

УДК 621.371:550.837.6

ФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СРЕДЕ НАД ЗАЛЕЖЬЮ УГЛЕВОДОРОДОВ

Д.В. ГОЛОЛОБОВ, И.Ю. МАЛЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 29 ноября 2004

В работе анализируются электродинамические модели углеводородных залежей (УВЗ), учитывающих физико-химические процессы в околозалежном пространстве. Анализ электрофизической обстановки в окрестности УВЗ позволяет сформулировать ряд направлений дальнейших исследований, позволяющих повысить уровень достоверности при идентификации залежей углеводородов.

Ключевые слова: углеводородная залежь, зоны восстановительной и окислительной обстановки, георазрез, аномалия магнитного поля, электродинамическая модель

Существующие модели георазреза с включением УВЗ

Для обоснования возникающего над залежами нефти и газа аномального поведения электрического и магнитного поля и его морфологии используются физико-математические модели, учитывающие физико-химические процессы, происходящие в околозалежном пространстве УВЗ.

В справочной литературе главной остается модель, в которой залежь представляется в виде тела с конечной проводимостью, помещенного в среду с потерями [1]. Вместе с тем в последнее время при моделировании процессов над залежами учитывается влияние ореольных проявлений под действием миграции углеводородов и многослойность разреза на поведение электромагнитного поля [5–9].

Модель С.Д. Пирсона основана на представлении залежи нефти в виде источника электротеллурического тока. Проведя серию исследований, Пирсон установил, что источники электрических потенциалов и токов существуют в Земле всегда, когда углеводороды (УВ) и связанные химические соединения (сероводород, соли органических кислот и др.) накапливаются в любых типах ловушек [2]. На рис. 1 приведена модель геологического разреза по Пирсону, на которой изображены линии вертикальных токов и их направления в зонах окислительной и восстановительной обстановки. Над залежью создается восстановительная зона с избытком электронов, а вокруг нее окислительная с дефицитом электронов. При этом ширина зоны восстановления $d_{\text{восст}}$, как правило, равна ширине зоны окисления $d_{\text{ок}}$. В результате этого появляется разность потенциалов и в направлении убывания температур протекает электрический ток. Токковые линии замкнуты на себя и направлены над контуром залежи вертикально вниз к скоплениям УВ, а вне контура — вверх к границе раздела "вмещающие породы" — воздух. Плотность тока максимальна над контуром залежи. Электротеллурический ток над залежью УВ должен существовать пока существует сама залежь. По мере разрушения УВЗ плотность тока уменьшается. Распределение и интенсивность токов на дневной поверхности напрямую зависит от контура и объема УВЗ.

