

Д.М. Трофимов (Компания «Совзонд»)

В 1958 г. окончил Московский геологоразведочный институт. В настоящее время — специалист компании «Совзонд». Доктор геолого-минералогических наук.

В.Н. Евдокименков (МАИ)

В 1982 г. окончил Московский авиационный институт (МАИ). В настоящее время — профессор кафедры «Информационно-управляющие комплексы» МАИ. Доктор технических наук.

В.В. Малышев (МАИ)

В 1960 г. окончил Московский авиационный институт (МАИ). В настоящее время — заведующий кафедрой «Системный анализ и управление» МАИ. Доктор технических наук.

Методика оценки перспектив нефтегазоносности структурных ловушек, выявленных или подготовленных к поисковому бурению, по космическим и геолого-геофизическим данным

Актуальной проблемой в современных условиях энергетической напряженности является совершенствование методов прогноза нефтегазоносности структурных ловушек, вводимых в поисковое бурение. Это связано как со стоимостью поискового бурения, уже доходящего до сотен миллионов рублей за одну скважину глубиной 4000-4500 м, так и с исчерпанием простых, крупных и средних по размерам локальных поднятий, что определяет необходимость выявления более сложных и глубоко залегающих ловушек нефти и газа.

В течение истории развития нефтегазопоисковых работ делались попытки использования различных видов геофизических и геохимических исследований для решения задачи прямых поисков нефти и газа [1-6]. С появлением новых нефтегазопоисковых методов каждый из них оценивался с точки зрения возможностей решения данной задачи. Не избежали этой участи и аэрокосмические методы, активно развивавшиеся и совершенствовавшиеся особенно в начале XXI века.

Помимо применения одиночных методов геофизических и геохимических исследований предпринимались попытки их комплексного использования в виде

выявления «аномалий типа залежей», которые не оправдали возлагавшихся на них надежд. До настоящего времени ведущим остается метод экспертных оценок, в рамках которого решение о бурении скважин принимают геологи и сейсморазведчики на основе анализа критериев нефтегазоносности (структурных, тектонических, литологических, геохимических и др.).

Авторы статьи также являются сторонниками комплексного подхода и использовали в своей работе как основные виды аэрокосмических методов, так и экспертную оценку критериев нефтегазоносности с определением значимости или веса каждого из используемых видов информации применительно к конкретному в ландшафтно-геологическом отношении региону.

При решении поставленной задачи привлекаются следующие виды съемок: панхроматическая, мультиспектральная и радиолокационная. Мультиспектральная съемка с космических аппаратов (КА) Landsat-7 и Terra (Aster) обеспечивает получение фитогеохимической информации через состояние растительного покрова. Она может отражать аномальное геохимическое либо гидрохимическое воздействие углеводородов, фиксирующих-

ся в определенном диапазоне спектра, соответствующем зоне поглощения хлорофиллов и каротиноидов, что было установлено при проведении экспериментальных работ.

Объектом исследований являются ареалы просачивания углеводородов или их вынос в зонах разгрузки глубинных вод. Легкие фракции углеводородов (метановые, нафтеновые и ароматические) являются наиболее подвижными. Находясь в почве и в воде, они оказывают токсическое и наркотическое действие на живые организмы, в том числе и на растительный покров [7, 8]. Ареал просачивания углеводородов, латерально мигрирующих по почвенному профилю и водоносным горизонтам, может занимать относительно большую площадь и быстро деградировать на земной поверхности и в почвах.

Циклические углеводороды окисляются очень трудно в связи с их малой растворимостью. Смолы и асфальтены при повышенных концентрациях вследствие их накопления в почвенном слое, оказывают токсическое действие на биоценоз [7]. Этот эффект усиливается за счет повышенного содержания в данных продуктах нефтяного ряда следующих элементов: ванадия, никеля, ртути и др. Соединения этих металлов действуют как яды, угнетая все живое. Вредное экологическое влияние смол и асфальтенов на почвенный покров заключается в изменении его водно-физических свойств. Являясь гидрофобными, они обволакивают корни растений и ухудшают поступление в них влаги и кислорода. Кроме этого, на смолистые вещества микроорганизмы не оказывают существенного воздействия, и процесс их разрушения затягивается на несколько лет. В составе мигрирующего к земной поверхности природного газа содержатся и неуглеводородные компоненты, в первую очередь, сероводород, ртуть, азот, гелий и др. Они также оказывают деградирующее воздействие на почвенно-растительный покров [9]. В целом нефтяные продукты приводят к ухудшению процессов фотосинтеза за счет угнетения хлорофиллов и каротиноидов, вызывающих изменения окраски листвы и хвои, что и фиксируется мультиспектральными снимками [10].

