

На правах рукописи

УДК 528.88

Емельянов Андрей Александрович

**МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ
ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСМИЧЕСКОЙ
СЪЁМКИ В ИНТЕРЕСАХ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ
НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(авиационная и ракетно-космическая техника)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

МОСКВА

2013

Работа выполнена на кафедре «Системный анализ и управление» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, МАИ)»

Научный руководитель: Райкунов Геннадий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, генеральный директор Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Официальные оппоненты: Боярчук Кирилл Александрович, доктор физико-математических наук, генеральный директор Открытого акционерного общества «Научно-исследовательский институт электромеханики»
Глазкова Инесса Анатольевна, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по информационным системам Федерального государственного унитарного предприятия «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В.Хруничева»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»

Защита состоится «30» апреля 2013 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, МАИ)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, МАИ)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

Автореферат разослан « 29 » марта 2013 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.125.12, к.т.н., доцент

В.В.Дарнопых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В условиях растущей потребности в минерально-сырьевой продукции особенно остро стоит вопрос о выполнении разведанных запасов углеводородов, что требует проведения больших объёмов геологоразведочных работ на огромных территориях. Наиболее рациональное решение данной задачи лежит в плоскости использования методов и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), что позволяет существенно снизить временные и материальные затраты на проведение геологоразведочных работ на нефть и газ.

Актуальность темы. Комплексное использование данных космической съёмки совместно с традиционными поисковыми и геологоразведочными методами для решения задач прогноза нефтегазоносности является активно развиваемым направлением исследований. Современные методы решения задачи интерпретации данных ДЗЗ в интересах оценки перспектив нефтегазоносности участков недр и локальных структур неразрывно связаны с методами классификации объектов по совокупности спектрорадиометрических данных.

Специфика задачи интерпретации данных ДЗЗ проявляется в зависимости их качества и информативности от влияния целого ряда процессов естественного и технического происхождения, нередко обуславливающих невозможность одновременного покрытия изучаемого участка одной сценой съёмки. В результате набор данных по изучаемой площади может быть получен в различное время и в различных условиях проведения съёмки, а также различной регистрирующей целевой аппаратурой (ЦА) с различных космических аппаратов (КА). Данная ситуация определяет новую постановку задачи классификации, при которой спектральная информация по эталонным объектам (обучающей выборке (ОВ)) и по распознаваемым объектам (РО) соответствует различным физико-техническим условиям проведения съёмки.

Существующие на сегодняшний день подходы к решению природоресурсных задач на основе методов классификации с обучением не учитывают данную ситуацию при формировании признакового пространства, что зачастую приводит к получению неудовлетворительных результатов. Вместе с тем, предлагаемые различными авторами статистические методы адаптации к условиям несогласованности данных ОВ и РО позволяют некоторым образом нивелировать возникающие ошибки, но при этом обладают существенными ограничениями, связанными с размером ОВ. Специфика данных задач также накладывает ограничения на использование известных методов фотометрического выравнивания, которые во многих случаях приводят к потере измерительных спектрорадиометрических свойств космической информации.

Таким образом, диссертационная работа посвящена решению актуальной технической задачи повышения достоверности результатов интерпретации данных ДЗЗ в интересах оценки перспектив нефтегазоносности локальных геологических структур и участков недр. В основу диссертации положены полученные автором результаты в процессе выполнения научно-исследовательских и прикладных работ в области методов обработки данных ДЗЗ и их использования для решения природоресурсных задач в рамках контрактов с ведущими отечественными разработчиками КА ДЗЗ и недропользователями в период 2004-2009 гг.

Цель работы – разработка методики коррекции данных ДЗЗ для решения задачи классификации в условиях физической и технической несогласованности данных по обучающей выборке и распознаваемым объектам. Для достижения указанной цели решаются следующие научно-технические задачи:

- исследуется возможность использования традиционной схемы решения задачи классификации с обучением по данным космической съёмки, проведённой в различных условиях;
- разрабатывается модель оценки условий освещённости местности;
- разрабатывается методика коррекции данных ДЗЗ на предмет учёта условий проведения съёмки;
- разрабатывается программный комплекс, реализующий предложенную методику;
- с использованием разработанного программного комплекса проводится оценка качества решения задач классификации для случая использования данных космической съёмки, полученных в различных условиях.

Объектом исследования являются методы поддержки принятия решений относительно нефтегазоносного потенциала геологических структур, вырабатываемых на основе анализа данных космической съёмки.

Предметом исследования выступает методика коррекции полученных в различных условиях съёмки данных ДЗЗ по распознаваемым и эталонным объектам на примере информации с КА серии Landsat (аппаратура ТМ, ЕТМ+).

Методы исследования. В работе использованы методы, основанные на законах физики излучения, элементах прикладной астрономии, методы теории вероятностей, математической статистики, математического моделирования, обработки геопространственных данных, а также методы объектно-ориентированного программирования, учитывающие свойства многозадачности операционных систем семейства MS Windows.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- 1) предложена модифицированная схема решения задачи классификации с обучением, адаптированная к использованию данных космической съёмки, полученных в различных физико-технических условиях;
- 2) разработана методика коррекции данных космической съёмки на предмет учёта характеристик целевой аппаратуры, освещённости подстилающей поверхности с учётом рельефа местности и параметров пропускания атмосферы;
- 3) разработан комплекс алгоритмов, обеспечивающих реализацию методики коррекции данных космической съёмки:
 - алгоритм оценки условий освещённости произвольного участка земной поверхности в момент проведения съёмки с учётом рельефа местности;
 - алгоритм радиометрической калибровки данных космической съёмки с синхронным внесением поправок, связанных с условиями освещённости подстилающей поверхности и пропускания атмосферы;
- 4) создан программный комплекс, построенный на принципах объектно-ориентированного программирования, реализующий перечисленные алгоритмы и позволяющий выполнять коррекцию данных космической съёмки, а так-

же формирование компонентов векторов признаков ОБ и РО.

Достоверность результатов. полученных в диссертационной работе, подтверждается физической и математической обоснованностью, адекватностью моделей, применяемых в методике коррекции данных космической съёмки, использованием апробированного математического аппарата, результатами обработки большого объёма данных съёмки на примере решения задачи оценки перспектив нефтегазоносности геологических структур Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и их последующего сопоставления с данными по ранее разведанным месторождениям.

