



УКРАЇНСЬКИЙ ЖУРНАЛ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

ONLINE
ISSN 2313-2132

17' 2018



СУЧАСНІ МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ПОШУКУ КОРИСНИХ КОПАЛИН

NOVEL REMOTE SENSING METHODS
FOR MINERALS PROSPECTING



Продовжуємо публікувати (по розділах) монографію “Сучасні методи дистанційного пошуку корисних копалин”, створеної колективом авторів Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України під редакцією В. І. Лялька та М. О. Попова (Київ: ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, 2017. — 1 електронний опт. диск CD-ROM).

У монографії наведено і детально описано теоретико-методичні основи інформаційного інтегрування даних багатоспектрального аерокосмічного знімання, польової спектрометрії і геолого-геофізичних даних при вирішенні завдань дистанційного пошуку покладів корисних копалин на суходолі і мор-

ському шельфі, а також нові ефективні методи дистанційного пошуку покладів вуглеводнів та виявлення родовищ рудної і нерудної сировини.

Більшість з розроблених методів дистанційного пошуку покладів вуглеводнів пройшла апробацію на території Дніпровсько-Донецької западини і в акваторії Чорного моря. Розроблені методи було застосовано також при прогнозуванні покладів поліметалічних руд, гіпсу та гіпсоангідритів в різних регіонах України.

Розроблені методи дистанційного пошуку покладів корисних копалин на суходолі і шельфі можуть слугувати науковою основою при обґрунтуванні заходів раціонального природокористування та прийнятті інформаційних і управлінських рішень.

Автори сподіваються, що матеріали монографії будуть корисними для вчених і спеціалістів, які працюють над вирішенням різноманітних природоресурсних завдань і впровадженням нових перспективних геологічних і геоінформаційних технологій.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут геологічних наук
Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі

УКРАЇНСЬКИЙ ЖУРНАЛ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Ukrainian Journal of Remote Sensing

№ 17 • 2018

Засновник:	Електронний
Національна Академія наук України	науковий фаховий журнал.
Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі	Заснований у березні 2014 року.
Інституту геологічних наук	Виходить щоквартально.
НАН України	Домашня сторінка: www.ujrs.org.ua
	E-mail: o.kudriashov@ujrs.org.ua

Головний редактор

академік НАН України В. І. Лялько



Рекомендовано до видання
Вченою радою Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України та рішенням Відділення наук про Землю
Національної Академії наук України

Наказом МОН України від 7 жовтня 2015 року №1021 журнал включено до
Переліку електронних наукових фахових видань України у галузях технічних і
геологічних наук

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

В. І. ЛЯЛ Ь К О	головний редактор доктор геолого-мінералогічних наук, академік НАН України
М. О. П О П О В	заступник головного редактора доктор технічних наук
О. Т. А З І М О В	доктор геологічних наук
С. О. Б А Р Т А Л Ь О В	доктор технічних наук (Росія, Москва)
В. Г. В Е Р Х О В Ц Е В	доктор геологічних наук
Л. Д. Г Р Е К О В	доктор технічних наук
М. Д. Г Р О Д З И Н С Ь К И Й	доктор географічних наук, член-кореспондент НАН України
С. М. Є С И П О В И Ч	доктор геологічних наук
Л. В. К А Т К О В С Ь К И Й	доктор фізико-математичних наук (Білорусь, Мінськ)
С. С. К О Х А Н	доктор технічних наук
Н. М. К У С С У Л Ь	доктор технічних наук
С. Т. Л Е В І Н С Ь К И Й	доктор технічних наук (Польща, Варшава)
В. В. Л У К І Н	доктор технічних наук
М. М. П О Н О М А Р Е Н К О	доктор технічних наук
С. А. С Т А Н К Е В И Ч	доктор технічних наук
А. А. Т Р О Н І Н	доктор геолого-мінералогічних наук (Росія, Санкт-Петербург)
О. Д. Ф Е Д О Р О В С Ь К И Й	доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України
В. Г. Я К И М Ч У К	доктор технічних наук

Секретар редакції О. В. Седлєрова / тел. + 380 44 486 84 21 / sedlerovaolga@gmail.com

Верстка, коректура О. І. Кудряшов / тел. + 380 44 482 03 72 / o.kudriashov@ujrs.org.ua

Редактор сайту А. Ю. Порущкевич / a.porushkevych@ujrs.org.ua

Матеріали друкуються в авторській редакції.
Редакція залишає за собою право виправлення статей. Зроблені зміни узгоджуються з автором.
Якість ілюстрацій відповідає якості наданих авторами вихідних матеріалів.