Съемка в инфракрасном диапазоне обеспечивает получение радиационных температур, которые при наземной проверке или коррекции с небольшими ошибками пересчитываются в термодинамические температуры. Использование этого вида съемки базируется на установленном факте, что структурные ловушки нефти и газа

концентрируют тепловой поток, усиливаемый за счет экзотермической реакции в залежи. Наиболее сложным является установление процесса вертикального теплопереноса к земной поверхности, учитывая рассеивающее воздействие многочисленных водоносных горизонтов, а самым простым – выявление глубинных разломов, по которым происходит разгрузка термальных вод. Для решения этой проблемы проводилась тепловая съемка из космоса в дальнем инфракрасном диапазоне со специальной обработкой радиационных температур. По результатам их анализа на структурных ловушках в пре-

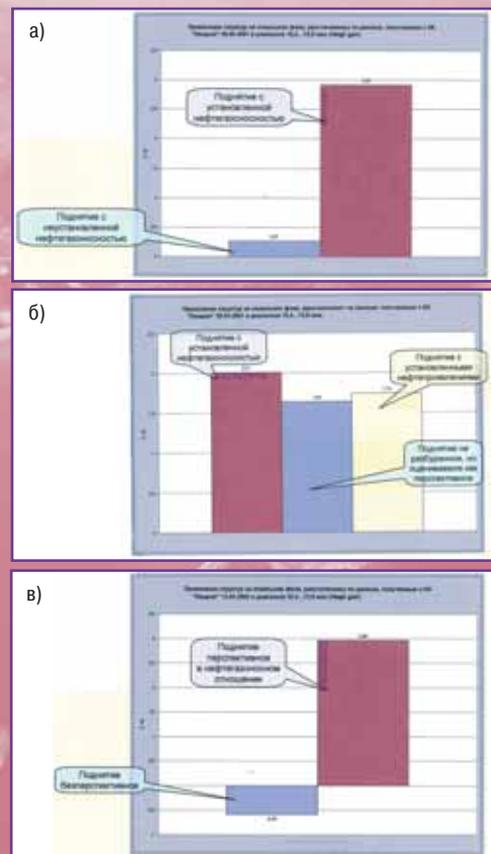


Рис. 1. Температурные показатели: а) по Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции; б) по Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции; в) по Волго-Уральской нефтегазоносной провинции

делах Тимано-Печорской, Западно-Сибирской и Волго-Уральской нефтегазоносных провинций получены относительно устойчивые показатели различий для продуктивных и непродуктивных поднятий (рис. 1). Эти данные свидетельствуют, что при комплексировании с наземной инфракрасной съемкой они могут иметь поисковое значение.

Радиолокационная съемка, фиксирующая пленки нефти в пределах акваторий, на суше служит для структурной привязки спектральных и тепловых аномалий. Она обеспечивает, по сравнению с другими видами съемок, максимальный объем структурной информации (разрывных и пликтивных дислокаций чехла), способствуя выявлению отражающихся на земной поверхности структурных ловушек и установлению связи дистанционно регистрируемых аномалий с дислокациями продуктивных горизонтов (рис. 2).

Космические съемки в отличие от полевых работ, в связи с высокой оперативностью, относительно небольшими затратами и непрерывным полем данных (в отличие от дискретных данных при наземных съемках), высоким спектральным и пространственным разрешением, обеспечивают быстрое получение детальных и качественных данных. На них с помощью снимаемых параметров (спектральные яркости, радиационные температуры и гипсометрия рельефа), проходящих специальную коррекцию и обработку, выявляются аномалии, обусловленные локальными проявлениями геохимической обстановки, связанной с просачиванием углеводородов, ростом структурных форм чехла и активными подвижками, осложняющими их разрывные нарушения.