Практическая значимость заключается в том, что разработанная методика позволяет повысить достоверность результатов интерпретации данных ДЗЗ в интересах оценки перспектив нефтегазоносности локальных геологических структур на основе использования аппарата классификации с обучением в среднем на 15%. Разработанная методика и реализующие её алгоритмы носят обобщённый характер и могут быть использованы для обработки данных с большинства современных отечественных и зарубежных КА ДЗЗ в интересах решения широкого спектра задач, связанных с оценкой спектрорадиометрических характеристик и распознаванием объектов подстилающей поверхности.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы в практической деятельности ООО «Газпром ВНИИГАЗ», в работах ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» по созданию КК «Ресурс-П» и практической деятельности ФГУП ЦНИИмаш при выполнении комплексных НИР, что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Модифицированная схема решения задачи классификации с обучением, адаптированная к использованию полученных в различных физико-технических условиях данных космической съёмки объектов ОБ и РО;
2. Методика коррекции данных космической съёмки на этапе их радиометрической калибровки;
3. Комплекс алгоритмов, составляющих основу методики коррекции данных съёмки;
4. Программный комплекс, реализующий предложенную методику;
5. Результаты решения задачи оценки перспектив нефтегазоносности геологических структур Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции по данным съёмки в различных физико-технических условиях.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 9-й, 10-й, 11-ой, 12-й Международных конференциях «Системный анализ, управление и навигация» (Евпатория, 2004, 2005, 2006, 2007 гг.), а также на семинаре кафедры 604 МАИ (НИУ) и заседании подсекции 1-5 секции 1 научно-технического совета ФГУП ЦНИИмаш в 2012 г. По теме диссертационной работы опубликованы 3 печатные работы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России [1,2,4], и 6 работ – в сборниках тезисов докладов на научно-технических конференциях и других изданиях [3, 5-9].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 120 наименований. Работа изложена на 192 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 25 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и практическая значимость темы диссертационной работы, сформулирована цель и определены положения, выносимые на защиту, кратко изложено состояние вопроса в исследуемой предметной области. Приведены структура и содержание диссертации.

В первой главе диссертации рассматриваются предпосылки и физико-технические основы использования данных ДЗЗ для решения задач оценки перспектив нефтегазоносности локальных геологических структур, рассматриваются современные методы ДЗЗ, основные подходы к обработке и интерпретации данных съёмки, формулируется постановка задачи.

Влияние глубинных процессов на приповерхностные слои почвы, растительный покров и другие элементы естественного ландшафта так или иначе изменяет их спектральные характеристики, формируя совокупность косвенных геоиндикационных признаков, используемых при решении задач прогнозирования и типизации локальных структур и контролирующих их разрывных нарушений.

В зависимости от размеров и расположения изучаемого участка местности, а также характеристик КА ДЗЗ может отсутствовать техническая возможность одновременного покрытия его территории одной сценой съёмки. Кроме того, в наиболее распространённом случае для решения задач прогноза нефтегазоносности территорий используется комплекс ретроспективных данных съёмки. Эти обстоятельства в значительной степени затрудняют последующую интерпретацию мультиспектральных данных ДЗЗ на исследуемый участок местности, информация об объектах которого может содержаться на сценах, полученных различной ЦА в различные временные периоды.

Базовый технологический цикл обработки данных космической съёмки включает в себя четыре основных этапа. Первым является этап первичной обработки, включающий восстановление исходной информации, радиометрическую и геометрическую коррекции, геокодирование, ортотрансформирование и импорт в рабочие форматы хранения данных.

Вторым этапом обработки космических данных ДЗЗ является тематическое дешифрирование, основанное на анализе системы геоиндикационных признаков в комплексе с геолого-геофизическими данными, целью которого является выделение геологических структур, потенциально перспективных в нефтегазоносном отношении. В диссертационной работе предполагается, что выделенные в результате дешифрирования контуры прогнозируемых локальных структур определены с достаточным уровнем достоверности.

На третьем этапе производится формирование исходных данных для этапа интерпретации данных ДЗЗ. Данный этап, на котором выполняется попиксельная обработка спектрорадиометрической информации по выделенным локальным структурам для их последующей классификации, составляет предмет исследований диссертационной работы.

Завершающим этапом технологического цикла обработки данных ДЗЗ является этап интерпретации. Целью данного этапа является оценка перспектив нефтегазоносности прогнозируемых локальных структур. В распространенной ситуации, когда объектом интерпретации являются данные космической съёмки хорошо изученной территории, на которой имеются структуры с достоверно установленным статусом нефтегазоносности, задача интерпретации может быть сформулирована как задача классификации с обучением. В этом случае обучающая выборка формируется геологическими структурами (эталонными объектами), которые в совокупности образуют два эталонных класса – нефтегазоносных и пустых структур.

С учётом отмеченных выше особенностей процесса получения данных ДЗЗ, имеет место специфическая задача классификации, когда данные обучающей выборки и распознаваемых объектов физически и технически не согласованы.

Пусть имеется набор из m эталонных классов, свойства которых характеризуются известными реализациями векторов признаков эталонных объектов $X^{kj} = (x_1^{kj}, x_2^{kj}, \dots, x_n^{kj})$, то есть каждый из классов $k = 1, \dots, m$ объединяет совокупность эталонных объектов $j = 1, \dots, N_k$. Признаки x_1, x_2, \dots, x_n сформированы путём проведения единовременной съёмки в n -спектральных каналах ЦА КА ДЗЗ. Реализации векторов признаков X^{kj} для каждого из эталонных классов S_1, S_2, \dots, S_m получены путём проведения r съёмок в различных условиях ε_l ($l = 1, \dots, r$), т.е. могут интерпретироваться, как результаты измерений: $X^{kj}(\varepsilon_1) = (x_1^{kj}, x_2^{kj}, \dots, x_n^{kj})^{\varepsilon_1}, \dots, X^{kj}(\varepsilon_r) = (x_1^{kj}, x_2^{kj}, \dots, x_n^{kj})^{\varepsilon_r}$.

Аналогично имеются реализации векторов признаков h -го ($h = 1, \dots, N_z$) распознаваемого объекта $Y^h(\varepsilon_g) = (y_1^h, y_2^h, \dots, y_n^h)^{\varepsilon_g}$, сформированные путём проведения q съёмок в условиях ε_g ($g = 1, \dots, q$), которые в общем случае не соответствуют условиям ε_l ($\varepsilon_g \neq \varepsilon_l$). Свойства распознаваемых и эталонных объектов описываются одним и тем же набором признаков.

Традиционно формирование компонентов векторов X^{kj} и Y^h происходит в результате попиксельного усреднения фотометрических характеристик подстилающей поверхности в пределах контуров эталонных и распознаваемых (прогнозируемых) объектов по данным съёмки в различных диапазонах спектра: $(x_b^{kj})^{\varepsilon_l} = DN_{\Delta\lambda_b}^{\varepsilon_l, x}$ и $(y_b^h)^{\varepsilon_g} = DN_{\Delta\lambda_b}^{\varepsilon_g, y}$. Здесь $DN_{\Delta\lambda_b}^{\varepsilon}$ – безразмерная величина, связанная с уровнями аналого-цифрового преобразователя ЦА и зависящая от энергетической яркости регистрируемого от подстилающей поверхности излучения b -м спектральным каналом ЦА в спектральном диапазоне $\Delta\lambda_b$. Характер такой зависимости для различных спектральных каналов и различной ЦА различен.

Данная постановка задачи отражает вполне типичную ситуацию, возникающую в процессе реализации технологий целевого применения КА ДЗЗ, предполагающих проведение количественных оценок параметров подстилающей поверхности (ПП) по данным разновременных съёмок.

