

## ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ЗАЛЕЖИ

© В.Д. Кукуруза, В.Т. Кривошеев, Е.З. Иванова, Е.В. Пекельная, 2009

*Украинский государственный геологоразведочный институт, Чернигов, Украина*

The analysis of the experimental relations between parameters of the electromagnetic field and hydrocarbon deposits made it possible to find natural relationship between oil-gas deposit and typical features of the electrical field formation. This allowed us to develop a geoelectrical model of a hydrocarbon deposit and to discover a method of electrophysical forecast of oil and gas presence (EFOGP). It permits not only to detect a deposit in sedimentary rocks and crystalline basement but also to determine their profile and depth of occurrence.

Изложенные в работе геоэлектрические аспекты нефтегазонакопления создают научную основу для повышения эффективности геологоразведочных работ на нефть и газ путем как разработки и широкого применения новых способов геоэлектро-разведки по прогнозированию нефтегазоносности структур, так и определения дополнительных критериев поисков скоплений углеводородов (УВ) в глубокозалегающих ловушках седиментационных бассейнов, в том числе в проницаемых зонах кристаллического фундамента, что имеет большое практическое значение.

В настоящее время научные и производственные организации сосредотачивают большие усилия на вскрытии резервов, которые могут способствовать быстрому и экономически эффективному выявлению крупных зон нефтегазонакопления и отдельных месторождений, а также повышению уровня добычи нефти при снижении стоимости продукции с тем, чтобы не вкладывать больших средств в разведку мало-перспективных площадей и освоение небольших месторождений. В то же время опыт геолого-поисковых и разведочных работ на нефть и газ в целом показал, что за последние годы коэффициент открытий составил 33–35%. “Таким образом, 2/3 структур являются пустыми и, если бы существовал надежный метод прогнозирования, их не следовало бы вводить в разведку, что привело бы к громадной экономии средств и времени и принесло бы народному хозяйству страны колоссальный экономический эффект” [1].

В последние годы в научной литературе высказано несколько предположений о физической природе факторов, которые позволяют выявлять и оконтуривать газонефтяные залежи. Все они основаны на получении аномальных эффектов от так называемых вторичных факторов, имеющих в пределах залежи, над ней и обусловленных ею. Не без основания многие исследователи считают, что наблюдаемые аномальные электрические эффекты

вызваны наличием над залежью рассеянных УВ, которые постоянно мигрируют из залежи вверх по разрезу вплоть до земной поверхности. В связи с этим некоторые исследователи, применяющие метод вызванной поляризации, соотносят природу аномалий повышенной поляризуемости над залежью с ореолом эпигенетической вкрапленности сульфидных минералов (в частности пирита), образующихся в сероводородной обстановке [2]. Исследователи, выполняющие поисковые работы методом ОВП, полагают, что рассеянные УВ в результате окислительно-восстановительных процессов вступают в химические реакции с минеральной средой, в результате чего над залежью появляются объемные электрохимические поля [3]. Изучение по данным электрокаротажа характера изменения удельного электрического сопротивления пород над залежью привело к выводу, что наличие в среде воздымающихся вверх УВ обуславливает увеличение удельного электрического сопротивления среды над залежью [4]. В результате рассмотрения данных электрокаротажа (стандартного градиент-зонда) на 15 нефтегазоносных месторождениях антиклинального и неантиклинального типов, расположенных в разных нефтегазоносных провинциях с резко различными геолого-геофизическими условиями, также установлено закономерное зональное изменение электрического сопротивления внепластового характера в области залежей, которое в некоторых случаях приобретает вертикальный характер и прослеживается над залежью даже до земной поверхности [5]. Зональное изменение электрического сопротивления объясняется вторичными изменениями пород под воздействием залежей. Высказано обоснованное мнение, что нефтегазовые залежи способствуют появлению подземных источников электрического тока, названных “топливными элементами”, которые могут быть прослежены на земной поверхности посредством измерения электрических потенциалов [6].

Использование скважинных методов электрометрии позволяло получать аномальные эффекты непосредственно от залежей путем экранирования токовых линий высокоомными продуктивными пластами [7].

Все указанные выше факторы и другие, безусловно, имеют место в природе, проявляются в электрических полях и тем самым способствуют формированию над залежами нефти и газа аномалий типа залежь (АТЗ). Тем не менее пока нет геоэлектрической модели углеводородной залежи, по которой можно было бы получить более обоснованные представления о природе и механизме вызванной поляризации и других физико-химических явлений, наблюдаемых в районах залежей.