Так как применяемые аэрокосмические показатели для оценки нефтегазоносности ловушек имеют косвенную значимость, то на первом этапе работ формируется количественный дистанционный образ нефтяного или газового месторождения, используемого в качестве эталона и расположенного в непосредственной близости от вводимых в бурение структур или в пределах одной структуры второго порядка, характеризующейся относительно выдержанными геолого-ландшафтными условиями. При наличии нескольких эталонных объектов вероятность прогноза может возрастать, так же как и при использовании «антиэталона» – разбуренного непродуктивного поднятия. Формирование этих дистанционных образов осуществляется попиксельно в площадном или профильном вариантах (рис. 3), причем последний обеспечивает более устойчивые результаты.

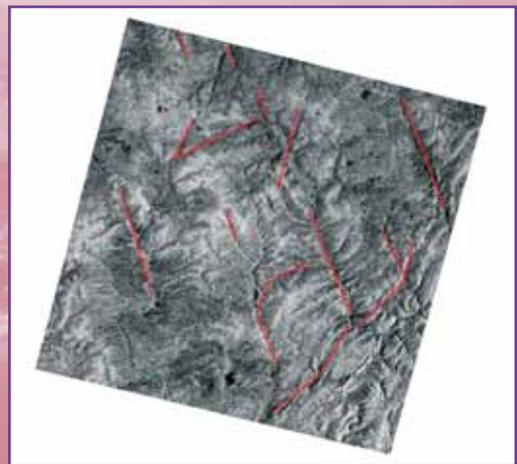


Рис. 2. Космический снимок со спутника ERS в радиодиапазоне и структурно-контролирующие разломы в районе Чаиндинского месторождения

На втором этапе работ проводится сопоставление эталонов и «антиэталонов» с изучаемыми структурными ловушками и определяется местоположение новых структур по всей исследуемой площади, исходя из

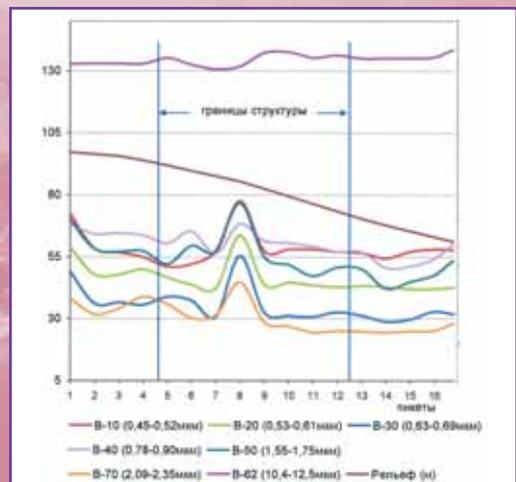


Рис. 3. Спектральный дистанционный образ структурной ловушки нефти и газа

предположения, что не все структуры выявлены сейсмо-разведкой. Современный аппарат математической статистики предлагает достаточно широкий выбор методов, позволяющих проводить подобное сопоставление с количественной оценкой перспектив нефтегазоносности структурных ловушек (рис. 4). Выбор конкретного метода существенно зависит от степени геологической изученности исследуемой территории. При наличии достаточного количества разбуренных структур («эталонов» и «антиэталонов») могут применяться известные методы классификации с «обучением», позволяющие обоснованно отнести изучаемую структурную ловушку к одному из эталонных классов (продуктивных или непродуктивных структур). В том случае, когда на исследуемой площади имеется ограниченное количество «эталонов» и «антиэталонов», недостаточное для «обучения» методов классификации, оценка перспектив нефтегазоносности изучаемых ловушек может проводиться с помощью методов проверки статистических гипотез, позволяющих на основе обоснованных количественных критериев проанализировать исследуемые ловушки с учетом близости

их свойств к свойствам эталонных структур. Наконец, в ситуации, когда на исследуемой территории бурение не проводилось, т. е. отсутствуют объекты, которые могут рассматриваться в качестве «эталонов» или «антиэталонов», предварительный анализ исследуемых ловушек может быть проведен с привлечением методов кластеризации. В этом случае из всей их совокупности выделяется конечный набор групп (кластеров), объединяющих объекты, близкие по своим яркостным или тепловым проявлениям. Выделенные кластеры в дальнейшем могут уточняться по результатам их более глубокого экспертного анализа. Таким образом, имеется фундаментальная, апробированная на практике, база, создающая надежную объективную основу для решения задач, связанных с оценкой перспектив нефтегазоносности структурных ловушек на основе аэрокосмических и геолого-геофизических данных.

