия многих факторов при миграции и аккумуляции их в залежах. Учитывая сложность проблем генезиса УВ, формирования и сохранности залежей нефти и газа, приведенные расчеты представляются начальной и составной частью комплекса количественного определения потенциальных ресурсов УВ — перспективного и важного научного направления в нефтегазовой геологии.

1. Баженова Т.К., Шиманский В.К., Смирнов С.В. и др. Геохимическое картирование осадочных бассейнов России в свете оценки потенциала их нефтегазоносности // Литологические и геохимические основы прогноза нефтегазоносности. СПб.: ВНИГРИ, 2008. — С. 28–37.

2. Вассоевич Н.Б. Геохимия органического вещества и происхождение нефти. Избранные труды. — М.: Наука, 1986. — 336 с.
3. Гавриш В.К., Мачулина С.А., Куриленко В.С. Визейская нефтегенерирующая толща Днепровско-Донецкой впадины // Геол. і геохім. горюч. копалин. — 1993. — № 2–3. — С. 62–72.
4. Геология и геохимия природных горючих газов: Справочник / Ермаков В.И., Зорькин Л.М., Скоробогатов В.А., Старосельский В.И.; ред. Высоцкий И.В. — М.: Недра, 1990. — 317 с.
5. Геология и нефтегазоносность / Кабышев Б.П., Шпак П.Ф., Билык О.Д. и др.; отв. ред. Шпак П.Ф.; АН УССР. Ин-т геологических наук. — Киев: Наук. думка, 1989. — 204 с.
6. Дж. Хант. Геохимия и геология нефти. — М.: Мир, 1982. — 704 с.
7. Ильинская В.В., Кулаева Т.П. Особенности состава органического вещества палеозойских пород Днепровско-Донецкой впадины и характер нефтегазообразования // Нефтематеринские свиты и принципы их диагностики. — М.: Наука, 1979. — С. 155–160.
8. Нестеров И.И. Генезис и формирование залежей углеводородного сырья // Геология нефти и газа / Ред. Еременко Н.А. — М.: Недра, 1984. — 480 с.
9. Оценка потенциальных ресурсов углеводородов на основе моделирования процессов их генерации, миграции и аккумуляции / Неручев С.Г., Баженова Т.К., Смирнов С.В. и др. — СПб.: Недра, 2006. — 364 с.
10. Справочник по геологии нефти и газа / Ред. Еременко Н.А. — М.: Недра, 1984. — 480 с.

Институт геологических наук НАН Украины, Киев

Рецензент — чл.-корр. НАН Украины А.Е. Лукин