

## Активизация тектоносферы и месторождения углеводородов

© В. В. Гордиенко, 2011

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 25 мая 2010 г.

Представлено членом редколлегии Я. М. Хазаном

Розглянуто процеси генерації та транспортування вуглеводнів у земній корі. Вони відповідають уявленням адвекційно-поліморфної гіпотези. Проаналізовано теплові моделі тектоносфер зон сучасної активізації на докембрійських платформах та в альпійських геосинкліналях. Побудовано схеми геологічних об'єктів і джерел аномалій геофізичних полів. Вони узгоджуються з відомими геолого-геофізичними даними по регіонах з покладами нафти і газу.

Processes of hydrocarbons generation and transfer in earth's crust are considered. They are conformed to the advection-polymorphous hypothesis. Thermal models of tectonospheres in recent activation zones of the Precambrian platforms and the Alpine geosynclines have been analyzed. Schemes of geological objects and sources of geophysical field anomalies have been plotted. They are in concordance with well-known geological-geophysical data in the regions with oil- and gas-fields.

**Введение.** Связь нефтегазоносности с современной активизацией (СА) представляется автору уже достаточно обоснованной различными геолого-геофизическими данными [Гордиенко и др., 2006; Гордиенко, 2007 и др.]. Сама по себе идея такой связи не нова, она достаточно давно обсуждается в геологической литературе [Лукин, 1997; 2004; Поиски ..., 1989; Разломная ..., 1989 и др.]. Однако часто дальше констатации дело не идет. Например, отмечается, что "... важный критерий высокопродуктивных зон генерации УВ (углеводородов — *авт.*) — повышенная тектоническая активность региона в настоящее время ..." [Поиски ..., 1989, с. 48]. Участие СА сводится к обоснованию создания ею зон трещиноватости в породах осадочного чехла и фундамента, в оживлении древних разломов, которые "наиболее резко ... проявились в кристаллическом фундаменте и нижних горизонтах осадочного чехла ... образуют системы тектонических нарушений примерно параллельных направлений. Их ширина достигает 10 км и более" [Разломная ..., 1989, с. 101]. Современная активизация (начавшаяся по мнению ав-

торов работы [Радзівілл А. Я., Радзівілл В. Я., 2006] в послеторгонское время, т. е. после рубежа около 14 млн лет назад) как условие появления и локализации УВ в девонской толще Вольно-Подольской плиты, упоминается только для привлечения внимания к упомянутой стратиграфической единице. Следовательно, в перечисленных публикациях речь идет об условиях транспортировки и размещения УВ, проблема генерации не затрагивается.

Актуальным кажется переход от фиксации связи к анализу механизма образования месторождений УВ в процессе активизации тектоносферы и проявлений СА в физических полях и геологических явлениях, которые могут рассматриваться как поисковые признаки. Последние исследуются преимущественно на материале месторождений Украины, в основном Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ). Речь идет именно о месторождениях, так как имеющихся данных о распространенности следов УВ в породах коры и верхней мантии вполне достаточно для констатации возможности их существования.

**Глубинный процесс современной активизации.** Процесс СА в рамках используемой автором адвекционно-полиморфной гипотезы (АПГ) в принципе не может быть рассмотрен с той же достоверностью, что и более древние, уже закончившиеся [Гордиенко, 2007 и др.]. Причина именно в его незавершенности. Есть основания считать, что в ряде случаев явления, приписываемые современной активизации, представляют собой начальную фазу рифтогенеза. Конечно, можно выбрать в прошлом изолированный эпизод одноактной активности какого-либо региона, который и рассмотреть в качестве примера полностью проявившегося процесса, аналогичного современному [Гордиенко, 2007 и др.]. Анализ такой информации приводит к модели, не противоречащей описанной ниже. Однако эта процедура может быть выполнена только для магматически проявившегося процесса (иначе его диагностика недостоверна). А многие зоны СА сейчас не сопровождаются магматизмом, возможно он не появится и в будущем. Поэтому рассмотрение древних зон активизации не дает уверенности в получении однозначно диагностированной схемы теплопереноса в тектоносфере.

Второе обстоятельство, создающее неоднозначность в моделях перемещения вещества при СА, — распространение этого типа активного процесса в регионах с весьма различными возрастами предшествующих геосинклиналей или рифтов. Широко представлена СА докембрийских платформ (Восточно-Европейской, Сибирской (СП), Африканской, Китайской, Индийской, Австралийской, Антарктической, Северо-Американской, Бразильской). Активизированы многие каледониды (Скандинавии, Великобритании, Гренландии). В состоянии СА находится часть герцинид Европы, Азии, Северной и Южной Америки. Охвачены современной активизацией многие киммериды Америки и Евразии, а также альпиды этих континентов. В последнем случае проблемой представляется выделение процессов активизации на фоне завершающих событий собственно геосинклинального развития. Соответственно в тектоносферах разных зон СА могут различаться по глубине первичные очаги частичного плавления (из которых выносятся перегретое вещество) и вторичные резервуары, в которые оно поступает.

С большой долей вероятности можно предполагать, что в недрах докембрийских платформ, каледонид и герцинид первичные ре-

зервуары образуются в низах верхней мантии, а в альпидах в качестве таковых используется сравнительно неглубокая астеносфера конечного этапа развития геосинклинали [Гордиенко, 2007 и др.]. В киммеридах могут встречаться оба варианта, предпочтение одного из них зависит от особенностей предшествующего процесса (размеров геосинклинали, ее возраста, расположения зоны СА внутри региона и т. д.). Для решения поставленной задачи указанные различия не принципиальны, поэтому представим в качестве иллюстрации распределение температур ( $T$ ) в процессе современной активизации в коре и верхних горизонтах мантии модели для СА докембрийской платформы и альпийской геосинклинали (рис. 1).

Выбор порядка перемещения вещества в тектоносфере при современной активизации платформы определяется несколькими соображениями, учет которых не может заменить обычно используемую информацию о более древних процессах, но все же позволяет надеяться на приближение к реальной схеме. Принимались во внимание [Гордиенко, 2007]:

1) сведения о расположении зоны частичного плавления у подошвы верхней мантии (в интервале глубин примерно 340—470 км);

2) данные о герцинской активизации, из которых следует, что перед попаданием на глубину 40—100 км перегретое вещество

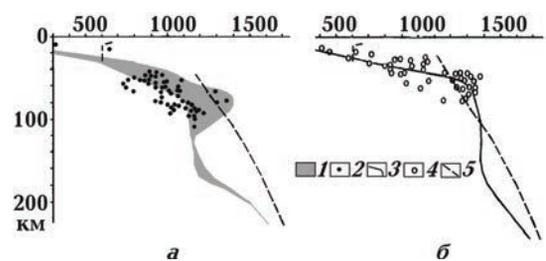


Рис. 1. Расчетные тепловые модели и данные геотермометров в зонах СА (шириной 60 км) докембрийской платформы (а) и альпийской геосинклинали (б): 1 — область расчетных температур зоны СА платформы (в центре и на периферии), 2 — данные геотермометров платформенных зон СА (Алдан, Витим, Чешский массив), 3 — расчетные температуры в зоне СА центральной части альпийской геосинклинали, 4 — данные геотермометров альпийских зон СА (Камчатка, Курилы, Апеннины), 5 — температуры солидуса пород мантии и образований амфиболитовой фации метаморфизма в коре (в интервале глубин 10—30 км).

образовывало очаг частичного плавления на глубине около 100—200 км;

3) отсутствие заметной скоростной аномалии на глубине 100—200 км под зонами СА;

4) отсутствие региональных аномалий теплового потока (ТП) во многих зонах СА и наличие локальных возмущений, указывающих на распространение в средней части коры источника перегретых флюидов (и/или зоны частичного плавления).

Из подкоревой перегретой области (возникшей при подъеме вещества из промежуточного очага под платформой или существовавшей перед началом активизации в альпидях) расплав выносится в кору в интервал глубин 30—40 км (0,5 млн лет назад, занимает около половины объема) и 20—30 км (0,2 млн лет назад, занимает четверть объема). Средняя температура растет здесь на  $300 \pm 50$  °С. Под кору опускаются эклогитизированные блоки основных коровых пород, при достижении астеносферы они понижают ее температуру примерно на 120 °С. Нагрев коры "размораживает" реакцию эклогитизации, быстрому течению которой способствуют флюиды, принесенные мантийными выплавками и образовавшиеся при частичном плавлении пород амфиболитовой фации метаморфизма. Темп преобразований вполне может достигать [Королюк и др., 2004] нужной величины — изменения минералогии за  $10^5$  лет при размере зерна 0,05 мм.

Утонение коры в зоне СА не может быть спрогнозировано в качестве обязательного элемента, но исключать его нельзя. Имеющиеся экспериментальные данные (пока немногочисленные) свидетельствуют в пользу реальности этого процесса. Величина смещения раздела М под зоной (и утолщения коры на периферии) скорее всего ограничена примерно 5 км.

Используемая модель тепломассопереноса в обоих вариантах не предполагает понижения температуры в области полиморфных преобразований у подошвы верхней мантии, достаточных для перехода к более плотной фазе оливина. Утонение коры может привести к опусканию поверхности до 0,6—0,7 км. Расчетное поднятие поверхности, учитывающее изменение температуры обоих знаков на разных глубинах (с разными коэффициентами теплового расширения), составляет около 0,8—0,9 км. Различие незначительно, но все же можно предположить поднятие поверхно-

сти на 100—200 м. Приведенные оценки относятся к СА на докембрийской платформе, для районов активизации альпийских геосинклиналей ситуация еще более неопределенная.

Результаты расчетов температур сопоставлены с данными геотермометров для обоих типов регионов (см. рис. 1), соответствующая библиография приведена в работе [Гордиенко, 2010]. В случае современной активизации докембрийской платформы сравнение не совсем корректно: ксенолиты вынесены молодыми щелочными базальтами, т. е. процесс активизации включает магматическую составляющую, которой нет во многих зонах СА. Тепловые модели в интервалах глубин максимального перегрева довольно близки и не противоречат данным геотермометров. Очевидно, что им должны соответствовать две зоны частичного плавления. Довольно мощная зона находится в подкоревой части мантии (в интервале глубин от 50—60 до 90—100 км), маломощная — в нижней коре на глубине несколько больше 20 км. Последняя может и отсутствовать, если вынос магмы в кору произошел заметно раньше принятых при расчете возрастов процесса. Эта зона может сама служить источником материала для внутрикоревой адвекции, приводящей к образованию отдельных вторжений кислой и средней магмы на глубину до 5—10 км [Гордиенко, 2007].

В период существования слоя частичного плавления в коре выше него располагается область флюидизации — пропитки среды глубинными растворами в количестве нескольких процентов по объему. Вероятно, что именно в ее пределах могут формироваться (при наличии необходимого количества исходных веществ) УВ, которые по проницаемым зонам поступают выше в осадочный слой или верхнюю часть кристаллического фундамента и при благоприятных условиях образуют месторождения.

**Происхождение месторождений УВ.** Принятая схема глубинного процесса не исключает образования УВ в мантии (вероятно, в пределах ее перегретой подкоревой части), в кристаллической коре и осадочном слое (из имеющейся в его породах органики).

Известные данные о биомаркерах и другие признаки участия органики осадочного слоя в образовании части УВ позволяют отнести этот источник к числу реальных [Лукин, Пиковский, 2004], но не обязательно признавать его главным или единственным, хотя

количество углерода органики (С) в подземных водах в 12 раз превосходит С мировых запасов нефти, а его общее количество в осадочном чехле больше на 4 порядка [Швец, 1971] (табл. 1).

Практически в любом районе с мощным осадочным слоем (обеспечивающим попадание органического С в РТ-условия образования УВ) достаточно углерода для создания месторождений. Однако известны залежи нефти и газа, которые нельзя связать с первично-органическим углеродом (т. е. С вещества органического происхождения, не прошедшего переработки метаморфизмом).

Возможность устойчивого существования УВ на больших глубинах в коре и верхней мантии можно считать доказанной, хотя "... модели полного термодинамического равновесия в мегасистеме "газ — вода — нефть — породы — остаточное углеродистое вещество" неинформативны. Они приводят к тривиальным результатам: в условиях осадочного слоя земной коры углеводороды распадаются на термодинамически равновесные продукты: метан, воду, уголекислоту, графит. Поэтому в нефтегазовой геохимии термодинамическое моделирование не рассматривалось до сих пор как эффективное самостоятельное средство исследования. Исключение составляют работы Э.Б. Чекалюка [Чекалюк, 1986 и др.], выполнявшего большую программу научных исследований по определению равновесного компонентного и группового составов углеводородных систем в условиях земной коры и верхней мантии. Им дан положительный ответ на фундаментальный вопрос о возможности существования тяжелых углеводороды в равновесном термодинамическом состоянии вне области их

метастабильного местоположения" [Бычинский и др., 2004, с. 8]. Соответствующие данные приведены на рис. 2 для минимально прогретой коры и верхней мантии. Римейк модели Э.Б. Чекалюка, проведенный в рамках иного метода расчета [Карпов и др., 1998], приводит к доказательству равновесного существования в условиях верхней мантии иных тяжелых УВ. Используемые в обоих случаях температуры на верхнемантийных глубинах существенно ниже реальных. Тем не менее, принципиально картина не меняется, тяжелые УВ в мантии могут устойчиво существовать, возможно в другом, чем на рис. 2, компонентном и групповом составе.

Принципиальная возможность образования УВ в мантии и информация о наличии какого-то их количества на соответствующих глубинах не означает доказательства мантийного происхождения всех или заметной части месторождений УВ. В литературе рассматриваются различные точки зрения [Дмитриевский и др., 1997; 2002; Дмитриев и др., 2000; Краюшкин, 2000; 2007; Лукин, 1997; 2009; Sugisaki, Mimura, 1994 и др.]. Иногда для диагностики генезиса УВ привлекаются сведения об изотопии углерода [Каменский и др., 1976; Лукин, Пиковский и др., 2004 и др.]. Автору этот аргумент не кажется убедительным. В мантии (согласно Э.М. Галимову [Галимов, 1973]) присутствуют две разновидности углерода — концентрированный подвижный (газы, графит, алмаз) с  $\delta^{13}\text{C} - 0,7$  и  $- 1,8$  %, т. е. изотопией углистых хондритов (рис. 3) и рассеянный, не участвующий в образовании газов, поступающий в кору только с интрузиями, с  $\delta^{13}\text{C} - 2,2$  %, т. е. с изотопией хондритов.