Анализ экспериментальных зависимостей позволяет представить геоэлектрическую модель углеводородной залежи с учетом геолого-геофизических данных и характера проявления ЭДС в капиллярно-пористых средах под действием внешнего электрического поля. Такая модель дает возможность учитывать явления электрохимического происхождения и объясняет физическую природу некоторых факторов, генетически связанных с нефтегазоносностью [8].

Известно, что теоретической основой геохимических поисков послужила субвертикальная миграция УВ из залежи вследствие диффузии, которая способствует образованию непрерывного пространственного ореола УВ над залежью [9].

Многочисленные газосъемочные работы, выполненные в Украине, показали, что почти на каждой нефтегазоносной структуре наблюдаются более или менее значительные выходы или микровыходы газа, обусловленные непрерывным диффузионным проникновением УВ из залежи в вышележащие породы (рис. 1) [10]. Масштабы

этого процесса характеризуются средним коэффициентом диффузионной проницаемости, который, например, для образований, покрывающих залежи Леляковского и Гнединцевского месторождений, равен  $6 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с.

Наиболее контрастно аномальные скопления углеводородных газов фиксируются в породах, представленных, как правило, песчано-алевритовыми отложениями, перекрытыми газоводоупорными слабопроницаемыми толщами.

Согласно расчетам, скорость вертикального электрофоретического переноса коллоидных частиц УВ в коллекторе достигает  $10^{-7}$  см/с. С учетом того что пластовые воды на больших глубинах (свыше 500 м) характеризуются очень малой скоростью латеральной фильтрации ( $10^{-2}$ – $10^{-4}$  м/год) [11], они не могут оказывать влияния на выдержанность по разрезу непрерывно воздымающегося углеводородного потока над залежью. К тому же концентрация рассеянных углеводородных газов над месторождениями нефти и газа, как правило, возрастает с глубиной, увеличивается контрастность газовых аномалий и их качественный состав по мере углубления приближается к составу газов залежей. Гравитационные и электрофоретические силы придают потоку УВ строго вертикальное направление, которое может сохраняться вплоть до первой регионально выдержанной покрывки.

К примеру, таким первым от поверхности опорным горизонтом в Днепровско-Донецкой впадине (ДДВ) служит песчано-алевролитовый горизонт бучакско-каневских отложений, перекрытых мергелисто-глинистыми породами на глубине 200–300 м. Газометрическими исследованиями керна и вод этих отложений установлено наличие аномалий над нефтяными месторождениями. Концентрация тяжелых углеводородных