Адреса редакції: Україна, 01054, м. Київ, вул. Олесь Гончара, 55-Б
тел. +380 44 486 94 05, 482 01 66; факс: +380 44 482 01 06, 486 14 30 / www.ujrs.org.ua

ЗМІСТ

Методи і засоби одержання та інтерпретації аерокосмічної інформації

О ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ М. А. Попов	4
ПРОГРАМНИЙ МОДУЛЬ ОЦІНКИ СУБПІКСЕЛЬНОГО ЗМІЩЕННЯ ЗНІМКІВ, ОТРИМУВАНИХ З КВАДРОКОПТЕРУ С. А. Станкевич, С. В. Шкляр, А. Р. Лисенко	10
ПОРІВНЯННЯ НОВОГО УДОСКОНАЛЕНОГО ПІДХОДУ КОМБІНУВАННЯ СУПЕРЕЧЛИВИХ ДАНИХ З ПРАВИЛОМ ЯГЕРА С. І. Альперт	14

Проблеми використання інформації дистанційного дослідження Землі

ОПЕРАТИВНЫЙ СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ВОДОЕМОВ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДОВ Д. К. Мозговой	18
ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВОДНОГО РЕЖИМУ ҐРУНТІВ НА СТУПІНЬ ЇХ ДЕГРАДАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ ТА ДАНИХ НАЗЕМНОЇ ПОЛЬОВОЇ ЗАВІРКИ І. Ф. Романчук	26

Правила та рекомендації для авторів (ua, ru)	31
---	----

Анонси. Нова монографія Центру

СУЧАСНІ МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ПОШУКУ КОРИСНИХ КОПАЛИН РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ПОШУКУ ПОКЛАДІВ ВУГЛЕВОДНІВ Підрозділи 2.10–2.15 (С. 94–123)	35
--	----

УДК 528.8

О технологии создания новых технологий в области дистанционного зондирования Земли

М. А. Попов

ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины”, Киев, Украина

Изложен методический подход к поэтапному созданию новых технологий в области дистанционного зондирования Земли. Приводится схема поэтапного создания новых технологий в ДЗЗ, обсуждаются содержание и наиболее важные аспекты работ на каждом из этапов. Изложенный подход рекомендуется для использования в качестве методической основы при формировании технических заданий и планов выполнения соответствующих исследований и разработок в области ДЗЗ.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, аэрокосмическое изображение, требования к ДЗЗ-технологии, классификация изображений, сбор данных, объем выборки

© М. А. Попов. 2018

1. Вступление

Непрерывное совершенствование технических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), развитие глобальной инфраструктуры доставки данных создали в настоящее время благоприятные условия для обеспечения пользователей практически в любой точке земного шара необходимыми им материалами аэрокосмической съемки. Более того, сегодня пользователю предоставляется большой выбор разных программных средств для обработки аэрокосмических изображений, причем работа с ними не требует высокой квалификации. Такая ситуация является благоприятной для разработки новых эффективных методов решения самых разных тематических задач и, безусловно, способствует дальнейшему расширению сфер использования методов ДЗЗ. Среди таких сфер — сельское и городское хозяйства, природные ресурсы, экология, транспорт и дорожные сети, водная среда и т. д., и в каждой из них учеными и специалистами постоянно ведутся новые разработки [1–3].

Однако проведенный нами анализ показывает, что создатели подобных разработок, с учетом их научного профиля и специфики предметной области, значительно различаются своими представлениями относительно уровня завершенности и технологичности разработок, глубины способов проверки их на эффективность, желаемой степени автоматизации и т. д. Данное обстоятельство затрудняет возможности как объективного сравнения ДЗЗ-разработок, так и их использование в смежных сферах с минимальными доработками.

Представляется, что указанных недостатков можно во многом избежать, если при создании новых ДЗЗ-разработок, независимо от сферы их последующего применения, придерживаться некоего общего подхода. Такой технологический подход предлагается в данной статье. Приводится схема поэтапного создания новых технологий в ДЗЗ, обсуждаются содержание и наиболее важные аспекты работ на каждом из этапов.

2. О понятии “технология” в ДЗЗ

Кембриджский словарь делового английского языка [4] дает следующее определение понятия “технология”:

Technology = knowledge, equipment, and methods that are used in science and industry (знания, оборудование и методы, используемые в науке и промышленности).

