

Палеогеотермические и палеотектонические реконструкции по данным витринитовой термометрии (на примере верхнепалеозойских отложений Днепровско-Донецкой впадины и прилегающих частей Донбасса)

А. В. Иванова, В. Б. Гаврильцев, 2021

Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 4 февраля 2021 г.

Статья посвящена палеогеотермическим и палеотектоническим реконструкциям по результатам обработки массива данных показателей отражения витринита угольной органики верхнепалеозойских отложений Доно-Днепровского прогиба (в пределах Днепровско-Донецкой впадины и прилегающих частей Донбасса). Установлено, что палеогеотермические показатели изменялись под влиянием геотектонических, магматических и литофациальных условий формирования верхнепалеозойских отложений. Анализ изменений и закономерностей распределения палеогеотермических характеристик дал возможность оценить эволюцию теплового поля, изменения характера тектонических движений, выявить роль вулканизма, геодинамики глубинных разломов, мощности литосферы в термальной истории исследуемого региона. Показано, что с помощью палеоструктурного анализа, опирающегося на данные о степени зрелости угольной органики, можно судить об изменениях активности тектонических структур во времени, последовательности формирования этих структур, устанавливать амплитуды их взаимного перемещения и дифференцировать по перспективности на нефтегазоносность. По результатам проделанной работы построены карты распределения палеогеотермических градиентов и амплитуд вертикальных перемещений породных массивов. Представленные карты следует рассматривать как универсальный информационный материал, который может быть использован с целью определения особенностей регионального распределения означенных параметров, а также стать важным инструментом в исследовании тектонической и термальной истории, выявлении тенденций изменений и закономерностей распределения палеогеотермических характеристик.

Ключевые слова: витринитовая термометрия, уголь, органическое вещество, палеогеотермические и палеотектонические реконструкции, палеогеотермический градиент, амплитуды вертикальных перемещений.

Вступление. Исследования теплового и палеотеплового состояния недр имеют важное значение для решения как прикладных, так и теоретических задач геологии. Тесная связь теплового потока с геодинамической обстановкой недр дает возможность считать тепловое поле и его отдельные показатели индикаторами геологических событий, что позволяет по изменениям во времени теплового режима воспроизводить термальную историю раз-

вития исследуемого региона, его тектоническую эволюцию, изменения характера тектонических движений и магматизма, режимы углефикации органического вещества (ОВ), условия формирования месторождений полезных ископаемых, в частности углеводородных и т. д.

Палеогеотермические исследования являются надежным инструментом изучения осадочных бассейнов. Благодаря установленной взаимосвязи между преобразова-

ниями витринита и палеотемпературами [Аммосов, Тан, 1961 и др.] они нашли особенно широкое применение в нефтегазовой геологии [Иванова, 1975; Штах и др., 1978; Аммосов, 1987; Burnham, Sweeney, 1989; Corcoran, Clayton, 2001; Коробов и др., 2009; Emujakporue et al., 2019 и др.].

Целью настоящего исследования является, в частности, выяснение роли герцинского цикла тектогенеза в тектоническом и геотермическом развитии Доно-Днепровского прогиба (в пределах Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ) и прилегающих частей Донбасса) путем определения и анализа палеогеотермических градиентов, соответствующих палеотемпературам осадочного чехла верхнепалеозойского этапа развития региона, и амплитуд вертикальных перемещений структур. Определение величин этих показателей и их региональное распределение дает возможность оценить эволюцию теплового поля региона, прогнозировать наличие углеводородных месторождений и решать некоторые задачи палеоструктурного анализа.

Изучению палеогеотермических условий недр ДДВ с помощью витринитовой термометрии с построением схематических карт изореспленд посвящены работы А. В. Ивановой [Иванова, 1975; 1976 и др.], А. Е. Лукина [Атлас..., 1984], Н. П. Гречишников [Гречишников, 1987].

Первые схематические карты палеогеотермических градиентов ДДВ были построены по разработанной А. В. Ивановой методике в 80—90-х годах [Иванова, 1989, 1991] и позже использованы В. В. Гордиенко с соавторами для изучения распределения палеотемператур пород осадочного чехла ДДВ [Гордиенко и др., 2006].

Витринитовая термометрия использовалась В. А. Приваловым и В. В. Гордиенко с соавторами при реконструкции тектоно-термальной эволюции Донбасса [Гордиенко, Усенко, 2003; Привалов, 2004; Гордиенко и др., 2015].

Методика обработки данных витринитовой термометрии. Для реконструкции палеогеотермических и палеотектонических обстановок была предложена мето-

дика определения палеогеотермических градиентов и мощностей денудированных пород [Иванова, 1992; Иванова, Гаврильцев, 2010], основанная на принятии ведущей роли температуры на процесс углефикации и линейной зависимости температуры от глубины.

Приоритет температуры как основного фактора изменения ОБ признается большинством геологов [Barker, Pawlewicz, 1986; Аммосов, 1987; Забигаило, Лукинов, 1989; Corcoran, Clayton, 2001; Привалов, 2004; Баженова, 2008; Emujakporue et al., 2019 и др.]. В частности, исследованиями Ч. Баркера [Barker, Pawlewicz, 1986; Barker, 1988] значительного количества геологических объектов показано, что термическое созревание ОБ стабилизируется через 10^4 — 10^7 лет после максимального нагрева. К концу этого геологически короткого отрезка времени показатель отражения витринита (ПОВ) теряет зависимость от времени, в дальнейшем зависит только от максимальной температуры T_{max} и может рассматриваться как максимальный геотермометр. При этом степень преобразования ОБ угольного ряда, а следовательно и ПОВ, носит необратимый характер.

Оценка палеотемператур может проводиться различными методами: опираясь на современные геотермические условия; по ПОВ, соответствующим современным температурам в областях современного преобладающего прогибания; по катагенетическим преобразованиям глинистых минералов; по данным гомогенизации газожидких включений; по изотопным исследованиям кислорода в карбонате кальция и воде и т. д. [Левенштейн, 1963; Богомолов и др., 1981; Канана, 1985; Barker, Pawlewicz, 1986; Velde et al., 1986 и др.; Аммосов, 1987; Степанов, 1987; Barker, 1988; Sakaguchi, 1996]. В частности, Ч. Баркер [Barker, 1988] использовал линейную регрессию для обработки массивов данных из областей современного преобладающего прогибания, характеризующихся максимальной точно установленной температурой. Полученная в результате зависимость максимальной температуры T_{max} и значений ПОВ (R_0) в

виде уравнения $\ln(R_0)=0,0096(T_{\max})-1,4$ дает, по данным автора, реалистичные оценки палеотемператур, и полученные по этой формуле результаты совпадают с другими геотермометрами.

В приведенной таблице дано сопоставление шкалы углефикации по М. Б. Вассоевичу [Вассоевич, 1986] с ПОВ и палеотемпературами преобразования ОБ, установленными рядом исследователей.

Сравнивая приведенные данные, можно констатировать, что все предложенные варианты шкал в большей или меньшей степени согласовываются между собой. Исключение составляет шкала, полученная по температурам гомогенизации газожидких включений в галите, кальците и доломите и характеризующаяся явно завышенными значениями [Богомолов и др., 1981]. Возможно авторами были исследованы вторичные включения, возникшие в результате более поздней гидротермальной деятельности. Кроме того, установлено, что на информативность указанных показателей влияет целый ряд факторов, искажающих полученные результаты (диффузия вещества сквозь кристалличе-

скую решетку минерала, перенаполнение включений, радиолиз и радиоактивный распад включений и т. д. [Возняк, 1988]).

Авторы используют в качестве наиболее обоснованной, с их точки зрения, шкалу, предложенную Ю. В. Степановым [1987], который воспользовался методом сопоставления палеотемператур с современными температурами в глубоких скважинах, расположенных в областях преобладающего прогибания (в депрессиях молодых платформ мезо-кайнозойского возраста), где ПОВ соответствует современным температурам. Он откорректировал полученную для современных депрессий термограмму, сопоставив ее с надежно установленными глубинами палеопогружений углей установленных стадий метаморфизма (для пермских отложений Печорского бассейна).

Определение палеогеотермических показателей осуществлялось по степени зрелости угольной органики в образцах угля и пород с включениями угольного вещества девонского, каменноугольного (преимущественно) и незначительного количества мезо-кайнозойского возраста [Иванова,

Т а б л и ц а . Сопоставление шкалы углефикации с ПОВ и палеотемпературами преобразования ОБ

| Шкала углефикации [Вассоевич, 1986] | | Шкалы палеотемператур, °С | | | | | | |
|-------------------------------------|------------|---------------------------|------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|---------------|
| Градации (марки) | R_0 , % | Левенштейн [1963] | Богомолов и др. [1981] | Канана [1985] | Вассоевич [1986] | Аммосов [1987] | Степанов [1987] | Баркер [1988] |
| Б ₁ | менее 0,30 | | | | | | | |
| Б ₂ | менее 0,40 | | менее 245 | менее 50 | менее 60 | менее 90 | менее 90 | 73,6 |
| Б ₃ | менее 0,50 | | | | | | | |
| Д | менее 0,65 | 70—90 | 245—310 | 50—80 | менее 80 | 90—130 | 90—126 | 101,0 |
| Г | менее 0,85 | 100—120 | 310—347 | 80—110 | менее 115 | 130—160 | 126—154 | 128,9 |
| Ж | менее 1,15 | | 347—382 | 110—120 | менее 135 | 160—190 | 154—172 | 160,4 |
| К | менее 1,55 | | 382—400 | 120—140 | менее 150 | 190—225 | 172—185 | 191,5 |
| ОС | менее 2,00 | 150—180 | более 400 | | менее 165 | 225—235 | 185—192 | 218,0 |
| Т | менее 2,50 | | | 140—155 | менее 180 | 235—255 | 192—216 | 241,3 |
| ПА | менее 3,50 | 190—240 | | 155—190 | менее 210 | 255—280 | 216—245 | 276,3 |
| А | более 3,50 | менее 300—350 | | 190—270 | менее 300 | более 280 | более 245 | |

2012]. Степень углефикации гомогенной и рассеянной угольной органики в целом подчиняется одной закономерности и в равной степени может служить показателем геотермического режима прошлого. Измерение ПОВ в отраженном поляризованном свете в воздухе (R_a) и масле (R_o) проводилось А. В. Ивановой в Институте геологических наук НАН Украины.

Для проведения палеогеотермических реконструкций А. В. Ивановой была разработана методика обработки данных витринитовой термометрии [Иванова, 1992], по результатам которой была построена первая схематичная карта палеогеотермических градиентов ДДВ [Иванова, 1989; Иванова, 1991]. Методика предусматривала графические способы обработки данных. Для удобства интерпретации была построена палетка-номограмма зависимости ПОВ от глубины для различных палеогеотермических градиентов, с помощью которой путем наложения и сравнения определялись палеогеотермические градиенты, палеоглубины достижения максимальных палеотемператур, амплитуды вертикальных перемещений породных массивов (ΔH), а также проводилась интерполяция

и экстраполяция значений ПОВ для глубин, не охарактеризованных фактическим материалом. Амплитуды вертикальных перемещений породных массивов, положительные значения которых соответствуют мощностям эродированных пород, определялись как разница палеоглубины и современной глубины нахождения образца.

В отличие от предыдущих отечественных методик [Левенштейн, 1963; Канана, 1985; Степанов, 1987] предложенная методика обработки данных витринитовой термометрии не ограничена условием постоянства палеогеотермического режима в пределах территории исследования и связанными с этим недостатками.