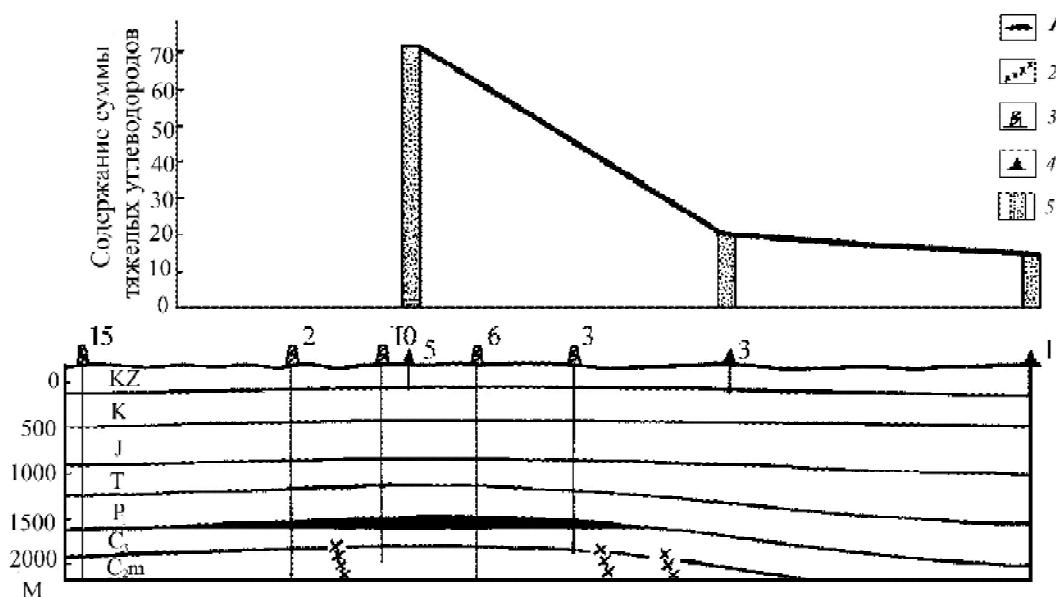


Рис. 1. Геологический разрез Гнединцевского месторождения: 1 – залежь; 2 – сбросы; 3 – скважина; 4 – скважина газокернового опробования; 5 – среднее содержание углеводородных газов в глинистом растворе, 10 см<sup>3</sup>/л

фракций здесь в 5–10 раз превышает таковые в законтурных частях залежей. Поток УВ в разрезе над месторождениями имеет в основном непрерывно-прерывистый характер, что обуславливает на определенных уровнях разреза существенное скопление углеводородных газов. Вероятно, по этой причине субвертикальная кольцеобразная зональность полей различной природы сопутствует залежам нефти и газа, которая усиливается в интервале расположения залежей антиклинального типа и контролирует контур залежей неантиклинального типа [12]. Поэтому во многих случаях с помощью глубинных методов электроразведки получают контуры аномальных эффектов типа АТЗ, которые удовлетворительно совпадают с контурами выявленных залежей.

Следует отметить, что возникновению электрокинетических явлений в поровом пространстве глинистых пород способствует не только электрическое поле Земли, но и аномальное электрическое поле, которое формируется в разрезе над нефтегазовой залежью как следствие электрохимических процессов, связанных с наличием глубинных источников “топлива” [6]. “Постоянно мигрирующие вверх по разрезу УВ и подземные воды обуславливают более восстановительную обстановку вблизи поверхностных отложений (даже в зоне выветривания) по сравнению с окружающими породами, в которых не протекают такие процессы миграции” [6, с. 10]. В связи с этим на контакте двух сред с окислительной и восстановительной обстановкой следует ожидать изменение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП). Об этом свидетельствуют экспериментальные данные, согласно которым над залежью фиксируются отрицательные значения

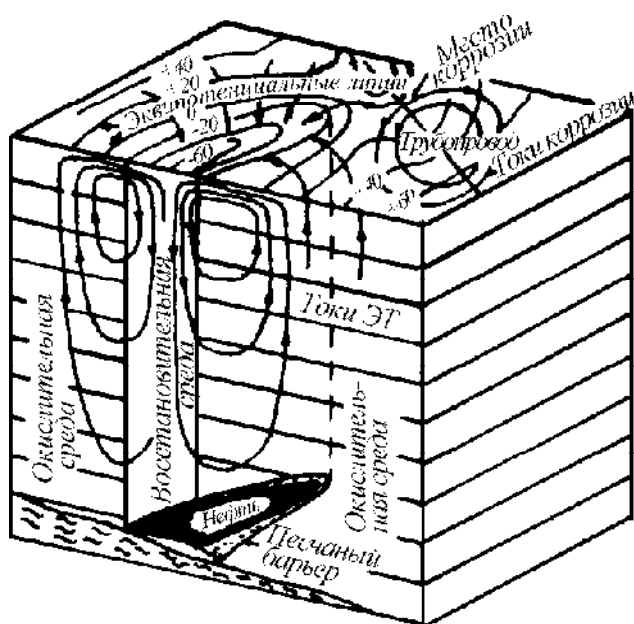


Рис. 2. Блок-диаграмма, свидетельствующая о наличии поверхностной аномалии ЭТ, обусловленной залежью нефти

электрических потенциалов (рис. 2), что вызывает появление локальных электрических токов (направление тока показано на рисунке). Последнее приводит к тому, что над залежью в восстановительной среде электрическое поле должно значительно усиливаться (почти в 2–3 раза) по сравнению с фоновым полем. Как отмечает С.Д. Пирсон: “Это – проявление вертикальной “геохимической трубы”, связываемой с нефтегазовой залежью” [6, с. 13).