Большой словарь современного украинского языка [5] трактует данное понятие таким образом:

Технология — совокупность способов обработки или переработки материалов, изготовления изделий, выполнения разных производственных операций и т. д.

Приведенные определения отражают сущность понятия “технология”, однако носят весьма общий характер. Заметим, что когда рассматривается какая-то конкретная область человеческой деятельности, то для достижения здесь новых конструктивных результатов необходимо учитывать присущий

* E-mail: mpopov@casre.kiev.ua
Тел.: +38 (044) 482-01-66,

ей методологический инструментарий, существующие в этой области специфические взгляды и представления, наработанные способы, методы, понятийный аппарат и т. д.

С учетом этих соображений для области ДЗЗ понятие “технология” можно выразить следующим образом:

Технология ДЗЗ — это набор процедур получения, обработки и комплексного анализа материалов аэрокосмической съемки, наземных данных и другой необходимой информации, в совокупности обеспечивающих решение конкретной тематической задачи или группы подобных задач и реализованных аппаратно и программно.

Под тематической задачей понимается задача в соответствующей отрасли человеческой деятельности — промышленности, науке, сельском хозяйстве и т. д., для решения которой предполагается использовать дистанционный подход.

К технологиям ДЗЗ предъявляются следующие требования:

- четко поставленная цель относительно конечной реализации технологического процесса — информационного продукта, обеспечивающего решение конкретной тематической задачи или группы задач;
- высокая степень разделения процесса на стадии (фазы);
- системная полнота (целостность) процесса, который должен включать весь набор элементов, обеспечивающих завершенность действий в достижении требуемого конечного результата;
- возможность интерактивного (диалогового) режима работы;
- способность взаимодействовать и функционировать с другими технологиями и системами.

Эти требования являются неперенными условиями достижения результатов в соответствии с поставленной целью, однако, в зависимости от сложности задачи, результат — конечный информационный продукт — может достигаться при различной степени “жесткости” осуществления технологического процесса.

В случае достаточно простых тематических задач этот процесс может быть полностью автоматизирован, и тогда говорят о программируемой технологии. Однако решение большинства тематических задач ДЗЗ требует непосредственного и активного участия специалиста в управлении данными и весьма сложных алгоритмов интеллектуальной обработки, результаты применения которых не всегда дают однозначный результат. Если при этом в технологии последовательность выполнения процессов алгоритмической обработки данных и инфор-

мации остается неизменной, то такую технологию называют научно-технической. Если же в технологии предусмотрена возможность изменять последовательность обработки данных, включать в контур обработки данных для получения желаемого результата некоторые дополнительные логико-вычислительные процедуры, то такую технологию характеризуют как научно-исследовательскую.

В зависимости от сложности тематической задачи ДЗЗ можно ориентироваться на тот или иной тип технологии. Безусловно, при выборе типа технологии важное значение имеют и другие факторы (уровень квалификации потенциальных пользователей, стоимость и др.). Однако при создании новой технологии ДЗЗ можно, независимо от выбранного типа и сферы ее применения, придерживаться единого общего подхода. Такой технологический подход рассматривается ниже.

3. Схема создания новых технологий в ДЗЗ

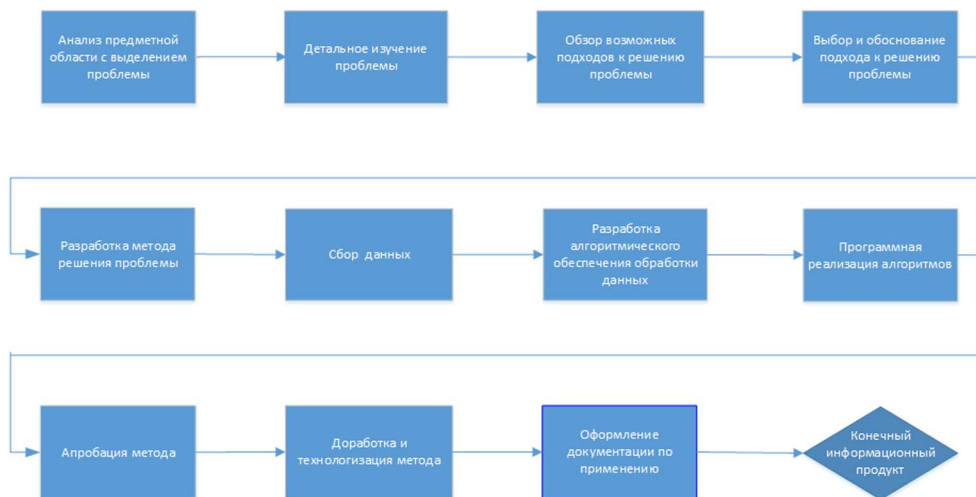
Схема, которая отображает содержание процесса создания новых технологий в различных сферах ДЗЗ, приведена на рисунке (см. ниже).