Если допустить неизменность  $\delta^{13}\text{C}$  в процессе образования коровых объектов из мантийных, очевидно, что изотопия графита коры соответствует мантийному углероду в случае участия в его образовании всех разновидностей последнего. Нефть вполне может быть связана с коровым графитом или рассеянным углеродом мантии. Однако изотопия газа (в том числе и попутного газа нефтяных месторождений) обнаруживает возможность резких изменений  $\delta^{13}\text{C}$ . Параметр существенно меняется и с глубиной залежи (см. рис. 3). Газ, сорбированный в каменных углях, обладает значениями  $\delta^{13}\text{C}$  от  $- 1,5$  до  $- 7$  % [Галимов, 1973]. Метан, для которого достоверна abiогенная природа (образованный в кристаллических породах срединно-океанических хребтов (СОХ)) имеет  $\delta^{13}\text{C} - 1,4$  % [Богданов и

**Т а б л и ц а 1. Количество углерода в различных объектах осадочной и водной оболочек Земли [Швец, 1971]**

| Объекты          | $S_{\text{орг}}, 10^{12} \text{ т}$ |
|------------------|-------------------------------------|
| Осадочные породы | 3500                                |
| Каменный уголь   | 5                                   |
| Подземные воды   | 2,5                                 |
| Мировой океан    | 2                                   |
| Торф             | 1                                   |
| Почвы            | 0,7                                 |
| Нефть            | 0,2                                 |

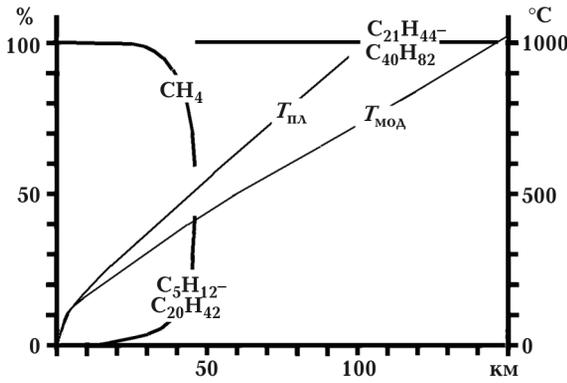


Рис. 2. Состав газовой фазы (массовое содержание, %) системы С—Н в равновесии с графитом (на больших глубинах с алмазом) в земной коре и верхней мантии [Бычинский и др., 2004].  $T_{пл}$  — нормальное платформенное распределение температуры,  $T_{мод}$  — распределение, для построенной модели состава.

др., 2000]. Согласно Э.М. Галимову, существует "... возможность использования гетерогенного фракционирования изотопов углерода для изучения широкого круга геологических процессов. Но в то же время именно наличие тонких и многообразных изотопных эффектов в процессе формирования графитов заставляет предостеречь от излишне прямолинейных выводов о генезисе графита на основании измерений его изотопного состава" [Галимов, 1973, с. 352—353]. Это в полной мере относится и к УВ. Считая известными процедуру и условия их образования (в том числе наличие и относительную концентрацию попутных газов с известной изотопией С) и ис-

ходное вещество, можно пытаться предсказать результат фракционирования. Решение обратной задачи явно неоднозначно.

Поэтому предпочтительней использовать другие аргументы при выборе между кристаллической корой и мантией в качестве источника формирования значимых скоплений УВ. Их следы широко распространены в породах обоих интервалов глубин, но значимыми будем считать скопления с извлекаемыми ресурсами (30—40 % от полных ресурсов) около 5—10 т у. т. / м<sup>2</sup> (у. т. — условное топливо). Именно они пригодны для создания реальных месторождений нефти и газа.

Непосредственное содержание УВ в кристаллических породах Украинского щита (УЩ) незначительно, если данные, полученные вблизи поверхности [Краюшкин, 2007], распространить на всю кору, получим величины плотности ресурсов на 2—3 порядка меньше необходимых для создания месторождений. Однако количество углерода в коре может оказаться весьма значительным. Для оценки параметра логично использовать данные геоэлектрики, по которым выявлены довольно обширные территории на западе щита и под осадочным слоем на Воыно-Подольской плите (ВПП) с интегральными величинами суммарной продольной проводимости ( $S$ ) в "гранитном" (глубже 4 км) и переходном слоях земной коры до 100—150 См (изредка 200—300 См) [Логвинов, Гордиенко, 2009]. В западной части УЩ показана их приуроченность к графитоносным районам [Гордиенко и др., 2005 и др.]. При построении моделей распределения удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) по глубине обнаруживаются

слои значительной мощности (1—5 км) со значениями около 100 Ом·м. При обычном содержании воды (около 0,2 %) в крупных проводящих объектах включения графита, как правило, не составляют связной системы при концентрациях  $C \approx 0,5 \div 5\%$  и определяемое ими  $\rho$  пород оценивается по эмпирической формуле  $\rho = 0,025 C^{-1,78}$  [Гордиенко и др., 2005] в 5—90 Ом·м. Таким образом, выявленные на УЩ и ВПП объекты рассмотренного класса должны соответствовать содержанию минерала на уровне 1%, что по геологическим данным вполне ре-

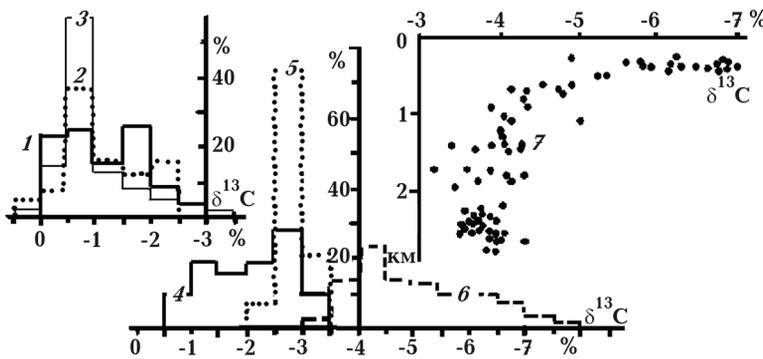


Рис. 3. Изотопия углерода различных образований [Галимов, 1973]: 1 — углистые хондриты, 2 — алмазы, 3 — углекислый газ разного происхождения, 4 — коровый графит и рассеянный углерод интрузивных пород, 5 — нефть, 6 — углеводородные газы, 7 — зависимость  $\delta^{13}C$  от глубины газовой залежи.

ально. Обычно содержание рудных (в том числе магнетита), обеспечивающее формирование известных региональных аномалий магнитного поля УЩ и ВПП, не превышает 10%. Этого недостаточно для возникновения заметных значений  $S$ .

Конечно, выявленные в коре аномалии электропроводности могут быть связаны не с графитом, а с флюидами, возникшими при современной активизации. В этом случае столь незначительные значения  $S$  могут свидетельствовать о поздней стадии процесса, когда слои частичного плавления в коре уже кристаллизовались. Однако размещение рассматриваемых проводников не согласуется с зонами современной активизации, выделенными по комплексу геолого-геофизических признаков.

По геологическим данным неясно, как глубоко и с какой концентрацией распространен графит под поверхностью в графитоносных районах [Яценко, 1998]. Знание величины  $S$  дает возможность найти интегральную характеристику в виде плотности ресурсов графита в коре:  $F_c = H C \sigma$ , где  $H$  — мощность слоя графитизации, м,  $C$  — концентрация графита (порядка 0,01),  $\sigma$  — его плотность (около 2,1—2,3 т/м<sup>3</sup>). Если пренебречь небольшой величиной  $S$  пород, не содержащих графит, и ориентироваться на установленную выше среднюю величину  $\rho$  проводников порядка 100 Ом · м, то мощность слоя составит  $H = 100S$ . Тогда  $F_c = 2,2S$  т/м<sup>2</sup>, т. е. для  $S = 50 \div 150$  См  $F_c = 110 \div 330$  т/м<sup>2</sup>. Это очень большие величины. Например, запасы угля Донбасса создают  $F_c = 3 \div 4$  т/м<sup>2</sup>. Выявленного углерода при его соединении с водородом (и добавкой 25 % массы), поступающим с больших глубин при активизации [Лукин, 1997 и др.], достаточно для создания 10— $n \cdot 10$  последовательно появляющихся и исчезающих (теряющих легкие составляющие и сохраняющих реститовые битумы [Лукин, 1997]) "поколений" месторождений УВ без участия осадочного чехла. Можно отметить, что за пределами указанных зон с повышенными значениями  $S$  встречаются районы, где предполагаемые запасы корового углерода в несколько раз меньше, но не нулевые. Они также могут быть источниками УВ для месторождений, хотя и в меньшем количестве. В частности, в центре плиты в верхней и средней частях коры распространен мощный слой с  $S > 20$  См, т. е. 40 т/м<sup>2</sup>. В сделанных оценках не учитываются многие важные особенности процесса генерации и транспортировки, которые могут существен-

но сократить возможности рассматриваемой коровой толщи в создании месторождения УВ, не назван источник водорода (см. ниже). Однако на достигнутом уровне изученности проблемы детализация представляется преждевременной.

Преимущественная перспективность пород верхней мантии как генератора УВ по имеющимся данным кажется сомнительной, несмотря на довольно широкое распространение такой точки зрения в последние годы, по следующим причинам.

1. Геоэлектрические данные не обнаруживают в мантии концентраций графита, сопоставимых с предполагаемыми в консолидированной коре. На территории Восточно-Европейской платформы вне зон СА значения  $\rho$  пород верхней мантии до глубин около 100 км составляют  $n \cdot 100$  —  $n \cdot 1000$  Ом · м [Semenov et al., 2008]. Конечно, проводящие объекты с параметрами, установленными для графитизированных зон коры, могут быть пропущены при глубинных геоэлектрических исследованиях, но лучшей информации в настоящее время нет.

2. Сведения о составе ксенолитов мантийных пород позволяют оценить концентрации графита величиной на порядки ниже, чем в коровых образованиях. Предположение об участии карбонатитов в образовании УВ радикально не меняет ситуацию, необходимы специальные аргументы в пользу их появления в нужном интервале глубин, в нужное время [Гордиенко и др., 2005 и др.], в нужной концентрации. Углерод карбонатитов изотопно тяжелый —  $\delta^{13}\text{C} = -0,7\%$  [Галимов, 1973].

Информация о метеоритах, которые могут представлять первичное вещество для формирования мантии Земли [Соботович и др., 1982], позволяет оценить содержание С в углистых хондритах (около 5 % общего количества метеоритов) в 2%. Учитывая содержание углерода в остальных метеоритах, получим среднюю концентрацию в исходном веществе 0,15 %, но вынос в кору (где оказалась практически вся вода из углистых хондритов) сокращает эту величину в несколько раз.

3. Количество УВ в газах СОХ (если считать их мантийными, что во многих случаях неверно [Богданов и др., 2000]) много меньше, чем необходимо для формирования месторождений УВ за первые сотни тыс. лет. Выделение в СОХ водорода в большей мере соответствует необходимому для формирования реальных месторождений УВ при усло-

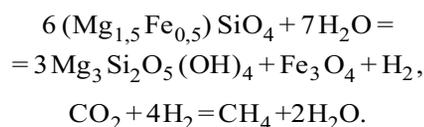
вии дополнения его до метана коровым углеродом.

Количество теряемого Землей водорода (восполняемого дегазацией планеты) составляет  $2,5 \cdot 10^5$  т/год [Белов, 2003]. Если сопоставимая масса  $H_2$  расходуется на образование УВ, то за 100—200 тыс. лет могут сформироваться месторождения, запасы которых сравнимы с разведанными.

В работе [Усенко, 2008 и др.] упоминается возможность замены водного флюида водородным при кристаллизации предварительно расплавленных пород. Такой процесс мог бы представлять интерес в качестве источника водорода для УВ над кровлей зоны частичного плавления в коре или мантии. Однако количественно этот источник  $H_2$  трудно оценить. Кроме того, в работе [Кадик, 1999] аргументирована вероятность появления кислых флюидов при предшествующем плавлении. В работе [Галимов, 1973, с. 337] упоминается, что "... углерод мантии, унаследованный от углистых хондритов, находясь в концентрированной форме в среде, богатой водородом, а также окислами железа, оказывается наиболее реакционноспособным и выносится в земную кору в виде газообразных соединений  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ". Возможно, описанная ситуация могла сложиться в период аккреции, до переработки метеорного вещества. В современной мантии она кажется маловероятной, ее углерод представлен графитом и алмазом. Можно упомянуть об еще одном возможном источнике водорода в коре — радиоллизе поровой воды [Lin et al., 2005]. Проблема недостаточно изучена, но по имеющимся оценкам производительности источника он не может "составить конкуренцию" другим.

Способность консолидированной земной коры формировать месторождения УВ в период СА можно связать с генерацией водорода при серпентинизации ультраосновных и основных пород. "Оливиновые породы редко встречаются в неизменном виде. Обычно они более или менее серпентинизированы и часто целиком превращены в змевики-серпентиниты" [Заварицкий, 1961, с. 223]. "... При проведении глубокой скважины ..., обнаружившей на глубине несерпентинизированный дунит, в дуните была встречена полость, содержащая сильно сжатый газ — водород" [Заварицкий, 1961, с. 226].

Возможны следующие реакции оливина с водным флюидом, содержащим углекислоту [Дмитриев и др., 2000]:



Серпентинизация может охватывать и ромбические пироксены перидотита, ей подвержены и габброиды, но в последнем случае выход водорода быстро сокращается с температурой. Это соображение не может быть препятствием для образования водорода в коре зоны современной активизации, где температура на глубине 30—40 км достигает 700—1000 °С (см. рис. 1). Серпентинизация не связана с поверхностным выветриванием, при нем образуются другие окисленные формы. Для ее протекания необходимы высокие температуры и давления. Процесс считается эпимагматическим, т. е. флюиды, необходимые для серпентинизации, поступают из расплава, образующего интрузию [Заварицкий, 1961]. На дне океана предполагается существенная роль морской воды, глубоко проникающей в перегретые породы вокруг магматического очага в недрах СОХ [Дмитриев и др., 2000]. Впрочем, такой точке зрения противоречит избыточная соленость вод "курильщиков" [Богданов и др., 2000]. Такие же очаги в средней и нижней частях коры (на глубине 20—40 км), сложенных преимущественно основными и ультраосновными породами, формируются за геологически краткое время в период СА.

По оценке из работы [Дмитриев и др., 2000] при переработке части минералов  $1 \text{ км}^3$  гарцбургита и соотношении вода : порода 2 : 1 образуется  $5 \cdot 10^5$  т  $H_2$  и  $2,5 \cdot 10^5$  т  $CH_4$ . При реакции  $H_2$  с коровым углеродом получим (учитывая уже имеющийся метан) ~ 6 тыс.  $\text{м}^3/\text{м}^2$  метана, т. е. 7,5 т у. т. /  $\text{м}^2$ . Образуются извлекаемые запасы ~ 2,8 т у. т. /  $\text{м}^2$  над каждой единицей площади серпентинизированного массива. Более полная переработка породы или вовлечение в процесс слоя мощностью в несколько км, концентрация метана на части территории могут обеспечить формирование реальных месторождений с плотностью извлекаемых запасов около 5—10 т у. т. /  $\text{м}^2$ .

Необходимо отметить, что далеко не все УВ СОХ можно считать абиогенными. По данным из работы [Богданов и др., 2000] в их гидротермальных системах с осадками (бассейн Гуаймас, Срединная долина северной части хребта Хуан-де-Фука, трог Эсканаба, хребет Горда) образование УВ — результат термоллиза органики. Таких УВ вполне доста-

точно для создания толщ, содержащих газогидраты в верхних частях осадочных разрезов дна морей. Ресурсы такого типа иногда оцениваются слишком высоко. Для Охотского моря, где условия благоприятны и имеется довольно подробная информация о возможной толщине залежи и составе газа, плотность ресурсов составляет  $0,025 \text{ т у. т. / м}^2$  [Веселов и др., 2006]. Даже не переходя к извлекаемым ресурсам (сейчас такой расчет не может быть технически мотивирован) и предполагая под слоем газогидратов сопоставимое количество газообразных УВ, следует оценить эти ресурсы как не пригодные для создания месторождений. Конечно, из сказанного не следует обязательное отсутствия месторождений УВ в коре как под газогидратами, так и в районах без них.