Как известно, процесс пиритообразования в нефтяных и газовых залежах обусловлен деятельностью сульфатредуцирующих бактерий, которые на водонефтяном контакте восстанавливают растворенные в пластовых водах сульфаты, окисляя нефть и газ. Для нефтяных месторождений ДДВ такой процесс тоже отмечается [13]. Так, повышенное содержание пирита (до 10 % объема всей породы) – характерная черта продуктивных горизонтов верхнего карбона–нижней перми Гнединцевского и Глинско-Розышевского месторождений, а также нефтеносных отложений нижнего карбона Гнединцевской, Радченковской площадей и башкирского яруса Прилукского месторождения (рис. 3). Пирит встречается в виде кубических или неправильных вкрапленников, часто образующих большие скопления. В нефтегазоносных пестроцветных отложениях верхнего карбона–нижней перми пирит приурочен в основном к светло-зеленым оглееным зонам. Однако в красноцветных гли-

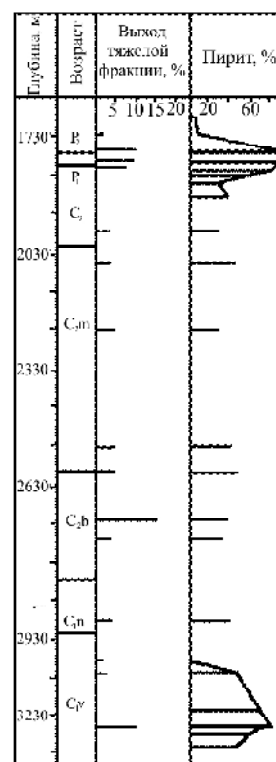


Рис. 3. Диаграмма содержания пирита в тяжелой фракции пермских и каменноугольных пород Гнединцевского месторождения нефти по скв. 8-Р, 2-Р, 6-Р (по А.Е. Лукину, Л.А. Трухану, 1967)

нистых отложениях пересажской свиты, играющих роль покрышки на Гнединцевском и других месторождениях, тоже обнаружен (под микроскопом в отраженном свете) пирит в виде мельчайших (меньше 0,01 мм) вкраплений. Кроме того, было изучено распределение пиритной серы в красноцветах пересажской свиты Гнединцевского месторождения. С этой целью из разрезов 20 скважин, расположенных внутри и вне контура нефтегазоносности, были отобраны образцы из верхней и нижней частей пересажской свиты.

На основании этого изучения сделан вывод, что площадь максимального содержания (больше 0,2 %) пиритной серы совпадает с центральной частью общего контура нефтеносности месторождения и характеризуется позднеэпигенетическим характером пиритообразования.

Особого внимания заслуживают исследования А.Е. Лукина [14] по изучению закономерности геологических эволюций, литогенеза и нефтегазонакопления в авлакогенных бассейнах, в результате которых автор пришел к важному выводу, что основными поисковыми объектами с реальными перспективами открытия крупных скоплений УВ в глубокозалегающих горизонтах являются глубинные погребенные структуры [14]. Последние обнаруживают признаки неоднократной тектонической активизации и фиксируются в виде геофизических и геохимических аномалий. Закономерности формирования этих аномалий обусловлены тем, что протекающие в продуктивных горизонтах наложенные процессы резко меняют минералогические и геохимические особенности пород, их плотность, тепло- и электропроводность, магнитность, радиоактивность, щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные свойства. В итоге возникает генетически обусловленная закономерная пространственная взаимосвязь радиоактивных, геомагнитных, геоэлектрических и различных геохимических кольцевых и полосовидных аномалий, которые в плане частично перекрывают друг друга, а частично смещены. “Эта сопряженность является главным критерием использования геохимических и геофизических аномалий при прямых поисках залежей нефти и газа, основой интерпретации комплекса методов прямых поисков по системе АТЗ” [14, с. 207].

Выполненные лабораторные исследования по изучению поляризуемости пород показали, что поляризуемость как одно из проявлений электрохимических свойств горных пород, руд и УВ представляет собой функцию поляризующего тока и времени его действия. Это дает основание считать, что последовательное чередование на пути электрического тока электронных и ионных проводников сопровождается ростом суммарной ЭДС вызванной поляризации.