Новые технологии создаются либо по заказу, либо инициативно, при наличии мотивации со стороны разработчика [6].

В первом случае формулировка проблемы, которая требует нового технологического решения, принадлежит заказчику. Он же, как инвестор разработки и будущий ее пользователь, имеет право задать основные требования к качеству конечного информационного продукта и устанавливает ограничения по срокам создания, стоимости и др. Всю эту информацию заказчик передает исполнителю — разработчику технологии.

Во втором случае инициатором разработки проводится анализ выбранной предметной области и в ней выделяется проблема, требующая решения. Далее эта проблема всесторонне изучается: производится оценка ее актуальности, выявляются причины, по которым она остается нерешенной, оцениваются востребованность создаваемой технологии для ее решения и возможные доходы от ее коммерческого использования и т. д. При положительных результатах такого изучения инициатором разработки решается вопрос с источниками финансирования предстоящей работы и переходят к анализу известных попыток ее решения, для чего привлекаются патенты, научные и научно-технические публикации, отчеты по выполненным в этой области научно-исследовательским работам, другие доступные информационные материалы, в том числе архивные.

По результатам проведенного критического анализа разработчиком выбирается подход к решению проблемы, делаются предварительные оценки его



Технологическая схема создания новых технологий в различных сферах ДЗЗ

перспективности и целесообразности в соответствии с принятыми критериями.

Выбранный подход требует конкретизации в виде структурно-логической схемы метода, которая содержит все стадии (фазы) процесса решения проблемы, обеспечивая системную полноту (целостность) процесса и завершенность действий в достижении конечного результата в виде обусловленного информационного продукта ДЗЗ. Составляется перечень спутниковых изображений, картографических, геологических и других материалов, которых требует метод, формулируются требования к их качеству, объемам, полноте. Ставятся задания на разработку совокупности алгоритмов для реализации логико-вычислительных процедур, предусмотренных телом метода.

Изучаются возможные источники данных, необходимых для применения метода, и производится их сбор. Значительную помощь в получении необходимых материалов (текстовых, графических) могут оказать существующие открытые базы данных и информационно-поисковые системы, в частности, семантические веб-сервисы (Semantic Web Services).

Опыт показывает, что поиск в глобальных сетях оказывается быстрым и результативным, если данные представлены в одном из общепринятых или стандартных форматов и снабжены метаданными, как, например, большинство спутниковых изображений или топокарты. Однако на данное время большая часть имеющихся данных о физических полях Земли не структурирована, а метаданные о них еще ждут своей стандартизации. Поэтому исследователю приходится задавать обобщенные, размытые критерии поиска, вследствие чего собираемые массивы данных оказываются избыточными и далеко не всегда адекватными потребностям задачи и требуют дополнительного рассмотрения и отбора. Существует и еще одна серьезная проблема, с которой приходится сталкиваться при привлече-

нии материалов из глобальных сетей, — это проблема доверия к их точности и достоверности.

Наряду со сбором необходимых исходных данных ведется разработка алгоритмического обеспечения их обработки и анализа. Состав алгоритмического обеспечения определяется содержанием логико-вычислительных процедур, которые должны быть реализованы в разрабатываемом методе. Как правило, при создании алгоритмического обеспечения в значительной мере удастся опираться на уже известные разработки, однако часть алгоритмов всегда является оригинальными.

Одной из логико-вычислительных процедур, которая присутствует практически в любом методе ДЗЗ, является контролируемая классификация. На сегодня известно достаточно много самых различных алгоритмов классификации, что упрощает задачу разработчиков.

Разработанные алгоритмы требуют программной реализации, т. е. разработки специализированного программного обеспечения. Перед тем, как решать эту задачу, необходимо определиться с рядом ключевых вопросов: языком программирования, требованиями к процессору и памяти, выбором операционной системы, протоколами взаимодействия, дизайном интерфейса пользователя и др. После разработки программного обеспечения каждый программный модуль в отдельности и система в целом подвергаются тестированию, в процессе которого выявляются и устраняются ошибки.