По данным для центральной части УЩ на современном эрозионном срезе встречаются преимущественно серпентинизированные гипербазиты мощностью  $0,1\text{—}3 \text{ км}$  [Ультрабазитовые ..., 1979]. С глубиной их количество должно увеличиваться. Некоторые массивы содержат графит. Таким образом, гипотеза корового происхождения УВ представляется реальной. Проблемой, для анализа которой необходимы дополнительные исследования, остается темп рассмотренных процессов генерации водорода и синтеза УВ в реальных условиях активизированной коры. Некоторым аргументом в пользу достаточного темпа генерации водорода могут служить данные работы [Welhan, Grain, 1979] о том, что в рифтовых долинах СОХ за год возникает  $1,3 \cdot 10^9 \text{ м}^3 \text{ H}_2$ ,  $0,16 \cdot 10^9 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$ . Если отнести эти количества к сравнительно небольшим площадям гидротермальных полей, синхронно существующих на осях СОХ в течение  $10^{3-6}$  лет [Краюшкин, 2008], то темп генерации водорода можно признать (на уровне имеющейся информации) достаточным.

Экспериментальные работы по получению водорода при серпентинизации основных и ультраосновных пород проведены для давлений, соответствующих глубинам  $5\text{—}20 \text{ км}$  и  $25\text{—}400 \text{ }^\circ\text{C}$  [Дмитриев и др., 2000]. Для природного процесса в коре СОХ (термальное поле Рейнбоу) установлена близкая минимальная глубина и диапазон температур  $350\text{—}500 \text{ }^\circ\text{C}$  [Barriga et al., 1997]. Возможно, что образование метана из  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}_2$  происходит в ограниченном диапазоне условий, так как отмечены случаи, когда при отсутствии другого источника углерода УВ не возникают.

Этим можно объяснить, в частности, различия газового режима ДДВ и Донбасса. В недрах обоих регионов идет процесс СА, следовательно, из нижней части коры должен выделяться водород. В северо-западной части ДДВ признаки активизации отсутствуют (или проявлены слабо) и значимых месторождений УВ нет. Установить графитонность консолидированной коры ДДВ по геоэлектрическим данным не представляется возможным [Гордиенко и др.; 2006 и др.], но на территории впадины представлена довольно мощная толща рифея, часть которой может служить источником углерода [Лукин, 1997]. Месторождения УВ здесь известны. На территории Донбасса за пределами распространения угленосных толщ (Нагольный кряж и др.) фанерозойские и предположительно рифейские первично-осадочные породы, образующие толщу суммарной мощностью  $20 \text{ км}$ , по геологическим данным не содержат углерода, месторождения УВ отсутствуют. Они появляются только на периферии бассейна и Приазовского массива, где, кроме зон активизации в коре, можно предположить наличие графита. "В центральных частях Донбасса (Нагольный кряж) в составе водорастворенных газов резко преобладает углекислый газ и водород, а углеводороды отсутствуют" [Лукин, 2004, с. 54].

Подобные аномальные потоки глубинного водорода встречены в нескольких районах Восточно-Европейской платформы [Ларин В. Н., Ларин Н. В., 2008]. По-видимому, они не являются редкостью.

Изучение гидротермальных потоков с водородом и метаном, приуроченных к СОХ, показывает не только перспективность рассмотренного механизма для образования месторождений УВ, но и выявляет сложность и ограниченность процесса. В частности, необходимым представляется [Базылев, 2000] предварительный метаморфизм пород, содержащих оливин, при температурах выше  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  (собственно серпентинизации). В этих условиях формируется пылевидная вкрапленность аваруита (самородного сплава с примерным составом  $\text{Ni}_3\text{Fe}$ , часто встречающегося акцессорного минерала в серпентинизированных офиолитах). Наличие таких метаморфических образований в фундаменте СОХ представляется вполне реальным (рис. 4).

Предварительный метаморфизм испытали и породы континентальной коры, примером *PT*-условий таких процессов могут служить данные по УЩ (рис. 5).

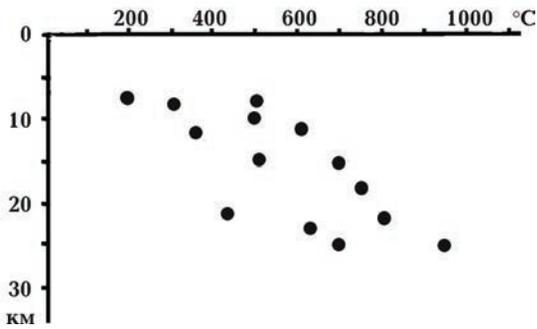


Рис. 4. Условия метаморфизма пород фундамента Срединно-Атлантического хребта [Прогребницкий, Трухалев, 2002].

При воздействии горячего флюида на метаморфизованную породу низов коры СОХ фугитивность кислорода в ходе серпентинизации буферизуется аваруитом, а углекислоты — кристаллизующимся кальцитом и доломитом. В результате флюид резко обогащается  $H_2$  и  $CH_4$ . Такой же процесс предполагается в континентальных оливинсодержащих породах (как правило, под влиянием флюидов с гораздо меньшей температурой, вплоть до 100—200 °С). Восходящий над серпентинизированными породами поток восстановленных горячих флюидов переносит микроскопические частицы металлов, сульфидов и карбонатов — сложный комплекс, совершенно чуже-

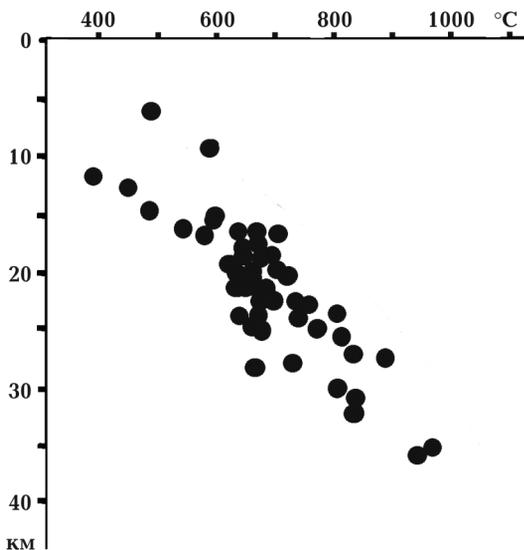


Рис. 5. Условия метаморфизма пород УЩ (данные разных авторов, собранные в работе [Гордиенко и др., 2005]).

родный по составу породам, в которых формируется залежь УВ.

Реально площадь выходов серпентинизированных пород фундамента Срединно-Атлантического хребта на поверхность дна на порядок больше площади гидротермальных полей с высокими концентрациями водорода и метана [Базылев, 2000]. Возможно, временные рамки процесса достаточно ограничены.

Необходимо упомянуть и процедуру транспортировки и накопления УВ, представления о которых довольно разнообразны [Галимов, 1973; Гордиенко и др., 2006; Лопатников, 1999; Лукин, 1997 и др.]. Возможность очень быстрого перемещения флюида в активизированной среде (аномального временного роста проницаемости трещиноватых зон) уже достаточно хорошо обоснована геотермическими данными. В частности, тепловая модель, построенная для одного из таких активных эпизодов (модель "термального купола") проконтролирована данными геотермометров до глубин в несколько километров [Гордиенко, 2007 и др.] (рис. 6). Она отличается от моделей в зонах СА Донбасса, УЩ и других (температуры в недрах последних ниже на сопоставимых глубинах), так как построена для случая мощной флюидонепроницаемой толщи у поверхности, существовавшей в киммерийское время в Донбассе, предварительного прогрева среды процессами в герцинской геосинклинали, повышенной температуры поверхности в мезозое. Именно ее можно проконтролировать независимыми данными.

Из рассмотренного механизма форма транспортировки УВ, обеспечивающая их накопление в месторождениях, не очевидна. Содержание нефтяных кислот и фенолов в водах ненефтеносных артезианских бассейнов (2 и 1 мг/л соответственно) принципиально не отличается от такового в водах нефтяных месторождений ( $3,5 \pm 3$  и  $2 \pm 1,5$  мг/л) [Швец, 1971]. Поскольку месторождения неповсеместны, приходится констатировать невозможность накопления УВ, переносимых в растворенном виде водами. Это подтверждают и расчеты, основанные на растворимости их в реальных *PT*-условиях недр.

Ориентируясь на данные рис. 6, можно утверждать, что влияние спада *P* и *T* при подъеме флюида может обусловить потерю легких УВ. Тяжелые могут "застревать" в мелких порах и также накапливаться в породах осадочной толщи в рассеянном состоянии в виде мельчайших капель и частиц [Галимов,

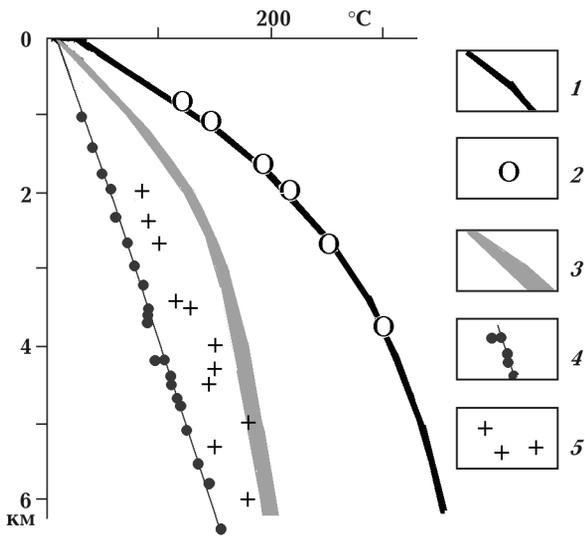


Рис. 6. Тепловые модели киммерийского термального купола на главной антиклинали Донбасса и современных термальных куполов УЩ и Донбасса: 1 — расчетное распределение температур киммерийского купола, 2 — температуры по данным геотермометров, 3 — расчетное распределение температур в центрах современных термальных куполов УЩ и Донбасса, 4 — средние наблюдаемые температуры в скважинах ДДВ (для фонового ТП 43 мВт/м<sup>2</sup>), 5 — максимальные измеренные температуры в скважинах ДДВ.

1973]. Этот углеводородный фон не создает месторождений, для их образования необходима очень быстрая мобилизация УВ и перенос в концентрированном виде в коллектор. Необходимым условием представляется "встряхивание" среды, "... сейсмический фактор следует рассматривать не как способствующий, а как определяющий саму возможность процесса миграции и аккумуляции углеводородов ... транспортирующая роль газа, возможно, состоит не в образовании газового раствора, а в механизме наподобие флотации" [Галимов, 1973, с. 141—142].

Сейсмичность (прежде всего, широко распространенные слабые землетрясения) характерна именно для зон СА, но часто события с малой магнитудой плохо изучены. В пределах Украины и прилегающих территорий соседних стран распределение эпицентров землетрясений показано на рис. 7.

Землетрясения происходят во всех нефтегазоносных регионах Украины, но в наиболее богатом углеводородами (Днепроовско-Донецком) их очень мало. Не исключено, что

это связано с недостатками изученности. На Воронежском массиве слабые землетрясения, эпицентры которых показаны на рис. 7, в основном не были известны до проведения специальных работ, направленных именно на обнаружение подобных событий.

Рассмотренная схема образования УВ и формирования их месторождений отчасти гипотетична, но обладает согласованностью элементов в рамках представлений АПГ и позволяет наметить геолого-геофизические особенности, присущие нефтегазоносным регионам.

**Прогнозные признаки нефтегазоносности.** Следует сразу же отметить, что признаки СА, необходимой для образования УВ, не указывают однозначно на наличие месторождений в зоне СА. Рассмотренный выше механизм возникновения нефтегазоносности показывает, что УВ при отсутствии соответствующих условий могут не возникать в глубинном очаге или не накапливаться в приповерхностных ловушках. Поэтому рассматриваемые ниже критерии не заменяют обычно используемые поисковые признаки нефтегазоносности, а дополняют их.

Естественно рассматривать особенности, которые могут быть сопоставлены с экспериментально установленными данными. Последние представлены весьма неравномерно: для некоторых можно использовать материал, полученный на территории всей северной Евразии, для других — на ограниченной территории ДДВ. Практически все критерии, фиксируемые в ДДВ, отмечены и в других нефтегазоносных регионах Украины — в Карпатах и на Скифской плите. Однако соответствующие объекты и физические поля нуждаются в дополнительном изучении, только после его завершения здесь можно будет получить картину, сопоставимую по достоверности с изученной в ДДВ.

*1. Перегрев верхних горизонтов мантии и земной коры.* Это неперемный элемент процесса, источник аномалий физических полей, поднятий поверхности и других геологических явлений в зонах СА. В мантии температурная аномалия (отличие от платформенного распределения  $T$ ) достигает 400—600 °С в центре зоны, средняя по всему активизированному объему величина аномалии в 1,5—2 раза меньше. В нижней и средней коре вскоре после вторжения мантийных выплавок тем-

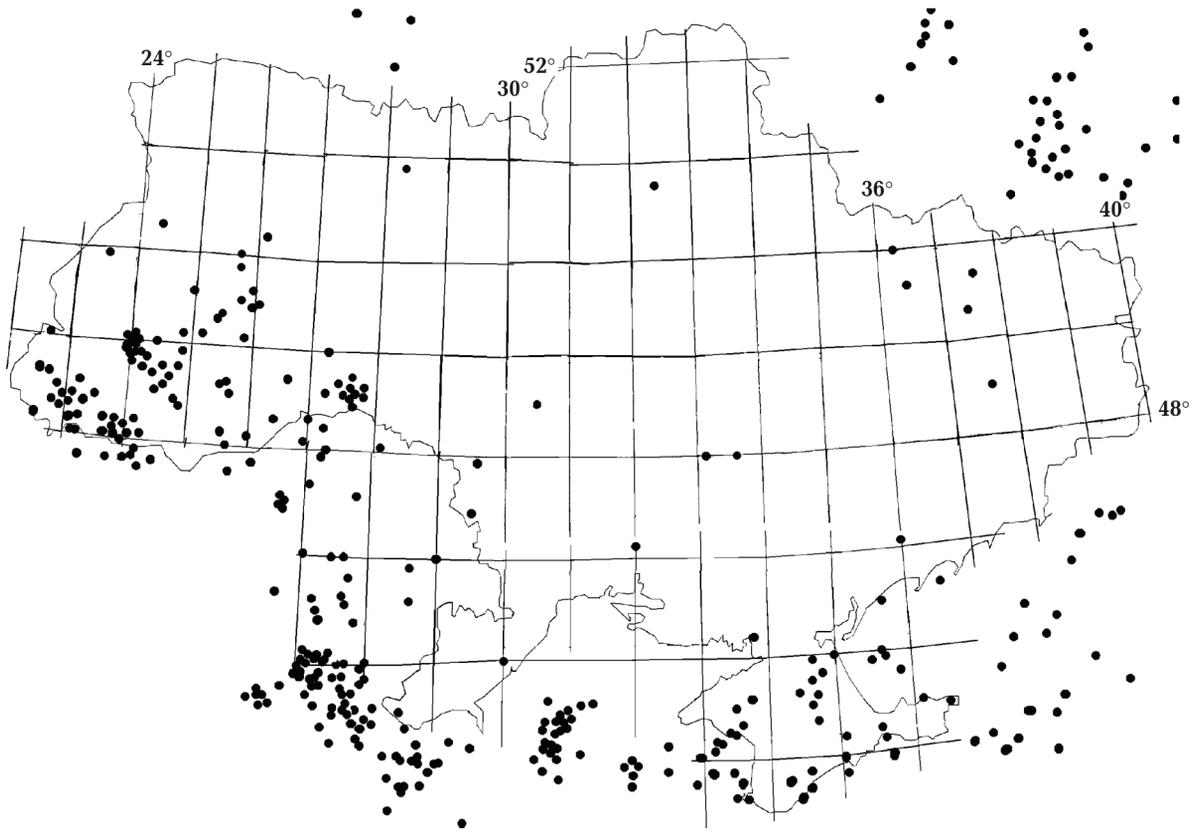


Рис. 7. Размещение эпицентров землетрясений [Андрущенко, Гордиенко, 2009; Савко и др., 2008; Сафронов, 2005 и др.].