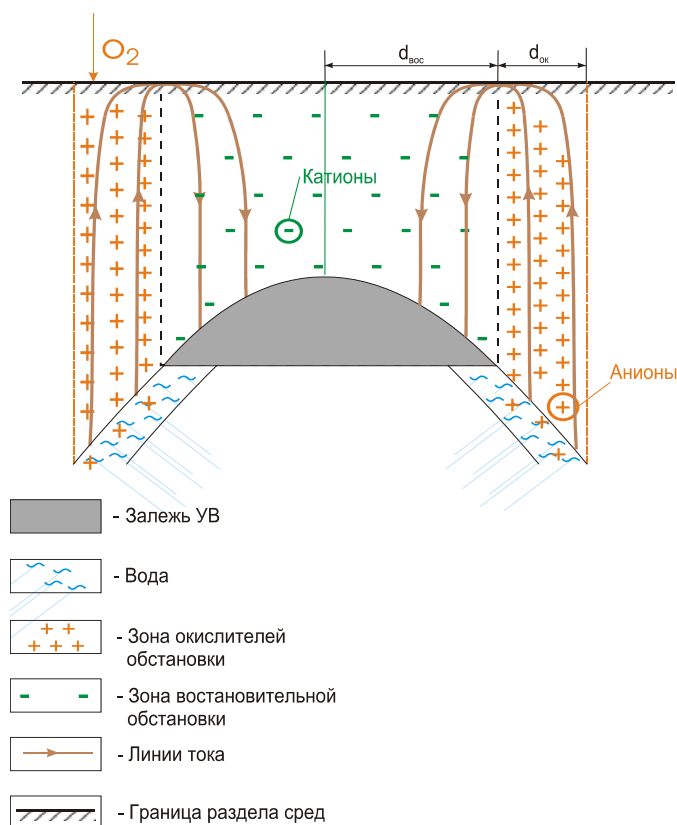


Рис. 1. Модель геологического разреза по Пирсону

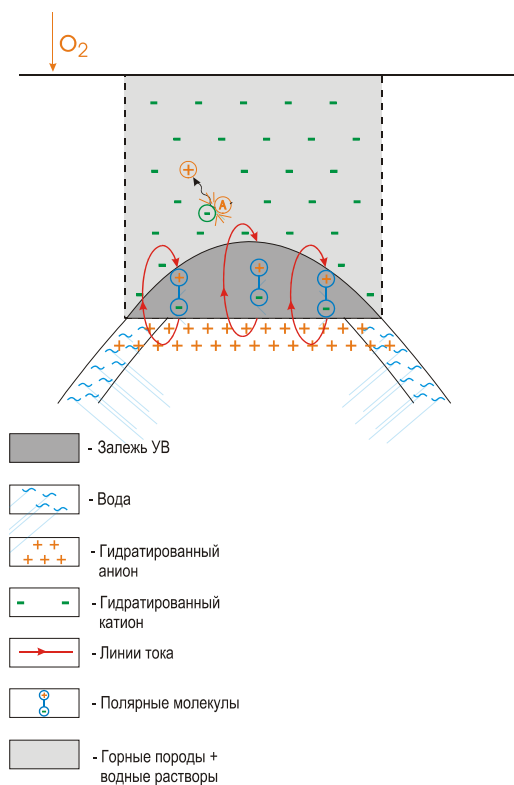


Рис. 2. Геоэлектрическая модель разреза с поляризационной залежью УВ

В ходе перемещения частиц происходит перемещение вещества в замкнутой системе типа УВЗ — атмосфера. Верхней границей системы является линия насыщения кислородом, нижней — подошва залежи [3].

Геоэлектрическая модель разреза с поляризационной залежью УВ [2] (рис. 2) учитывает трехкомпонентную среду, в которой горные породы пронизаны водно-солевыми растворами, закрытыми УВЗ. За счет пластового давления и высоких температур залежь поляризуется и на границах контакта ее с окружающей средой образуется промежуточная область, где преобладают восстановительные процессы, характеризующиеся переходом ряда химических элементов в низковалентное состояние и избытком свободных электронов. Окислительно-восстановительная обстановка при средней температуре в области залежи $T_{\text{пд}} = (350 - 400)^\circ\text{K}$ характеризуется разностью потенциалов между УВЗ и дневной поверхностью, равной 140–360 мВ. Действующая обстановка способствует появлению полярных молекул непосредственно в залежи.

Для обоснования способа георазведки [5] нефтяная залежь представлена в виде активной резонансной излучающей системы. Объем редуцированных пород над залежью играет роль индуктивности, а сама нефть – роль диэлектрика, подошва и надзалежная кромка – роль обкладок конденсатора. Таким образом, вся система является резонансной и генерирует колебания, определяемые геометрическими размерами конденсатора и глубиной залегания УВЗ.

Модель В.Н. Москвичева [6] описывает среду над залежью УВ как многорезонансную избирательную систему за счет представления слабо намагниченного потока флюидов в виде анизотропного образования плазмopodobного типа (рис.3). Согласно исследованиям автора, развитие вторичных процессов минералообразования в вертикальном разрезе над УВЗ, физические и химические изменения во вмещающих породах из-за обменных реакций сопровождаются смещением свободных носителей заряда по температурному гра-

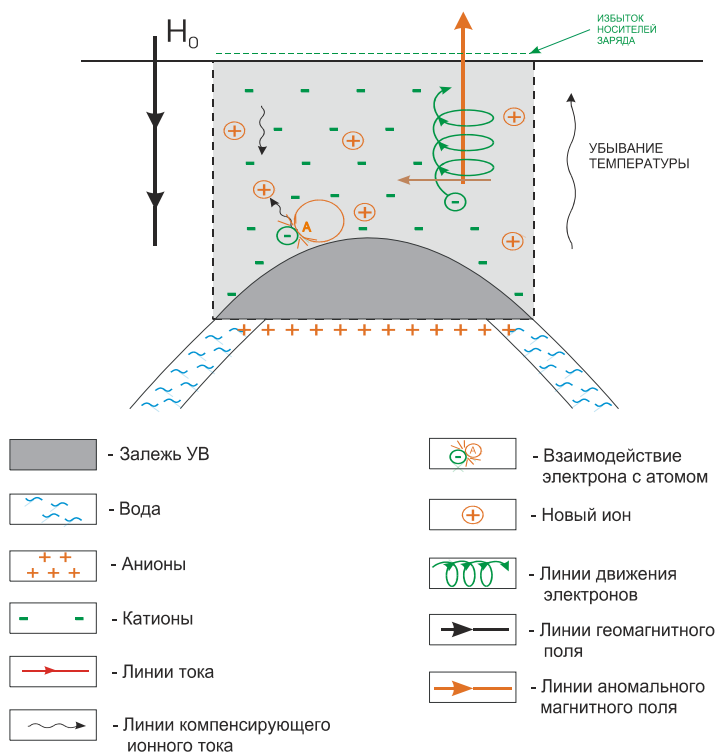


Рис. 3. Модель геологического разреза Москвичева

диенту и наличием тепловых колебаний (фононов), присущим всем твердым телам с дефектом кристаллической решетки, от нагретой части разреза в направлении холодной (к дневной поверхности). При этом наблюдается избыток свободных носителей заряда на уровне насыщения кислородом, появление компенсирующих ионных токов. Процесс переноса зарядов носит эстафетный характер – частица, первоначально бывшая атомом, после взаимодействия с отрицательно заряженной частицей становится ионом. При наличии потока частиц над УВЗ проявляется геомагнитная аномалия, морфология которой объясняется вращательным перемещением электронов в магнитном поле, приводящим к появлению дополнительного магнитного поля, направленного против внешнего над залежью. Находит обоснование и увеличение удельного электрического сопротивления над УВЗ, заключающегося в действии магниторезистивного эффекта.