В рассматриваемых условиях необходимо решить задачу классификации, целью которой является отнесение распознаваемого объекта к одному из эталонных классов. Решение данной задачи в условиях несогласованности априорной информации по ОВ и РО, формирующей совокупность признаков векторов $X^{kj}(\mathcal{E}_i)$ и $Y^h(\mathcal{E}_g)$, предложено выполнять путём учёта различий физико-технических условий проведения съёмки, которые определяются влиянием на регистрируемый средствами ДЗЗ сигнал следующих параметров:

- спектрорадиометрических характеристик ЦА КА ДЗЗ $R(\lambda)$;
- условий освещённости, геометрии освещения Солнцем исследуемого участка местности и геометрии наблюдения в момент проведения съёмки, определяемых соответствующими параметрами Ω и Ψ (рис. 1);
- параметров пропускания атмосферы на момент проведения съёмки $\tau(\lambda)$.

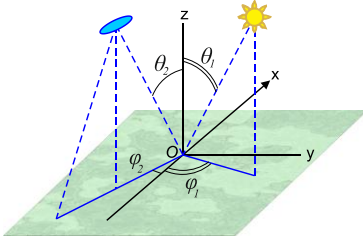


Рис. 1. Геометрия освещения плоской горизонтальной поверхности и её наблюдения: $\Omega(\theta_1, \varphi_1)$ и $\Psi(\theta_2, \varphi_2)$

Пусть $f_\lambda(\Omega, \Psi, \lambda)$ – функция, определяющая отражательные характеристики ПП; $E_\lambda(\Omega, \lambda)$ – создаваемая источником освещения (Солнцем) спектральная плотность энергетической освещённости (СПЭО) поверхности в точке O ; $L_{scr}(\lambda)$ – вклад рассеянного атмосферой излучения; $B(\lambda, T)$ – функция Планка; T – температура ПП; $L_{atm}(\lambda)$ – собственное излучение атмосферы; $\varepsilon(\lambda)$ – излучательная способность поверхности. Тогда энергетическую яркость излучения от ПП, зарегистрированного b -м

спектральным каналом ЦА КА ДЗЗ в диапазоне длин волн $\Delta\lambda_b$ с границами $[\lambda_1, \lambda_2]$ в приведённых условиях съёмки $\bar{\mathcal{E}}$ (с учётом условий съёмки), можно представить в следующем виде:

$$L_{\Delta\lambda_b}^{\bar{\mathcal{E}}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [(f_\lambda(\Omega, \Psi, \lambda)E_\lambda(\Omega, \lambda)\tau(\lambda) + \varepsilon(\lambda)B(\lambda, T))\tau(\lambda) + L_{scr}(\lambda) + L_{atm}(\lambda)]R(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

Обратная задача ДЗЗ сводится к оценке по данным съёмки отражательной способности и радиационной температуры ПП. Т.е, решение (1) относительно f_λ и T позволяет сформировать компоненты признаков векторов $X^{kj}(\bar{\mathcal{E}})$ и $Y^h(\bar{\mathcal{E}})$ с учётом условий съёмки:

$$\begin{cases} (x_b^{kj})^{\bar{\mathcal{E}}} = f_{\Delta\lambda_b}^x, & (y_b^h)^{\bar{\mathcal{E}}} = f_{\Delta\lambda_b}^y, & (\Delta\lambda_b \in [0,40 \div 2,50] \text{ мкм}) \\ (x_b^{kj})^{\bar{\mathcal{E}}} = T_{\Delta\lambda_b}^x, & (y_b^h)^{\bar{\mathcal{E}}} = T_{\Delta\lambda_b}^y, & (\Delta\lambda_b \in [8,10 \div 12,6] \text{ мкм}) \end{cases} \quad (2)$$

При этом выражение (1) следует рассматривать в качестве модели измерений при решении задачи коррекции данных ДЗЗ.

Применение (1) и (2) на этапе формирования признаков пространства обеспечивает решение задачи несогласованности условий получения данных по ОВ и РО в процессе интерпретации данных ДЗЗ, а также возможность использования традиционной постановки задачи классификации с обучением.

Таким образом, функциональная схема решения задачи классификации локальных структур с целью их обоснованного отнесения к одному из эталонных классов может быть представлена в виде классической схемы алгоритма классификации с дополнением её операцией коррекции мультиспектральных данных съёмки с КА ДЗЗ и формирования компонентов векторов признаков ОВ и РО (рис. 2).

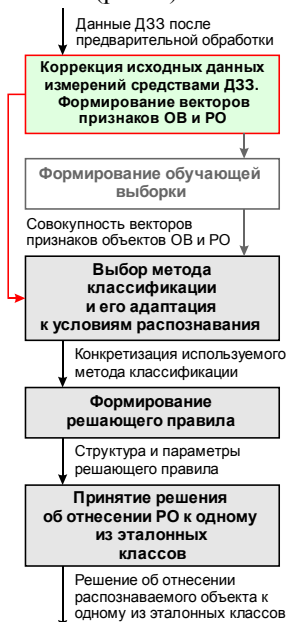


Рис.2. Модифицированная схема решения задачи классификации

В отличие от известных подходов к решению задачи классификации, которые базируются на статистических методах определения характера случайного возмущающего процесса, в основе предложенного подхода лежит учёт наиболее существенных физических процессов, сопровождающих процесс получения данных ДЗЗ.

Во второй главе рассмотрен комплекс вопросов, касающихся разработки методики и решения задачи коррекции мультиспектральных данных ДЗЗ с целью формирования признаковового пространства ОВ и РО с учётом условий проведения съёмки. Сформулирована модель формирования регистрируемого средствами ДЗЗ полезного сигнала с учётом условий освещённости и рельефа местности, рассмотрены механизмы взаимодействия излучения с атмосферой и модель стандартной атмосферы, решена задача пространственного совмещения данных, разработана модель и решена задача оценки условий освещённости местности, предложена методика коррекции данных ДЗЗ.

В рамках решения задачи пространственного совмещения данных о взаимном положении Солнца, Земли, КА, покрытия территории зонами обзора ЦА и данными съёмки, положения и ориентации подпиксельных площадок на местности с топографической картой применяются три группы систем координат (СК): инерциальная геоэквиаториальная СК (ГЭИСК); СК, связанные с Землёй (ПЗ-90.02, СК95 и WGS84, далее называемая гринвичской геоцентрической системой координат (ГГСК)); плоские прямоугольные СК картографических проекций (UTM, проекция Гаусса-Крюгера).