Позже была разработана компьютерная программа обработки данных витринитовой термометрии [Иванова, Гаврильцев, 2010]. Алгоритм построен на нормализации множества точек данных ПОВ с разных глубин функцией зависимости ПОВ от палеотемпературы в соответствии с выбранной шкалой, последующей аппроксимацией методом наименьших квадратов (МНК) нормализованного массива точек прямой, представляющей собой, фактически, зависимость следующего вида:



Рис. 1. Карта фактического материала и схема тектонического районирования Доно-Днепровского прогиба в пределах Украины: 1 — краевые нарушения; 2 — границы поперечного деления ДДВ (буквы в кружках — главные сегменты в пределах ДДВ: Чн — Черниговский, Лх — Лохвицкий, Из — Изюмский, Дб — Донбасс [Старостенко и др., 2017а]); 3 — границы центрального рифта ДДВ; 4 — скважины с данными ПОВ.

Fig. 1. The factual material map and the scheme of tectonic zoning of the Don-Dnieper Downwarp within Ukraine: 1 — border failures; 2 — boundaries of the transverse division of the Dnieper-Donets Depression, letters in circles are the main segments within the Dnieper-Donets Depression: Чн — Chernigovsky, Лх — Lokhvitsky, Из — Izyumsky, Дб — Donbass [Starostenko et al., 2017a]; 3 — boundaries of the Dnieper-Donets Depression central rift; 4 — wells with vitrinite reflectance data.

$t_H = t_0 + \mu(H + \Delta H)$, где t_H — палеотемпература, t_0 — температура нейтрального слоя, μ — палеогеотермический градиент, H — современная глубина нахождения образца, ΔH — амплитуда вертикального перемещения породного массива. Компьютерная обработка и привлечение большего количества данных ПОВ (2300 образцов по более чем 600 скважинам) позволили выйти на новый уровень исследования (рис. 1).

Объект исследования. Геоструктурная позиция и геотектоническое развитие региона. Тектоническое строение Доно-Днепровского прогиба, в состав которого входят ДДВ и Донбасс (см. рис. 1), обусловлено его положением на юге Восточно-Европейской платформы как внутриплатформенной структуры, расположенной между Украинским щитом и Воронежским кристаллическим массивом (рис. 2).

Вопросы о тектонической природе, истории развития, в частности о времени заложения рифта, инверсии и формиро-

вании складчатости Донецкого сегмента Доно-Днепровского прогиба, строения Донецкого бассейна и его переходных зон и соотношении с окружающими структурами, роли в рифтогенезе горизонтальных движений растяжения, сжатия и вертикальных напряжений и т. п. не решены однозначно.

По представлениям многих современных исследователей Доно-Днепровский прогиб является частью внутриконтинентальной рифтовой системы, включающей также Припятскую впадину и вал Карпинского. Формирование прогиба связывается с герцинской фазой тектогенеза, а именно со средним девонем, в связи с чем рифейские и нижнепалеозойские отложения в нем отсутствуют [Рослий, 1985; Кутас, Бевзюк, 1992; Кутас, Цвященко, 1993; Кутас, Пашкевич, 2000; Стомба, Стифенсон, 2000; Рослий, 2001; Привалов, 2004; Рослий, Стрижак, 2008; Соловьев, 2011]. По мнению других исследователей,



Рис. 2. Геоструктурная позиция Доно-Днепровского прогиба как внутриплатформенной структуры: 1 — Зона Тейсейра-Торнквиста, 2 — Доно-Днепровский прогиб, 3 — Украинский щит, 4 — Воронежский массив.
 Fig. 2. Geostructural position of the Don-Dnieper Downwarp as an intra-platform structure: 1 — Teisseyre-Tornquist Zone, 2 — Don-Dnieper Downwarp, 3 — Ukrainian shield, 4 — Voronezhsky massif.

Днепровско-Донецкий авлакоген наследует рифейский рифт, выполненный рифейскими или рифей-нижнепалеозойскими отложениями [Соллогуб и др., 1977; Чирвинская, Соллогуб, 1980; Чекунов, 1994; Гордиенко, 1995; Гордиенко и др., 1999; Усенко, 2002; Гордиенко и др., 2006; Айзберг, Старчик, 2013].

Большинством авторов предпочтение при формировании рифта отдается процессам растяжения. По мнению Р. И. Кутаса и И. К. Пашкевич [Кутас, Пашкевич, 2000], напряжения растяжения преобладали как на этапе развития рифта, так и осадочного бассейна (с конца среднего девона до поздней перми). С. Н. Стовбой [Стовба, 2008], который считал тектонический режим растяжения или растяжения со сдвигом доминирующим при рифтогенезе, выделены и охарактеризованы три относительно кратковременные фазы пострифтового растяжения земной коры в ДДВ и Донбассе (в начале позднего визе, в середине серпуховского века и на рубеже карбона и перми), а также одна фаза сжатия (на рубеже мезозоя и кайнозоя). В отличие от указанных авторов, А. Н. Истомина [Истомин, Евдошук, 2002] основную роль в формировании ДДВ, в том числе и Днепровско-Донецкого рифтогена, отводит напряжениям субгоризонтального сжатия.

Не оспаривается и роль мантийного диапиризма как процесса, сопровождавшего рифтогенез [Кутас, Бевзюк, 1992; Кутас, Цвященко, 1993; Стовба, 2008]. В. И. Старостенко с соавторами [Старостенко и др., 2017б] полагает, что Днепровско-Донецкий палеорифт сформирован в результате «суммарного эффекта» пассивного (растяжение коры со сдвигом под влиянием внешних сил с предварительным нагревом) и активного (пульсирующий подъем астеносферы, формирование диапира) этапов рифтогенеза. В отличие от указанных авторов, В. К. Гавриш [Гавриш, 1974] связывал возникновение Доно-Днепровского прогиба с мантийным диапиризмом и растяжением земной коры в сводовой части поднятия.

По данным ряда авторов, опирающихся на сейсмические и геотермические исследования [Усенко, 2002; Стовба, 2008], ДДВ и Донбасс на протяжении позднего палеозоя были единой геологической структурой, которая формировалась под воздействием схожих геодинамических факторов. На дорифтовом этапе образовалась синеклизная зона, где происходило накопление терригенно-карбонатных и терригенно-вулканических образований и началось соленакопление (франкский век позднего девона). Конец франкского века ознаменовался началом рифтового этапа, который характеризовался образованием блоков, формированием горстов и грабенных, накоплением синрифтовых терригенно-карбонатных, галогенных и вулканических пород мощностью от 3,5 км на северо-западе ДДВ до 8 км в Донбассе и денудацией осадочных отложений на поднятых массивах. На этой стадии произошел интрузивный магматизм с проникновением в кору мантийных расплавов.

С точки зрения В. В. Гордиенко с соавторами [Гордиенко и др., 2006], в девоне ДДВ и Донбасс не были единой структурой. Это аргументируется как разным темпом осадконакопления в их пределах, так и различным характером и происхождением магматических пород, которые формировались на разных глубинах и в разное время.

Бретонская фаза герцинского тектогенеза (граница D-C) ознаменовалась размывом верхнедевонских отложений, на которых с перерывом залегают турнейско-нижневизейские образования. Этот региональный перерыв характерен как для ДДВ, так и для Донбасса (рис. 3).

Начало пострифтового синеклизного этапа развития региона приходится на турнейский век [Геология..., 1989; Стовба, 2008] — верхневизейское время [Чирвинская, Соллогуб, 1980; Рослый, 1985; Кутас, Бевзюк, 1992; Гордиенко и др., 2006] каменноугольного периода. По данным [Misch et al., 2015], всплеск мощности теплового потока, начавшегося в конце франкского века, завершился к концу нижневизейско-

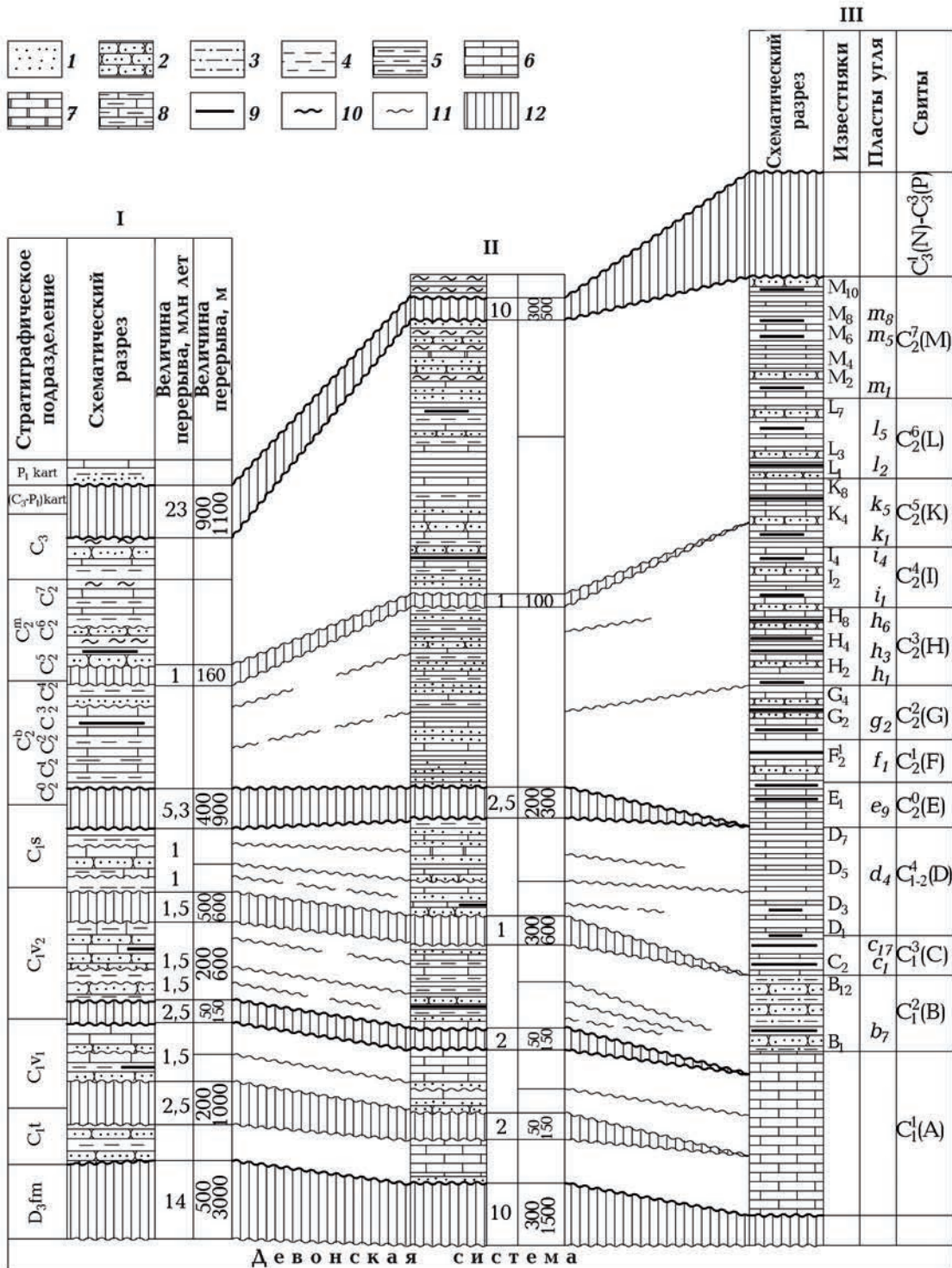


Рис. 3. Схема стратиграфических перерывов и несогласий в разрезе карбона Доно-Днепровского прогиба [Вакарчук, Гавриш, 1991] с некоторыми исправлениями и изменениями авторов: I — северо-западная часть ДДВ (Чернигов), II — юго-восточная часть ДДВ (Полтава), III — Донецкий бассейн (Донецк); 1 — пески, 2 — песчаники, 3 — алевриты, 4 — глины, 5 — аргиллиты, 6 — известняки, 7 — доломиты, 8 — известняки глинистые, 9 — уголь, 10 — региональные перерывы и угловые несогласия, 11 — субрегиональные и внутриформационные перерывы, 12 — отсутствие осадконакопления.