Миграция углеводородов как источник тока и средство переноса вещества

Существенную роль в изменении физических и химических свойств пород, закрывающих залежи нефти и газа, отводят преимущественно вертикальной миграции углеводородов (УВ). Следует, однако, провести оценку основных характеристик возникающего при этом потока УВ и жестко связанных с ним химических преобразований в среде над УВЗ. Приняв в качестве отправного момента концепцию "топливного элемента" Пирсона [2] и учитывая слоистость поровых слабопроводящих вмещающих пород, необходимо, согласно [3], учитывать преобладание ионной проводимости среды над УВЗ, при которой ионы являются средством переноса и заряда, и вещества.

На рис. 4 приведена схема движения ионных потоков и химических отложений в геологическом разрезе над УВЗ. За счет генерации анионного потока во вмещающих породах над залежью происходит накопление нерастворимых соединений и мобилизация присутствующих в породах Cl^- , Br^- , J^- , SiO_3^{2-} и PO_4^{3-} . Отложения сульфидов и карбонидов происходят по мере генерации S^{2-} и CO_3^{2-} . После поворота токовых линий в горизонтальное направление остатки CO_3^{2-} и OH^- фиксируются в гидроксил-карбонатные соединения (малахит, азурит, давсонит и др.). В зоне окислительной обстановки при повороте линий тока вниз возможно отложение $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и $\text{Al}(\text{OH})_3$. Преобладающими в потоке к залежи становятся кислородосодержащие анионы, которые, достигнув залежи, вступают в реакцию окисления и теряются в подошвенных водах после взаимодействия с катионами.

Основным носителем заряда в катионном потоке является ион H^+ . Двигаясь по токовым линиям вверх, водород вступает в реакцию с железом, марганцем, медью и другими металлами и растворами, обогащая поток катионов ионами этих элементов. В приповерхностном слое H^+ полностью расходуется и окислительная обстановка полностью меняется на восстановительную.

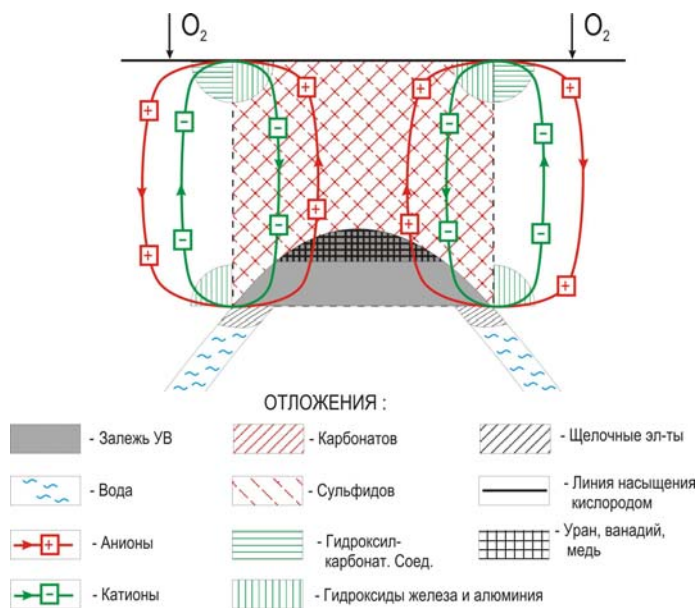


Рис. 4. Схема движения ионных потоков и химических отложений

За счет реакций с HCO_3^- у границы окислительной и восстановительной зон происходит образование гидроксил-карбонатных соединений (медь, цинк, свинец). Дальнейшее движение потока вниз способствует фиксации карбонидов свинца, кальция, железа, марганца, кобальта, магния, отложению сульфидов и глинистых минералов. У залежи ввиду потери потоком элементов металлов происходит мобилизация щелочных металлов и их последующая нейтрализация анионами, сконцентрированными в подошвенной части УВЗ.

В результате действия анионного и катионного потоков происходит "обогащение" залежи УВЗ медью, ванадием и ураном. Наличие повышенного γ -излучения в среде над УВЗ является дополнительным источником миграции свободных зарядов к линии насыщения кислородом.