Анализ спектральных характеристик, полученных в результате обработки космических снимков, может осуществляться для одной даты или нескольких, охватывающих летний сезон, когда растительность не изменяет резко свою окраску.

Использование нескольких разновременных снимков дает дополнительную информацию, показывающую существенное различие продуктивных и непродуктивных структур. Для первых – характерна высокая степень временной корреляции значений спектральных характеристик, приближающаяся к единице, а для вторых – свойственно отсутствие устойчивых корреляционных связей между значениями спектральных характеристик, соответствующих различным периодам съемки. Относительная однородность по-

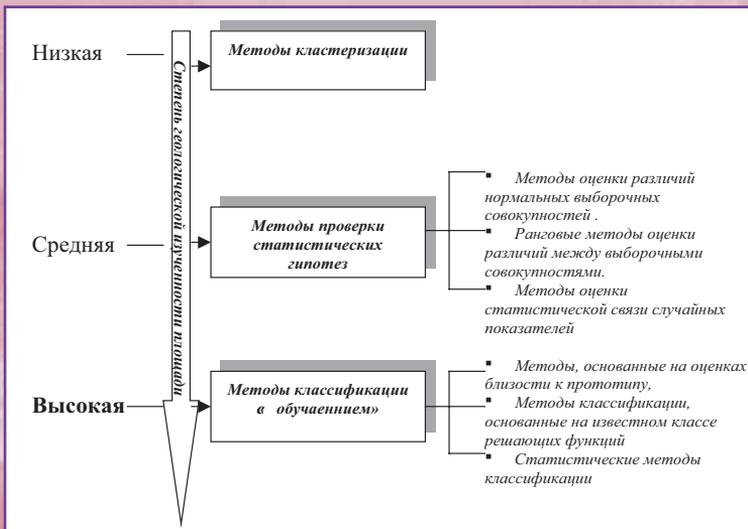


Рис. 4. Структура математических методов, используемых для оценки перспектив нефтегазоносности структурных ловушек

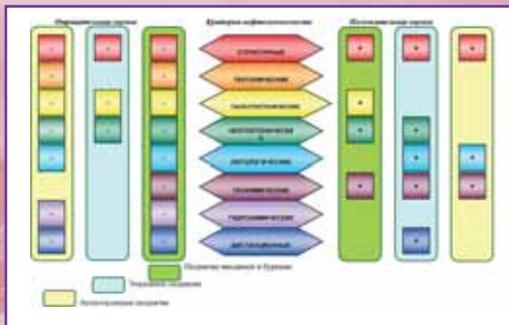


Рис. 5.
Схема сопоставления критериев нефтегазоносности эталонов и «антиэталон» со структурной ловушкой нефти и газа, вводимой в поисковое бурение

лученных аэрокосмическими методами результатов объясняется наличием специфической геохимической обстановки, связанной с просачиванием из продуктивных горизонтов углеводородов, влиявших на окраску растительного покрова и отражающихся в виде специфических значений спектральных яркостей. Установленным является тот факт, что в ареале месторождений нефти и газа поддерживается устойчивый геохимический режим в четвертичных отложениях и почвенном покрове, характеризующихся определенными показателями eH и pH и набором минералов [11].

Помимо сопоставления этих данных, проводится экс-

пертный анализ критериев нефтегазоносности (рис. 5), отражающих сравнительную оценку перспективности рассматриваемых объектов.

Целью заключительного этапа является сравнительная формализованная оценка объективных данных космических съемок, независимых от точки зрения геолога, и экспертных геологических, геофизических и геохимических показателей, оценки которых могут быть подвержены субъективному влиянию исполнителя, но с учетом количественного определения значимости морфологических характеристик структурных ловушек и критериев нефтегазоносности, применимых к изучаемому региону. Таким образом, критерием оценки достоверности результатов анализа спектральных характеристик при наличии нескольких «эталон» является сходимость их дистанционных образов, а для рассматриваемых структурных ловушек определяется степень близости к эталонным объектам и отличия от «антиэталон».