го времени, когда вероятно и начался синеклизный этап развития. С этого времени, по мнению Р. И. Кутаса и В. А. Цвященко [Кутас, Цвященко, 1993], в отличие от точки зрения С. Н. Стовбы [Стовба, 2008], единая структура палеорифта распадается на ряд самостоятельных бассейнов с неодинаковым строением, динамикой развития и характером осадконакопления — более спокойным синеклизного типа в пределах ДДВ и достаточно активным, вызванным интенсивным погружением, в Донбассе.

Судетская фаза (граница C_1-C_2) ознаменовалась поднятием южных прибрежных частей Доно-Днепровского прогиба и усилением погружения его центральной части. Восходящие движения, начавшиеся в западной части УЩ, привели на территории ДДВ к перерыву в осадконакоплении (см. рис. 2) [Кабышев, Вакарчук, 1971; Вакарчук, Гавриш, 1991].

Развитие прогиба в нижнем и среднем карбоне характеризовалось образованием в условиях парализованного режима терригенно-карбонатных угленосных отложений.

Активизация тектонических движений, связанная с **астурийской фазой** тектогенеза (граница C_2-C_3), привела к изменению условий осадкообразования и формированию в позднем карбоне толщи песчано-глинистых отложений с незначительным содержанием карбонатных и углистых пород [Геология..., 1988]. Углистые образования в отложениях верхнего карбона зафиксированы в Донбассе [Геология..., 1963], а также в пределах Изюмского и Донбасского сегментов [Иванова, 2012] (см. рис. 1). В конце карбона в Доно-Днепровском прогибе происходит постепенное угасание процессов угленакопления.

В пермский период формировалась толща песчано-глинистых и галогенно-кар-

бонатных пород морских, лагунных и континентальных фаций, выполнявших осевую часть ДДВ, а по данным П. И. Степанова [1944], также Бахмутскую и Кальмиус-Торецкую котловины Донбасса. В ДДВ единичные углепроявления и углистые включения в породах зафиксированы в пермских песчано-глинистых отложениях в сегментах от Лохвицкого до Донбасса [Иванова, 2012].

Тенденция Доно-Днепровского прогиба к погружению связана с однонаправленным длительным развитием краевых глубинных разломов, контролировавших развитие фациальных зон, в значительно меньшей степени — поперечных, определявших разломно-блоковую структуру фундамента и создававших геоморфологически выраженные впадины и поднятия [Попов, 1963; Пронин, 1969].

Заключительные фазы герцинского тектогенеза привели к формированию Донецкого складчатого сооружения, но единой точки зрения о времени его становления нет. Инверсию геотектонического режима Донбасса, которая сопровождалась процессами складкообразования, исследователи связывают: с тектоническими процессами в позднем карбоне [Яковлев, 1944], с уральской фазой на рубеже C_3-P [Лапкин, 1961; Майданович, Радзивилл, 1984; Гавриш, Мачулина, 2000; Рослий, 2001], тектоническими процессами в ранней перми [Нагорный, Нагорный, 1976; Разницин, 1976], заальской фазой на рубеже ранней и поздней перми [Привалов и др., 2001; Привалов, 2002; Sachsenhofer et al., 2012], тектоническими процессами в эпоху поздней перми [Соловьев, 2011], пфальцской фазой на рубеже $P-T$ [Кутас, Бевзюк, 1992; Кутас, Цвященко, 1993]. С. Н. Стовба [2008] считает, что на границе ассельского и сакмарского веков ран-

Fig. 3. Scheme of stratigraphic lost records and unconformities in the Carboniferous section of the Don-Dnieper Downwarp [Vakarchuk, Gavriush, 1991] with some corrections and changes by the authors: *I* — northwestern part of the Dnieper-Donets Depression (Chernigov), *II* — southeastern part of the Dnieper-Donets Depression (Poltava), *III* — Donets Basin (Donetsk); 1 — sands, 2 — sandstones, 3 — siltstones, 4 — clays, 5 — mudstones, 6 — limestones, 7 — dolomites, 8 — clayey limestones, 9 — coal, 10 — regional lost records and angular unconformities, 11 — subregional and intraformational lost records, 12 — no sedimentation.

ней перми произошло высокоамплитудное поднятие Донбасса и части ДДВ, но оно не было связано с процессами складчатости, которая сформировалась лишь во время киммерийской и альпийской фаз тектогенеза.

Точка зрения на инверсию Донбасса на рубеже С-Р подтверждается с позиций концепции седиментодиагенетического засоления углей и их эволюции под действием метаморфизма и изменения тектонического положения углепородного массива [Иванова, Кривега, 1985; Иванова, 2016]. Об этом свидетельствует и предраннепермский перерыв в ДДВ и Донбассе [Пронин, 1969; Вакарчук, Гавриш, 1991].

Киммерийский геотектонический цикл в пределах прогиба проявился локально, тектонические движения и повышение величины теплового потока и температур были более слабыми по сравнению с вызванными герцинским тектогенезом [Кутас, Цвященко, 1993; Усенко, 2002; Привалов, 2004; Гордиенко и др., 2006]. Вулканизм, проявившийся во время среднекиммерийского тектогенеза, зафиксирован только в пределах Мрынской структуры и в переходной зоне от ДДВ к Донбассу [Бугаенко, 1984; Гордиенко, 2006].

Альпийский цикл тектогенеза также не внес кардинальных изменений в тектоническое и геотермальное развитие региона, а режим современной активизации принципиально не отличается от киммерийской [Усенко, 2002; Привалов, 2004].

Для мезо-кайнозойских литолого-стратиграфических комплексов неосинеклизного периода, по И. С. Рослому [Рослий, 2001], характерна полого-синеклизная и субгоризонтальная форма залегания.

Результаты работы. Палеогеотермические и палеотектонические условия развития региона. Карты палеогеотермических градиентов. Для реконструкции палеогеотермических и палеотектонических обстановок палеозойского прогиба были задействованы данные ПОВ 2300 образцов из более чем 600 скважин, расположенных в ДДВ и Северо-Западном Донбассе [Иванова, 2012], и проинтерпретированы по

описанной методике с компьютерной обработкой данных. Это позволило впервые с такой степенью детализации, площадью охвата территории и количеством измерений построить карты палеогеотермических градиентов и амплитуд вертикальных перемещений породных массивов. Для характеристики палеогеотермических параметров Юго-Западного Донбасса использовались данные ПОВ, приведенные в работах [Левенштейн и др., 1991; Привалов, 2004].

При построении карт данные распределения значений ПОВ от глубины ряда близрасположенных скважин, вписывающиеся в общую палеогеотермическую модель и дополняющие друг друга, объединялись. Используемый для построения карт расчетный материал следует рассматривать как целостное устойчивое решение, отражающее особенности регионального распределения указанных параметров.

Выборка полученных значений палеогеотермического градиента тяготеет к нормальному частотному распределению (рис. 4), что характерно для природных процессов и явлений, в частности для распределения значений теплового поля [Поляк, Смирнов, 1968].

Построенная по этим данным карта значений палеогеотермических градиентов (рис. 5) свидетельствует об изменчивости

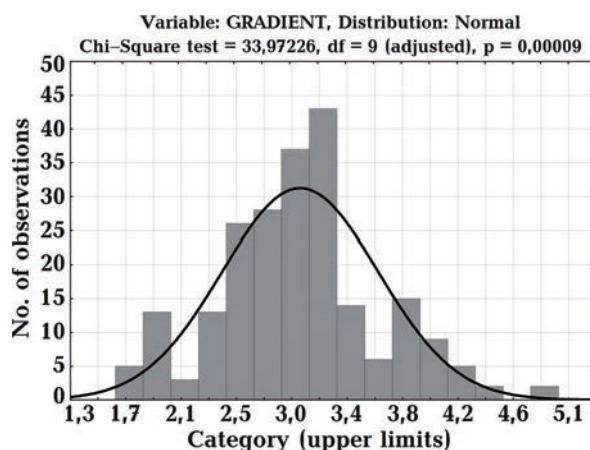


Рис. 4. Гистограмма распределения величин палеогеотермического градиента.

Fig. 4. Histogram of the paleogeothermal gradient values distribution.

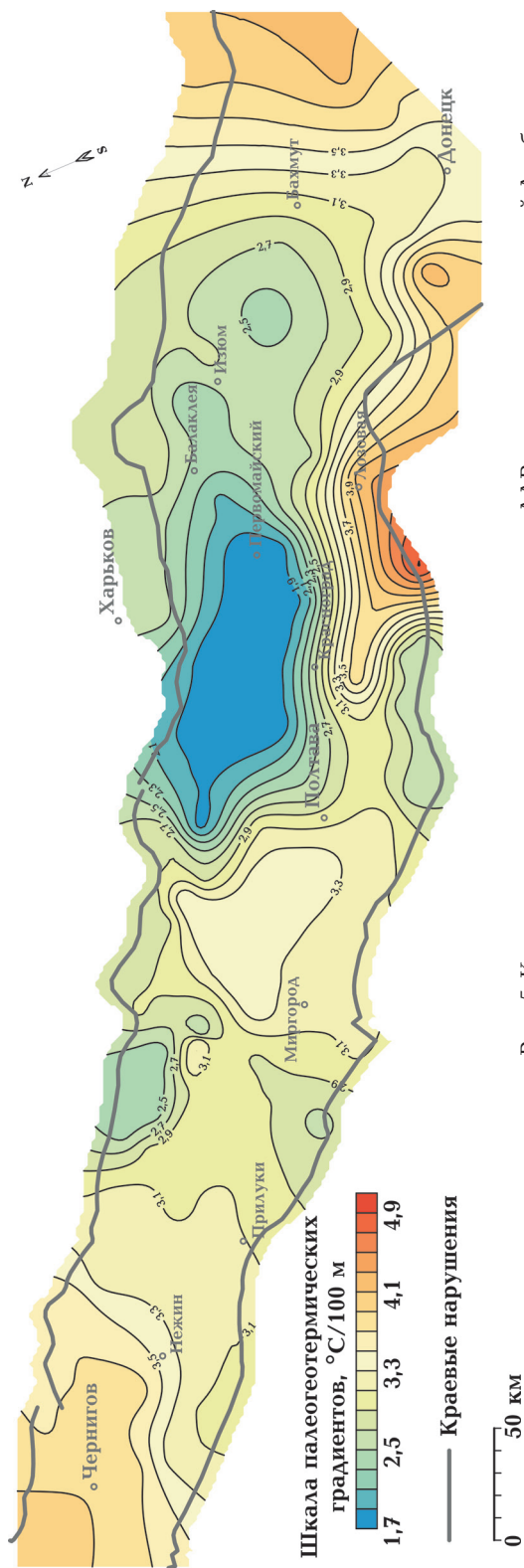


Рис. 5. Карта палеогеотермических градиентов ДДВ и прилегающих частей Донбасса.

Fig. 5. Paleogeothermal gradients map of Dnieper-Donets Depression and adjacent areas of Donbass.