Аномалии геомагнитного поля над УВЗ

Над месторождениями нефти и газа отмечаются аномалии магнитного поля Земли. Одним из обоснований этого признака является накопление минералов, обладающих свойствами магнетиков за счет сульфидной минерализации, карбонатизации и других процессов в среде над залежью [8]. Содержание таких минералов может меняться от единиц до 10–12 %. Принимая во внимание, что увеличение содержания магнетита в среде на 1% обеспечивает приращение магнитной восприимчивости χ_m в среднем на $(4-5) \cdot 10^{-4}$, можно определить пределы восприимчивости в контуре над УВЗ $\chi_m = (4-60) \cdot 10^{-4}$. Учитывая, что χ_m характеризует намагниченность среды J , вектор магнитной индукции над УВЗ

$$\vec{B} = \mu_0[\vec{H}_0 \pm \vec{J}] = \mu_0\vec{H}_0(1 \pm \chi_i) = \mu'\vec{H}_0 = \vec{B}_0 + \Delta\vec{B}, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, \vec{H}_0 — вектор поля подмагничивания, \vec{B}_0 — вектор магнитной индукции, $\Delta\vec{B}$ — составляющая вектора индукции, учитывающая влияние магнитной среды.

Знак в (1) определяет свойства магнетика — если $\chi_m > 0$ и $\mu' > 1$, то среда обладает парамагнитными свойствами, если $\chi_m < 0$ и $\mu' < 1$, — диамагнитными.

В работе [9] отмечается, что аномалии $\Delta\vec{B}$ характеризуются преимущественно отрицательными, а иногда положительными значениями поля. Как правило, среда над УВЗ обладает диамагнитными свойствами, определяемыми морфологией аномалий геомагнитного поля ("корытообразная" аномалия над всей залежью). Амплитудное значение аномалий геомагнитного поля над УВЗ не превышает 10–15 нТл [8–10], что является главной причиной сдерживания широкомасштабного внедрения методов магниторазведки для поиска залежей нефти и газа.

Другие немаловажные причины такого положения:

- неразработанность методики выделения аномалий на фоне региональных изменений геомагнитного поля из-за влияния кристаллического фундамента;

- наличие высокочастотной составляющей, вызванной локальными неоднородностями верхней части георазреза и техногенными факторами;
- изрезанность аномалий над залежью, обусловленную неравномерностью магнитных новообразований в разрезе, проявлением так называемой "магнитной ряби" (ripples), сказывающейся в области высоких частот;
- измерение модуля магнитной индукции поля Земли, а не истинного значения магнитной напряженности, отсутствие магнитного наклона, несущего информацию об изменении свойств исследуемой среды (ограниченность возможностей теодолитов);
- отсутствие регистраций горизонтальной составляющей вектора магнитной индукции, учитывающей дополнительное поле, обусловленное существованием кольцевых токов над УВЗ.

Аномальные изменения сопротивления пород над УВЗ

Вмещающие породы, пронизанные потоком углеводородных флюидов, перемещаемым по вертикали от УВЗ к дневной поверхности, представляют собой полупроводниковую среду. Наличие электронного потока над УВЗ должно способствовать уменьшению проводимости среды [11], однако экспериментальные исследования показывают, что над нефтегазовыми месторождениями отмечается увеличение удельного электрического сопротивления [6, 8]. В работе [12] впервые проведена аналогия с эффектом Гаусса в полупроводниках, при котором наблюдается изменение удельной проводимости полупроводникового образца при подмагничивании по соотношению

$$\Delta\sigma/\sigma = -0,33 p_e^2 B_{y\delta\delta}^2, \quad (2)$$

где p_e — подвижность электронов, дрейфующих в породах со скоростью v_e ; $B_{y\delta\delta} = \alpha\mu_0 H$ — эффективное магнитное поле с учетом стационарного поля Холла; α — коэффициент, учитывающий угол между направлениями потока частиц и вектора магнитной индукции B_0 .

Однако помимо магниторезистивного эффекта может появляться и другое гальваномагнитное явление — эффект Холла, заключающийся в возникновении электрического поля в породах с током, когда направления тока и вектора подмагничивания перпендикулярны. Увеличение электрической напряженности следует ожидать на границах контура УВЗ, где направление токов (по Пирсону) строго перпендикулярно магнитному полю.

За счет действия гальваномагнитных явлений в среде над УВЗ происходит увеличение сопротивления в слабом геомагнитном поле. Мерой влияния магнитного поля является условие

$$\omega_i \tau \ll 1, \quad (3)$$

где ω_i — циклотронная частота, τ — среднее время между столкновениями частиц в среде.

Повышение поляризуемости над нефтегазовым месторождением обусловлено увеличением удельного сопротивления

$$\eta = |E_{\dot{a}\delta\delta}| / |A_{\dot{a}\delta\delta}|, \quad (4)$$

где $|A_{\dot{a}\delta\delta}|, |A_{\dot{a}\delta\delta}|$ — модули напряженностей вторичного (отраженного) и первичного полей, определенные по методу вызванной поляризации [13].