Следовательно, на основании изложенного можно полагать, что в пределах залежей нефти и газа и в воздымающемся над ними диффузионно-фильтрационном потоке УВ имеются благоприятные условия для образования восстановительной среды. Поэтому в пределах продуктивных горизонтов и воздымающихся над ними потоков УВ ионопроводящая среда содержит в себе гораздо больше электропроводящих включений, чем за их пределами, что должно способствовать повышению поляризуемости среды над месторождениями нефти и газа. Последнее приводит к увеличению времени кажущегося становления поля и уменьшению проводимости среды, что служит основанием для прогнозирования нефтегазоносности с помощью способов геоэлектроразведки. К тому же наличие над залежью воздымающегося потока УВ также способствует повышению поляризуемости среды при воздействии на нее постоянным электрическим полем.

Из применявшихся ранее геофизических методов для выявления перспективных в нефтегазоносном отношении участков наиболее широко опробован и усовершенствован наземный метод электрофизического прогноза нефтегазоносности (ЭПНГ) [15]. Данный метод позволяет прогнозировать скопления нефти и газа не только в осадочном чехле, но и в трещиноватых зонах кристаллического фундамента, а также определять контур залежи и ее глубину. Уверенные результаты получают там, где горизонтальные размеры месторождения превышают глубину его залегания.

Метод ЭПНГ основан на следующих положениях.

Из теории и практики электроразведки известно, что, чем больше расстояние между питающими электродами, тем глубже распространяется ток с заданной плотностью и тем на большую глубину можно исследовать разрез осадочных пород. Это обстоятельство весьма существенно при геоэлектроразведке газонефтяных месторождений, залегающих в основном на глубинах 1500–5000 м и более. Кроме того, в пределах средней одной трети расстояния между питающими электродами электрическое поле почти однородное. Было предложено производить измерения напряженности электрического поля в пределах средней одной трети расстояния между питающими электродами в точках наблюдения по профилю, параллельному питающей линии. Последнее позволяет значительно увеличить производительность работ, так как при одном положении питающей линии исследуется значительная часть профиля.

На рис. 4 представлены результаты исследований методом ЭПНГ над Сахалинским (в ДДВ) поднятием, где на глубинах 3000–4500 м в отложениях среднего и нижнего карбона выявлены залежи нефти.

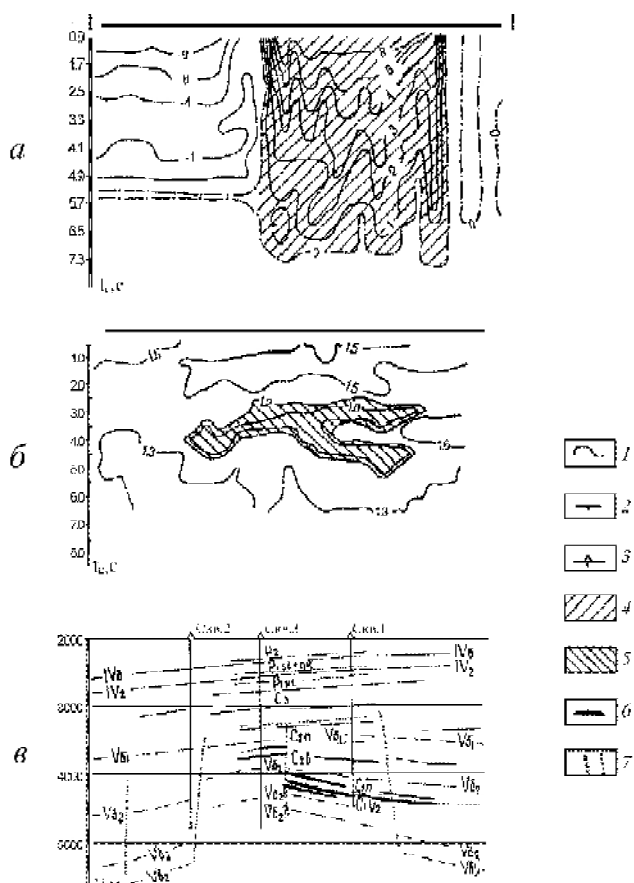


Рис. 4. Вертикальные временные разрезы нормированного электрического поля (а) и поля вертикальной магнитной компоненты (б) по профилю I над Сахалинским газонефтяным месторождением: 1 – изолиния; 2 – точка измерения на профиле; 3 – скважина; 4, 5 – аномальные эффекты, обусловленные нефтегазоносностью; 6 – залежь; 7 – тектонические нарушения

На рис. 4, а показан временной вертикальный разрез нормированного электрического поля. Применение нормирования позволяет представить процесс становления поля в безразмерных величинах, выделить аномальные эффекты от исследуемых объектов и исключить из рассмотрения искажения, не связанные прямо с нефтегазоносностью. На разрезе отчетливо видна положительная аномалия, которая проявилась непосредственно над месторождением УВ снизу вверх по всему разрезу. Подобные аномалии выделяются на временных разрезах над залежами как антиклинального, так и неантиклинального типа, что позволяет предполагать наличие связи между факторами, вызывавшими на разрезах характерные аномальные эффекты, обусловленные нефтегазоносностью.