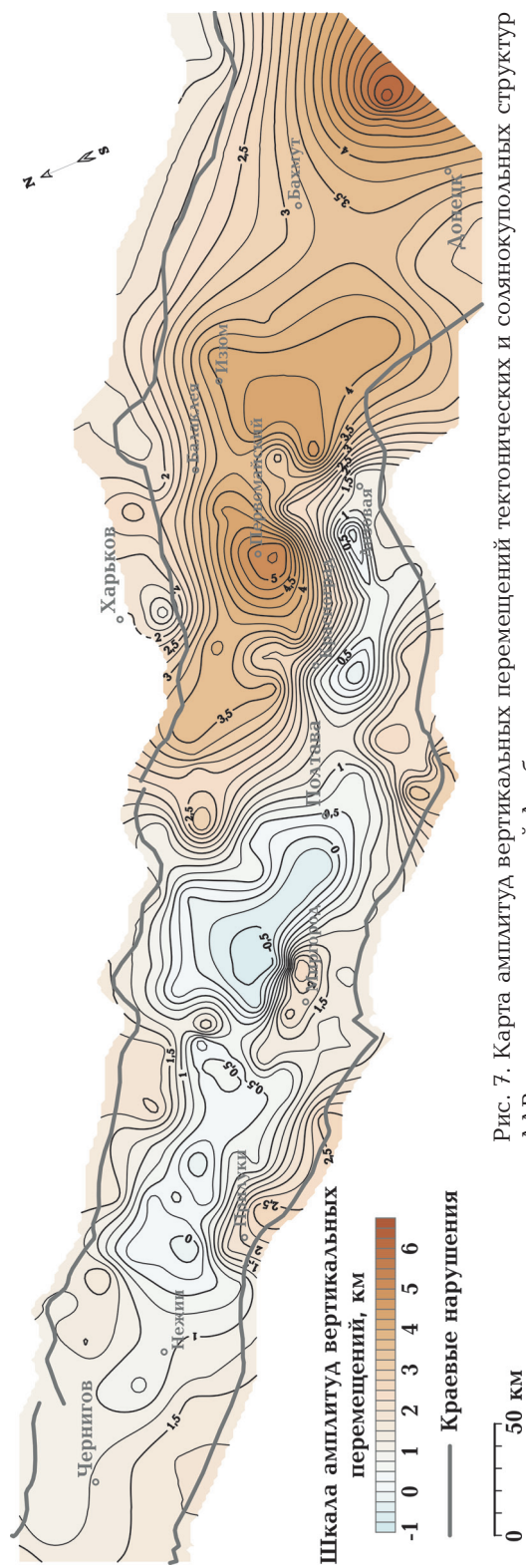


Рис. 7. Карта амплитуда вертикальных перемещений тектонических и солянокупольных структур ДДВ и прилегающих частей Донбасса.

Fig. 7. Vertical displacements amplitudes map of tectonic and salt-domed structures in the Dnieper-Donets Depression and adjacent areas of Donbass.

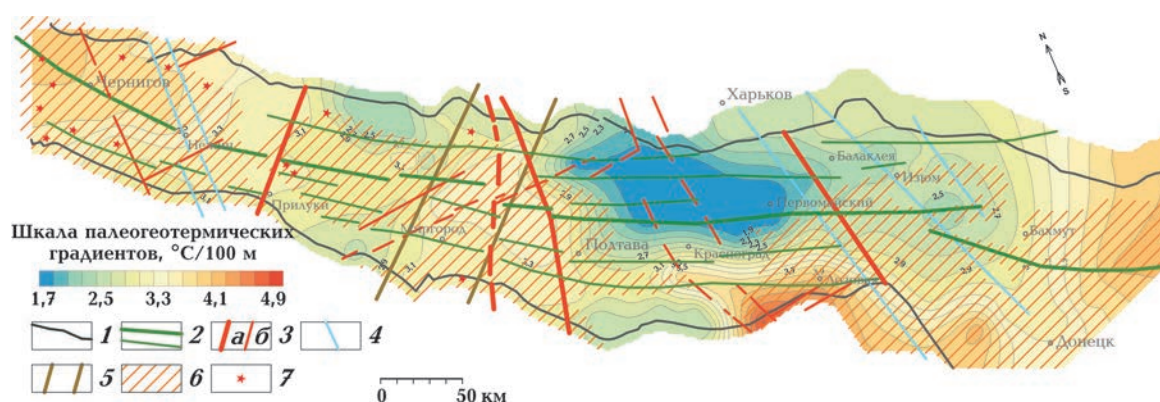


Рис. 6. Карта палеогеотермических градиентов с зонами развития возмущающих тепловые параметры факторов: 1 — краевые нарушения; 2 — продольные разломы; 3 — разломы ортогональной системы: первого ранга, в т. ч. ограничивающие главные сегменты впадины (а) и более высоких рангов (б); 4 — трансрегиональные тектонические швы; 5 — литосферный линеймент Г; 6 — области положительных значений гравитационного поля в редукции Буге; 7 — предполагаемые палеовулканы.

Fig. 6. Paleogeothermal gradients map with overlay zones of factors disturbing thermal parameters: 1 — border failures; 2 — longitudinal faults; 3 — faults of orthogonal system: first rank, including limiting main segments of the depression (a) and higher ranks (b); 4 — transregional suture zones; 5 — lithospheric lineament G; 6 — areas of the gravitational field in Bouguer reduction positive values; 7 — supposed paleovolcanoes.

их значений в пределах исследуемой территории. Повышенные палеогеотермические градиенты (до 3,5—4,0 °C/100 м) наблюдаются в северо-западной половине Черниговского сегмента. Высокими палеогеотермическими градиентами (до 4,0—4,9 °C/100 м) характеризуется прибрежная часть юго-востока ДДВ (Левенцовская, Орельская, Шандровская структуры) и Западный Донбасс (Изюмский сегмент). В Донбасском сегменте значения палеогеотермических градиентов достигают 4,1 °C/100 м. Обращает на себя внимание область минимальных палеогеотермических градиентов (1,8—1,9 °C/100 м) в центральной части ДДВ северо-восточнее Полтавы (северо-восточная половина Изюмского сегмента).

На рис. 6 приведена карта палеогеотермических градиентов с нанесенными на нее центрами палеовулканизма [Ляшкевич, Марушкин, 1982], глубинными разломами [Старостенко и др., 2017а] и областями положительных значений наблюдаемого гравитационного поля в редукции Буге [Куприенко и др., 2010].

Хорошо заметна прямая корреляционная связь интенсивности гравитационного поля, вызванного плотностными неоднородностями земной коры и верхней мантии, с распределением значений палеогеотермических градиентов.

Как видно из рис. 6, увеличение интенсивности гравитационного поля сопровождается повышением значений тепловых параметров. По всей видимости это можно связать с проникновением в консолидированную земную кору плотных мантийных масс, являющихся дополнительным носителем и проводником глубинного тепла к отложениям осадочной толщи.

Кроме того, повышение палеотеплового потока в Черниговском сегменте может быть вызвано проявлениями на этой территории позднедевонского вулканизма [Ляшкевич, Марушкин, 1982] (см. рис. 6), приведшего к временному (в течение 50—100 млн лет) накоплению энергии и повышению температуры в накапливающихся слабо литифицированных каменноугольных осадках. Этот механизм описан А. А. Смысловым [Смыслов, 1993] как нестационарный режим верхнекорового разогрева, проявляющийся при любой активизации мантийного теплового потока и переходящий в стационарный режим по мере литификации осадков. Повышенный тепловой поток в результате действия

позднедевонского вулканизма мог влиять на увеличение степени зрелости ОБ каменноугольных отложений в течение каменноугольного периода и раннепермской эпохи.

Повышение палеогеотермических градиентов в Изюмском сегменте можно связать с геодинамикой глубинных разломов, создающих узел пересечения продольных и поперечных разломов с региональным разломом, ограничивающим ДДВ.

В пределах Донбасса повышение палеогеотермических градиентов до 4,0—4,1 °С/100 м может быть следствием утоньшения литосферы, мощность которой, по данным В. И. Старостенко с соавторами [Старостенко и др., 2017а,б], уменьшается от 280 км в Черниговском сегменте до 120—80 км в Донецком.

Северная половина Изюмского сегмента с наиболее низкими палеогеотермическими градиентами соответствует территории с самой низкой (до –40 мГал) по сравнению с остальной территорией ДДВ интенсивностью гравитационного поля. Следует отметить, что указанная территория характеризуется наиболее широким развитием нижнепермских хемогенных отложений [Атлас..., 1984]. Допуская, что максимальный прогрев каменноугольных и нижнепермских отложений грабена завершился до предпозднепермского времени [Гречишников, 1987], распределение нижнепермских хемогенных отложений, которые представляют собой основной в регионе водоупорный горизонт, может влиять на величины палеогеотермических параметров. По мнению Р. М. Новосилецкого [Атлас..., 1984], указанный горизонт отклоняет восходящие потоки горячих флюидов в направлении выклинивания эвапоритов. По мнению авторов, воздействие гидротермальных процессов характеризуется скорее локальным характером.

Сравнивая современные геотермические градиенты палеозойских отложений, которые изменяются в пределах ДДВ и Донбасса от 1,5 до 4,0 °С/100 м [Кашпур, 1963; Атлас..., 1984; Кутас, Бевзюк, 1992; Гордиенко и др., 2002; Гордиенко и др.,

2015; Усенко, 2020], с палеоградиентами, находящимися преимущественно в тех же пределах (см. рис. 4, 5), можно утверждать, что в период формирования палеозойского осадочного чехла Доно-Днепровский прогиб, как и современный, по уровню геодинамической и геотермической активности в целом принадлежал к бассейнам с нормальной геотермией [Robert, 1985].

Карты амплитуд вертикальных перемещений структур. На рис. 7 приведена карта амплитуд вертикальных перемещений тектонических и солянокупольных структур, положительные значения которых соответствуют мощностям эродированных пород. Наибольшие значения приходятся на центральную часть юго-востока ДДВ (северо-восточная половина Изюмского и западная часть Донбасского сегментов), где они составляют 3,5—5,0 км, достигая максимума (до 6,3 км, скв. С-1379) в Юго-Западном Донбассе.

Минимальные, близкие к нулю, значения амплитуд вертикального перемещения структур наблюдаются в приосевой части ДДВ (Лохвицкий сегмент) и в прибортовой юго-восточной части впадины (Изюмский сегмент). Эти территории практически не испытывали подъема, а местами даже подвергались погружению до –0,5 км (Лохвицкий сегмент, северо-восточнее Миргорода).

По В. А. Привалову [2004], максимальная мощность эродированных пород по Юго-Западному Донбассу составляет 5,3 км (скв. С-1489). Он проводил расчеты путем моделирования трендов ПОВ в зависимости от плотности тепловых потоков и мощностей эродированных отложений, а также фишн-трекового датирования. К моделированию дополнительно привлекались данные по литологическому составу и физическим параметрам пород, температурам горных пород по скважинам и расчетные значения современных тепловых потоков на разных гипсометрических уровнях.

Приведенные в настоящей статье амплитуды поднятий по Донецкому бассейну коррелируются с данными палеотектонических реконструкций Ю. В. и В. В. На-

горных [Нагорный, Нагорный, 1976], выполненных на основе анализа мощностей и литофаций отложений карбона и перми и данных о глубинах образования определенных групп метаморфизма угля.

По оценкам С. Н. Стовбы и В. Ю. Шимановского [Стовба, Шимановский, 2000], мощности эродированных отложений во время пермского, как предполагают авторы, подъема в пределах южной краевой и бортовой зон юго-восточной части ДДВ южнее Полтавы составляют от 0 до 2,5 км. Расчеты проводились с помощью метода «бекстриппинга» и прямого моделирования по Мак Кензи на основе данных о мощности, литологии, абсолютном возрасте, глубинах залегания и уровне моря во время осадконакопления. По нашим расчетам амплитуды поднятий на этой территории колеблются в пределах от 0 до 3,1 км.

Карты палеогеотермических градиентов и амплитуд вертикальных перемещений породных массивов построены на основе структурно-тектонической карты Днепровско-Донецкой впадины [Структурно-тектонічна..., 1996] и тектонической карты Украины и Молдовы [Тектоническая..., 1988]. В качестве справочного материала использовался электронный ресурс «Державна геологічна карта України (Держгеолкарта-200)» [Державна..., 1998].