пература превышает солидус пород амфиболитовой фации в средней коре ( $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и может приближаться к солидусу пород гранулитовой фации в нижней коре ( $900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), создавая возмущения интенсивностью  $200\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Коровые аномалии быстро релаксируют, выше зоны вторжения мантийных магм температуры могут быть повышены вокруг отдельных штоков кислого и среднего расплава, поступивших в верхнюю кору. Над последними тепло переносится гидротермами и в зависимости от стадии процесса перегрев может быть представлен локальными аномалиями около сравнительно тонких проницаемых зон (шириной в первые сотни метров, при территориально близких зонах ширина аномалий может быть много больше) или более обширной аномалией, образованной прогревом всей верхней части коры источниками тепла в нижней и средней частях.

2. *Аномалии ТП.* Возмущения теплового потока Земли часто сопровождают зоны СА и районы нефтегазоносности. Однако, как

показывают специальные расчеты, в принципе они не обязательно должны существовать в виде значительных по площади аномалий, доступных для фиксации при обычной неравномерной и редкой сети определений ТП. При достаточно молодом возрасте мантийных (первые миллионы лет) и коровых (в сотни тысяч лет) источников тепла их влияние еще не достигает приповерхностной зоны, где определяется геотермический градиент и ТП. Прогрев охватывает только ближайшие окрестности проницаемых зон разломов, по которым поднимается глубинный флюид. Поэтому аномальные ТП могут быть представлены локальными возмущениями, ширина которых не превышает  $1\text{--}1,5\text{ км}$  [Гордиенко и др., 2006].

Интенсивности локальных и региональных аномалий сопоставимы и достигают в максимуме  $20\text{--}25\text{ мВт/м}^2$ . В зонах на платформе абсолютные величины ТП составляют  $60\text{--}65\text{ мВт/м}^2$ , в альпийских геосинклиналях они сильно варьируют в зависимости от части

региона: в передовом прогибе практически не отличаются от платформенных, в тыльном прогибе превышают 100 мВт/м<sup>2</sup>.

3. *Аномальная изотопия гелия подземных вод.* Частичное плавление пород мантии, перенос мантийных выплавов в кору, вторжение более кислых магм в верхнюю часть коры, циркуляция глубинных флюидов в пространстве над ними — все это способствует попаданию мантийного гелия (с содержанием <sup>3</sup>He в 1000 раз большим, чем в коровом) в подземные воды активизированного региона. Такие аномалии — прямое указание на наличие мантийного этажа процесса и его молодость. Однако практически этот критерий не всегда может быть использован, так как аномалии очень локальны, исчезают на небольшом расстоянии от канала, выводящего флюиды на глубину, где они становятся доступны изучению.

4. *Поднятия поверхности в последние миллионы лет.* Сделанная выше весьма приближенная оценка указывает на возможность поднятия с амплитудой 100—200 м. Основным источником поднятий — перегрев верхних горизонтов мантии — обладает большой мощностью и расположен на глубине, сопоставимой с линейными размерами зоны СА. Поэтому следует ожидать меньшей амплитуды поднятий на большей территории, чем занимаемая источником.

5. *Оживление разломов.* Перемещения по разломам на границах зон СА и внутри них неизбежны. Но и здесь можно высказать соображения, сходные с приведенными по отношению к поднятиям поверхности. "Оживление" части древнего разлома с большой степенью вероятности приведет к перемещению на его продолжении вне зоны, т. е. этот признак активизации будет зафиксирован на слишком большой территории.

6. *Землетрясения.* Источником напряжений, разрешающихся в форме землетрясений, могут быть различные элементы процесса СА в коре и верхней мантии. Подробнее вопрос рассматривается в публикациях [Гонтовая и др., 2007; 2009; Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., 2008 а, б]. Приуроченность местной сейсмичности к зонам СА кажется весьма вероятной, но это явление может быть представлено событиями заметно разной глубинности в альпийских регионах и более древних. Кроме того, сейсмичность, связанная с перемещениями блоков пород, изменивших плотность в результате полиморфных преобразований, мо-

жет быть локальной во времени и не попадать в период наблюдений. Как указывалось выше, слабые землетрясения могут просто не фиксироваться наличной сетью станций.

7. *Зоны аномально высоких пластовых давлений (АВПД).* Их возникновение неизбежно при вторжении перегретых высоконапорных флюидов в залежь УВ. Реальная проницаемость вмещающих пород не позволяет высоким давлениям сохраняться длительное время. Речь идет о временных отрезках совсем не геологического характера — сотнях и тысячах лет. Поэтому существование в настоящее время зон АВПД на многих месторождениях указывает на продолжающуюся подпитку месторождения флюидами, на незавершенность процесса формирования залежи.

8. *Зоны гидрохимической инверсии и микрочастицы.* Химический состав вещества, растворенного в глубинных флюидах, даже в случае их частичного смешивания с подземными водами поверхностного происхождения, должен существенно отличаться от состава соединений, растворенных в последних. В случае нефтегазоносных регионов Украины это означает прежде всего замену хлор-натриевых вод (соль распространена в осадочном слое ДДВ, Предкарпатского и Закарпатского прогибов, на части Скифской плиты) карбонатными (в источнике флюидов они контактируют с кальцитом, образование которого буферизирует СО<sub>2</sub>) и появление множества более тонких особенностей состава растворенных солей.

В восстановленном флюиде, переносящем водород и метан от кровли серпентинизируемых основно-ультраосновных пород средней и нижней частей коры к интервалу глубин, где с использованием графита кристаллической коры или углерода осадков завершается формирование УВ, и выше (к залежам месторождений), должны присутствовать следы весьма сложной процедуры его образования. Их можно оценить по имеющимся данным о породах и процессах на гидротермальных полях СОХ и массивах основных—ультраосновных пород континентов (которые часто необоснованно все подряд именуют офиолитами).

В составе серпентинитов (табл. 2), через которые проходит флюид, присутствуют остаточный аварит (размеры включений составляют до 3—20 мкм) пентландит и хизлевудит (5 мкм), шпинель [Базылев, 2000]. Микропрорастаниями представлена и часть кальцита и доломита в серпентине. В основно-ультраос-

**Т а б л и ц а 2. Содержание элементов в некоторых рудных минералах серпентинитов СОХ [Базылев, 2000], %**

| Элемент | Аваруит | Пентландит, хизлевудит | Шпинель |
|---------|---------|------------------------|---------|
| S       | 0,12    | 33,39                  | —       |
| Ni      | 74      | 44,22                  | —       |
| Fe      | 24      | 20,39                  | 29      |
| Cu      | 1       | 0,07                   | —       |
| Co      | 0,7     | 1,47                   | —       |
| Zn      | 0,04    | 0,01                   | 0,2     |
| Pb      | 0,04    | 0,02                   | —       |
| O       | —       | —                      | 19      |
| Ti      | —       | —                      | 0,3     |
| Al      | —       | —                      | 6       |
| Mn      | —       | —                      | 1       |
| Mg      | —       | —                      | 4,5     |
| Cr      | —       | —                      | 35      |
| V       | —       | —                      | 0,1     |

новых комплексах континентов "... около 15 % сульфидов находится в зернах размером менее 2—5 мкм, представляя нано- и микрочастицы ..." [Раскаев и др., 2009, с. 635]. Отчасти мелкими зернами представлен хромит (с примесями Al и Mg, реже Mn, Ti, V), Pt (и платиноиды), Au, SnO<sub>2</sub>, TiO. Касситерит включает вкрапленность Ti, Nb, Ta, Fe, Cr, V, W размером 1—100 мкм. При метаморфизме пироксенов (баститизации) из породы выносятся хром и алюминий.

Вопрос в том, как далеко все эти микро- и наночастицы способен перенести рассматриваемый флюид, достигнут ли они месторождений УВ. Вероятен положительный ответ, так как можно считать доказанным, что позднедокембрийские микрофоссилии размером 1—100 мкм [Асеева, 1976] переносятся им в ДДВ в верхний палеозой — на расстояния до 5—10 км [Лукин, 1997].

Поэтому, кроме сложного состава солей, растворенных в глубинном флюиде, можно ожидать и накопления в коллекторе (месте остановки или резкого замедления восходящего потока флюида) отложений, обогащенных весьма разнообразными и нехарактерными для вмещающих пород микрочастицами.

**9. Аномалии скорости сейсмических волн.** Эти возмущения связаны как с перегревом, так и с изменением состава и минералогии пород коры и верхней мантии. Перегрев и базификация коры создают сложную картину отрицательных и положительных аномалий скорости, наложенную на скоростной разрез региона, предшествующая геологическая история которого также могла сформировать заметные отличия скорости от фоновой. В результате выделение возмущений, относящихся именно к СА, трудно провести на достоверном уровне [Гордиенко и др., 2005; 2006].

Отрицательная скоростная аномалия в верхней мантии должна быть заметна начиная от раздела М до 150 км (см. рис. 1), ее интенсивность (для продольных волн) в максимуме может достигать 0,3 км/с. Однако и в этом интервале глубин вероятно появление положительных возмущений скорости, связанных с погружающимися в мантию блоками эклогитизированных коровых пород. Данные ксенолитов из кимберлитов СП показывают, что такие породы могут сохранять минеральный состав (и соответственно аномальные свойства) долгое время [Уханов и др., 1988]. И все же можно ожидать, что в зонах СА на платформах наиболее распространены эклогиты, лишь незначительно опустившиеся под раздел М [Гонтовая и др., 2009]. Их наличие должно полностью компенсировать отрицательную аномалию тепловой природы. Таким образом, в подкоровой мантии можно прогнозировать отрицательную аномалию скорости с максимумом около 0,1—0,2 км/с на глубине 90—100 км.

**10. Сокращение глубины раздела М.** Схема глубинного процесса СА не включает сокращение мощности коры в качестве обязательного элемента. В этом смысле нельзя считать предположение о подъеме раздела М прогнозным признаком СА (и области, перспективной на месторождения УВ), тем более, что даже экспериментально фиксируемое изменение мощности коры может быть обусловлено иной причиной. Тем не менее сравнение выказанного предположения с известными данными ГСЗ представляет интерес, так как многие особенности тепломассопереноса при СА нуждаются в уточнении, достоверная схема незавершенного процесса создается с привлечением всех пригодных для этого данных.

**11. "Мантийная" гравитационная аномалия.** Тепловое разуплотнение верхних горизонтов мантии в процессе СА не вызывает со-

мнений. Расчет показывает, что при обычных размерах зоны интенсивность соответствующей ему гравитационной аномалии достигает величины незначительно больше 20 мГал, на границе зоны опускается до 20 мГал. Это возмущение не просто выделить на фоне, точность вычисления которого определяется погрешностью скоростного разреза коры и обоснованностью представлений о связи скорости сейсмических волн и плотности пород.

Прогноз аномалии должен также учитывать наличие зон разуплотнения в коре. Последние могут и не отражаться в скоростях, так как представлены сравнительно тонкими вертикальными объектами — проницаемыми каналами разломов, по которым поднимаются глубинные флюиды. Способ вычисления мантийной гравитационной аномалии, сводящийся к определению гравитационного эффекта коры и нормальной мантии и вычитанию его из наблюдаемого поля, приводит к тому, что влияние проницаемых зон разломов попадает в мантийный эффект, хотя источники располагаются в коре. Расчет показал, что непосредственно над разломом отрицательная гравитационная аномалия может достигать 5 мГал.

**12. Аномалии проводимости.** Описанные выше перегрев и частичное плавление пород коры и верхней мантии в зонах СА должны проявляться в объектах высокой электропроводности. Собственно расплав не обладает особенно низким  $\rho$  (находится на уровне 0,7 Ом·м). При содержании магмы на уровне примерно 2% [Гонтовая и др., 2007]  $\rho$  сокращается до 50 Ом·м,  $S$  объекта мощностью 10—50 км порядка 200—1000 См. Содержание в расплаве флюида (которое может достигать 50%) увеличивает  $S$  в несколько раз. Однако более вероятна миграция флюида в пространство над зоной частичного плавления. В мантийном объекте флюид в значительной мере уходит с магмой, вторгающейся в кору, способствует быстрой экологитизации пород.

В коре на роль источника флюидов при прогреве и частичном плавлении в реальных породах "гранитного" и переходного слоев консолидированной коры претендует, прежде всего, биотит. Его содержание в гранитах до 5%, во многих гнейсах до 15%. Этот минерал содержит структурную воду ( $n \cdot \%$  по объему), ее большую часть (около 60%) отдает при

температуре 600—700 °С, т. е. при его переходе в менее водосодержащие и безводные минералы образовавшиеся поры будут заполнены флюидом. Трещиноватость не обязательно ведет к появлению заметного порового пространства. Однако при переходе биотита через амфиболы к пироксенам (переход амфибол — пироксен тоже связан с выделением воды) плотность растет примерно на 3%, что должно обеспечить сопоставимый поровый объем. Таким образом, в среде появляется  $n \cdot 0,1 \%$  включений с низким сопротивлением ( $\rho$  магматического флюида можно оценить как 0,04 Ом·м) [Гордиенко, 2001],  $\rho$  среды достигает  $n \cdot 1—10$  Ом·м. При мощности объекта в 10—15 км получим величину  $S$  до первых тысяч сименсов. Вероятно, связность имеющихся в породах включений графита и рудных (в фоновых количествах) при этом не увеличивается, во всяком случае, они заметно не влияют на падение  $\rho$ .

На фоне рассмотренного проводника слой расплава в коре (если он сохранился к настоящему времени) вносит незначительный вклад в суммарную величину  $S$  коры. Под флюидным объектом в средней части коры зачастую невозможно достоверно выделить и мантийную зону частичного плавления.