На временном вертикальном разрезе нормированного магнитного параметра (рис. 4, б) четко локализовался минимум, который также характерен для газонефтяных месторождений. Зная фоновую скорость распространения электромагнитной волны в заданном разрезе, можно определить глубину залегания исследуемого объекта.

Метод ЭПНГ основан на выявлении имеющейся закономерной взаимосвязи между нефтега-

зовой залежью и характерными особенностями становления электрического поля в недрах. Так, на временных вертикальных разрезах информативных параметров нормированных полей проявляется как сама залежь (по магнитным данным) в виде минимума, вызванного диамагнитными свойствами УВ, так и воздымающийся над ней диффузионно-фильтрационный поток УВ (по электрическим данным) в виде положительной аномалии поляризуемости среды, обусловленной прежде всего наличием углеводородных компонентов, а также позднеэпигенетическим скоплением сульфидов, чего не наблюдается над “пустыми” структурами. Фактически данный метод позволяет выявлять скопления УВ не только в ловушках осадочного чехла антиклинального и неантиклинального типов независимо от глубины их залегания, но и в трещиноватых зонах кристаллического фундамента. При этом в осадочном чехле определяются контур месторождения и глубина залегания скоплений УВ.

Метод ЭПНГ опробован на более чем 100 газонефтяных месторождениях и перспективных площадях Украины, Беларуси, Узбекистана, Таджикистана, Краснодарского края России в различных геотектонических условиях и шельфах Черного и Азовского морей. Полученные этим методом прогнозные результаты проверены бурением на трети объектах, достоверность метода достигает 90 %. С помощью метода ЭПНГ за последние годы в Украине с высокой эффективностью (первой поисковой скважиной) открыто 7 нефтяных и газоконденсатных месторождений, из них в пределах шельфов Черного и Азовского морей положительные результаты были получены на структурах Голицына, Шмидта, Субботина, Стрелковой, впоследствии подтвержденные бурением. Метод высокоэкономичный (стоимость работ на одной структуре среднего размера не превышает 1 % стоимости поисковой скважины средней глубины), высокопроизводительный и экологически чистый.

Электрофизический метод рекомендуется также для прогнозирования зон скопления метаногидратов, представляющих огромный энергетический резерв Украины.

В последние годы у нас и за рубежом для прогнозирования нефтегазоносности все шире используют геофизические и геохимические методы. Накопившийся к настоящему времени материал, полученный при исследовании месторождений нефти и газа, свидетельствует о том, что залежи УВ проявляются в наблюдаемых электрических, сейсмических, гравитационных, магнитных и других полях. Поэтому в каждом перспективном в нефтегазоносном отношении районе целесообразно применять рациональный комплекс геофизических и геохимических исследований, для чего необходимо производить усовершенствование методов для

прямых поисков с разработкой наиболее эффективного комплексирования их применительно к различным геологическим условиям, а также разработку и внедрение в практику более высокоточной геофизической и геохимической аппаратуры с использованием новейших достижений электроники и счетно-вычислительной техники.