Палеоструктурный анализ. Витринитовая термометрия позволяет решать задачи структурно-тектонического, в частности палеоструктурного анализа. Известные методы восстановления истории формирования тектонических структур по изоресплендам ПОВ [Горшков, 1987] могут быть успешно дополнены инструментарием проведенных исследований.

При сравнении гипсометрического положения стратиграфических уровней соседних структур с характером их палеотемпературного поля можно уверенно выявлять изменения активности тектонических структур во времени, последовательность формирования структур и амплитуды их взаимного перемещения.

На рис. 8 приведена типовая сводная палеогеотермическая модель зависимости

ПОВ от глубины, построенная по изложенной методике для Вертиевской (скв. бр), Анисовской (скв. 1р, 207) и Ивановской (скв. 1р) структур, расположенных в северо-западной части ДДВ. Стратиграфические разновозрастные подразделения карбона указанных структур залегают на разных уровнях, при этом значения ПОВ по Анисовской и Ивановской структурам закономерно располагаются на общем графике. Следовательно, все изменения взаимного пространственного расположения породных массивов Анисовской и Ивановской структур происходили до момента воздействия на каменноугольные отложения максимальных температур, что необратимо зафиксировалось в значениях ПОВ.

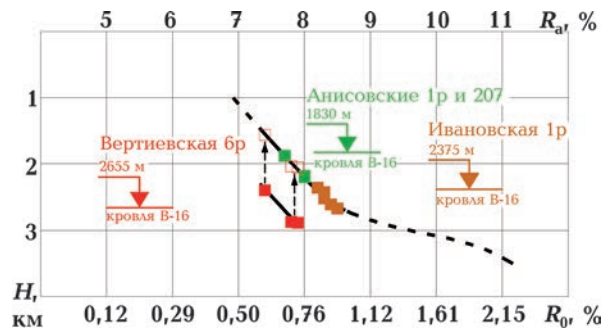


Рис. 8. Типовая сводная палеогеотермическая модель скважин Анисовская 1р, 207, Вертиевская бр и Ивановская 1р.

Fig. 8. Typical composite paleogeothermal model of the wells Anisovskaya 1p, 207, Vertievskaya 6p and Ivanovskaya 1p.

Иная картина наблюдается в Анисовской и Вертиевской структурах. На рисунке видно, что значения ПОВ Вертиевской структуры расположены существенно ниже графика палеогеотермической модели, однако при совмещении границ стратиграфических подразделений полностью с ним согласовываются. Таким образом, можно с уверенностью констатировать, что каменноугольные отложения продуктивного горизонта В-16 Вертиевской и Анисовской структур в период достижения ими максимальных температур находились на одном гипсометрическом уровне и сместились относительно друг друга на 825 м только после этого события.

Такое сопоставление близ расположенных структур позволяет отслеживать последовательность их взаимных перемещений и прогнозировать степень перспективности этих структур на наличие углеводородных залежей. По Н. П. Гречишникову [Гречишников, 1987], породный массив, подвергшийся с соседними породными массивами термическим преобразованиям на одинаковой максимальной глубине, а впоследствии поднятый тектоническими процессами на более высокий гипсометрический уровень, менее перспективен с точки зрения нефтегазоносности.

Выводы. В установлении палеогеотермического режима верхнепалеозойских отложений Доно-Днепровского прогиба ведущую роль сыграл герцинский геотектонический цикл.

Реконструкция по предложенной авторами методике палеогеотермических и палеотектонических условий развития исследуемого региона позволила впервые с такой степенью детализации, площадью охвата территории и количеством измерений построить карты распределения палеогеотермических градиентов и амплитуд вертикальных перемещений породных массивов верхнепалеозойских отложений территории ДДВ и прилегающих частей Донбасса.

Анализ карты распределения палеогеотермических градиентов свидетельствует о более высоких палеогеотермических градиентах в Черниговском сегменте, в прибортовой части юго-востока ДДВ и Западном Донбассе. Наиболее низкие градиенты наблюдаются в центральной части ДДВ северо-восточнее Полтавы.

Установлена прямая корреляционная связь интенсивности наблюдаемого гравитационного поля, вызванного плотностными неоднородностями земной коры и верх-

ней мантии, с распределением значений палеогеотермических градиентов.

Показано, что палеогеотермические показатели изменялись под влиянием геотектонических, магматических и литофациальных условий формирования верхнепалеозойских отложений.

Наибольшие значения мощностей эродированных пород зафиксированы в центральной части и на юго-востоке ДДВ, достигая максимума в Юго-Западном Донбассе. Минимальные, близкие к 0, значения амплитуд вертикального перемещения структур наблюдаются в приосевой и прибортовой юго-восточной частях ДДВ. Эти территории практически не испытывали подъема, а местами даже подвергались погружению до $-0,5$ км.

Полученные карты могут стать важным инструментом в исследовании тектонической и термальной истории, выявлении тенденций изменений и закономерностей распределения палеогеотермических характеристик, связанных с различной геодинамической обстановкой подкорового субстрата и его эволюцией.

С помощью палеоструктурного анализа близрасположенных тектонических структур и их корреляции по стратиграфическим и палеогеотермическим уровням можно делать выводы об изменениях активности тектонических структур во времени, последовательности формирования и амплитуд их взаимного перемещения и дифференцировать структуры по перспективности на нефтегазоносность. При поисково-разведочных работах на нефть и газ это может способствовать повышению результативности работ и получению весомого экономического эффекта.

Благодарности. Авторы выражают свою признательность д-ру геол. наук С. А. Мачулиной за советы и ценные комментарии по содержанию статьи.

Список литературы

Айзберг Р. Е., Старчик Т. А. Границы раздела Мохоровичича в структурах Припятско-Донецкого авлакогена: *Материалы XLV Меж-*

дунар. тектоническое совещ. 2013 г. «Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеа-

- нической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой». Москва: ГЕОС, 2013. С. 3—6.
- Аммосов И. И. Прогноз палеотемператур. В кн.: Голицин В. М. (ред.), Петрология органических веществ в геологии горючих ископаемых. Москва: Наука, 1987. С. 36—41.
- Аммосов И. И., Тан С.-И. Стадии изменения углей и парагенетические отношения горючих ископаемых. Москва: Изд. АН СССР, 1961. 116 с.
- Атлас геологического строения и нефтегазоносности Днепровско-Донецкой впадины. Под ред. Арсирия Ю.А., Витенко В. А., Палия А. М., Цыпко А. К. Киев: Наук. думка, 1984. 190 с.
- Баженова Т. К. Проблема нефтегазоносности базальных горизонтов бассейнов древних платформ в аспекте их катагенетической эволюции. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2008. № 3. С. 1—21.
- Богомоллов Г. В., Панов В. В., Богомоллов Ю. Г. О палеотемпературных условиях формирования Припятско-Донецкого авлокогена. В кн.: Е. А. Любимова, В. А. Глебовицкий (ред.), Геотермометры и палеотемпературные градиенты. Москва: Наука, 1981. С. 42—49.
- Бугаенко В. Н. Вулканогенные породы Днепровско-Донецкой впадины. В кн.: В. А. Слипченко (ред.), Палеовулканизм Украины. Киев: Наук. думка, 1984. С. 199—224.
- Вакарчук Г. И., Гавриш В. К. Перерывы и несогласия в разрезе палеозоя Днепровско-Донецкой впадины. *Геол. журнал*. 1991. № 1. С. 119—131.
- Вассоевич Н. Б. Избранные труды. Геохимия органического вещества и происхождение нефти. Москва: Наука, 1986. 368 с.
- Возняк Д. К. Преобразование включений минералообразующей среды и его генетическая интерпретация. В кн.: Геохимия и термометрия эндогенных флюидов. Киев: Наук. думка, 1988. С. 25—33.
- Гавриш В. К. Глубинные разломы, геотектоническое развитие и нефтегазоносность рифтогенов. Киев: Наук. думка, 1974. 160 с.
- Гавриш В. К., Мачулина С. А. Волны трансгрессий и регрессий в палеозой-кайнозойской истории развития Днепровско-Донецкой впадины. *Доп. НАН України*. 2000. № 3. С. 122—125.
- Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Глубинное строение и геотектоническое развитие. Ред. В. К. Гавриш. Киев: Наук. думка, 1989. 208 с.
- Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Стратиграфия. Ред. Д. Е. Айзенберг. Киев: Наук. думка, 1988. 148 с.
- Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 1. Гл. ред. И. И. Аммосов. Москва: Госгеолтехиздат, 1963. 1210 с.
- Гордиенко В. В. Тектоносфера Донбасса. *Геофиз. журн*. 1995. Т. 17. № 4. С. 32—40.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В. Тепловое поле Донбасса. *Геофиз. журн*. 2015. Т. 37. № 6. С. 2—23.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Пек Й., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Днепровско-Донецкая впадина (геофизика, глубинные процессы). Київ: Корвін прес, 2006. 144 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Логвинов И. М., Тарасов В. Н. Донбасс (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос, 2015. 123 с.
- Гордиенко В. В., Завгородняя О. В., Усенко О. В. Тепловой поток Донецкого бассейна. *Геофиз. журнал*. 1999. Т. 21. № 1. С. 127—130.
- Гордиенко В. В., Усенко О. В. Глубинные процессы в тектоносфере Украины. Киев: Изд. НАН Украины, 2003. 147 с.
- Горшков В. И. Прикладные аспекты витринитовой термометрии в нефтяной геологии. Решение некоторых задач палеоструктурного анализа. В кн.: Голицин В. М. (ред.), Петрология органических веществ в геологии горючих ископаемых. Москва: Наука, 1987. С. 135—145.
- Гречишников Н. П. Эволюция палеогеотермии Доно-Днепровского прогиба. Днепровско-Донецкая впадина. В кн.: Голицин В. М. (ред.), Петрология органических веществ в геологии горючих ископаемых. Москва: Наука, 1987. С. 72—79.