Наиболее фундаментальным свойством, описывающим отражательные характеристики поверхности в функции длины волны, является монохроматическая функция распределения двунаправленного отражения (МФРДО). Пусть положение направленного источника излучения относительно заданной точки определяется зенитным углом Солнца θ_1 и азимутальным углом φ_1 . Если создаваемая Солнцем СПЭО поверхности в данной точке – $E_\lambda(\theta_1, \varphi_1, \lambda)$, а спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) отражённого излучения в определяемом соответствующими углами θ_2 и φ_2 направлении входного зрачка ЦА – $L_\lambda(E_\lambda, \theta_2, \varphi_2, \lambda)$, то МФРДО определяется в виде:

$$f_{\lambda}(\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2, \lambda) = \frac{L_{\lambda}(E_{\lambda}, \theta_2, \varphi_2, \lambda)}{E_{\lambda}(\theta_1, \varphi_1, \lambda)} \cdot [cp^{-1}] \quad (3)$$

При этом важным свойством МФРДО является свойство взаимности:

$$f_{\lambda}(\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2, \lambda) = f_{\lambda}(\theta_2, \varphi_2, \theta_1, \varphi_1, \lambda) \quad (4)$$

Полный поток излучения в спектральном диапазоне $[\lambda_1 \div \lambda_2]$, попадающий на зрачок ЦА с каждой подпиксельной площадки, равен:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \iint_{S_{пл}} k_{\lambda}^H \cdot E_{\lambda c}^{\perp} \cos \theta_1 \cdot k_{\lambda}^B \cdot f_{\lambda}(\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2, \lambda) \cdot \frac{S_a}{H^2} dS \quad (5)$$

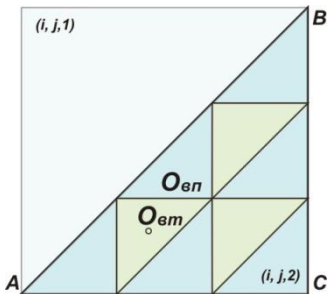


Рис. 3. Схема разбиения ППМ на ВТПМ и ВТ

где H – расстояние от рассматриваемой площадки до датчика, S_a – площадь зрачка ЦА, $E_{\lambda c}^{\perp}$ – СПЭО площадки на внешней границе атмосферы, нормаль к которой совпадает с направлением на Солнце; $k_{\lambda}^H, k_{\lambda}^B$ – коэффициенты монохроматического пропускания атмосферы на нисходящем и восходящем потоках излучения соответственно.

Для расчёта СПЭО некоторой подпиксельной площадки на местности (ППМ) в пределах сцены съёмки ППМ (i, j) разбивается на две вспомогательные треугольные площадки (ВТПМ $(i, j, k), k = 1, 2$) (рис.3). Предполагается, что для каждой ППМ известны превышения её угловых точек относительно базовой поверхности (в данном случае – поверхности сфероида WGS84), которые рассчитываются путём билинейной интерполяции (исходя из модели рельефа GRID), либо путём триангуляции Делоне (исходя из модели TIN), а ПП в пределах ВТПМ может быть аппроксимирована плоскостью.

Для ВТПМ (i, j, k) углы между направлением на Солнце и внешней нормалью к ней, а также ориентации связанной с ней местной поверхностной системы координат (МПСК) определяются исходя из зависимостей:

$$\theta_{i,j,k} = \arccos\left(\left(\overline{\rho_s^0}\right)^T \cdot \left(\overline{n_{i,j,k}^0}\right)\right) \quad (6)$$

$$\varphi_{i,j,k} = \arccos\left(\left(\overline{n_{i,j,k}^0} \times \overline{Z_0}\right)^T \cdot \left(\overline{n_{i,j,k}^0} \times \overline{\rho_s^0}\right)\right), \quad (7)$$

где $\overline{Z_0}$ – единичный вектор в направлении оси OZ МПСК, начало которой находится в геометрическом центре $O_{вп}$ вспомогательной площадки, ось OX направлена по нормали к поверхности в этой точке, определяемой единичным вектором $\overline{n_{i,j,k}^0}$. Ось OZ является базовой осью, касающейся поверхности в точке $O_{вп}$, а ось OY дополняет систему до правой; $\overline{\rho_s^0}$ – единичный вектор, определяющий направление на Солнце из центра ВТПМ (i, j, k) в момент проведения съёмки.

Очевидно, что необходимым условием освещённости ВТПМ (i, j, k) прямым солнечным излучением является неравенство:

$$\cos \theta_{i,j,k} > 0 \quad (8)$$

В случае реальной местности и отличной от зенитной высоты Солнца для части ВТПМ условие (8) может не выполняться. Такие ВТПМ будем называть первично затенёнными. Их наличие неизбежно приводит к появлению падающих теней на прилегающих зонах, что, в свою очередь, приводит к полному или частичному вторичному затенению ряда сопредельных ППМ. Геометрически точное определение границ падающих теней в общем случае является проблематичным, в связи с чем предложен приближённый метод решения данной задачи. Необходимым и достаточным условием для проведения анализа на вторичное затенение является выполнение хотя бы для одной ВТПМ условия:

$$\cos \theta_{i,j,k} \leq 0 \quad (9)$$

При выполнении (9) необходимо осуществить проверку на вторичное затенение ППМ, находящихся в некой окрестности такой ВТПМ и удовлетворяющих (8). Разделим ВТПМ (i, j, k) , удовлетворяющую условию (8), на n_s^k равных внутренних треугольников (ВТ) (рис.3). Примем допущение, что вторичное затенение каждого ВТ определяется затенением его геометрического центра. Это будет иметь место, если луч, проведённый из геометрического центра рассматриваемого ВТ в направлении Солнца, пересечёт хотя бы одну первично затенённую по условию (9) ВТПМ, вершины которой в ГГСК определяются векторами $\overline{R}_A, \overline{R}_B$ и \overline{R}_C . Тогда положение точки пересечения луча из центра ВТ с данной ВТПМ определяется из уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{R}_p = \overline{R}_0 + l \overline{\rho}_s^0 \\ (\overline{R}_0 + l \cdot \overline{\rho}_s^0 - \overline{R}_p)^T \cdot \overline{n}_{i,j,k}^0 = 0 \end{array} \right., \text{ откуда } l = \frac{(\overline{R}_0 - \overline{R}_A)^T \cdot \overline{n}_{i,j,k}^0}{\overline{\rho}_s^0{}^T \cdot \overline{n}_{i,j,k}^0} \quad (10)$$

В случае принадлежности данной точки рассматриваемой ВТПМ, что эквивалентно одновременному выполнению условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\overline{A}_1 \times \overline{A}_2)^T \cdot (\overline{A}_2 \times \overline{A}_3) \geq 0 \\ (\overline{A}_2 \times \overline{A}_3)^T \cdot (\overline{A}_3 \times \overline{A}_1) \geq 0 \end{array} \right., \quad (11)$$

искомый ВТ является вторично затенённым ($\overline{A}_1 = \overline{R}_p - \overline{R}_A$, $\overline{A}_2 = \overline{R}_p - \overline{R}_B$, $\overline{A}_3 = \overline{R}_p - \overline{R}_C$ – вспомогательные векторы).