Описанная выше и выполненная авторами новой технологии совокупность работ позволяет перейти к апробации разработанного метода. На этом этапе определяется работоспособность метода и оцениваются его возможности по получению конечного информационного продукта, отвечающего принятым критериям.

Один из наиболее важных критериев — это достоверность получаемой дистанционной информа-

ции [7, 8]. Она определяется точностью классификации аэрокосмических изображений. Известно, что при выбранном методе классификации статистическая корректность оценок точности зависит от объема экзаменационной выборки, которая должна включать в себя репрезенты всех учитываемых в задаче классов объектов. Наиболее благоприятный случай — это когда удастся сформировать выборку, в которой примерно в одинаковых пропорциях представлены все классы. В таком случае для определения статистически достаточного объема экзаменационной выборки используется подход, основанный на биномиальной модели [9]. Коротко опишем его суть.

Предположим, экзаменационная выборка состоит из N объектов, принадлежащих соответствующим классам (число классов не менее двух), а по результатам классификации получают s ошибочных результатов. Обозначим P_0 — точность классификации (оценка вероятности правильной классификации), q — оценка вероятности ошибки (неправильной классификации); $q = s/N$. Очевидно, что $P_0 + q = 1$.

Величина s является дискретною случайною величиной, вероятность определяется биномиальным распределением

$$\Pr \{s = s/q\} = \frac{N!}{(N-s)!s!} q^s (1-q)^{N-s}. \quad (1)$$

Согласно [6], объем N^* экзаменационной выборки, обеспечивающий корректность статистических оценок точности классификации, рассчитывается по формуле:

$$N^* = \frac{Z_a^2 P_0 (1 - P_0)}{b^2}, \quad (2)$$

где Z_a — стандартная табулированная оценка для принятой вероятности α двухсторонней ошибки 1-го рода; b — допустимая (приемлемая) ошибка.

Значение P_0 может быть первоначально выбрано исходя из предыдущих экспериментов или других источников, а потом уточняться. Ошибка 1-го рода задает вероятность α того, что истинное значение вероятности правильной классификации P выйдет за границы доверительного интервала: $\alpha = \Pr\{|P_0 - P| \geq Z_a \cdot \sqrt{P(1-P)/N}\}$.

Заметим, что из формулы (2) следует, что с ростом вероятности правильной классификации (при увеличении качества классификации) пропорционально понижаются требования к необходимому объему выборки.

Однако во многих практических задачах экзаменационную выборку, в которой примерно одинаково представлены все классы объектов, сформировать не удастся. В подобных случаях применима для определения статистически достаточного объема экзаменационной выборки используется подход, основанный на мультиномиальной модели [10], которая позволяет

учитывать требования к точности классификации на уровне класса. Суть подхода состоит в следующем. Пусть выборка состоит из объектов — репрезентов K классов, причем известны доли Π_i объектов произвольного i -го класса в выборке, $i = 1, 2, \dots, K$. Кроме того, установлена некоторая приемлемая ошибка классификации объектов i -го класса b_i , а также задана вероятность α ошибки 1-го рода. Тогда, согласно [9], необходимая численность n_i объектов i -го класса в выборке может быть рассчитана по формуле:

$$n_i = \frac{B \Pi_i (1 - \Pi_i)}{b_i^2}, \quad (3)$$

где число $B = \chi^2_{(1-\alpha/K)}$ берется из табулированного кумулятивного распределения χ^2 с одной степенью свободы для значения α/K (см., например, [11]).

Для определения потребного объема N^* выборки сначала формулу (3) применяют последовательно для каждого класса, после чего используют правило:

$$N^* = \max_{i=1,2,\dots,K} \{n_i\} \quad (4)$$

Отметим, что мультиномиальная модель дает наиболее хорошие результаты в условиях достаточно больших выборок, особенно когда численность объектов какого-то класса доминирует над остальными.

Примеры расчетов по определению статистически достаточного объема экзаменационной выборки при оценке точности результатов контролируемой классификации аэрокосмических изображений для обоих рассмотренных выше моделей можно найти в [12].

Если разработанный метод в результате проведенных испытаний (апробации) продемонстрировал свою эффективность, то переходят к его технологизации. Окончательно определяются с аппаратурой (компьютер, интерфейс, другие необходимые средства) и загружают в нее весь инструментальный разработанного метода. На этом этапе также разрабатывается сопроводительная документация (описание технологии, руководство по применению, указания по эксплуатации и др.).