- Державна геологічна карта України м-бу 1:200 000. 1998. Режим доступу: <http://geoinf.kiev.ua/wp/kartograma.htm>.
- Забигаїло В. Е., Лукинов В. В. О соотношении степени метаморфизма углей и стадии катагенеза пород Донбасса. *Геология и геохимия горючих ископаемых*. 1989. № 73. С. 1—7.
- Іванова А. В. Генезис і еволюція солоного вугілля України та проблеми його освоєння: Автореф. дис. д-ра геол. наук. Київ: ІГН НАНУ, 2016. 41 с.
- Іванова А. В. Изучение катагенетической зональности каменноугольных отложений ДДВ по данным исследования степени углефикации угольной органики (в связи с нефтегазоносностью): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Киев: ИГН АН УССР, 1975. 36 с.
- Іванова А. В. Использование витринитовой термометрии в геологии нефти и газа. *Советская геология*. 1991. № 3. С. 11—15.
- Іванова А. В. Использование углепетрографических методов в геологии нефти и газа. Киев, 1989. 55 с. (Препр./ИГН АН УССР; № 89).
- Іванова А. В. Катагенетическая зональность каменноугольных отложений ДДВ по данным замеров отражательной способности витринита угольной органики (в связи с нефтегазоносностью). Киев, 1976. 70 с. (Препр./ИГФМ АН УССР).
- Іванова А. В. Каталог показателей отражения витринита угольной органики осадочной толщи Доно-Днепровского и Преддобруджинского прогибов с установленными палеотермическими градиентами и амплитудами вертикальных перемещений тектонических структур. Киев: Изд. ИГН НАНУ, 2012. 100 с.
- Іванова А. В. Методика обработки данных витринитовой термометрии для проведения палеотермических и палеотектонических реконструкций. *Геол. журн.* 1992. № 6. С. 32—36.
- Іванова А. В., Гаврильцев В.Б. Методика обработки даних вітринітової термометрії. *Авторське право і суміжні права: офіц. бюл.* 2010. № 21. С. 200.
- Іванова А. В., Кривега Т. А. Солёные угли Западного Донбасса (условия формирования и проблемы использования). Киев: Наук. думка, 1985. 124 с.
- Істомин А. Н., Евдошук Н. И. Геодинамические условия формирования Днепровско-Донецкой впадины. *Геофиз. журн.* 2002. Т. 24. № 6. С. 143—155.
- Кабышев Б. П., Вакарчук Г. И. Классификация перерывов и несогласий в стратиграфическом разрезе Днепровско-Донецкой впадины. *Геол. журн.* 1971. Т. 31. № 6. С. 61—71.
- Канана Я. Ф. Вертикальная зональность и палеотемпературы регионального метаморфизма органического вещества. *Геол. журн.* 1985. Т. 45. № 6. С. 69—73.
- Коробов А. Д., Коробова Л. А., Ахлестина Е. Ф. Минералогические и палеотермические критерии нефтегазоносности рифтогенных осадочных бассейнов. *Известия Саратовского университета. Сер. Науки о Земле*. 2009. Т. 9. № 2. С. 28—35.
- Куприенко П. Я., Макаренко И. Б., Старостенко В. И., Легостаева О. В., Савченко А. С. Трёхмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 6. С. 175—214.
- Кутас Р. И., Бевзюк М. И. Земной тепловой поток Донбасса. *Геофиз. журн.* 1992. Т. 14. № 2. С. 14—22.
- Кутас Р. И., Пашкевич И. К. Геотермическая и магнитная модели земной коры Донбасса (тектонический анализ совместно с данными ГСЗ). *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 4. С. 21—36.
- Кутас Р. И., Цвященко В. А. Тепловые процессы в геологической истории Донбасса. *Геофиз. журн.* 1993. Т. 15. № 2. С. 42—53.
- Лапкин И. Ю. Нижняя пермь юга Русской платформы: *Материалы по геологии и газоносности нижнепермских отложений юга Русской платформы. Тр. совещ. по нижнепермским отложениям восточных районов Украины и сопредельных областей в связи с их газоносностью*. Харьков: ХГУ, 1961. С. 19—49.
- Левенштейн М. Л. О причинах и динамике процессов метаморфизма углей. В кн.: Кузнец

- цов И. А. (ред.), Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Москва: Госгеолтехиздат, 1963. Т. 1. С. 386—395.
- Левенштейн М. Л., Спирина О. И., Носова К. Б., Дидов В. С. Комплект карт метаморфизма углей Донецкого бассейна м-ба 1:500 000 (поверхности палеозоя, срезов –400 м, –1000 м, –1600 м и структурных планов угольных пластов с¹₆ и к₅). Киев: ЦТЕ, 1991. 14 л.
- Ляшкевич З. М., Марушкин А. И. Вулканические формации Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Наук. думка, 1982. 180 с.
- Майданович И. А., Радзивилл А. Я. Особенности тектоники угольных бассейнов Украины. Киев: Наук. думка, 1984. 120 с.
- Нагорный Ю. Н., Нагорный В. Н. Особенности геологического развития Донецкого бассейна. *Геотектоника*. 1976. № 1. С. 76—86.
- Поляк Б. Г., Смирнов Я. Б. Связь глубинного теплового потока с тектоническим строением континентов. *Геотектоника*. 1968. № 4. С. 3—19.
- Попов В. С. Тектоника. В кн.: Кузнецов И. А. (ред.), Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Москва: Госгеолтехиздат, 1963. Т. 1. С. 103—151.
- Привалов В. А. Метан в угленосной толще карбона Донбасса. Геологические аспекты генерации, миграции и условия сохранности. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2002. № 2. С. 65—83.
- Привалов В. А. Тектонотермальная эволюция Донецкого бассейна: Дис. д-ра геол. наук. Донецк: ДонНТУ, 2004. 343 с.
- Привалов В. А., Саксенховер Р., Жикаляк Н. В., Писковой М. А., Панова Е. А. Тепловые потоки в геологической истории Донбасса: результаты моделирования. *Наук. праці ДонНТУ. Серія гірн.-геол.* 2001. № 32. С. 14—21.
- Пронин А. А. Герцинский цикл тектонической истории Земли. Хронология тектонических движений. Ленинград: Наука, 1969. 196 с.
- Разницын В. А. Тектоническое районирование, генезис структур северной зоны мелкой складчатости Донецкого бассейна. *Геотектоника*. 1976. № 1. С. 57—72.
- Рослий І. С. Геодинаміка і нафтогазоносність Дніпровсько-Донецького рифтогену: Автореф. дис. д-ра геол. наук. Чернігів: УКРД-ГРІ, 2001. 27 с.
- Рослий И. С. Формирование структуры Днепровско-Донецкой впадины в карбоне. *Геотектоника*. 1985. № 5. С. 102—105.
- Рослий І. С., Стрижак В. Геодинаміка Дніпровського грабену на девонсько-кам'яновугільних етапах розвитку. *Геолог України*. 2008. № 1. С. 66—72.
- Смирнов Я. Б. Связь теплового поля со строением и развитием земной коры и верхней мантии. *Геотектоника*. 1968. № 6. С. 3—25.
- Смыслов А. А. Тепловая эволюция Земли. В кн.: Эволюция геологических процессов в истории Земли. Москва: Наука, 1993. С. 216—225.
- Соллогуб В. Б., Бородулин М. И., Чекунов А. В. Глубинная структура Донбасса и сопредельных регионов. *Геол. журн*. 1977. № 2. С. 23—31.
- Соловьев В. О. Хронология тектонических движений: Фазы, эпохи, циклы тектогенеза. Харьков: УкрНИИГаз, 2011. 112 с.
- Старостенко В. И., Пашкевич И. К., Макаренко И. Б., Куприенко П. Я., Савченко А. С. Неоднородность литосферы Днепровско-Донецкой впадины и ее геодинамические следствия. Часть I. Глубинное строение. *Геодинаміка*. 2017а. № 1. С. 125—138. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.01.125>.
- Старостенко В. И., Пашкевич И. К., Макаренко И. Б., Куприенко П. Я., Савченко А. С. Неоднородность литосферы Днепровско-Донецкой впадины и ее геодинамические следствия. Часть II. Геодинамическая интерпретация. *Геодинаміка*. 2017б. № 2. С. 83—103. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.02.083>.
- Степанов Ю. В. Реконструкция палеогеотермического режима. В кн.: Голицин В. М. (ред.), Петрология органических веществ в геологии горючих ископаемых. Москва: Наука, 1987. С. 200—202.
- Степанов П. И. Тектоника. В кн.: Геология СССР. Донецкий бассейн. Москва-Ленинград: Госгеолиздат, 1944. Т. 7. С. 401—503.
- Стовба С. М. Геодинамічна еволюція Дніпровсько-Донецької западини та Донбасу: Авто-

- реф. дис. Д-ра геол. наук. Київ: ІГФ НАНУ, 2008. 41 с.
- Стовба С. Н., Стифенсон Р. А. Сравнительный анализ строения и истории формирования юго-восточной части Днепровско-Донецкой впадины и Донецкого складчатого сооружения. *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 4. С. 37—61.
- Стовба С. Н., Шимановский В. А. Количественная оценка амплитуды подъема осадочных бассейнов во время инверсий тектонического режима. В кн.: Теоретичні та прикладні проблеми нафтогазової геології. Київ: Карбон Лтд, 2000. Т. 2. С. 63—69.
- Структурно-тектонічна карта Дніпровсько-Донецької западини м-бу 1:200 000 (з 6 аркушів). Київ: ДГП Укргеофізика, 1996.
- Тектоническая карта Украинской ССР и Молдавской ССР м-ба 1:500 000 (из 20 листов). Киев: УкрНИГРИ, ГПО Укргеология, 1988.
- Усенко О. В. Тепловой поток и современная активизация Донецкого бассейна (по новым данным). *Геофиз. журн.* 2002. Т. 24. № 5. С. 102—111.
- Усенко А. П., Усенко О. В. Аналіз геотермічних параметрів нафтогазових родовищ центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 3. С. 127—144. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203—3100.v42i3.2020.204705>.
- Чекунов А. В. К геодинамике Днепровско-Донецкой рифт-синеклизы. *Геофиз. журн.* 1994. Т. 16. № 3. С. 3—13.
- Чирвинская В. Б., Соллогуб М. В. Глубинная структура Днепровско-Донецкого авлакогена по геофизическим данным. Киев: Наук. думка, 1980. 180 с.
- Штах Э., Маковски М.-Т., Тейхмюллер М., Тейлор Г., Чандра Д. Петрология углей. Москва: Мир, 1978. 554 с.
- Яковлев Н. Н. Пермские отложения. В кн.: Геология СССР. Донецкий бассейн. Москва-Ленинград: Госгеолиздат, 1944. Т. 7. С. 187—202.
- Barker, C. (1988). Geothermics of petroleum systems: Implications for stabilization of kerogen maturation after a geologically brief heating duration at peak temperature. In: L. Magoon (Ed.), *Petroleum Systems of the United States: U.S. Geol. Surv. Bull.* (V. 1870, pp. 26—29). U.S. Government Printing Office.
- Barker, Ch. E., & Pawlewicz, M. J. (1986). The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter. In: G. Buntebarth, L. Stegena (Eds.), *Paleogeothermics: Evaluation of Geothermal Conditions in the Geological Past: Lecture Notes in Earth Sciences* (pp. 79—93). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Burnham, A. K., & Sweeney, J. J. (1989). A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(10), 2649—2657. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90136-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90136-1).
- Corcoran, D. V., & Clayton, G. (2001). Interpretation of vitrinite reflectance profiles in sedimentary basins, onshore and offshore Ireland. In P. M. Shannon, P.D.W. Haughton, D. V. Corcoran (Eds.), *The Petroleum Exploration of Ireland's Offshore Basins* (Vol. 188, pp. 61—90). Geol. Soc., London, Spec. Publ. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.188.01.04>.
- Emujakporue, G., Ekine, A., & Nwosu, L. (2019). Evaluation of Time-Temperature Index and Vitrinite Reflectance for Hydrocarbon Maturity in Parts of Niger Delta Sedimentary Basin, Nigeria. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 4(11), 7—15.
- Misch, D., Sachsenhofer, R. F., Bechtel, A., Gratzner, R., Gross, D., & Makogon, V. (2015). Oil/gas-source rock correlations in the Dniepr-Donets Basin (Ukraine): New insights into the petroleum system. *Marine and Petroleum Geology*, 67, 720—742. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.002>.
- Robert, P. (1985). *Histoire géothermique et diagenèse organique: phdthesis*. Pau: Elf Aquitaine, 345 p.
- Sachsenhofer, R. F., Privalov, V. A., & Panova, E. A. (2012). Basin evolution and coal geology of the Donets Basin (Ukraine, Russia): An overview: European Coal Conference 2010. *International Journal of Coal Geology*, 89, 26—40. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.05.002>.
- Sakaguchi, A. (1996). High paleogeothermal gradient with ridge subduction beneath the Cretaceous Shimanto accretionary prism, southwest Japan. *Geology*, 24(9), 795—798. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.05.002>.

doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0795:HP-GWRS>2.3.CO;2.

Velde, B., Suzuki, T., & Nicot, E. (1986). Pressure-Temperature-Composition of Illite/Smectite

Mixed-Layer Minerals: Niger Delta Mudstones and other Examples. *Clays and Clay Minerals*, 34(4), 435—441. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1986.0340410>.