**Сопоставление прогнозных и экспериментальных данных.** Рассмотрим, насколько прогнозны признаки нефтегазоносности, связанные с СА, совпадают с известными геолого-геофизическими данными.

1. Расчетные тепловые аномалии в мантии под различными зонами СА можно проконтролировать данными геотермометров в некоторых регионах. Такая информация достаточно широко распространена в альпийских геосинклиналях и редко встречается на платформах. Кроме того, молодой магматизм части СП и Чешского массива не сопровождается образованием месторождений УВ, а в нефтегазоносных регионах платформ (от докембрийских до эпикиммерийских) магматизм отсутствует. Поэтому трудно говорить о должном контроле тепловой модели верхних горизонтов мантии платформенных зон нефтегазоносности геотермометрами. Тем не менее можно констатировать, что расчетные модели неплохо согласуются с этой информацией. Отклонения не превышают обусловленные погрешностями определения  $PT$ -условий образования минерального состава пород ксенолитов.

Расчетное распределение температур в верхней части коры отражает максимальный вариант модели для центра проницаемой зоны с поднимающимися флюидами. Уже на незначительном расстоянии от него температуры должны быть близки к фоновым, характерным для среднего ТП в регионе. Для ДДВ это  $43 \text{ мВт/м}^2$ , соответствующие температуры широко распространены во впадине. Максимальные зафиксированные температуры приближаются к расчетным аномальным или совпадают с ними (см. рис. 6).

Во внешней зоне Предкарпатского прогиба (с платформенным основанием), где фоновый ТП незначительно отличается от наблюдаемого в ДДВ, аномалии интенсивнее и больше распространены. То же можно сказать о Скифской плите. Не исключено, что процесс тепломассопереноса в коре этих регионов начался несколько раньше, чем в ДДВ.

Температуры в осадочном слое нефтегазонасных регионов альпид (Карпат, Закарпатского и Паннонского прогибов, Камчатки) существенно выше из-за иного фона.

2. Аномалии ТП представлены во всех нефтегазонасных регионах Украины, в Паннии, Предкавказье, на Камчатке, Западно-Сибирской плите и др. Во всех альпидах (исключая их передовые прогибы) они значительно превосходят наблюдаемые в платформенных бассейнах. Различия примерно соответствуют прогнозным (см. выше). Сложнее всего аномалии диагностируются в регионах, где связаны только с локальным прогревом пород у проницаемых разломов. Одним из примеров такой ситуации может служить тепловое поле ДДВ. Фоновый тепловой поток здесь невысок —  $43 \text{ мВт/м}^2$ . Определяя аномалию как превышение фона на три среднеквадратических погрешности, получим величину  $55 \text{ мВт/м}^2$ . Распределение пунктов, в которых установлены такие (и большие) значения ТП, показано на рис. 8. Очевидно, что аномалии встречаются по всей впадине. В переходной зоне от ДДВ к Донбассу их концентрация растет, в Донбассе это уже не локальные возмущения, а аномалии, занимающие значительную часть региона. Параметры процесса современной

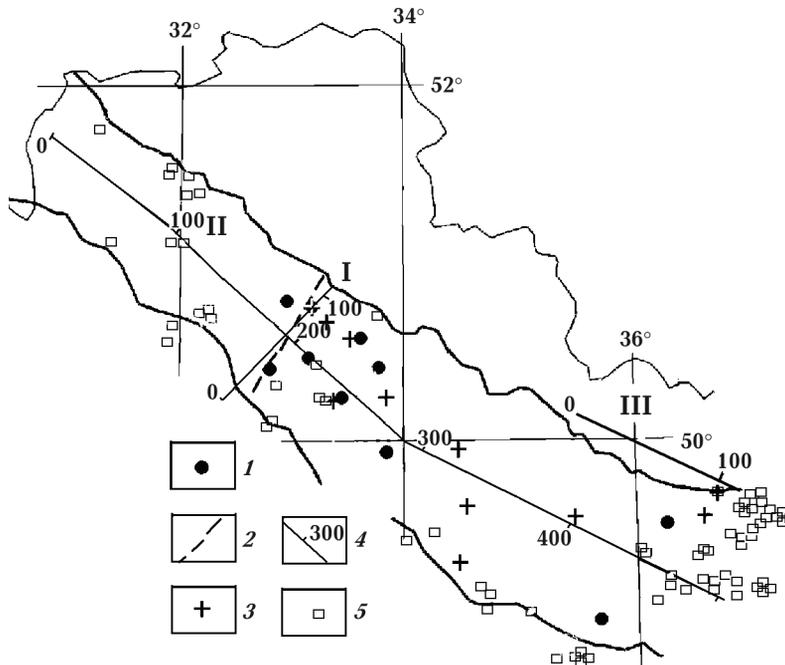


Рис. 8. Некоторые признаки активизации и нефтегазонасности ДДВ: 1 — аномалии  $^3\text{He}/^4\text{He}$ , 2 — северо-западная граница зоны гидрогеологической инверсии [Лукин, 1997], 3 — зоны АВПД на месторождениях, для части которых установлен возраст залежи менее 1 млн лет [Атлас ..., 1998; Лукин, 1997], 4 — профили I и II, вдоль которых построены двумерные геоэлектрические модели, и профиль III гравитационного моделирования [Гордиенко и др., 2006] (см. ниже), 5 — пункты с ТП более  $55 \text{ мВт/м}^2$ .

активизации в ДДВ и Донбассе в этом смысле различны.

Довольно неожиданно выглядит распространение аномалий ТП на северо-западную часть ДДВ, где отсутствует современная нефтегазоносность (см. рис. 8). Возможно, возмущения ТП здесь созданы другими механизмами, что существенно понижает роль ТП как признака нефтегазоносности. Для уверенности в таком выводе необходимо более детально изучить возрасты остаточных битумов (предположительно следов существовавших ранее месторождений УВ [Лукин, 1997]) в Деснянском бассейне.

Впрочем, объяснение несовпадения аномалий ТП и месторождений УВ может быть связано с ограниченным развитием углеродсодержащей толщи рифея в ДДВ. Обломки ее пород известны только между меридианами 34 и 37° в. д. [Лукин, 1997], хотя нельзя исключать некоторого продолжения толщи за эти пределы (месторождения УВ прослеживаются до меридиана 32° 15') [Атлас ..., 1998].

3. Изотопное отношение гелия подземных вод ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) определялось во многих нефтегазоносных регионах: на Камчатке [Каменский и др., 1976], в Предкавказье [Поляк, 1988], в ДДВ, Припятском прогибе, Карпатах, Паннонии, на Скифской плите [Гордиенко, Тарасов, 2001] и др. Во всех случаях фиксируются аномалии различной интенсивности, свидетельствующие о попадании в приповерхностные флюиды мантийного гелия. Впрочем, картина не кажется совершенно однозначной: в ДДВ интенсивность аномалий незначительна, в Карпатах и на Скифской плите они много больше. В Предкарпатском прогибе, где сосредоточены основные запасы УВ региона, аномалии изотопии гелия отсутствуют.

Превышение фоновых значений  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (около  $2 \cdot 10^{-8}$ ) в ДДВ фиксируется только на юго-восточной части впадины (см. рис. 8) — примерно до меридиана 32° 45'. На северо-западе (Деснянский бассейн) аномалии отсутствуют, они появляются в Припятском прогибе. Это соответствует распределению месторождений УВ во впадине и прогибе [Атлас ..., 1998].

Аномалии изотопии гелия в ДДВ локальны: в единственном случае, когда изучено распределение  $^3\text{He}/^4\text{He}$  в зависимости от расстояния до разлома (к которому приурочен максимум возмущения), фоновое значение достигается в километре от него.

В целом можно считать, что прогнозный изотопно-гелиевый критерий нефтегазоносности оправдывается, но его применение существенно ограничено редкой и неравномерной сетью определений  $^3\text{He}/^4\text{He}$ .

4. Поднятия поверхности впадины, произошедшие за последние примерно 3 млн лет, приведены на рис. 9 по данным работы [Верховцев, 2006]. Представленная картина поднятий в общем не противоречит сделанному прогнозу. Северо-западная граница активизированной части впадины оказывается примерно на том же месте, что и на рис. 8. Однако создается впечатление (особенно при сравнении с данными о перемещениях поверхности за больший период), что перестройка плана поднятий еще не завершена, выделение нефтегазоносной части ДДВ в самостоятельную структуру продолжается.

Заслуживают внимания "ответвления" аномальных поднятий из ДДВ на склон Воронежского массива в районе меридиана 34° в. д. Восточнее меридиана 35° в. д. в пределах аналогичной зоны поднятий известны месторождения газа в породах фундамента севернее краевого разлома ДДВ.

5. Перемещения по разломам в период СА отмечены в работе [Верховцев, 2006] практически по всей территории Украины. Это не удивительно, так как зон много, а движения по разломам могут, по-видимому, распространяться за их пределы. В ДДВ представлены преимущественно сбросы и взбросы, часть нарушений наследует крупные древние разломы или близка к ним, большинство моло-

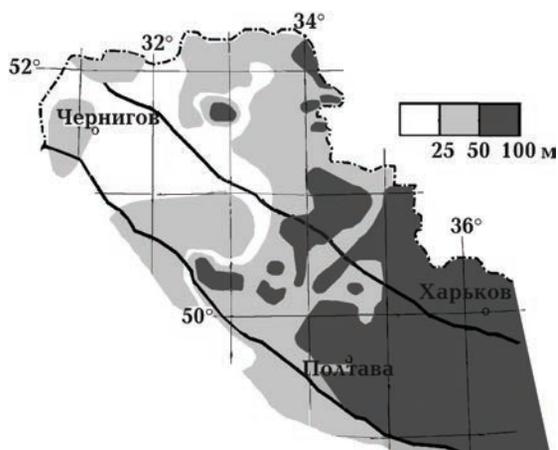


Рис. 9. Распределение амплитуд поднятий поверхности в районе ДДВ за последние 3 млн лет [Верховцев, 2006].

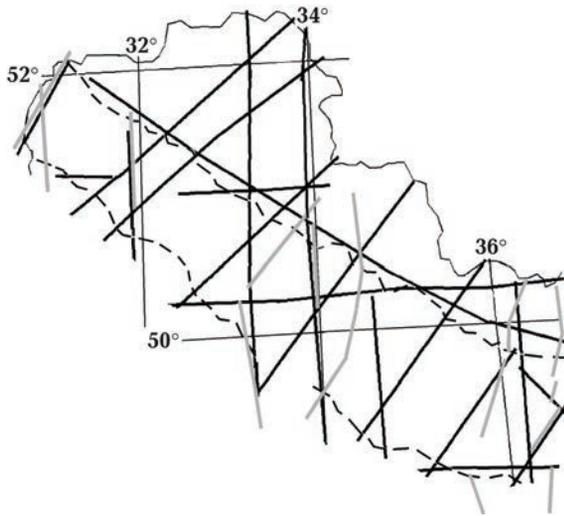


Рис. 10. Разломы, активизированные в последние 3 млн лет [Верховцев, 2006]. Серым цветом показаны крупные древние разломы [Карта ..., 1988].

дых нарушений "оживляют" мелкие древние разломы или проходят по местам, где такие ранее не фиксировались (рис. 10).

Таким образом, разломы в ДДВ активизированы, это способствует переносу глубинных флюидов, прогнозный диагностический критерий присутствует, но его значение для локализации региона, перспективного на месторождения УВ, практически нулевое. Примерно то же можно сказать и о сейсмичности (см. рис. 7). Не исключено, что при более детальном исследовании в пределах впадины будет обнаружено больше слабых землетрясений. В других нефтегазоносных регионах в Украине и за ее пределами сейсмичность в той или иной мере проявляется, однако обнаруживается и в зонах СА без месторождений УВ.

Прогнозировать глубину гипоцентров для зон СА, включающих весьма различные варианты глубинного процесса, невозможно. Вероятным кажется предположение о том, что должны быть широко представлены мелкофокусные землетрясения, но в отдельных случаях (скорее всего, в тех же зонах СА вне нефтегазоносных регионов) могут встречаться более глубокофокусные, вплоть до самых глубоких [Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., 2008а, б]. В Украине представлены только мелкофокусные, в основном коровые.

6. Зоны аномально высоких пластовых давлений распространены в ДДВ и других нефтегазоносных регионах Украины и за ее пре-

делами [Атлас ..., 1998]. В Украине они отсутствуют только на месторождения ВПП. Не исключено, что мелкие и редкие месторождения этого региона относятся только к верхней части зоны циркуляции глубинных флюидов или существуют слишком долго после последнего пополнения жидкостью под высоким давлением.

7. Распространенность зон гидрохимической инверсии примерно такая же, как АВГД (см. рис. 8), они встречены в нефтегазоносных регионах Украины и других местах. Явление инверсии — четкое указание на глубинное происхождение флюидов, переносящих УВ [Лукин, 1997; 2004; Лукин, Пиковский, 2004]. Отличия химизма глубинных флюидов от связанных с вышележащей частью разреза в общем соответствует прогнозному.

Сложный комплекс микро- и наночастиц металлов, их оксидов, сульфидов и карбонатов, формирующийся при возникновении восстановленного флюида в процессе серпентинизации предварительно метаморфизованных основных и ультраосновных пород, обнаружен в последнее время в залежах УВ разных регионов [Лукин, 2009]. Соотношение их концентраций, наблюдаемое, в частности, в ДДВ преимущественно в темном пелитовом веществе [Лукин, 1997; 2009], не может быть спрогнозировано, так как не изучены начальные пропорции (непосредственно после захвата частиц флюидом), изменения при транспортировке (размеры частиц различаются до двух порядков, по пути состав флюида меняется вследствие преобразования водорода в УВ) и осаждения. Дополнительная сложность связана с тем, что лучше изучены преобразования океанических пород в соответствующих условиях (большого количества воды), а для изучения реальных месторождений УВ необходимо знать их для континентальных пород. "Различие в режимах метаморфизма океанических и офиолитовых (в широком смысле термина ...) перидотитов проявлено также и в том, что некоторые минеральные ассоциации, обычные в офиолитовых перидотитах и развивающиеся при низких отношениях вода/порода, такие как брусит + серпентин, антигорит + оливин, кальцит + серпентин, доломит + серпентин, диопсид + серпентин, в океанических перидотитах либо не известны, либо проявлены очень ограниченно" [Базылев, 2000]. Можно констатировать только совпадение общего характера состава прогнозируемых и наблюдаемых включений (в частности, распро-

страненность самородного железа и никеля), но и это представляется существенным аргументом в пользу принятой гипотезы образования флюида.

8. Имеющаяся информация о распределении скоростей сейсмических волн в коре нефтегазоносных регионов Украины недостаточно точна и достоверна для выделения скоростных аномалий. Во многих случаях создается впечатление компенсации тепловых эффектов аномалиями, связанными с базификацией пород коры. Впрочем, в Закарпатском прогибе на 20—27 км [Исследование ..., 1980], Припятском прогибе на 20—30 км [Боборыкин и др., 1993], в Балтийской синеклизе на 20—23 км [Pshenko, 1999] эти аномалии наблюдаются отдельно. Глубины их расположения неплохо соответствуют обычным для переходного слоя коры, содержащего породы амфиболитовой фации метаморфизма, где возможно современное частичное плавление.