1. Максимов С.П., Строганов В.П., Такаев Ю.Г. Состояние изучения проблемы "Время формирования залежей нефти и газа" // *Время формирования залежей нефти и газа*. – М.: Наука, 1976. – С. 5–17.
2. Голубков В.В., Романенко В.П. Опыт работ методом вызванной поляризации по проблеме прямых поисков нефти и газа в Прикаспийской впадине // *Региональная разведочная и промысловая геофизика*. – М.: ОНТИ ВИЭМС, 1971. – № 22. – С. 88–92.
3. Воронин В.Д., Дорошенко В.И., Корона М.В., Соловьев В.В. Опыт работ методом ОВП по проблеме прямых поисков нефти и газа в Западном Предкавказье: – (Экспресс-информация. Сер.: Регион. развед. и промысл. геофизика). – М.: ВИЭМС, 1973. – № 16. – 15 с.
4. Мартынов Ю.М., Сидоров В.А. Опыт выявления залежей нефти и газа на глубине по верхним геоэлектрическим горизонтам // *Геология нефти и газа*. – 1973. – № 7. – С. 10–12.
5. Гальченко В.А., Кукуруза В.Д. О комплексировании газометрических и электроразведочных исследований при прямых поисках нефти и газа (Днепровско-Донецкая впадина) // *Обмен опытом в области геохимических и геофизических поисков залежей нефти и газа: Тез. докл. семинара, г. Гурьев 14–18 апр. 1975 г.* – М.: ВИЭМС, 1975. – С. 26–27.
6. Пирсон С.Д. Новый электрический метод разведки залежей нефти и газа. – Пер. с англ. А.П. Яковлева // *Экспресс-информация. Сер. Регион. развед. и промысл. геофизика*. – М.: ВИЭМС, 1972. – № 4. – С. 4–14.
7. Кукуруза В.Д. Вертикальная прямоугольная электрическая установка для определения контура нефтегазональной залежи // *Нефт. и газ. пром-сть*. – 1970. – № 1. – С. 4–6.
8. Кукуруза В.Д., Смольников Б.М. Геоэлектрические исследования при поисках залежей нефти и газа. – Киев: Наук. думка, 1984. – 140 с.
9. Зорькин Л.М., Крымов В.Ф., Барташевич О.В. и др. Прямые геохимические поиски месторождений нефти и газа // *Обзор. Геол. методы поисков и разведки. м-ний нефти и газа*. – М.: ВИЭМС, 1977. – 53 с.
10. Гальченко В.А. Оценка газометрических исследований как прямых методов поисков нефтяных и газовых залежей в северо-западной части Днепровско-Донецкой впадины. Материалы по геологии и нефтегазонасности Украины. – (Тр. УкрНИГРИ, вып. 16). – М.: Недра, 1968. – С. 240–247.
11. Гуревич А.Е., Капченко Л.Н., Кругликов Н.М. Теоретические основы нефтяной гидрогеологии. – М.: Недра, 1972. – 232 с.
12. Киричек М.А., Давидова Л.Н., Петухов А.В. Физико-химическое обоснование геофизических методов прямых поисков. Материалы к спецэкспозиции ВДНХ. – М.: ВИЭМС, 1981. – 4 с.
13. Лукин А.Е., Трухан Л.А. О некоторых косвенных показателях нефтегазонасности палеозоя Днепровско-Донецкой впадины // *Геология нефти и газа*. – 1967. – № 2. – С. 25–28.
14. Лукин А.Е. Литогеодинимические факторы нефтегазонакопления в авлакогенных бассейнах. – Киев: Наук. думка, 1997. – 224 с.
15. Кукуруза В.Д. Геоэлектрические факторы в процессах формирования нефтегазонасности недр. – Киев, 2003. – 416 с.

*Поступила в редакцию 03.03.2009 г.*

*В.Д. Кукуруза, В.Т. Кривошеев, Е.З. Иванова, Е.В. Пекельная*

## ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ЗАЛЕЖИ

Анализ экспериментальных зависимостей параметров электромагнитного поля от залежей углеводородов дал возможность установить закономерную взаимосвязь между нефтегазовой залежью и характерными особенностями становления электрического поля. Это позволило разработать геоэлектрическую модель углеводородной залежи и создать метод электрофизического прогноза нефтегазонасности, с помощью которого можно не только выявлять залежи в осадочных породах и кристаллическом фундаменте, но и определять их контур и глубину залегания.

*В.Д. Кукуруза, В.Т. Кривошеев, Е.З. Иванова, О.В. Пекельная*

## ГЕОЭЛЕКТРИЧНА МОДЕЛЬ ВУГЛЕВОДНЕВОГО ПОКЛАДУ

Аналіз експериментальних залежностей параметрів електромагнітного поля від покладів вуглеводнів дав змогу встановити закономірний взаємозв'язок між нафтогазовим покладом і характерними особливостями становлення електричного поля. Це обумовило розробку геоелектричної моделі вуглеводневого покладу та створення методу електрофізичного прогнозу нафтогазонасності, за допомогою якого можна не лише виявляти поклади в осадових породах і кристалічному фундаменті, а й визначати їхні контури та глибину залягання.