Пусть в пределах ВТПМ (i, j, k) количество вторично затенённых ВТ будет равно n_t^k при общем их количестве n_s^k . Тогда средняя СПЭО прямым солнечным излучением ВТПМ (i, j, k) на длине волны λ определяется исходя из следующих условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_\lambda^{i,j,k} = k_\lambda^H \cdot E_\lambda^1 \cdot \cos \theta_{i,j,k} \cdot \frac{n_s^k - n_t^k}{n_s^k}, \quad \text{при } \cos \theta_{i,j,k} > 0 \\ E_\lambda^{i,j,k} = 0, \quad \text{при } \cos \theta_{i,j,k} \leq 0 \end{array} \right. \quad (12)$$

Данная методика позволяет производить оценку освещённости произвольной точки земной поверхности в произвольный момент времени с учётом неоднородности рельефа местности.

При прохождении излучения через атмосферу в результате его взаимодействия с материальными частицами, образующими атмосферу, происходят изменения СПЭЯ излучения, связанные с селективным и континуальным поглощением, а также рассеянием. Коррекция влияния атмосферы на регистри-

руемый от ПП сигнал проводится путём учёта определяющих функцию пропускания атмосферы $\tau(\lambda)$ составляющих на основе априорной информации об оптическом и метеорологическом состояниях атмосферы, излучательных и отражательных свойствах подстилающей поверхности, геометрических параметров освещения и съёмки. Результатом решения данной задачи являются поля распределений значений коэффициентов пропускания атмосферы $k_{\Delta\lambda_b}^{i,j}$, полученных интегрированием по длине волны $\tau(\lambda)$ в пределах спектральных диапазонов каналов ЦА для каждой подпиксельной площадки (i, j) с учётом превышения её центра над сфероидом.

В рамках данной работы в качестве априорной информации для расчёта параметров пропускания атмосферы используется стандартная справочная атмосфера, являющаяся набором реализованных в программном модуле Lowtran эмпирических моделей, описывающих вертикальное распределение температуры, давления и плотности воздуха для пяти широтных поясов. Наряду с отмеченным, используемый модуль включает сведения о параметрах аэрозоля в нескольких моделях, отличающихся оптической толщиной и высотным расположением его слоёв. В процессе проведения расчётов априорные данные о метеорологических параметрах в изучаемом районе на момент проведения съёмки уточнены по архивным данным наземных наблюдений.

В силу возникающих в процессе строгого решения обратной задачи ДЗЗ с использованием (1) неопределённостей, для приведения получаемых в результате съёмки растровых матриц оцифрованного от ПП сигнала в безразмерных DN к значениям L_{λ_b} – СПЭЯ на входном зрачке (т.е. калибровка данных) использованы представляемые разработчиками ЦА верифицированные эмпирические зависимости, построенные на данных лабораторных предпусковых измерений, последующих полётных калибровок и валидационных наблюдений.

Таким образом, решение задачи формирования векторов признаков ОВ и РО с учётом условий съёмки предложено выполнять следующим образом:

$$\begin{cases} (x_b^{kj})^{\bar{e}} = \rho_{\Delta\lambda_b}^x, & (y_b^h)^{\bar{e}} = \rho_{\Delta\lambda_b}^y, & \text{для } b = 1 - 5, 7 \quad (\Delta\lambda_b \in [0,45 \div 2,35] \text{ мкм}) \\ (x_b^{kj})^{\bar{e}} = T_{\Delta\lambda_b}^x, & (y_b^h)^{\bar{e}} = T_{\Delta\lambda_b}^y, & \text{для } b = 6 \quad (\Delta\lambda_b \in [10,4 \div 12,6] \text{ мкм}), \end{cases} \quad (13)$$

где спектральный диапазон $\Delta\lambda_b$ привязывается к множеству спектральных каналов аппаратуры ТМ/ЕТМ+, $\rho_{\Delta\lambda_b}$ – расчётный параметр, наиболее часто в литературе называемый «альбедо» и характеризующий отражательные характеристики подстилающей поверхности. В рамках данной работы предложена модификация известной зависимости для вычисления $\rho_{\Delta\lambda_b}$ в пределах ППМ (i, j) исходя из восстановленных значений СПЭЯ на входном зрачке с учётом (12):

$$\rho_{\Delta\lambda_b}^{i,j} = \frac{\pi \cdot L_{\Delta\lambda_b} \cdot d^2}{E_{\Delta\lambda_b}^{\perp} \cdot (s^{i,j,1} \cos\theta_{i,j,1} + s^{i,j,2} \cos\theta_{i,j,2}) \cdot k_{\Delta\lambda_b}^H \cdot k_{\Delta\lambda_b}^B \cdot k_{\Delta\lambda_b}^{i,j}} \quad (14)$$

где d – расстояние от Земли до Солнца в астрономических единицах;

$s^{i,j,k} = \frac{n_s^k - n_t^k}{n_s^k}$ ($k = 1, 2$) – коэффициент вторичного затенения ВТПМ (i, j, k) .

В отличие от известного подхода к восстановлению альбедо, в диссертации

ционной работе оценка отражательных характеристик ПП (14) производится с учётом поправок на влияние условий освещённости, эффектов первичного и вторичного затенения ППМ на субпиксельном уровне, а также параметров пропускания атмосферы.

$T_{\Delta\lambda_b}$ в выражении (13) – радиационная температура ПП, для ТМ/ЕТМ+ получаемая с использованием известной зависимости, дополнительно учитывающей параметры пропускания атмосферы:

$$T_{\Delta\lambda_b}^{i,j} = \frac{K2_{\Delta\lambda_b}}{\ln\left(\frac{K1_{\Delta\lambda_b} \cdot k_{\Delta\lambda_b}^{B,i,j}}{L_{\Delta\lambda_b}} + 1\right)} \quad (15)$$

где $K1$ и $K2$ – калибровочные коэффициенты, поставляемые оператором КА.

Таким образом, вектор признаков распознавания, сформированный в соответствии с (13) на основе данных съёмки с КА серии Landsat аппаратурой ТМ/ЕТМ+, представляет собой 7-мерный вектор, компонентами которого выступают полученные путём решения задачи пространственного анализа принадлежности пикселей сцены съёмки контурам ОВ и РО усреднённые по площади структуры восстановленные радиометрические характеристики ПП.

Технологическая схема решения задачи коррекции исходных данных космической съёмки и формирования векторов признаков объектов ОВ и РО с использованием разработанной методики приведена на рис. 4.

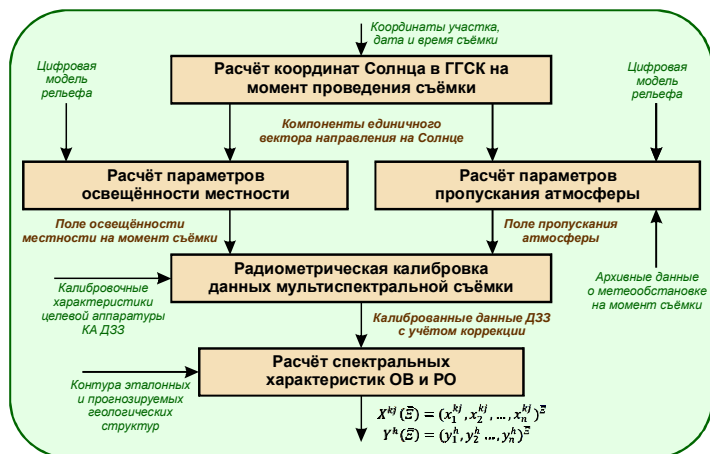


Рис. 4. Технологическая схема решения задачи коррекции данных съёмки и формирования компонентов векторов признаков ОВ и РО

Предложенные в диссертационной работе подходы и алгоритмы реализованы в разработанном под MS Win32 программном комплексе, который, кроме того, выполняет все основные технологические операции с геопространственными данными в растровых и векторных форматах представления (рис. 5).