Характерным является то, что поляризуемость над газовым и нефтяным месторождением имеет существенные отличия.

Заключение

1. Возможные трансформации структуры поля электромагнитной волны (ЭМВ) могут быть обоснованы следующим:

всплеск электрической напряженности поля на границах контура УВЗ за счет концентрации гидроксидов железа и алюминия, а также гидроксил-карбонатных соединений цинка и меди на границе окислительной и восстановительной зон;

изменение фонового значения напряженности электрического поля непосредственно над залежью — из-за накопления карбонидов Pb, Ca, Fe, Mn, Mg, Co, Tr, а также увеличения γ -излучения за счет сконцентрированных в подошве залежи поливалентных металлов V, U, Mo и др.;

изменение напряженности поля в законтурной зоне из-за повышения концентрации металлов в катионной форме;

в возможное увеличение сигнала на отдельных частотах из-за наличия оксидов марганца и олова (MnO_2 , SnO_2), хлорида кальция ($CaCl_2$) и других соединений, содержащихся в горных породах.

2. Для разработки и построения новых аппаратных средств для идентификации сред, обладающих свойствами магнетиков, необходимо использовать:

методику определения ядерного магнитного (для диамагнитных сред) и/или электронного парамагнитного (для парамагнетиков) резонансов;

измерение горизонтальной составляющей вектора магнитной индукции и наклона магнитного поля Земли;

новые методы с искусственным постоянным и переменным подмагничиванием.

PHYSICAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSES IN THE ENVIRONMENT ABOVE THE CARBON-HYDROGEN DEPOSIT

D.V. GOLOLOBOV, I.YU. MALEVICH

Abstract

The paper is focused on analysis of electrodynamics' models of carbon-hydrogen deposits (CHD) that take into account the physical and chemical processes in the surrounding areas. Analysis of electro-physical conditions in the CHD surrounding areas allows formulating a number of further studies that enable higher level of precision in the identification of carbon-hydrogen deposits.

Литература

1. Электроразведка. Справочник геофизика / Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко М., 1989. Т.2. 377 с.
2. Pirson S.J. // World oil. 1971. Vol. 172, № 5, P. 69–72.
3. Бабкин Ю.А. // Литасфера. 1998, № 9, С. 121–125.
4. Дмитриев А.Н. // Разведочная геофизика. М., 1981. Вып. 93. С. 100–106.
5. А.С. 1264122 СССР Способ поиска месторождений нефти и газа / А.Ф. Семенов, В.Ф. Семенов. 1986. Бюл. № 38.
6. Москвичев В.Н. // Радиотехника и электроника. Мн., 1989. Вып. 18. С. 91–96.
7. Чугунов А.В., Мурзин В.Г. // Тез. докл. Междунар. геофизической конф. М., 2000, С. 418.
8. Урдабаев А.Т. // Тез. докл. Междунар. геофизической конф. М., 2000. С. 213.
9. Максимчук В.Е. // Тез. докл. Междунар. геофизической конф. М., 2000. С. 195.
10. Розенберг В.Н. // Разведочная геофизика. М., 1991. № 112. С. 35.
11. Платцман Ф., Вольф П. Волны и взаимодействия в плазме твердого тела. М., 1975.
12. Москвичев В.Н., Стадник Ю.Н. // Перспективы развития минерально-сырьевой базы БССР. Мн., 1990. С. 73–80.
13. Моисеев В.С. // Тезисы докладов международной НТК. СПб., 2000. С. 174.
14. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. М., 1984. 312 с.

УДК 623.618.2

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ СТАНЦИЯМ СЕКТОРНОГО ОБЗОРА И МЕТОД ЕЕ РЕШЕНИЯ

А.Н. ПАЛЬЦЕВ, С.В. КРУГЛИКОВ

*Военная академия Республики Беларусь
Гуртьева, 1, Минск, 220057, Беларусь*

Поступила в редакцию 23 февраля 2005

Работа посвящена формализации задачи распределения воздушных объектов по радиолокационным станциям секторного обзора в виде трехиндексной задачи о назначениях со специфическими ограничениями. Представлен точный метод решения этой задачи.

Ключевые слова: распределение, задача о назначениях.

Введение

Одной из задач, решаемых в пункте управления (ПУ) системы специального назначения в реальном масштабе времени с помощью комплекса средств автоматизации, является задача распределения воздушных объектов (ВО) по радиолокационным станциям (РЛС) секторного обзора. Данная задача реализуется в ПУ для обеспечения непрерывного сопровождения трасс ВО, находящихся в зоне обнаружения системы. В РЛС секторного обзора, управление которыми осуществляется с ПУ, реализована вторичная обработка радиолокационной информации. Трассовая информация по десяти ВО, находящимся в секторе работы данной станции, с темпом 1 с выдается из РЛС в ПУ для ее дальнейшей обработки. РЛС секторного обзора может сопровождать только те ВО, которые находятся в границах ее рабочего сектора, положение которого может изменяться самой станцией.