При анализе традиционных геологических материалов использовались данные по тектоническому положению, морфологии структурных ловушек и их характеристикам по основным опорным горизонтам чехла. В первую очередь анализировалось структурное положение ловушек в пределах структур более низкого порядка и осложняющих их разломов, прогнозируемых по космическим данным. Подобный анализ был проведен в пределах Волго-Уральской, Тимано-Печорской и Восточно-Сибирской нефтегазоносных провинций. В отличие от ранее выявленных связей разломов и месторождений,

Значения вероятности правильного распознавания продуктивных и непродуктивных структур по различным морфологическим характеристикам

Наименование морфологической характеристики	Вероятность правильного распознавания продуктивных и непродуктивных структур, %
Площадь структуры по башкирскому ярусу	84,6
Амплитуда по башкирскому ярусу	80,0
Мощность осадочного чехла	78,6
Площадь структур по бобриковскому горизонту	71,8
Площадь структур по фундаменту	56,7
Амплитуда по доманику	56,2
Амплитуда поднятий в рельефе	54,5
Площадь структур по космическим данным	46,1
Площадь структур по доманику	43,5
Амплитуда по фундаменту	43,3
Амплитуда по бобриковскому горизонту	39,3

авторы изучали связи нескольких разнонаправленных разрывных нарушений с продуктивными и непродуктивными скважинами. В пределах Жигулевско-Пугачевского свода связь нефтяных месторождений с ограничивающим его с севера разломом была однозначной. Для Камовского свода Байкинской антеклизы был использован традиционный метод оценки статистической связи качественных (бинарных) признаков, в основе которого лежит таблица сопряженности признаков и критерий Фишера-Пирсона. Полученный результат позволяет с вероятностью 0,9942 (т. е. практически достоверно) утверждать, что существует объективная связь между продуктивными скважинами и узлами пересечения разрывных нарушений, прогнозируемых по космическим данным и не зафиксированных сейсморазведкой. Частота присутствия этих нарушений для продуктивных скважин статистически достоверно превышает частоту их наличия для непродуктивных скважин.

В качестве иллюстрации выше изложенного приведем некоторые результаты исследований по Жигулевскому валу и северной части Жигулевско-Пугачевского свода. На первом этапе был проведен анализ оценки информативности отдельных морфологических характеристик изучаемых локальных поднятий и их комбинаций в задаче распознавания продуктивных и непродуктивных объектов. В качестве меры дифференцирующих возможностей этих характеристик рассматривалась вероятность правильного распознавания продуктивных и непродуктивных объектов, достигаемая при использовании их значений в методе дискриминантного анализа.

При проведении статистического анализа использовались следующие морфологические характеристики локальных поднятий: мощность осадочного чехла; площади структуры по фундаменту, девону, бобриковскому горизонту, башкирскому ярусу, амплитуда по этим опорным поверхностям, площадь структуры по космическим данным и амплитуда поднятий в рельефе. По результатам анализа наиболее информативной характеристикой разграничения продуктивных и непродуктивных структур является значение площади локальной структуры по башкирскому ярусу. Вероятность правильного распознавания по этой характеристике составила 84,6% (см. таблицу).

При исследовании взаимосвязей значений геолого-геофизических и аэрокосмических признаков, свойственных продуктивным и непродуктивным структурам,

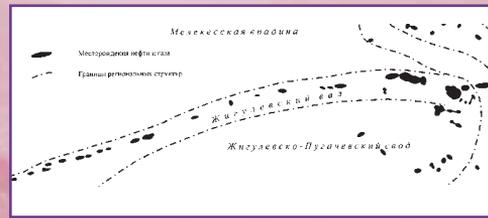


Рис. 6.

Схема расположения структурных ловушек нефти и газа северной части Жигулевско-Пугачевского свода, изученных космическими методами

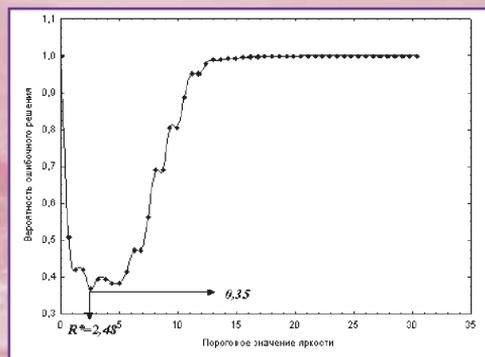


Рис. 7.

График спектральных яркостей для оценки исследуемых объектов

возникают различные по сложности ситуации:

- имеется информация об эталонных объектах на участках, которые могут рассматриваться в качестве надежных аналогов изучаемых участков;
- эталонные объекты не обнаруживают достаточного геологического подобия с прогнозируемыми или выявленными структурами.