Paleogeothermal and paleotectonic reconstructions based on vitrinite thermometry data (on the example of the upper paleozoic deposits of the Dnieper-Donets depression and adjacent areas of Donbass)

A. V. Ivanova, V. B. Gavryltsev, 2021

Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The article is devoted to paleogeothermal and paleotectonic reconstructions based on the results of processing the vitrinite reflectance data array of coal organic matter of the Upper Paleozoic sediments from the Don-Dnieper Downwarp (within the Dnieper-Donets Depression and adjacent areas of Donbass). It was found that paleogeothermal parameters changed under the influence of geotectonic, magmatic and lithofacies formation conditions of the Upper Paleozoic deposits. Analysis of changes and regularities distribution of paleogeothermal characteristics made it possible to assess the evolution of the thermal field, changes in the tectonic movements character, to identify the role of volcanism, deep faults geodynamics, lithosphere thickness in the thermal history of the region under study. It is shown that with the help of paleostructural analysis, based on data on the thermal maturity degree of coal organic matter, it is possible to judge the activity changes of tectonic structures in time, the formation sequence, to establish the amplitudes of their mutual displacement and rank according to oil and gas potential. Based on the results of the work, maps of the paleogeothermal gradients distribution and the amplitudes of rock masses vertical displacements were constructed. The presented maps should be considered as a universal information material that can be used to determine the features of the regional distribution of the above parameters, as well as become an important tool in the study of tectonic and thermal history, identification changes trends and distribution patterns of paleogeothermal characteristics.

Key words: vitrinite thermometry, coal, organic matter, paleogeothermal and paleotectonic reconstructions, paleogeothermal gradient, amplitudes of vertical displacements.

References

- Aizberg, R. Ye., & Starchik, T. A. (2013). Boundaries of Mokhorovichich's division in the structures of the Pripyat-Donets aulacogen: *Geological history, possible mechanisms and problems of the depressions formation with suboceanic and anomalously thin crust in provinces with continental lithosphere: Int. XLV tectonic meeting* (pp. 3—6). Moscow: GEOS (in Russian).
- Ammosov, I. I. (1987). Forecast of paleotemperatures. In: V. M. Golitsin (Ed.), *Petrology of organic substances in the geology of fossil fuels* (pp. 36—41). Moscow: Nauka (in Russian).
- Ammosov, I. I., & Tan, S.-I. (1961). *Stages of coal alteration and paragenetic relations of the fossil fuels*. Moscow: Edition of the Academy of Sciences of the USSR, 116 p. (in Russian).
- Arsiry, Yu. A., Vitenko, V. A., Paly, A. M., & Tsyenko, A. K. (Eds.). (1984). *Atlas of the geological structure and petroleum potential of the Dnieper-Donets depression*. Kiev: Naukova Dumka, 190 p. (in Russian).
- Bazhenova, T. K. (2008). A problem of oil-and-gas content of basal horizons in the basins of ancient platforms in terms of their catagenetic

- evolution. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, (3), 1—21 (in Russian).
- Bogomolov, G. V., Panov, V. V., & Bogomolov, Yu. G. (1981). On the paleotemperature conditions of the formation of the Pripyat-Donets aulocogen. In: E. A. Lyubimova & V. A. Glebovitsky (Eds.), *Geothermometers and paleotemperature gradients* (pp. 42—49). Moscow: Nauka (in Russian).
- Bugaenko, V. N. (1984). Volcanic rocks of the Dnieper-Donets depression. In: V. A. Slipchenko (Ed.), *Paleovolcanism of Ukraine* (pp. 199—224). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Vakarchuk, G. I., & Gavrish, V. K. (1991). Breaks and disagreements in the Paleozoic section of the Dnieper-Donets basin. *Geologicheskii Zhurnal*, (1), 119—131 (in Russian).
- Vassoevich, N. B. (1986). *Selected Works. Geochemistry of organic matter and the origin of oil*. Moscow: Nauka, 368 p. (in Russian).
- Vozniak, D. K. (1988). Transformation of the mineral-forming environment inclusions and its genetic interpretation. In: *Geochemistry and thermobarometry of endogenous fluids* (pp. 25—33). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Gavrysh, V. K. (1974). *Deep-faults, geotectonics development and oil-gas bearing riftogens*. Kiev: Naukova Dumka, 160 p. (in Russian).
- Gavrysh, V. K., & Machulina, S. A. (2000). Transgression and regression waves in Paleozoic and Cenozoic Dnieper—Donets Basin development history. *Dopovidi NAN Ukrayiny*, (3), 122—125 (in Russian).
- Gavrysh, V. K. (Ed.). (1989). *Geology and petroleum productivity of the Dnieper—Donets depression. Deep structure and geotectonic development*. Kiev: Naukova Dumka, 208 p. (in Russian).
- Aizenverg, D. E. (Ed.). (1988). *Geology and oil and gas content of the Dnieper-Donets depression. Stratigraphy*. Kiev: Naukova Dumka, 148 p. (in Russian).
- Ammosov, I. I. (Ed.) (1963). *Geology of coal and oil shale deposits in the USSR* (Vol. 1). Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1210 p. (in Russian).
- Gordienko, V. V. (1995). Tectonosphere of Donbass. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 17(4), 32—40 (in Russian).
- Gordienko, V. V., Gordienko, I. V., & Zavgorodnyaya, O. V. (2015). Thermal field of the Donbas. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(6), 2—23 (in Russian).
- Gordienko, V. V., Gordienko, I. V., Zavgorodnyaya, O. V., Kovachikova, S., Logvinov, I. M., Tarasov, V. N., & Usenko, O. V. (2006). *Dnieper-Donets depression (geophysics, deep processes)*. Kiev: Korvin press, 144 p. (in Russian).
- Gordienko, V. V., Gordienko, I. V., Zavgorodnyaya, O. V., Logvinov, I. M., & Tarasov, V. N. (2015). *Donbass (geophysics, deep processes)*. Kiev: Logos, 123 p. (in Russian).
- Gordienko, V. V., Zavgorodnyaya, O. V., & Usenko, O. V. (1999). The heat flow of the Donets basin. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 21(1), 127—130 (in Russian).
- Gordienko, V. V., & Usenko, O. V. (2003). *Deep processes in the Ukraine's tectonosphere*. Kiev: Edition of the Academy of Sciences of Ukraine, 147 p. (in Russian).
- Gorshkov, V. I. (1987). Applied aspects of vitrinite thermometry in petroleum geology. Solution of some problems of paleostructural analysis. In: V. M. Golitsin (Ed.), *Petrology of organic substances in the geology of fossil fuels* (pp. 135—145). Moscow: Nauka (in Russian).
- Grechishnikov, N. P. (1987). Evolution of paleo-geothermy of the Don-Dnieper Downwarp. Dnieper-Donets Depression. In: V. M. Golitsin (Ed.), *Petrology of organic substances in the geology of fossil fuels* (pp. 72—79). Moscow: Nauka (in Russian).
- State Geological Map of Ukraine at a scale of 1:200 000 (Derzhgeolokarta—200). (1998). Retrieved from <http://geoinf.kiev.ua/wp/kartograma.htm> (in Ukrainian).
- Zabigailo, V. E., & Lukinov, V. V. (1989). On the relationship between the degree of coal metamorphism and the stage of catagenesis of the Donbass rocks. *Geologiya i geokhimiya goryuchikh iskopayemykh*, (73), 1—7 (in Russian).
- Ivanova, A. V. (2016). Genesis and evolution of salt coal of Ukraine and problems of its develop-

- ment. [Author's ref. Dr. geol. sci. diss.]. Kiev, 36 p. (in Ukrainian).
- Ivanova, A. V. (1975). *Study of the catagenetic zoning of the Carboniferous deposits of the Dnieper—Donets depression according to the determination of the degree of coal organic matter coalification (in connection with oil and gas content)* [Author's ref. cand. geol. and min. sci. diss.]. Kiev, 36 p. (in Russian).
- Ivanova, A. V. (1991). Application of vitrinite thermometry in oil and gas geology. *Sovetskaya Geologiya*, (3), 11—15 (in Russian).
- Ivanova, A. V. (1989). *Applications of coal petrography methods in oil and gas geology*. Working paper № 89. Kiev: IGN AN UkrSSR, 55 p. (in Russian).
- Ivanova, A. V. (1976). *Catagenetic zoning of the Carboniferous deposits of the Dnieper-Donets depression according to measurements of the vitrinite reflectance of coal organic matter (in connection with oil and gas content)*. Working paper. Kiev: IGFMA AN UkrSSR, 70 p. (in Russian).
- Ivanova, A. V. (2012). Catalog of indicators of vitrinite reflection of coal organic matter of sedimentary strata of the Don-Dneprovsky and Predobrudzhinsky troughs with established paleogeothermal gradients and amplitudes of vertical displacements of tectonic structures. Kiev: IGN NANU, 2012.100 p. (in Russian).
- Ivanova, A. V. (1992). Technique of Vitrinite Thermometry Data Processing for Paleogeothermic and Paleotectonic Reconstructions. *Geologicheskii Zhurnal*, (6), 32—36 (in Russian).
- Ivanova, A. V., & Gavryltsev, V. B. (2010). Method of vitrinite thermometry data processing. *Avtorske pravo i sumizhni prava: ofitsiynyy byulleten*, (21), 200 (in Ukrainian).
- Ivanova, A. V., & Krivega, T. A. (1985). *Saline Coals in Western Donbass (Origin and Utilization Problems)*. Kiev: Naukova Dumka, 124 p. (in Russian).
- Istomin, A. N., & Evdoschuk, N. I. (2002). Geodynamic conditions of the Dnieper-Donets depression formation. *Geofizicheskii Zhurnal*, 24(6), 143—155 (in Russian).
- Kabyshev, B. P., & Vakarchuk, G. I. (1971). Classification of discontinuities and discordances in the stratigraphic section of the Dnieper-Donets depression. *Geologicheskii Zhurnal*, 31(6), 61—71 (in Russian).
- Kanana, J. F. (1985). Vertical zoning and paleotemperatures of organic matter regional metamorphism. *Geologicheskii Zhurnal*, 45(6), 69—73 (in Russian).
- Korobov, A. D., Korobova, L. A., & Akhlestina, E. F. (2009). Mineralogical and Paleogeothermal Criteria for Predicting oil and Gas Contents from the Rift sedimentary Basins. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle*, 9(2), 28—35 (in Russian).
- Kuprienko, P. Ya., Makarenko, I. B., Starostenko, V. I., Legostaeva, O. V., & Savchenko, A. S. (2010). Three-dimensional density model of the earth's crust and upper mantle of the Dnieper-Donets Basin and Donbass. *Geofizicheskii Zhurnal*, 6(32), 175—214 (in Russian).
- Kutas, R. I., & Bevzyuk, M. I. (1992). Terrestrial heat flow of Donbass. *Geofizicheskii Zhurnal*, 14(2), 14—22 (in Russian).
- Kutas, R. I., & Pashkevich, I. K. (2000). Geothermal and magnetic models of the Donbass earth crust (tectonic analysis together with DSS data). *Geofizicheskii Zhurnal*, 22(4), 21—36 (in Russian).
- Kutas, R. I., & Tsvyashchenko, V. A. (1993). Thermal processes in the geological history of the Donbass. *Geofizicheskii Zhurnal*, 15(2), 42—53 (in Russian).
- Lapkin, I. Yu. (1961). Lower Permian of the South of the Russian Platform: *Materials on the Geology and Gas Content of the Lower Permian Deposits of the South of the Russian Platform. Proceedings of the meeting on the Lower Permian sediments of the eastern regions of Ukraine and adjacent regions in connection with their gas content* (pp. 19—49). Kharkov: Publ. of Kharkiv State University (in Russian).
- Levenshtein, M. L. (1963). On the causes and dynamics of coal metamorphism processes. In: I. A. Kuznetsov (Ed.), *Geology of coal and oil shale deposits in the USSR* (Vol. 1, pp. 386—395). Moscow: Gosgeoltekhizdat (in Russian).
- Levenshtein, M. L., Spirina, O. I., Nosova, K. B., & Dedov, V. S. (1991). *Set of maps of Coal Metamorphism in the Donets Basin (on the Paleozoic*