Сектор работ — это ограниченный по азимуту и углу места участок пространства, в котором РЛС обеспечивает сопровождение ВО с заданными требованиями.

Задача распределения воздушных объектов в пункте управления по радиолокационным станциям секторного обзора характеризуется одновременным поиском двух различных назначений: "РЛС – группа совместно сопровождаемых воздушных объектов (ССВО)" и "канал сопровождения – ВО из состава группы ССВО". Она существенно отличается от задачи распределения ВО по РЛС кругового обзора, в которой производится лишь поиск назначения типа "канал сопровождения – ВО".

Под ССВО будем понимать совокупность ВО, каждая из которых при сопровождении ее РЛС не вызывает нарушения сопровождения других ВО этой группы.

Канал сопровождения — это совокупность аппаратных и (или) программных средств, обеспечивающих сопровождение трассы одного воздушного объекта.

Формализация задачи

Пусть в зоне обнаружения системы, в состав которой входит $N_{ДЕ\tilde{N}}$ РЛС секторного обзора, находится $N_{\tilde{A}i}$ воздушных объектов, трассы которых сопровождаются в ПУ и для обеспечения их непрерывного сопровождения по ним решается задача распределения в текущем такте обработки информации. Пусть на момент решения задачи распределения ВО у q -й РЛС ($q = 1, N_{ДЕ\tilde{N}}$) имеется $m_{\tilde{e}_q}$ свободных каналов сопровождения. Относительно каждой РЛС сформировано S_q групп ССВО и определено, что сопровождение трассы одного n -го ВО осуществляется только одной РЛС.

Тогда задача распределения ВО для их сопровождения по РЛС секторного обзора формулируется следующим образом: необходимо найти целочисленный набор $X = \{x_{nqk}\}$, максимизирующий целевую функцию

$$W(\vec{X}) = \sum_{n=1}^{N_{\tilde{A}i}} \sum_{q=1}^{N_{ДЕ\tilde{N}}} \sum_{k=1}^{m_{\tilde{e}_q}} t_{nqk}^i x_{nqk} \quad (1)$$

при следующих ограничениях и условиях:

$$\sum_{q=1}^{N_{ДЕ\tilde{N}}} \sum_{k=1}^{m_{\tilde{e}_q}} x_{nqk} \leq 1, \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^{N_{\tilde{A}i}} \sum_{q=1}^{N_{ДЕ\tilde{N}}} x_{nqk} \leq 1, \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{\tilde{e}_q}} x_{nqk} \leq 1, \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^{S_q} y_{qs} = 1, \quad (5)$$

$$x_{nqk} \leq \sum_{s=1}^{S_q} \Gamma_{ns}^q y_{qs}, \quad (6)$$

$$x_{nqk} \in \{1, 0\}, \quad (7)$$

$$y_{qs} \in \{1, 0\}, \quad (8)$$

где t_{nqk}^i — время нахождения n -го ВО в секторе работы q -й РЛС при назначении для его сопровождения ее k -го канала;

$$x_{nqk} = \begin{cases} 1, & \text{если } k - \text{й канал } q - \text{й РЛС свободен и } n - \text{й ВО в секторе;} \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$y_{qs} = \begin{cases} 1, & \text{если } q - \text{й РЛС свободна и } s - \text{я группа ССВО;} \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$\tilde{A}_{ns}^q = \begin{cases} 1, & \text{если } n \text{-й канал } s \text{-й РЛС} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$n = \overline{1, N_{\hat{A}}}, \quad s = \overline{1, S_q}.$$

В зависимости от задачи, которая ставится перед системой специального назначения, целевая функция (1) может принимать другой вид.

Набор $X = \{x_{nk}\}$ образует трехмерную матрицу, состоящую из нулей и единиц, которая называется планом назначения.

Ограничение (2) учитывает тот факт, что для сопровождения n -го ВО не может быть назначено более одной РЛС. При этом каждый ее канал одновременно может сопровождать только один ВО, что и отражено в ограничении (3).

Ограничение (4) требует, чтобы для сопровождения n -го ВО назначалось не более одного канала q -й РЛС.

Ограничение (5) учитывает условия того, что на каждую РЛС может быть распределена только одна группа ССВО.

Ограничение (6) требует, чтобы на каждую РЛС распределялись лишь те ВО, которые входят в выбранную для назначения группу ССВО.

Ограничения (7) и (8) определяют целочисленность переменных x и y .

Полученная задача относится к многоиндексным задачам дискретного программирования. Однако специфика ограничений (5) и (6) не позволяет отнести ее к известным типам задач дискретного программирования (транспортная задача, задача о назначениях), для которых достаточно широко разработан математический аппарат их решения.