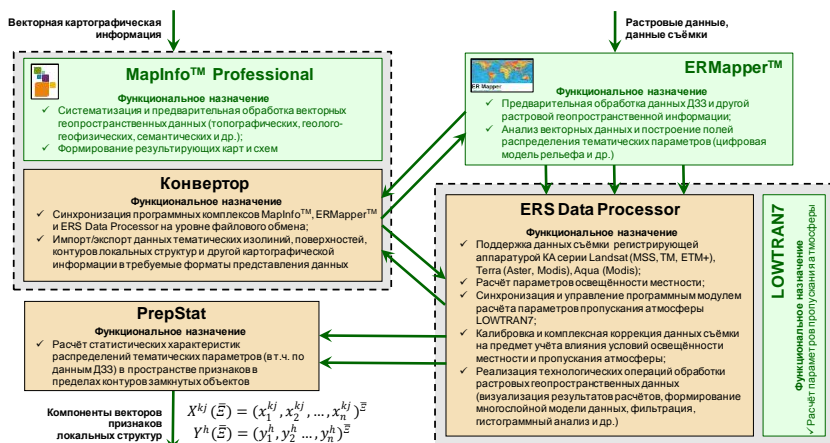


Рис. 5. Функциональная схема программного комплекса (зелёный – привлекаемое ПМО, оранжевый – разработанное)

В третьей главе рассмотрены вопросы верификации и применения разработанной методики в решении задачи оценки перспектив нефтегазоносности локальных структур, проведена оценка достоверности интерпретации данных мультиспектральной космической съёмки участка Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции в районе Печоро-Кожвинского мегавала и Большесынинской впадины.

В качестве исходных данных привлекалась информация по 17 находящимся в пределах изучаемого участка эталонным структурам с достоверно установленным статусом нефтегазоносности.

Для анализа использовались данные съёмки с КА Landsat-5 (TM) и Landsat-7 (ETM+) со 169 и 170 маршрутов (p) в пределах 14 и 15 кадров (r) в спецификации WRS-2: от 21.07.2000 (p169r14, ETM+), от 28.06.2006, 30.05.2007 (p169r15, TM), от 26.06.2000 (p170r15, ETM+), а также 17.09.2001 (ETM+) и 19.06.2006 (TM) в пределах кадров p170r14-15.

Представленные результаты пространственного анализа (рис. 6) показывают, что изучаемый участок и объекты классов нефтегазоносных (НГ) и пустых (Пуст.) структур в большинстве случаев не покрываются одной сценой съёмки, за исключением сцен от 19.06 и 17.09, когда съёмка проводилась в маршрутном режиме. Вместе с тем, вследствие наличия в моменты проведения съёмок локальной облачности, накрывающей отдельные локальные структуры, несмотря на формальное покрытие таких структур данными съёмки, фактически спектральная информация по ним отсутствует.

Таким образом, из-за неблагоприятных метеорологических условий в различные периоды времени в совокупности с параметрами покрытия исследуемого участка данными съёмки, отсутствовали спектральные данные по следующим структурам:

30.05: № 32, 2, 22, 31, 30, 23, 42;

26.06: № 32, 2, 26, 37, 33, 24, 22, 27, 31, 25, 34, 30, 41, 23, 42, 43;

28.06: № 1, 13, 27, 35, 45;

21.07: № 1, 28, 26, 24, 13, 27, 35, 34, 36, 40, 44.

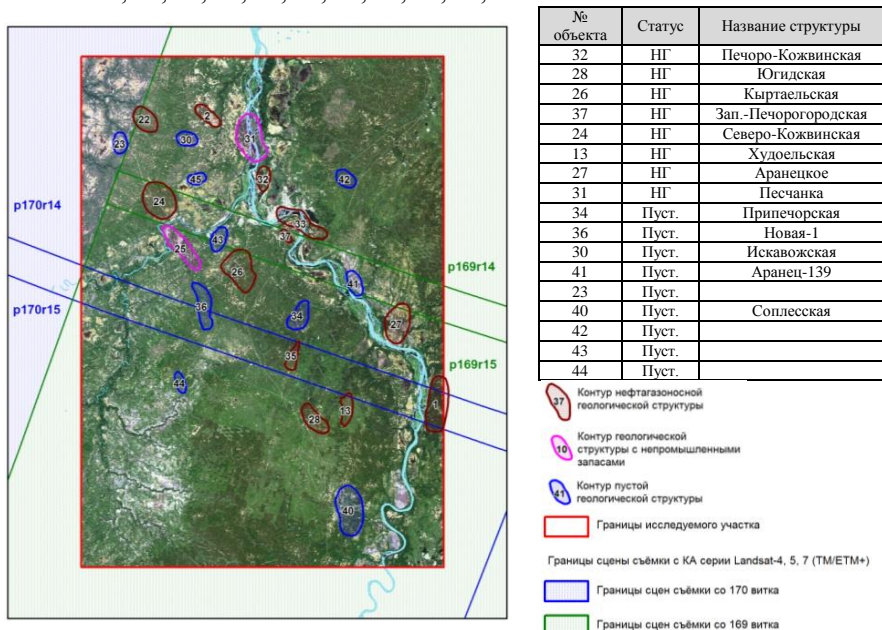


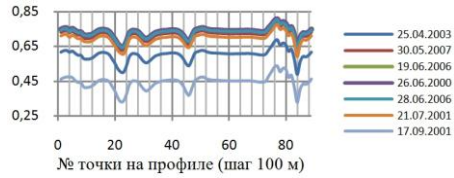
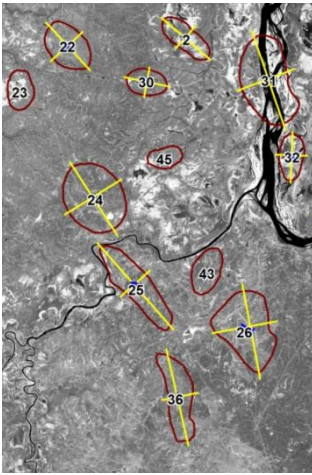
Рис. 6. Схема покрытия изучаемого участка сценами съёмки с КА серии Landsat со 169 и 170 маршрутов в пределах 14 и 15 кадров (WRS-2)

В качестве исходных данных для оценки условий освещённости местности, а также расчёта параметров пропускания атмосферы на момент проведения съёмки использовалась цифровая модель рельефа, построенная по данным цифровой топографической карты М 1:100 000.