Ситуация с выделением аномалии  $V_p$  в верхних горизонтах мантии несколько лучше, так как можно использовать значительный массив фактического материала, что увеличивает шансы на успешную диагностику постулированного возмущения. Понижение скорости распространения продольных сейсмических волн отмечено в мантии под многими нефтегазоносными регионами. Интересно сопоставить с нефтегазоносностью скоростные разрезы мантии северной Евразии. В работе [Булин и др., 1999] такое сравнение не привело к определенному результату: отрицательные скоростные аномалии обнаружены в верхах мантии (в слоях мощностью в десятки километров) под газовыми и газовой-конденсатными

месторождениями (абсолютные значения  $V_p = 7,9 \div 8,2$  км/с), но под 65 % нефтяных месторождений скорости повышены до 8,3—8,7 км/с.

Прогнозируемое принятой моделью глубинного процесса распределение скорости достаточно сложное: кроме теплового понижения  $V_p$ , должны встречаться положительные аномалии, связанные с погружением в мантию эколгитизированных пород. Оценки интегрального эффекта показывают, что знак аномалии должен сохраниться, интенсивность уменьшиться по сравнению с полной величиной возмущения тепловой природы до 0,1—0,15 км/с. Молодость процесса должна приводить к распространению ситуаций, когда значительная часть высокоскоростных эколгитов сосредоточена непосредственно под корой. Здесь сохранение отрицательной аномалии проблематично.

Для проверки прогноза использован фактический материал ГСЗ и данные невзрывной сейсмологии, относящиеся к нефтегазоносным регионам, в которых скоростные разрезы охватывают подкоровую толщу мантии мощностью от нескольких десятков до 100 км [Боборыкин и др., 1993; Геофизические ..., 1996; Гонтовая и др., 2007; Исследование ..., 1980; Pshenko, 1999; Pavlenkova G. A., Pavlenkova N. I.; 2006 и др.]. Расположение мест отбора данных представлено на рис. 11. На значительной территории отобраны скоростные разрезы на платформах за пределами зон СА (и нефтегазоносных регионов) с шагом 100 км и проведено осреднение значений  $V_p$  в интервалах глубин мощностью 20 км, начиная с 40 км. Такая же операция проделана в неф-

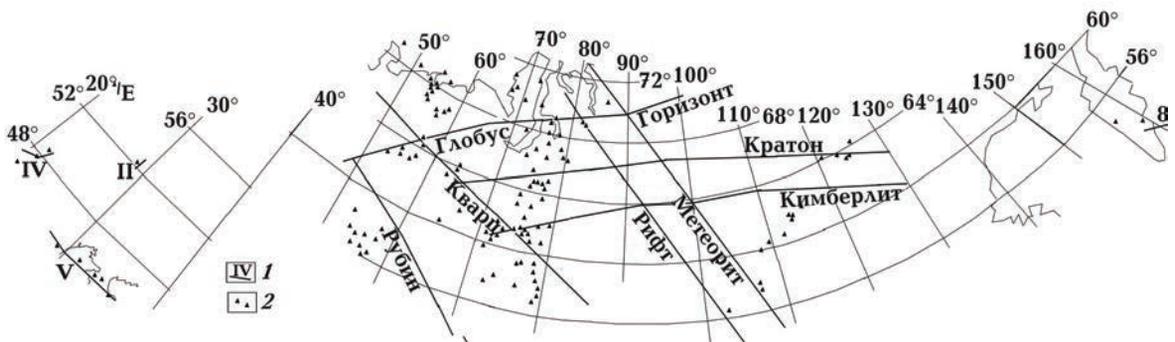


Рис. 11. Профили, вдоль которых построены скоростные разрезы верхних горизонтов мантии (1) и известные месторождения УВ (2) в Северной Евразии. Е — фрагмент профиля Евробридж, II — Припятский прогиб, IV — Паннония и Закарпатский прогиб, V — Скифская плита, восточная часть Восточно-Европейской платформы, Западно-Сибирская плита, южная и восточная окраины СП, Камчатка (8).

тегазоносных регионах. Результаты сравнения представлены на рис. 12.

Экспериментальные данные для платформы согласуются с расчетным распределением, т. е. в этих регионах среднее содержание эклогитов в мантии резко не отличается от принятого в использованной модели. В активизированных нефтегазоносных регионах согласование достигается только глубже 100 км (см. рис. 12). На меньших глубинах в полном соответствии с прогнозом скорости повышены по сравнению с расчетными из-за появления коровых эклогитов, которые в регионах с различными предшествующими эндогенными режимами успели опуститься на разную глубину.

9. Для неактивизированных платформенных и активизированных нефтегазоносных регионов, показанных на рис. 11, построены гистограммы распределения глубин раздела М (рис. 13).

Сокращение мощности коры при современной активизации прогнозируется с небольшой достоверностью, но экспериментальные данные, собранные на большой территории в регионах с разной предшествующей геологической историей, показывают, что статистически этот эффект все же проявляется. Различия в глубине раздела М составляют около 5 км, что согласуется с величиной, принятой при оценке амплитуды молодых поднятий (см. выше).

При построении гистограммы не использовались данные по ДДВ. Это связано с неясностью времени утонения коры впадины. Средняя глубина М в ее пределах около 39 км, но мощный осадочный слой палеозойского и (в меньшей мере) мезозойского возраста скорее всего указывает на утонение в период герцинского рифтогенеза и киммерийской активизации. "Причастность" современной активизации к этому процессу должна рассматриваться отдельно, что пока не сделано.

10. "Мантийную" гравитационную аномалию и геоэлектрическую модель средней части коры можно с достаточной достоверностью рассмотреть только на примере ДДВ. В других нефтегазоносных регионах Украины и за ее пределами модели необходимой детальности еще не построены или аномалии включают мощные эффекты, не связанные с СА рассматриваемого региона. Эти помехи в выделении "мантийной" гравитационной аномалии присутствуют в Карпатском регионе (включая Предкарпатский прогиб) и на Кам-

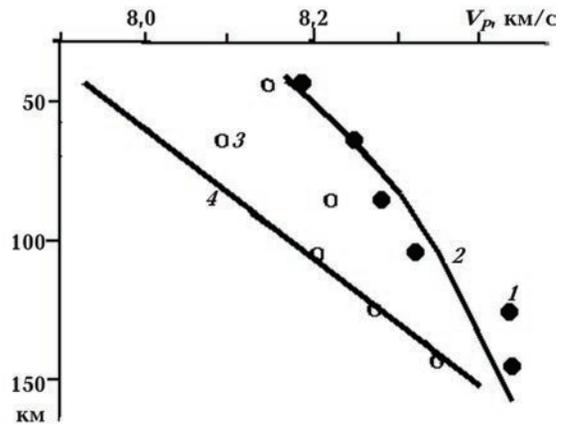


Рис. 12. Распределение  $V_p$  в верхней мантии Северной Евразии: 1 — средние значения под платформами вне зон СА, 2 — расчетное распределение скорости (среднее между вариантами для нормальных и пониженных температур в мантии под платформой), 3 — средние значения под нефтегазоносными регионами, 4 — расчетное распределение скорости (среднее для тепловых моделей на рис. 1).

чатке — влияние альпийской геосинклинали, на Скифской плите — влияние молодого рифта Черного моря. В Балтийской синеклизе и Припятском прогибе они отсутствуют, но результаты очень ограничены. Можно упомянуть, что они не противоречат установленным в ДДВ.

Во впадине плотностные модели коры построены вдоль семи профилей ГСЗ, пересекающих ее, и шести расположенных между ними вспомогательных профилей, для которых скоростные разрезы коры были пред-

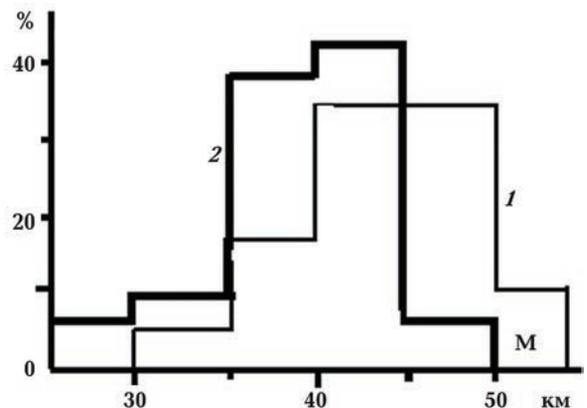


Рис. 13. Гистограммы распределений мощностей коры в платформенных (1) и нефтегазоносных (2) регионах Северной Евразии.

ставлены как средние между известными на соседних профилях ГСЗ [Гордиенко и др., 2006]. Скоростные модели пересчитаны в плотностные, определен гравитационный эффект коры и нормальной мантии, сопоставленный с наблюдаемым полем. Разница составила мантийную гравитационную аномалию, в которой кроме эффекта аномальных плотностей мантии неизбежно содержатся и эффекты коровых объектов, не учтенных исходной моделью. В рассматриваемом случае ими вполне могут быть проницаемые зоны разломов, подводящие глубинные флюиды к верхней части осадочного слоя. Выполненные оценки погрешности расчета указывают на достоверно выделяемую величину мантийной аномалии – 20 мГал. Ее расположение показано на рис. 14, где аномалия сопоставлена с известными месторождениями УВ ДДВ.

Прежде всего необходимо проанализировать соответствие аномалии прогнозной величине. Последняя определена как эффект теплового разуплотнения подкоровой части мантии. Влияние расположенных на больших глубинах тепловых уплотнений невелико и в модели не учитывалось. Расчетное распределение поперек впадины (и зоны СА) представлено на рис. 15. С ним сопоставлены величины экспериментально установленной мантийной гравитационной аномалии, осредненные на всем протяжении значащего возмущения с шагом поперек ДДВ около 12 км. Очевидно, что прогнозная величина аномалии подтверждается, различия между расчетными и экспериментальными значениями составляют несколько мГал, что явно меньше погрешности вычислений. Кроме того, просматриваются дополнительные возмущения, связанные с продольными разломами предположительно рифейского возраста, вероятно, “оживленными” в период современной активизации.

Данные рис. 14 демонстрируют согласованность аномалии и месторождений УВ, но из них следует и невозможность выявить нефтегазоносную область по аномалии. Последняя значительно больше по площади, так как отражает всю зону СА. Небольшие фрагменты аномалии юго-западнее, западнее и северо-западнее ее основной территории представляют собой окраины Кировоградской, Днепровской и, вероятно, Южно-Припятской зон СА [Гордиенко и др., 2005; 2006]. На северо-восток от основного возмущения примерно

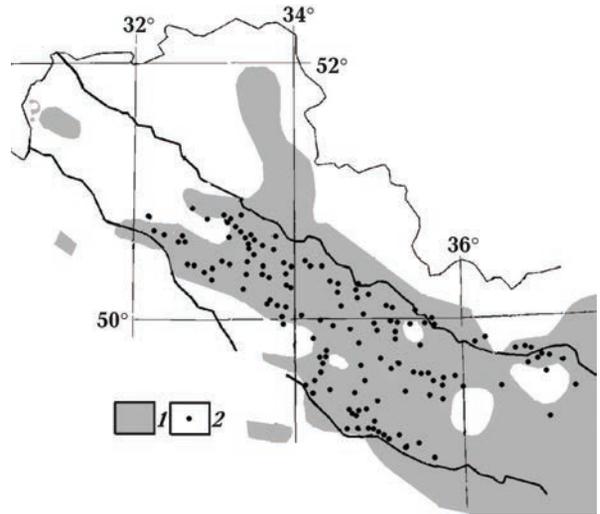


Рис. 14. “Мантийная” гравитационная аномалия в районе ДДВ: 1 — территория аномалии интенсивностью 20 мГал и более, 2 — месторождения УВ.

вдоль 34° в. д. ответвляется аномалия, соответствующая северному продолжению Кировоградской зоны СА, тянущейся по геоэлектрическим данным и вне Украины [Варенцов и др., 2011].

На северо-восточном борту ДДВ (см. рис. 8) предпринята попытка рассмотрения гравитационных аномалий, связанных с проницаемыми разломами, в “чистом” виде без мантийного возмущения. Это стало возможным из-за довольно значительной информации о мощности осадочного слоя и его составе, полученной при бурении. Из наблюдаемого поля

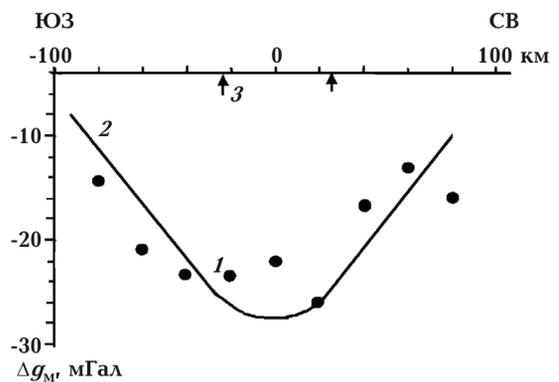


Рис. 15. Сравнение установленной по полю и результатам моделирования (1) и расчетной по аномальной температуре (2) гравитационной мантийной аномалии в ДДВ; 3 — положение краевых разломов рифейского грабена ДДВ.

были исключены эффект мантийного разуплотнения и осадочного слоя ДДВ (рис. 16).

Интенсивность выявленных аномалий достигает примерно 5 мГал. В районе изучены параметры трещиноватых зон, которые позволяют рассчитать соответствующие гравитационные эффекты, подбирая ширину зон разуплотнения [Гордиенко и др., 2006]. В подобранные зоны почти полностью попадают известные газовые месторождения северо-восточного борта ДДВ.

На борту лучше, чем во впадине, проявляются небольшие по интенсивности аномалии ТП (см. рис. 16). Видно, что рост параметра приурочен к проницаемым зонам, контролирующим большинство месторождений.

11. Принятая модель процесса образования месторождений УВ позволяет прогнозировать две аномалии электропроводности — в коре и верхней мантии. В некоторых нефтегазоносных регионах они установлены: в Балтийской синеклизе — на 20—23 и 50—80 км [Гордиенко, 1993], на Восточной Камчатке — на 10—40 и 70—100 км [Мороз, 2009], в западной части Скифской плиты — на 10—30 и 40—100 км, в центральной части Скифской плиты в Украине — на 15—20 и 80—100 км, в частях Предкарпатского прогиба — на 20—30 и 50—70 км и на 10—20 и 50—100 км, в Припятской впадине — на 20—30 и 50—80 км, в Паннонии — на 70—170 км [Геоэлектрическая ..., 1998]. В Складчатых Карпатах и Закарпатском прогибе сведения о проводнике в мантии не однозначны, коровый проводник располагается в интервале глубин примерно 10—20 км. Такая информация в общем не противоречит прогнозу, но недостаточно детально.

Глубинные геоэлектрические исследования в ДДВ [Гордиенко и др., 2006] проведены в два этапа. На первом изучено распределения  $\rho$  верхней наиболее проводящей толщи осадков. Ее суммарная продольная проводимость достигает 3000 См. Учет влияния этого объекта позволил на втором этапе выделить во впадине и более глубокий проводник, расположенный в нижней части осадочного слоя и глубже. Его размещение в разрезе на поперечном и продольном профилях I и II (см. рис. 8) показано на рис. 17.