Метод решения задачи

Обзор известной литературы показал, что эффективный метод решения задачи распределения ВО, описываемой выражениями (1)–(8) в ее прямой постановке, не разработан. Поэтому решение данной задачи возможно только методом полного перебора, который предусматривает перебор всех вариантов, в каждом из которых последовательно решаются следующие подзадачи:

закрепление за РЛС по одной очередной группе ССВО;

распределение ВО из "прикрепленных" групп ССВО по РЛС.

Предположим, что все возможные варианты закреплений групп ССВО за РЛС пронумерованы от 1 до F , где

$$F = \prod_{q=1}^{N_{\text{РЛС}}} S_q.$$

Рассмотрим некоторое f -е закрепление групп ССВО за РЛС (где $f = \overline{1, F}$). При этом допустим, что в соответствии с этим закреплением на $m_{\hat{e}_q}$ каналов сопровождения будет распределяться $N_{\hat{A}_f}$ ВО.

Данная задача позволяет осуществить переход к ее двухиндексному виду. Введем одноиндексную нумерацию (l) значений пары индексов (q, k) следующим образом:

$$\begin{aligned}
(1,1) &\equiv 1, & (1,2) &\equiv 2, & \dots, & (1, m_{\hat{e}_1}) &\equiv m_{\hat{e}_1}, \\
(2,1) &\equiv m_{\hat{e}_1} + 1, & (2,2) &\equiv m_{\hat{e}_1} + 2, & \dots, & (2, m_{\hat{e}_2}) &\equiv m_{\hat{e}_1} + m_{\hat{e}_2}, \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
(N_{\text{ДЕН}}, 1) &\equiv \sum_{q=1}^{N_{\text{ДЕН}}-1} m_{\hat{e}_q} + 1, & (N_{\text{ДЕН}}, 2) &\equiv \sum_{q=1}^{N_{\text{ДЕН}}-1} m_{\hat{e}_q} + 2, & \dots, & (N_{\text{ДЕН}}, m_{\hat{e}_{N_{\text{ДЕН}}}}) &\equiv \\
& & & & & & \equiv \sum_{q=1}^{N_{\text{ДЕН}}-1} m_{\hat{e}_q} + m_{\hat{e}_{N_{\text{ДЕН}}}} = M_{\hat{e}}
\end{aligned}$$

Тогда для рассматриваемого f -го закрепления получаем соответствующую подзадачу: найти вектор $X = \{x_{nl}\}$, максимизирующий функцию

$$W(\vec{X}) = \sum_{n=1}^{N_{\hat{A}f}} \sum_{l=1}^{M_{\hat{e}}} t_{nl}^i x_{nl}, \quad (9)$$

и удовлетворяющий ограничениям

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^{N_{\hat{A}i}} x_{nl} = 1, \text{ а́ннè } N_{\hat{A}i} \geq M_{\hat{e}}, \\ \sum_{n=1}^{N_{\hat{A}i}} x_{nl} \leq 1, \text{ а́ннè } N_{\hat{A}i} < M_{\hat{e}}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^{M_{\hat{e}}} x_{nl} = 1, \text{ а́ннè } N_{\hat{A}i} < M_{\hat{e}}, \\ \sum_{l=1}^{M_{\hat{e}}} x_{nl} \leq 1, \text{ а́ннè } N_{\hat{A}i} \geq M_{\hat{e}}, \end{cases} \quad (11)$$

$$x_{nl} \in \{1, 0\}, \quad (12)$$

где t_{nl}^H — время нахождения n -го ВО в секторе работы РЛС при назначении для ее сопровождения l -го канала, $l = \overline{1, M_{\hat{e}}}$, $n = \overline{1, N_{\hat{A}f}}$.

Подзадача (9)–(12) соответствует классическому виду задачи о назначениях [1].

Решая последовательно F подзадач (9)–(12), получаем совокупность значений $\{L_f(\vec{X})\}_{f=1}^F$ целевой функции (9).

Тогда искомым решением задачи распределения целей, описываемой выражениями (1)–(7), является вектор \mathbf{X}^* , полученный при закреплении за РЛС f -го варианта групп ССВО, для которого

$$\hat{E}_a(\vec{X}^*) = \max_{f \in F} \{L_f(\vec{X})\}.$$

Схема алгоритма решения задачи распределения ВО показана на рисунке. Время, затрачиваемое на решение данной задачи, зависит от количества вариантов закреплений групп ССВО за РЛС и времени решения задачи о назначениях выбранным методом, размерность которой определяется количеством распределяемых ВО и свободных каналов сопровождения.

Методы, использующие аппарат комбинаторики, являются наиболее предпочтительными для решения задачи о назначениях с точки зрения временных затрат ЭВМ на получение опти-

мального решения [2]. Среди методов этой группы наибольший интерес для практического использования представляют метод логических шкал [3] и метод Мака [4]. Указанные методы позволяют получить решение задачи о назначениях небольшой размерности в реальном масштабе времени.