В первом случае геологические и аэрокосмические характеристики эталонных объектов объединяются в обучающую выборку, непосредственно используемую для формализации решающего правила в процедуре распознавания. Подобная ситуация свойственна Жигулевскому валу (рис. 6), где анализировалось большое количество продуктивных и непродуктивных структур, что позволило выявить некоторые статистические закономерности, используемые для оценки структур, представляющих интерес для разбуривания.

Анализ распределения значений яркостей в среднем ИК-диапазоне, полученных с КА Landsat-7, свидетельствует о возможности разделения продуктивных и непродуктивных структур по спектральному признаку. На рис. 7 приведена зависимость, отражающая вероятность ошибочной классификации эталонных объектов только на основе значений яркостей. Отсюда видно, что при оптимальном пороговом значении яркости, вероятность правильной классификации эталонных продуктивных и непродуктивных объектов по спектральному признаку достигает величины $P = 0,65$. Следует заметить, что комплексное использование спектральных характеристик, выявляемых на основе обработки результатов космических съемок, с морфологическими характеристиками увеличивает вероятность правильной классификации эталонных продуктивных и непродуктивных структур до величины $P = 0,88$.

Более сложная ситуация возникает в слабоизученном регионе, например, в Восточной Сибири, где отсутствуют эталонные объекты.

Проведенные исследования в различных регионах позволили выявить важную закономерность – среднее значение спектральной яркости нефтегазоносных структур выше, чем среднее значение пустых структур. Эта тенденция в разной степени проявляется для всех каналов и разных периодов времени, что позволяет использовать метод кластерного анализа.

Так как при решении задачи оценки перспектив нефтегазоносности структур приходится сталкиваться с большим количеством неопределенностей, в подобных условиях целесообразно использовать многовариантный подход, когда решение формулируется на основе анализа большого количества критериальных функций, полученных различными методами. Такой подход позволяет совместить в рамках единого алгоритма как эвристические методы распознавания, так и методы, использующие принцип обучения.

Полученные результаты показывают, что предлагаемая методика позволяет разделять перспективные и неперспективные ловушки углеводородов и дает возможность использовать его на практике для оценки нефтегазоносности ловушек выявленных или подготовленных к глубокому бурению.

Список литературы

1. Агалаков С.Е., Бакуев О.В. Новые объекты поисков углеводородов в надсеноманских отложениях Западной Сибири // Геология нефти и газа. – 1992. – № 11.
2. Березкин В.М., Киричек М.А., Кукарев А.А. Применение геофизических методов разведки для прямых поисков месторождений нефти и газа. – М.: Недра, 1978.
3. Бродов Л.Ю., Гогоненков Г.Н., Тальвирский Д.Б. и др. Эффективность сейсморазведки при прямых поисках залежей нефти и газа // Совершенствование методов подготовки площадей для поисков нефти и газа. – М.: ВНИГНИ, 1979.
4. Кукураза В.Д. Геоэлектрические факторы в процессах формирования нефтегазоносности. – Киев, 2003.
5. Прямые поиски месторождений нефти и газа геофизическими методами // Реферативный сборник «Региональная, разведочная и промысловая геофизика». – М.: ВИЭМС, 1971. – № 22.
6. Суворов В.В. О природе магнитных аномалий над нефтегазоносными структурами // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. – Пермь, 1989.
7. Киричек М.А., Заранова Н.Г., Киршин А.В., и др. О возможности поисков газонефтеперспективных зон в юрских подсолевых карбонатных отложениях Западного Узбекистана зондированием становления поля // Региональная, разведочная и промысловая геофизика. – М.: ВИЭМС, 1974. – Вып. 5.
8. Пиковский Ю.Н. Трансформация техногенных потоков нефти в почвенных экосистемах // В сборнике «Восстановление нефтегазоносных почвенных экосистем». – М.: Наука, 1988.
9. Исмаилов Н.М. Микробиология и ферментативная активность нефтезагрязненных почв // В сборнике «Восстановление нефтегазоносных почвенных экосистем». – М.: Наука, 1988.
10. Колмогорова Л.Г. Разработка фитогеохимических показателей нефтегазоносности. – М.: ВНИИЯГ, 1988.
11. Куваев В.Б., Щебенко А.М. Растительный покров у газовых скважин на западном побережье Ямала (окрестности поселка Харасавей) // В сборнике «Вопросы охраны редких видов растений и фитоценозов». – М.: Наука, 1987.