Величины  $S$  корового проводника согласуются с представлениями об его образовании в виде зоны, содержащей флюиды над слоем

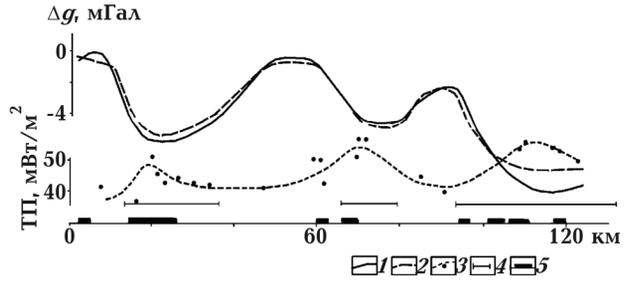


Рис. 16. Распределение глубинного ТП и сравнение осредненного аномального гравитационного поля на профиле III (рис. 8) с расчетным: 1 — осредненное аномальное гравитационное поле, 2 — расчетное гравитационное поле, 3 — значения в пунктах определения и сглаженное распределение ТП, 4 — подобранная ширина зон разуплотнения, 5 — расположение месторождений газа.

частичного плавления. Она располагается именно в нефтегазоносной области ДДВ.

**Вариации нефтегазоносности и аномалий физических полей.** Принятая модель формирования месторождений УВ подразумевает значительную неравномерность в распределении их запасов. Если схема процесса верна, то вместе с вариациями этого параметра должны изменяться и аномалии гравитационного поля, электропроводности и ТП, максимумы которых приурочены к зонам проницаемых разломов. Рассмотрим проблему на примере ДДВ. Будем считать, что известные месторождения на ее детально изученной территории отражают "полную" нефтегазоносность, т. е. количество УВ в еще не открытых

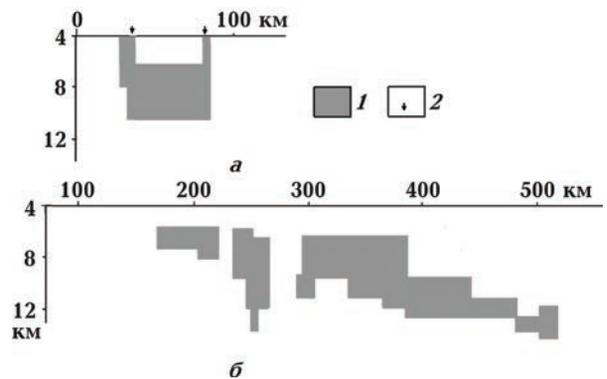


Рис. 17. Расположение глубинных проводящих объектов в земной коре ДДВ вдоль профилей I (а) и II (б): 1 — контуры проводников с  $\rho = 1 \div 25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , 2 — положение краевых разломов рифейского grabена ДДВ.

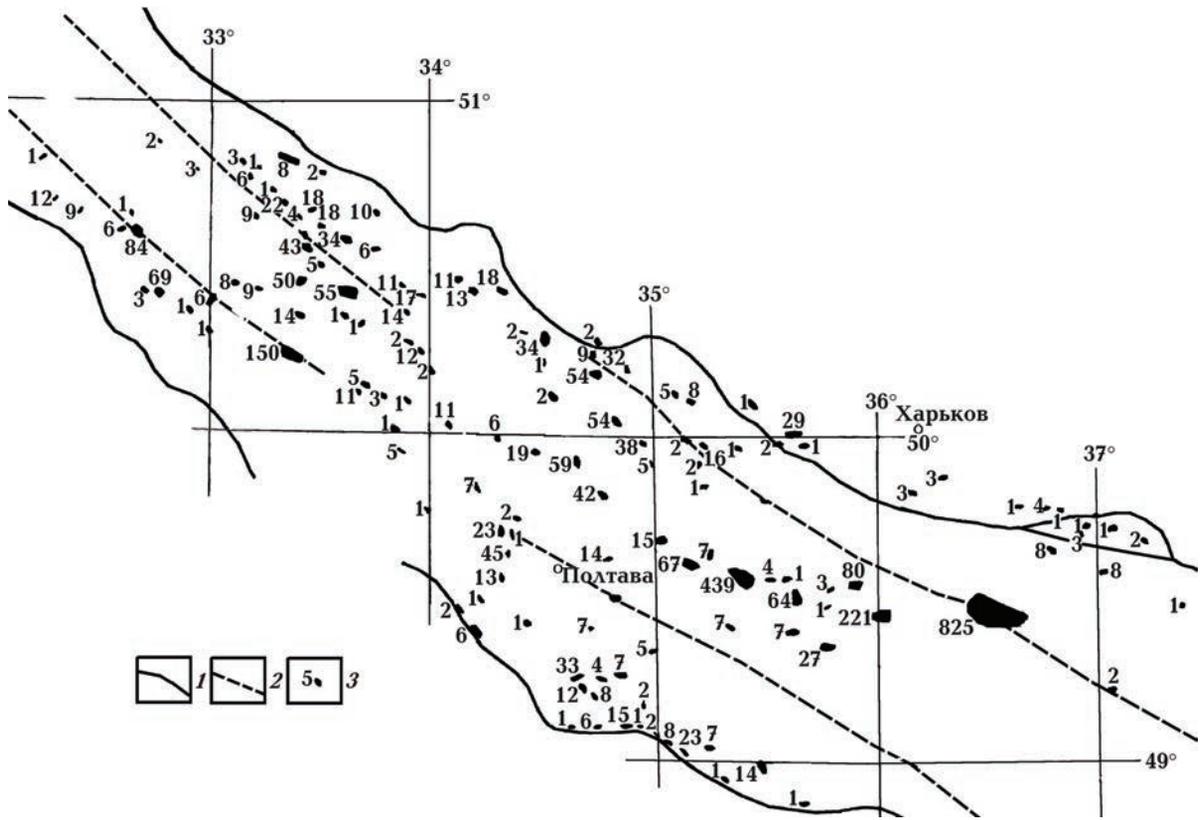


Рис. 18. Запасы (в млн т у. т.) месторождений углеводородов ДДВ: 1, 2 — краевые разломы ДДВ (1), рифейского грабена ДДВ (2), 3 — месторождения УВ.

месторождениях изменяется от места к месту примерно так же, как в уже открытых. Начальные добываемые запасы категорий А+В+С<sub>1</sub> известных месторождений (по данным из работы [Атлас ..., 1998]), представленные нефтью, газом и конденсатом, пересчитаны в условное топливо (рис. 18).

Для характеристики изменчивости нефтегазоносности территория впадины и ее бортов была разбита на поперечные участки шириной 25 км и продольные полосы несколько изменяющейся (в соответствии с расширением ДДВ к юго-востоку) ширины. В среднем ширина продольной полосы составляла 12,5 км. Для каждого участка и полосы вычислены суммарные запасы, отнесенные к единице площади ( $F$ ) и построены кривые их изменения вдоль и поперек ДДВ, причем значения  $F$  отнесены к центрам соответствующих участков и полос (рис. 19).

Очевидна очень сильная изменчивость параметра  $F$ . Максимумы на поперечном профиле приурочены к краевым разломам рифейского грабена, на продольном располага-

ются примерно у Западно-Ингулецкого, Криворожско-Кременчугского, Орехово-Павлоградского, Западно-Приазовского и Центрально-Приазовского глубинных разломов. Расположение у краевых разломов рифейского грабена крупнейших месторождений УВ ДДВ создает максимумы  $F$ , на склонах которых теряется эффект приуроченности некоторых месторождений в юго-восточной части Днепровского бассейна к краевым разломам ДДВ и переходной зоны от ДДВ к Донбассу. Своеобразие перемещений по этим фрагментам разломов отмечено еще на герцинском этапе развития впадины [Гордиенко и др., 2006].

Связь аномалий гравитационного поля и электропроводности с разломами и нефтегазоносностью выражена довольно отчетливо. Соответствие им аномалий ТП не повсеместно. В целом складывается впечатление, что в межразломных зонах образование и перенос УВ практически отсутствуют. Поскольку в процессе участвуют и продольные и поперечные разломы, в какой-то мере заполнена месторождениями и территория между поперечными разломами.

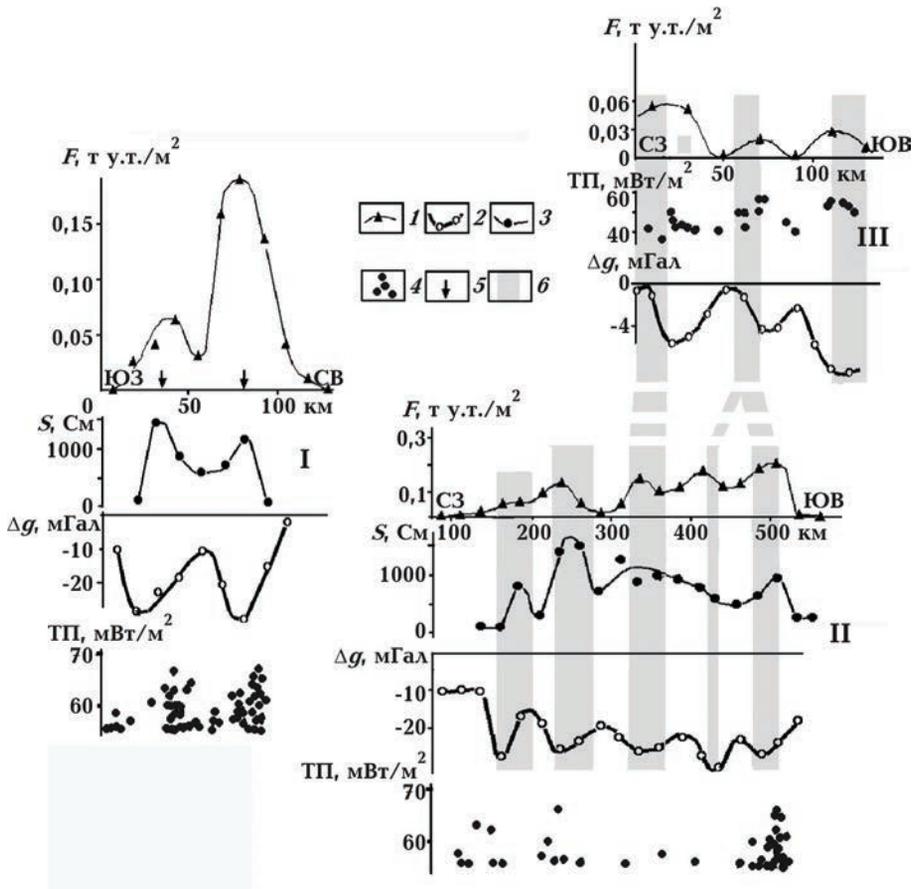


Рис. 19. Вариации вдоль профилей I—III: 1 — изменения  $F$ , 2 — вариации мантийной аномалии  $\Delta g$  (профили I и II) и  $\Delta g$  над зонами разломов (профиль III), 3 — вариации величины  $S$  корового проводника, 4 — тепловой поток (вдоль профилей I и II показаны только ТП более  $55 \text{ мВт/м}^2$ ), 5 — краевые разломы рифейского грабена, 6 — глубинные разломы (на профиле II с северо-запада на юго-восток: Западно-Ингулецкий, Криворожско-Кременчугский, Орехово-Павлоградский, Западно-Приазовский и Центрально-Приазовский).

Может возникнуть впечатление связи величины  $F$  с интенсивностью аномалий физических полей. Оно принципиально неверно. Оба вида аномалий "отмечают" проницаемые зоны, а их величина зависит от характера и интенсивности процессов в них, которые могут создавать различные отношения, например  $F$  и  $S$ .

Последнее хорошо видно на изменениях параметров вдоль Кировоградской аномалии электропроводности (рис. 20). Коровые проводящие объекты аномалии показаны непрерывными и неразветвляющимися, что не обязательно верно [Гордиенко и др., 2006]. Значения  $F$  отличаются от нуля только в ДДВ, значения  $S$  минимальны в обоих проводящих объектах.

Таким образом, выявленные геофизические критерии служат для обнаружения и трас-

сирования проницаемых разломных зон, по которым перемещаются флюиды, что может способствовать выделению наиболее перспективных на месторождения УВ частей нефтегазонасной области. Однако их недостаточно для выделения такой области внутри зоны СА.

**Заключение.** Предпринятая попытка анализа связи месторождений УВ с процессом СА позволила с большой определенностью установить ее наличие и характер. Конечно, работе необходимо продолжить с привлечением данных по месторождениям УВ вне ДДВ, возможно уточнение принятой схемы. На данное время она вкратце сводится к следующему.

Основное событие процесса СА — мантийный теплоперенос — приводит к появлению перегретого и частично расплавленного подкорового объекта, из него в кору поступают выплавки, прогревающие ее нижнюю

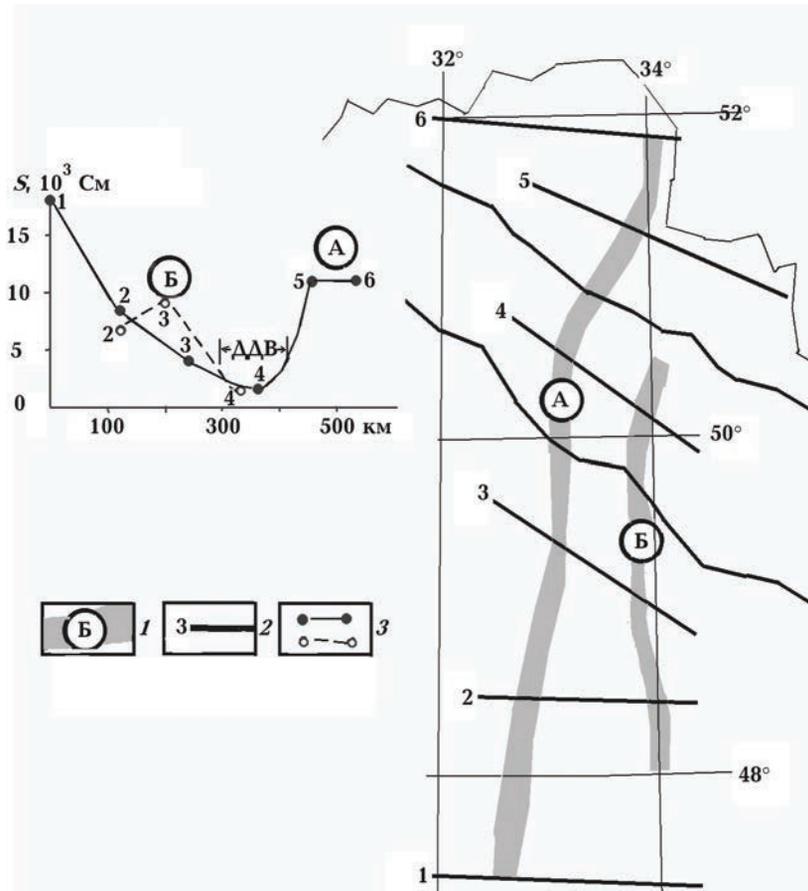


Рис. 20. Изменение величины  $S$  вдоль Кировоградской аномалии электропроводности: 1 — коровые проводящие объекты, 2 — профили геоэлектрических исследований, вдоль которых построены двумерные модели, 3 — примерные величины  $S$  в местах пересечений профилями проводящих объектов.