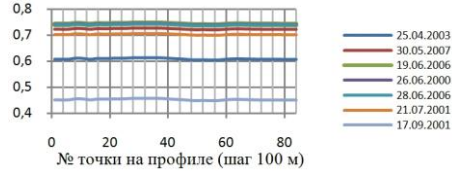
Проведённые расчёты показали, что диапазон изменения условий освещённости местности, определяемых величиной $\cos\theta_{i,j,k}$ (6), в условиях реального рельефа достигает 0,6 при диапазоне сезонного (апрель-сентябрь) изменения средних значений [0,45-0,74]. Рис.7 иллюстрирует обусловленную рельефом местности неоднородность условий освещённости как на территории участка в целом, так и в пределах контуров отдельных локальных структур. Отмеченные обстоятельства не позволяют в полной мере использовать допущение о плоскости территории при решении задачи восстановления отражательных характеристик локальных областей ПП.

Зависимости полученных с использованием предложенного подхода (14) расчётных значений отражательной способности ПП от величин DN приведены на рис. 8.

Основным показателем результативности разработанной методики коррекции данных является достоверность решения задачи оценки перспектив нефтегазоносности геологических структур.

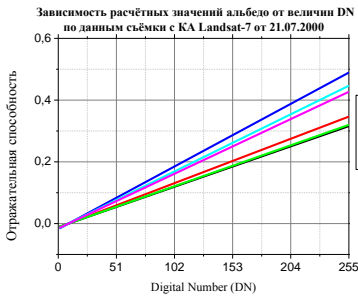


а) Профиль через структуру 25

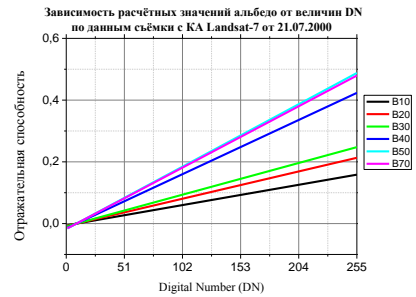


б) Профиль через структур 2

Рис. 7. Изменение расчётного $\cos\theta_{i,j,k}$ вдоль профилей через структуры



а)



б)

Рис. 8. Зависимость расчётных значений альbedo от относительных величин DN исходных данных съёмки: а) без коррекции, б) после коррекции

В соответствии с постановкой задачи были рассчитаны два комплекта компонентов векторов признаков объектов эталонных классов:

- для исходных данных съёмки с КА Landsat-5 и 7 – средние по площади локальной структуры зарегистрированные значения яркости в относительных единицах $(x_b^{kj})^{\varepsilon_l} = DN_{\Delta\lambda_b}^{\varepsilon_l} x$ и $(y_b^h)^{\varepsilon_g} = DN_{\Delta\lambda_b}^{\varepsilon_g} y$ ($b = 1 \dots 7$), оцененные в 7 спектральных каналах ЦА;
- для данных съёмки, прошедших коррекцию – средние по площади локальной структуры значения расчётной отражательной способности (для спектральных каналов 1-5 и 7) и радиационной температуры (для спектрального канала 6) в соответствии с (13-15) с учётом условий съёмки.

Спектральные свойства первого из эталонных классов (класса нефтегазовых объектов) представлены восемью реализациями (по количеству эталонных месторождений) вектора признаков, полученными для каждого из вышеперечисленных моментов съёмок. Второй эталонный класс (пустых объек-

тов) объединил девять реализаций вектора признаков, соответствующих тем же периодам съёмки с поправкой на отсутствие единого покрытия и локальную облачность на отдельные даты съёмки.

Результаты сопоставления характера изменений во времени отдельных компонентов векторов признаков объектов эталонных классов, сформированных по исходным данным съёмки в DN и на основе оценок радиометрических параметров ПП с учётом условий съёмки на основе предложенного подхода (13-15), приведены на рис. 9.

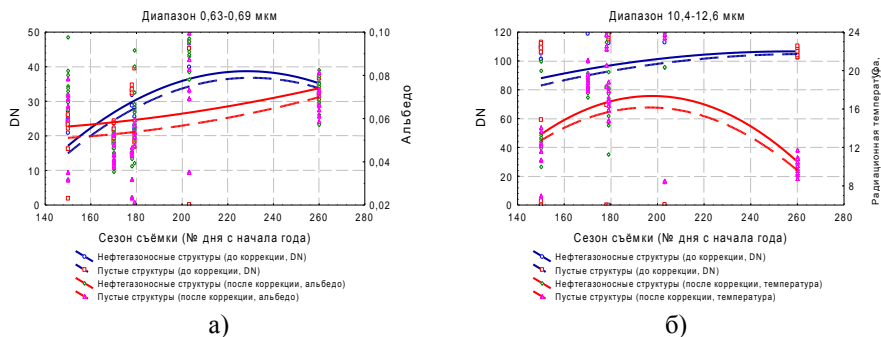


Рис. 9. Зависимость компонентов векторов признаков *OB* и *PO* от сезона съёмки: а) в диапазоне 0,63-0,69; б) в диапазоне 10,4-12,6 мкм.

Анализ достоверности решения задачи оценки перспектив нефтегазоносности проведён путём решения задачи классификации для каждого из объектов эталонных классов. То есть в качестве *PO* в задаче классификации последовательно выступали все приведенные в таблице на рис. 6 эталонные объекты, которые должны были быть отнесены к одному из двух эталонных классов – нефтегазоносных или пустых объектов. В качестве показателя достоверности результатов классификации выступала частота правильной классификации эталонных объектов.

С целью получения максимально объективных оценок для решения задачи классификации привлекались три разных метода, представляющие построенные на различных принципах группы методов классификации:

- метод статистической (байесовской) классификации, основу которого составляет гауссовская аппроксимация плотности совместного распределения значений спектрорадиометрических характеристик (альbedo, радиационные температуры);
- метод дискриминантного анализа (многомерной линейной классификации), базирующийся на расчёте дискриминантных функций по *OB*;
- метод сравнения с прототипом, основанный на количественных оценках близости распознаваемого объекта к эталонным классам в идее расстояния Махаланобиса.

Результаты проведённых расчётов показали, что все три упомянутых выше метода продемонстрировали сопоставимые оценки достоверности распознавания эталонных объектов на основе исходных данных съёмки и данных,

прошедших коррекцию в соответствии с разработанной методикой. В таблице 1 приведены усреднённые по трём использованным методам классификации показатели достоверности распознавания локальных структур по данным съёмки с КА Landsat-5, 7.