- surface, on the levels: -400 m, -1000 m, -1600 m, and on the structural plans of coal seams c^1_6 and k_5) at 1:500000. Kiev: Ministry of Geology of the USSR, 14 sh. (in Russian).
- Lyashkevich, Z. M., & Marushkin, A. I. (1982). *Volcanic formations of the Dnieper-Donets depression*. Kiev: Naukova Dumka, 180 p. (in Russian).
- Maidanovich, I. A., & Radziwill, A. Ya. (1984). *Tectonic features of Ukrainian coal basins*. Kiev: Naukova Dumka, 120 p. (in Russian).
- Nagorny, Yu. N., & Nagorny, V. N. (1976). Geological development features of the Donets basin. *Geotektonika*, (1), 76—86 (in Russian).
- Polyak, B. G., & Smirnov, Ya. B. (1968). Relationship of deep heat flow with the tectonic structure of continents. *Geotektonika*, (4), 3—19 (in Russian).
- Popov, V. S. (1963). Tectonics of the Donets Basin. In: I. A. Kuznetsov (Ed.), *Geology of Coal and Oil Shale Deposits of the USSR* (Vol. 1, pp. 103—151). Moscow: Gosgeoltekhizdat (in Russian).
- Privalov, V. A. (2002). Methane in coal—bearing measures of the Donbas: Geological aspects of generation, migration and preservation potential. *Heolohiya i heokhimiya horyuchykh kopalyn*, (2), 65—83 (in Russian).
- Privalov, V. A. (2004). *Tectonothermal evolution of the Donets basin* [Dr. geol. sci. diss.]. Donetsk, 343 p. (in Russian).
- Privalov, V. A., Sachsenhofer, R. F., Zhykalyak, M. V., Pyskovoy, M. A., & Panova, E. A. (2001). Heat flows in geological history of the Donbas. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya hirn.-heol.*, (32), 14—21 (in Russian).
- Pronin, A. A. (1969). *Hercynian cycle in the tectonic evolution of the Earth. Chronology of tectonic movements*. Leningrad: Nauka, 196 p. (in Russian).
- Raznitsyn, V. A. (1976). Tectonic zoning and genesis of the North zone structures with small size folding of the Donets basin. *Geotektonika*, (1), 57—72 (in Russian).
- Rosly, I. S. (2001). *Geodynamics and oil and gas potential of the Dnieper-Donets riftogen* [Author's ref. dr. geol. sci. diss.]. Chernigiv: UKRDGRI Publ., 27 p. (in Ukrainian).
- Rosly, I. S. (1985). Formation of the structure of the Dnieper-Donets depression in the Carboniferous. *Geotektonika*, (5), 102—105 (in Russian).
- Rosly, I. S., & Stryzhak, V. (2008). Geodynamics of the Dnieper graben at the Devonian-Carboniferous stages of development. *Geolog Ukrainy*, (1), 66—72 (in Ukrainian).
- Smirnov, Ya. B. (1968). The relationship between the thermal field and the structure and development of the earth's crust and upper mantle. *Geotektonika*, (6), 3—25 (in Russian).
- Smyslov, A. A. (1993). Thermal evolution of the Earth. In: *Evolution of geological processes in the Earth history* (pp. 216—225). Moscow: Nauka (in Russian).
- Sollogub, V. B., Borodulin, M. I., & Chekunov, A. V. (1977). Deep structure of Donbass and adjacent regions. *Geologicheskij Zhurnal*, (2), 23—31 (in Russian).
- Soloviev, V. O. (2011). *Chronology of tectonic movements: Phases, epochs, cycles of tectogenesis*. Kharkov: UkrNDIGas, 112 p. (in Russian).
- Starostenko, V. I., Pashkevich, I. K., Makarenko, I. B., Kuprienko, P. Ya., & Savchenko, O. S. (2017a). Lithosphere heterogeneity of the Dnieper-Donets basin and its geodynamical consequences. I part. Deep structure. *Heodynamika*, (1), 125—138. <https://doi.org/doi.org/10.23939/jgd2017.01.125> (in Russian).
- Starostenko, V. I., Pashkevich, I. K., Makarenko, I. B., Kuprienko, P. Ya., & Savchenko, O. S. (2017b). Lithosphere heterogeneity of the Dnieper-Donets basin and its geodynamical consequences. II part. Geodynamics interpretation. *Heodynamika*, (2), 83—103. <https://doi.org/doi.org/10.23939/jgd2017.02.083> (in Russian).
- Stepanov, Yu. V. (1987). Reconstruction of the paleogeothermal regime. In: V. M. Golitsin (Ed.), *Petrology of organic Matter in the geology of fossil fuels* (pp. 200—202). Moscow: Nauka (in Russian).
- Stepanov, P. I. (1944). Tectonics. In: *Geology of the USSR. Donets basin* (Vol. 7, pp. 401—503). Moscow-Leningrad: Gosgeolizdat (in Russian).
- Stovba, S. M. (2008). *Geodynamic evolution of the Dnieper-Donets Basin and the Donbas* [Author's ref. dr. geol. sci. diss.]. Kiev: IGPH NASU Publ., 41 p. (in Ukrainian).

- Stovba, S. N., & Stifenson, R. A. (2000). Comparative analysis of the structure and history of the formation of the southeastern part of the Dnieper-Donets Basin and the Donets fold structure. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 22(4), 37—61 (in Russian).
- Stovba, S. N., & Shimanovsky, V. A. (2000). Quantitative estimation of the sedimentary basins elevation amplitude during the tectonic regime inversions. In: *Theoretical and applied problems of oil and gas geology* (Vol. 2, pp. 63—69). Kiev: Carbon Ltd (in Russian).
- Structural-tectonic map of the Dnieper-Donets depression at a scale of 1:200 000 (on 6 sheets)*. (1996). Kiev: DGP Ukrgeofizika (in Ukrainian).
- Tectonic map of the Ukrainian SSR and Moldavian SSR at a scale of 1:500 000 (on 20 sheets)*. (1988). Kiev: Ukrgeologiya, UkrNIGRI (in Russian).
- Usenko, O. V. (2002). Heat flow and modern activation of the Donets basin (according to new data). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 24(5), 102—111 (in Russian).
- Usenko, A. P., & Usenko, O. V. (2020). Analysis of geothermic parameters of oil—and gas deposits of the central part of the Dnieper-Donets depression. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(3), 127—144. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204705> (in Ukrainian).
- Chekunov, A. V. (1994). The geodynamics of the Dniepr-Donets rift syncline. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 16(3), 3—13 (in Russian).
- Chirvinskaya, M. V., & Sollogub, V. B. (1980). *Deep structure of the Dnieper-Donets aulacogen according to geophysical data*. Kiev: Naukova Dumka, 180 p. (in Russian).
- Shtakh, E., Mackowsky, M.-Th., Teichmuller, M., Taylor, G. H., & Chandra, D. (1978). *Coal Petrology*. Moscow: Mir, 554 p. (in Russian).
- Yakovlev, N. N. (1944). Permian sediments. In: *Geology of the USSR. Donets basin* (Vol. 7, pp. 187—202). Moscow-Leningrad: Gosgeolizdat (in Russian).
- Barker, C. (1988). Geothermics of petroleum systems: Implications for stabilization of kerogen maturation after a geologically brief heating duration at peak temperature. In: L. Magoon (Ed.), *Petroleum Systems of the United States: U.S. Geol. Surv. Bull.* (V. 1870, pp. 26—29). U.S. Government Printing Office.
- Barker, Ch. E., & Pawlewicz, M. J. (1986). The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter. In: G. Buntebarth, L. Stegena (Eds.), *Paleogeothermics: Evaluation of Geothermal Conditions in the Geological Past: Lecture Notes in Earth Sciences* (pp. 79—93). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Burnham, A. K., & Sweeney, J. J. (1989). A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(10), 2649—2657. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90136-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90136-1).
- Corcoran, D. V., & Clayton, G. (2001). Interpretation of vitrinite reflectance profiles in sedimentary basins, onshore and offshore Ireland. In P. M. Shannon, P.D.W. Houghton, D. V. Corcoran (Eds.), *The Petroleum Exploration of Ireland's Offshore Basins* (Vol. 188, pp. 61—90). Geol. Soc., London, Spec. Publ. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.188.01.04>.
- Emujakporue, G., Ekine, A., & Nwosu, L. (2019). Evaluation of Time-Temperature Index and Vitrinite Reflectance for Hydrocarbon Maturity in Parts of Niger Delta Sedimentary Basin, Nigeria. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 4(11), 7—15.
- Misch, D., Sachsenhofer, R. F., Bechtel, A., Gratzner, R., Gross, D., & Makogon, V. (2015). Oil/gas-source rock correlations in the Dniepr-Donets Basin (Ukraine): New insights into the petroleum system. *Marine and Petroleum Geology*, 67, 720—742. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.002>.
- Robert, P. (1985). *Histoire géothermique et diagenèse organique: phdthesis*. Pau: Elf Aquitaine, 345 p.
- Sachsenhofer, R. F., Privalov, V. A., & Panova, E. A. (2012). Basin evolution and coal geology of the Donets Basin (Ukraine, Russia): An overview: European Coal Conference 2010. *International Journal of Coal Geology*, 89, 26—40. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.05.002>.
- Sakaguchi, A. (1996). High paleogeothermal gradient with ridge subduction beneath the Cretaceous Shimanto accretionary prism, southwest Japan. *Geology*, 24(9), 795—798. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.05.002>.

doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0795:HP-GWRS>2.3.CO;2.

Velde, B., Suzuki, T., & Nicot, E. (1986). Pressure-Temperature-Composition of Illite/Smectite

Mixed-Layer Minerals: Niger Delta Mudstones and other Examples. *Clays and Clay Minerals*, 34(4), 435—441. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1986.0340410>.

Палеогеотермічні та палеотектонічні реконструкції за даними вітринітової термометрії (на прикладі верхньопалеозойських відкладів Дніпровсько-Донецької западини та прилеглих частин Донбасу)

А. В. Іванова, В. Б. Гаврильцев, 2021

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

Стаття присвячена палеогеотермічним та палеотектонічним реконструкціям за результатами обробки масиву даних показників відбиття вітриніту вугільної органіки верхньопалеозойських відкладів Доно-Дніпровського прогину (в межах Дніпровсько-Донецької западини і прилеглих частин Донбасу). Встановлено, що палеогеотермічні показники змінювалися під впливом геотектонічних, магматичних і літофаціальних умов формування верхньопалеозойських відкладів. Аналіз змін і закономірностей розподілу палеогеотермічних характеристик дав можливість оцінити еволюцію теплового поля, зміни характеру тектонічних рухів, виявити роль вулканізму, геодинаміки глибинних розломів, потужності літосфери в термальній історії досліджуваного регіону. Показано, що за допомогою палеоструктурного аналізу можна робити висновки щодо змін активності тектонічних структур у часі, послідовності формування цих структур, встановлювати амплітуди їх взаємного переміщення і диференціювати за перспективністю на нафтогазоносність. За результатами виконаної роботи побудовано карти розподілу палеогеотермічних градієнтів і амплітуд вертикальних переміщень породних масивів. Наведені карти слід розглядати як універсальний інформаційний матеріал, який може бути використаний з метою визначення особливостей регіонального розподілу зазначених параметрів, а також стати важливим інструментом у дослідженні тектонічної і термальної історії, виявленні тенденцій змін і закономірностей розподілу палеогеотермічних характеристик.

Ключові слова: вітринітова термометрія, вугілля, органічна речовина, палеогеотермічні та палеотектонічні реконструкції, палеогеотермічний градієнт, амплітуди вертикальних переміщень.