и среднюю части, в результате чего предварительно метаморфизованные основные и ультраосновные породы серпентинизируются, выделяя водород и УВ. Сопровождающая активизация сейсмичность на порядки (примерно в 1000 раз) повышает проницаемость зон глубинных разломов, обеспечивая быстрый перенос флюидов вверх через углеродсодержащие зоны разной природы, количество УВ возрастает в несколько раз. Сотрясения создают и возможность отделения и накопления УВ.

Очевидна необходимость выделения зон СА по комплексу геолого-геофизических признаков, при условии изученности территории необходимыми методами достоверность диагностики зон велика. Однако графитсодержащие горизонты "гранитного" и переходного слоев коры, судя по имеющимся данным геоэлект-

рики, распространены далеко не повсеместно, не везде есть осадочный слой и он не обязательно содержит достаточное количество органического углерода в нужном интервале глубин (PT-условий).

Для выделения нефтегазоносных регионов внутри зон СА еще предстоит разработать специальную методику, контуры которой могут проясниться после более детальных гравиметрических, геотермических и геоэлектрических исследований уже выявленных зон, изучения состава глубинных газов и металлометрических аномалий в их пределах независимо от наличия в них нефтегазоносных районов. Внутри последних комплекс критериев, основанных на предлагаемой гипотезе образования месторождений УВ, может заметно дополнить применяемый в настоящее время.

Список литературы

- Андрушенко Ю. А., Гордiенко Ю. А. Аналіз ефективності застосування критеріїв ідентифікації вибухів і землетрусів для локальних та регіональних подій в умовах платформної частини України // Геофиз. журн. — 2009. — 31, № 3. — С. 121—129.
- Асеева Е. А. Микрофоссилии и водоросли из отложенный верхнего докембрия Воыно-Подоллии // Палеонтология и стратиграфия верхнего докембрия и нижнего палеозоя юго-запада Восточно-Европейской платформы. — Киев: Наук. думка, 1976. — С. 40—83.
- Атлас родовищ нафти і газу України. Т. I—VI / Під ред. М. М. Іванюти та ін. — Львів: Центр Європи, 1998.
- Базылев Б. А. Развитие аваруйтсодержащей минеральной ассоциация в перидотитах из зоны разлома 15° 20' (Атлантический океан) как одно из проявлений океанического метаморфизма // Рос. журн. наук о Земле. — 2000. — 2, № 3.
- Белов С. В. Чистое топливо будущего — водород // Природно-ресурсные ведомости. — 2003. — 47. — С. 8.
- Боборыкин А. М., Гарецкий Р. Г., Емельянов А. П. Сейсмологические исследования в Белоруссии в 1984—1988 гг. // Сейсмологические и геотермические исследования на западе СССР. — Минск: Наука и техника, 1993. — С. 6—22.
- Богданов Ю. А., Гурвич Е. Г., Леин А. Ю., Сагалевич А. М., Новиков Г. В., Пересыпкин В. И., Бортников Н. С., Викентьев И. В. Гидротермальные рудопроявления полей Логачева и Рэйнбоу (Срединно-Атлантический хребет) — новый тип гидротермальных отложений океанских рифтов // Рос. журн. наук о Земле. — 2000. — 2, № 4.
- Булин Н. К., Щеглов А. Д., Егоркин А. В. Новые сейсмические метки литосферы районов размещения крупных углеводородных скоплений // Докл. РАН. — 1999. — 364, № 6. — С. 792—795.
- Бычинский В. А., Исаев В. П., Тупицын А. А. Физико-химическое моделирование в нефтегазовой геохимии. Учебное пособие. Часть 2. Модели гетерогенных систем. — Иркутск: Изд. ИГУ, 2004. — 159 с.
- Варенцов И. М., Ковачикова С., Куликов В. А., Логвинов И. М., Пушкарев П. Ю., Соколова Е. Ю., Яковлев А. Г., рабочая группа KIROVOGRAD. Коровые аномалии электропроводности на западном склоне Воронежской антеклизы // Матер. междунар. конф. "Современное состояние наук о Земле". — Москва: Геолфак МГУ, 2011. — С. 290—295.
- Верховцев В. Новітні вертикальні рухи земної кори території України, їх взаємовідношення з лінійними та кільцевими структурами // Енергетика Землі, її геолого-екологічні прояви, науково-практичне використання. — Київ: Изд. КНУ, 2006. — С. 129—137.
- Веселов О. В., Гордиенко В. В., Куделькин В. В. Термодинамические условия формирования газогидратов в Охотском море // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2006. — № 3. — С. 62—68.
- Галимов Э. М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. — Москва: Недра, 1973. — 384 с.
- Геофизические параметры литосферы южного сектора Альпийского орогена / Ред. Б. С. Вольвовский, В. И. Старостенко. — Киев: Наук. думка, 1996. — 216 с.
- Геоэлектрическая модель тектоносферы Евразийского складчатого пояса и сопредельных территорий. — Киев: Знання, 1998. — 265 с.
- Гонтовая Л. И., Гордиенко В. В., Попруженко С. В., Низкоус И. В. Глубинная модель верхней мантии Камчатки // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2007. — 1, вып. 9. — С. 78—92.
- Гонтовая Л. И., Гордиенко В. В., Гордиенко Л. Я. О природе среднеглубинной сейсмичности в переходных зонах Тихоокеанского типа // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2009. — № 1. — С. 38—45.
- Гордиенко В. В. Тектоносфера Прибалтики // Геофиз. журн. — 1993. — 15, № 5. — С. 16—24.
- Гордиенко В. В. Природа коровых и мантийных проводников // Геофиз. журн. — 2001. — 23, № 1. — С. 29—39.
- Гордиенко В. В. Адвекционно-полиморфная гипотеза процессов в тектоносфере. — Киев: Корвін пресс, 2007. — 172 с.
- Гордиенко В. В. О природе аномалий скорости распространения продольных сейсмических волн в верхней мантии // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 2. — С. 43—63.

- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В. О природе глубокой сейсмичности в переходных зонах от континентов к океанам // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2008а. — № 3. — С. 56—64
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В. О природе мелкофокусной сейсмичности в переходных зонах колумбийского типа // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2008б. — № 4. — С. 83—92.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О.В. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). — Киев: Корвін пресс, 2005. — 210 с.
- 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). — Киев: Корвін пресс, 2006. — 142 с.
- Гордиенко В.В., Тарасов В.Н. Современная активизация и изотопия гелия территории Украины. — Киев: Знання, 2001. — 102 с.
- Дмитриевский А.Н., Балаюк И.Е., Сорохтин О.Г., Донгарян Л.Ш. Серпентиниты океанической коры — источник образования углеводородов // Геология нефти и газа. — 2002. — № 3. — С. 37—41.
- Дмитриевский А.Н., Каракин А.В., Балаюк И.Е., Матвеев В.В. Гидротермальный механизм образования углеводородов в срединно-океанических хребтах // Геология нефти и газа. — 1997. — № 8. — С. 4—16.
- Дмитриев А.В., Базылев Б.А., Борисов М.В., Буго А., Силантьев С.А., Соколов С.Ю. Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти // Рос. журн. наук о Земле. — 2000. — 1, № 6.
- Заварицкий А.Н. Изверженные горные породы. — Москва: Изд-во АН СССР, 1961. — 480 с.
- Исследование литосферы и астеносферы на длинных профилях ГСЗ / Ред. Н. В. Кондорская. — Москва: Наука, 1980. — 250 с.
- Кадик А.А. Влияние окислительно-восстановительного состояния планетарного вещества на формирование углеродо-насыщенных флюидов в верхней мантии Земли // Вестн. ОГГГН РАН. — 1999. — № 4(10). — С. 65—85.
- Каменский И.Л., Лобков В.А., Прасолов Э.М., Бескровный Н.С., Кудрявцева Е.И., Ануфриев Г.С., Павлов В.П. Компоненты верхней мантии Земли в газах Камчатки (по изотопам He, Ne, Ar, C) // Геохимия. — 1976. — № 5. — С. 682—695.
- Карпов И.К., Зубков В.С., Степанов А.Н., Бычинский В.А. Римейк термодинамической модели системы С-Н Э.Б. Чекалюка // Докл. РАН. — 1998. — 358, № 2. — С. 85—97.
- Карта разрывных нарушений и основных зон линейментов юго-запада СССР / Ред. Н.А. Крылов. — Москва: Мингео СССР, 1988. — 4 л.
- Королюк В.Н., Лепегин Г.Г., Корсаков А.В. Оценка термической истории метаморфических пород по обменно-диффузионной зональности в минералах // Геология и геофизика. — 2004. — № 4. — С. 501—512.
- Краюшкин В.А. Улики глубинной небиогенной природы нефти // Геол. журн. — 2000. — № 3. — С. 23—28.
- Краюшкин В.А. Древнейшие геоблоки Мирового взморья — щиты: их рельеф, молодой тектоно-магматизм, современная сейсмичность и нефтегазоносность // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2007. — № 3. — С. 15—50.
- Краюшкин В.А. Небиогенная нефтегазоносность современных центров спрединга дна Мирового океана // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2008. — № 3. — С. 19—39.
- Ларин В.Н., Ларин Н.В. Водородная дегазация на Русской платформе // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы. — Москва: ГЕОС, 2008. — С. 267—269.
- Логвинов И.М., Гордиенко В.В. Электропроводность консолидированной коры и графитизация // Матер. IV школы-семинара ЭМС-09. — Москва: ОИФЗ РАН, 2009. — С. 23—24.
- Лопатников С.Л. Основные уравнения теории квазидвумерной конвекции в тонких пронизываемых пластах // Физика Земли. — 1999. — № 1. — С. 52—62.
- Лукин А. Е. Литолого-динамические факторы нефтегазоаккумуляции в авлакогенных бассейнах. — Киев: Наук. думка, 1997. — 224 с.
- Лукин А.Е. Глубинная гидрогеологическая инверсия как глобальное синенергетическое явление: теоретические и прикладные аспекты. Статья 1. Феноменология и природа глубинной гидрогеологической инверсии // Геол. журн. — 2004. — № 4. — С. 53—70.

- Лукин А.Е. Самородные металлические микро- и нановключения в формациях нефтегазоносных бассейнов — трассеры суперглубинных флюидов // Геофиз. журн. — 2009. — 31, № 2. — С. 61—92.
- Лукин А.Е., Пиковский Ю.И. О роли глубинных и сверхглубинных флюидов в нефтегазообразовании // Геол. журн. — 2004. — № 2. — С. 21—33.
- Мороз Ю.Ф. Глубинная электропроводность вулканических зон Камчатки // Электромагнитные исследования Земли. — Москва: ОИФЗ РАН, 2009. — С. 157.
- Погребницкий Ю.Е., Трухалев А.П. Проблема формирования Срединно-Атлантического хребта в связи с составом и возрастом пород его метаморфического комплекса // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. — Москва: ОИФЗ РАН, 2002. — С. 189—203.
- Поиски углеводородов в кристаллических породах фундамента на северном борту Днепровско-Донецкой впадины. — Киев: ИГН АН УССР, 1989. — 52 с.
- Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. — Москва: Наука, 1988. — 192 с.
- Рагзівіл А.Я., Рагзівіл В.Я. До тектоніки південно-західної частини Волино-Подільської плити в зв'язку з проблемою нафтогазоносності // Геол. журн. — 2006. — № 4. — С. 60—65.
- Разломная тектоника и нефтегазоносность Украины / Ред. В. А. Рябенко. — Киев: Наук. думка, 1989. — 116 с.
- Раскаев А.И., Нераговенкий Ю.Н., Черноусенко Е.В., Морозова Т.А. Минералого-технологические исследования бедных серпентинитовых медно-никелевых руд Печенгского рудного поля // Вестн. МТГУ. — 2009. — 12, № 4. — С. 632—637.
- Савко А.Д., Надежка Л.И., Шевырев Л.Т. Новые данные о флюидной и сейсмической активности Воронежской антеклизы // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы. — Москва: ГЕОС, 2008. — С. 439—441.
- Сафронов О.Н. Сейсмические условия и сейсмическая опасность платформенной части Украины: дис. ... канд. геол. наук. — Симферополь, 2005. — 135 с.
- Соботович Э.В., Бартницкий Е.Н., Цюнь О.В., Кононенко Л.В. Справочник по изотопной геохимии. — Москва: Энергоиздат, 1982. — 241 с.
- Ультрабазитовые формации центральной части Украинского щита / Ред. Н.П. Семененко. — Киев: Наук. думка, 1979. — 412 с.
- Усенко О.В. Глубинные процессы образования расплавов в тектоносфере: Автореф. дис. ... д-ра. геол. наук. — Киев, 2008. — 41 с.
- Уханов А.В., Рябчиков И.Д., Харьков А.Д. Литосферная мантия Якутской кимберлитовой провинции. — Москва: Наука, 1988. — 287 с.
- Чекалюк Э.Б. К проблеме синтеза нефти и газа на больших глубинах // Журн. всесоюз. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. — 1986. — 31, № 5. — С. 556—562.
- Швец В. М. Содержание и распространение органического вещества в подземных водах // Докл. АН СССР. — 1971. — 201, № 3. — С. 453—456.
- Яценко В.Г. Закономерности пространственного расположения проявлений графита на Украинском щите // Аспекты минерагении Украины. — Киев: ГНЦ РОС, 1998. — С. 254—270.
- Barriga F., Costa I., Relvas J., Ribeiro A., Fouquet Y., Ondreas H., Parson L. The Rainbow serpentinites and serpentinite-sulphide stockwork (Mid-Atlantic Ridge, AMAR segment): A preliminary report of the Flores results // EOS. — 1997. — 78 (46). — F832.
- Iichenko T. V. Preliminary model EB 95 // Between Eurobridge and TESZ. — Warsaw, 1999. — P. 44—45.
- Lin L., Hall J., Lippmann-Pirke J., Qward J., Lollar B., DeFlaun M., Rothmel R., Moser D., Gihring T., Mislowack B., Onstott T. Radiolytic H<sub>2</sub> in continental crust: Nuclear power for deep subsurface microbial communities // Geochim. Geophys. Geosys. — 2005. — № 6. — Q07003, doi:10.1029/2004GC000907.
- Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I. Upper mantle structure of Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data // Tectonophysics. — 2006. — 416. — P. 33—52.
- Semenov V.Yu., Pek J., Adam A., Jozwiak W., Ladanyvskyy B., Logvinov I., Pushkarev P., Vozar J. Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project // Acta Geophysica. — 2008. — 56, № 4. — P. 957—981.
- Sugisaki R., Mimura K. Mantle hydrocarbons: abiotic or biotic? // Geochim. et cosmochim. Acta. — 1994. — № 11. — P. 2527—2542.
- Welhan J., Grain H. Methane and hydrogen in East Pacific rise hydrothermal fluids // Geophys. Res. Lett. — 1979. — 6, № 11. — P. 829—831.