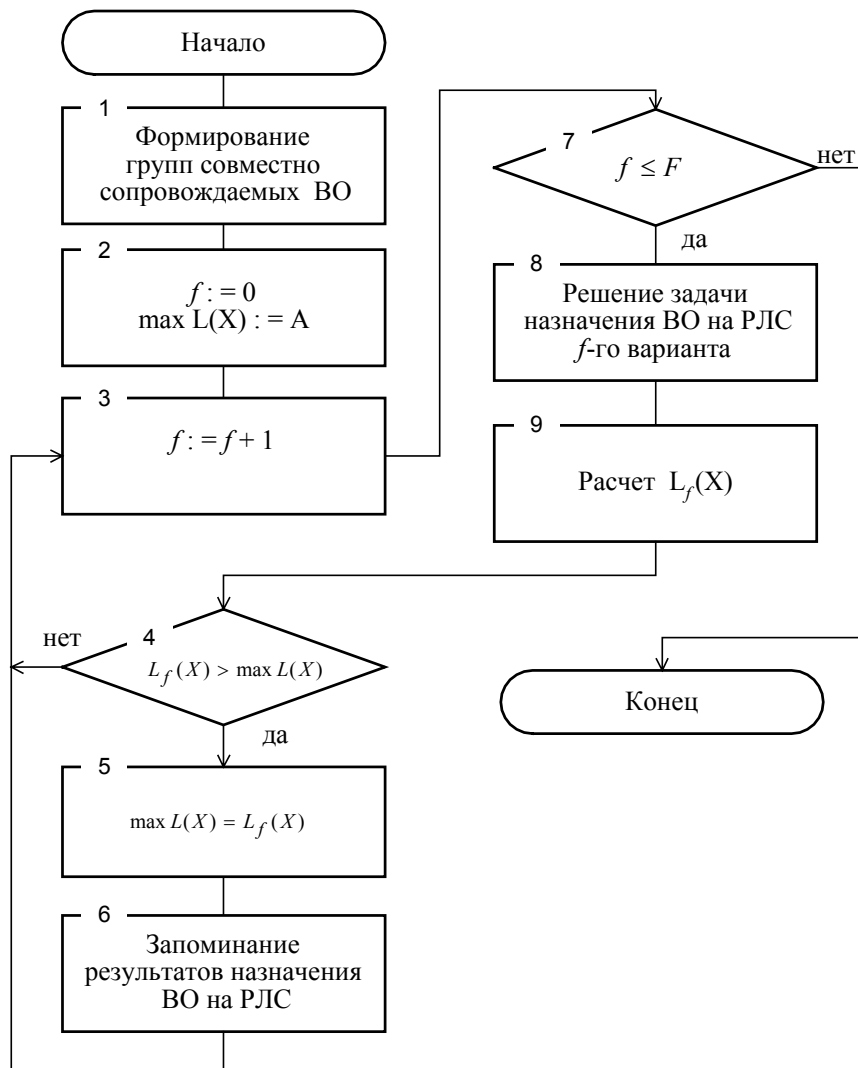


Схема алгоритма решения задачи распределения ВО

Был проведен на ПЭВМ типа Pentium-3 с тактовой частотой 800 МГц численный эксперимент с целью оценки средних затрат процессорного времени машины на решение задачи распределения ВО методом перебора групп ССВО при использовании указанных выше точных методов решения задачи о назначениях. Применительно к системе специального назначения, ПУ которой может сопровождать до 100 трасс ВО при наличии у всех РЛС секторного обзора 60 каналов сопровождения, значение математического ожидания процессорного времени ПЭВМ решения задачи распределения ВО составляет 8–30 мин в зависимости от интенсивности входа ВО в зону обнаружения системы.

Заключение

На практике при наличии временных ограничений на решение задачи распределения ВО в программном обеспечении ПУ могут реализовываться приближенные методы. Результаты проведенных исследований и численных экспериментов показали, что применение данных методов, несмотря на их простоту и реализуемость в реальном масштабе времени, приводит к снижению эффективности распределения до 50–60%.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF PROBLEM OF AIR OBJECTIVE DISTRIBUTION OVER SINGLE-FACED RADAR'S AND METHOD OF ITS SOLUTION

A.N PALZEV, C.V. KRUGLIKOV

Abstract

The mathematical description of the problem related to the air objective distribution over the single-faced radars in the kind of three-index problem of purposes with specific limitations is presented in the article. The exact method of the solution of the problem is considered.

Литература

1. *Габасов Р., Кириллова Ф.Н.* Методы линейного программирования. Ч. 3. Специальные задачи. Мн., 1980.
2. *Пападимитриу Х., Стайглиц К.* Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность: Пер с англ. М., 1985.
3. *Любимов Ю.И., Реут В.Б.* Решение задач математического программирования с использованием функциональных цифровых автоматов. М., 1986.
4. *Банди Б.* Основы линейного программирования: Пер. с англ. М., 1989.