Таблица 1. Усреднённая оценка вероятности правильного отнесения локальной структуры к эталонному классу

Дата съёмки	Без коррекции	С коррекцией
30.05.2007	0,846	0,923
19.06.2006	0,765	0,882
21.07.2000	0,703	0,856
17.09.2001	0,647	0,882
В среднем:	0,740	0,886

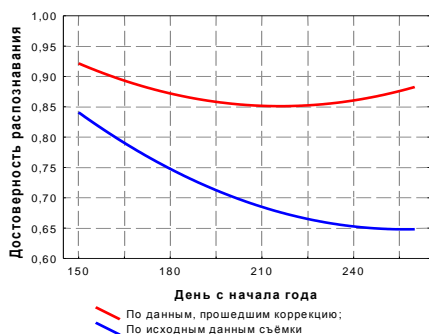


Рис. 10. Достоверность распознавания эталонных объектов в результате применения методики коррекции данных ДЗЗ

степени влияния факторов освещённости подпиксельных площадок, а также изменений состояния почвенно-растительных подстилающих покровов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В представленной диссертационной работе сформулирована и решена актуальная научно-техническая задача повышения достоверности результатов интерпретации данных ДЗЗ в интересах оценки перспектив нефтегазоносности локальных геологических структур. Показано, что решение исходной задачи сводится к ряду частных подзадач, в процессе решения которых автором получены следующие основные результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью:

1. Проведён анализ процесса обработки и интерпретации данных космической съёмки земной поверхности в целях оценки перспектив нефтегазоносности локальных геологических структур. Показано, что реализация этого процесса приводит к необходимости решения задачи классификации, осложнённой временной и физико-технической несогласованностью данных обучающей выборки и распознаваемых объектов [1, 3, 4, 5].

2. Предложена модифицированная схема решения задачи классификации с обучением, адаптированная к использованию данных космической съёмки ОБ и РО, полученных в различных физико-технических условиях [1, 4, 8].

3. Разработана модель оценки условий освещённости прямым солнечным излучением произвольного участка земной поверхности с учётом рельефа местности в произвольный момент времени. Решена задача оценки освещённости с учётом краевых эффектов вторичного затенения подпиксельных площадок соседними участками местности в условиях реального рельефа [2].

4. Разработана методика коррекции данных космической съёмки, основой которой составляет созданная модель оценки условий освещённости местности с учётом рельефа местности и предложенный автором модифицированный подход к радиометрической калибровке данных съёмки с учётом условий освещённости и пропускания атмосферы [2, 5, 7, 9];

5. Разработан комплекс алгоритмов, обеспечивающих реализацию методики коррекции данных космической съёмки, объединяющий процедуру формирования компонентов векторов признаков ОБ и РО с этапом калибровки и коррекции данных ДЗЗ [2, 6, 7].

6. Создан реализующий предложенную методику и совокупность разработанных алгоритмов программный комплекс, построенный на принципах объектно-ориентированного программирования [4, 7]. Отличительной особенностью данного программного комплекса является функциональное объединение разработанных алгоритмов с отдельными процедурами различных программных продуктов, что обеспечивает возможность выполнения комплекса основных операций по обработке совокупности геопространственных данных в растровой и векторной формах представления, а также интеграцию разработанной методики в технологический цикл решения задачи интерпретации данных космической съёмки.

7. На примере обработки данных мультиспектральной съёмки локальных геологических структур участка Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции в районе Печоро-Кожвинского мегавала и Большесынинской впадины показано, что использование разработанной методики коррекции данных ДЗЗ статистически достоверно увеличивает частоту правильной классификации локальных структур в среднем на 15% [1, 4].

В заключение необходимо отметить, что разработанная методика и реализующие её алгоритмы имеют общий характер и могут быть использованы для обработки данных с большинства современных отечественных и зарубежных КА ДЗЗ, а в силу открытости архитектуры разработанного программного комплекса перечень используемых моделей может быть расширен, что позволит использовать программный комплекс для решения широкого спектра задач обработки и анализа данных съёмки.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1. Емельянов А.А., Евдокименков В.Н., Ким Р.В.** Повышение достоверности распознавания объектов подстилающей поверхности на основе предварительной географической синхронизации спектральных данных дистанционного зондирования Земли / Космонавтика и ракетостроение. – №3(68), 2012. С.70-78.
- 2. Емельянов А.А.** Расчёт параметров освещённости местности в задаче анализа радиационных характеристик подстилающей поверхности по результатам дистанционного зондирования Земли / Космонавтика и ракетостроение. – №2(63), 2011. С.48-55.
- 3. Емельянов А.А., Любченко Ф.Н., Борисов А.В.** Ключевые направления развития наземной инфраструктуры комплексов приёма, обработки и распространения космической информации / Аэрокосмический курьер. – №6(78), 2011. – С.25-27.
- 4. Емельянов А.А., Евдокименков В.Н., Райкунов Г.Г., Трофимов Д.М.** и др. Информативность методов комплексного многокритериального анализа результатов дистанционного зондирования Земли и геохимических исследований как перспективного направления нефтегазопроисловых работ / Космонавтика и ракетостроение. – №2(59), 2010. С.99-106.
- 5. Емельянов А.А.** Некоторые особенности использования мультиспектральных данных ДЗЗ на поисковых этапах месторождений углеводородов // Тезисы докладов XII Международной конференции «Системный анализ, управление и навигация», г.Евпатория, Украина, 2007. – М.: Изд-во МАИ. – С.103.
- 6. Емельянов А.А., Лопухова В.В., Райкунов Г.Г., Серебряков В.Б., Трофимов Д.М.** Выделение и типизация локальных тепловых аномалий при оценке перспектив нефтегазоносности локальных структур, прогнозируемых по космическим данным // Тезисы докладов XI Международной конференции «Системный анализ, управление и навигация», г.Евпатория, Украина, 2006. – М.: Изд-во МАИ. – С.155-156.
- 7. Емельянов А.А., Райкунов Г.Г.** Методика проведения сопряжённой обработки данных ДЗЗ, результатов геотемпературных исследований и геолого-геофизической информации // Тезисы докладов XI Международной конференции «Системный анализ, управление и навигация», г.Евпатория, Украина, 2006. – М.: Изд-во МАИ. – С.154-155.
- 8. Емельянов А.А., Евдокименков В.Н., Райкунов Г.Г., Серебряков В.Б., Трофимов Д.М., Цыруль А.В., Малышев В.В.** Методика статистической обработки космической информации при оценке перспектив нефтегазоносности локальных структур, прогнозируемых дистанционными методами // Тезисы докладов XI Международной конференции «Системный анализ, управление и навигация», г.Евпатория, Украина, 2006. – М.: Изд-во МАИ. – С.153-154.
- 9. Емельянов А.А.** Методика отбора, предварительной обработки и анализа аэрокосмической информации для тематической обработки физических полей земной поверхности // Тезисы докладов X Международной конференции «Системный анализ, управление и навигация», г.Евпатория, Украина, 2005. – М.: Изд-во МАИ. – С.99-100.

Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16.

Печать офсетная. Усл.печ.л. 1,1

Уч.изд. л. 1,1. Тираж 80 экз.

Заказ 4653.

Отпечатано с готового оригинала-макета

в типографии Издательства МАИ

Волоколамское ш., д.4, Москва, А 80, ГСП-3, 125993