Описание разработанной технологии должно включать в себя:

1. Название технологии.
2. Область применения.
3. Целевое предназначение.
4. Описание сущности разработанного метода (теоретические предпосылки, модели, расчетные формулы, схема выполнения операций преобразования данных и др.).
5. Требования к исходным данным и другой необходимой информации.
6. Требования к аппаратному обеспечению.
7. Пример (учебный или из практики) использования технологии.

Руководство по применению технологии должно

содержать требования к квалификации пользователей, перечень необходимых исходных данных и пути их получения, последовательность действий пользователя, особенности применения в разных задачах и др.

Указания по эксплуатации технологии должны содержать описание условий, предусмотренных Техническим заданием на проект и необходимых для штатного функционирования аппаратного обеспечения технологии, информацию по проверке работоспособности инструментария технологии, рекомендации по устранению возможных ошибок и неисправностей в системе и т. д.

4. Заключительные замечания

После завершения процесса создания новой технологии ДЗЗ и установления факта ее эффективности встает вопрос о ее дальнейшей судьбе. Если технология создавалась по чьему-то заказу, то она передается заказчику на обусловленных договором или другим документом условиях. При этом для создателя новой технологии очень важным моментом является обеспечить сохранность авторских имущественных прав на нее как объект интеллектуальной собственности. Одним из шагов, способствующих решению данной проблемы, является своевременное оформление патентной заявки на изобретение.

Иная ситуация, если у технологии конкретный заказчик отсутствовал; например, она создавалась в инициативном порядке. Тогда, после получения информационного продукта — новой технологии ДЗЗ, перед разработчиком стоит задача найти и заинтересовать ее возможностями потенциальных пользователей. Достижению этой цели способствует правило: “не забывать, что понятия “технология” и “пользователь” должны рассматриваться в одной связке на всех этапах разработки”.

Итак, в статье изложен технологический подход к поэтапному созданию новых технологий в ДЗЗ, рассмотрено содержание и наиболее важные аспекты выполнения работ на каждом из этапов. Изложенный подход может быть использован как основа при формировании технических заданий и планов выполнения соответствующих исследований и разработок в области ДЗЗ.

Литература

1. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. 3rd Ed. / R. A. Schowengerdt // Amsterdam: Elsevier 2007. — 558 p.
2. Спутниковые методы поиска полезных ископаемых / Под ред. акад. НАН Украины В. И. Лялько и д. т. н. М.А. Попова // Киев: Карбон-Лтд, 2012. — 436 с.
3. Сучасні методи дистанційного пошуку корисних копалин / За ред. В. І. Лялька і М. О. Попова // Київ: НАН України, ЦАКДЗ, 2017. — 221 с. <http://ujrs.org.ua/ujrs/>
4. Cambridge Business English Dictionary <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/technology>.
5. Великий тлумачний словник сучасної української мови / Уклад. і голов. ред. В. Т. Буссел. — Київ: Ірпінськ: ВТФ “Перун”, 2003. — 1440 с.
6. Hong Z. The Development and Industrialization Recommendation of Current Aerial Remote Sensing Technology / Z. Hong // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XL-7/W1, 3rd ISPRS IWIDF 2013, 20–22 August 2013, Antu, Jilin Province, PR China. P. 37–39.
7. Попов М. О. Правила та процедура сертифікації методик використання даних дистанційного зондування Землі при вирішенні тематичних задач // М. О. Попов, Т. В. Цимбал // Космічна наука і технологія. — 2004. — Т. 10. — № 4. — С. 104–112.
8. Дистанційне зондування Землі з космосу. Методика оброблення даних: Порядок розроблення / Національний стандарт України ДСТУ 7894:2015. — 8 с.
9. Congalton R. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. 2nd Ed. / R. Congalton, K. Green // Boca Raton: Taylor & Francis, 2009. — 183 p.
10. Tortora R. A note on sample size estimation for multinomial populations / R. Tortora // American Statistician, 1978, 32 (3). P. 100–102.
11. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель // М.: Наука, 1969. — 576 с.
12. Попов М. А. Методология оценки точности классификации объектов на космических изображениях / М. А. Попов // Проблемы управления и информатики. — 2007. — № 1. — С. 97–103.

ПРО ТЕХНОЛОГІЮ СТВОРЕННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ГАЛУЗІ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

М. О. Попов

Розглянуто методичний підхід до поетапного створення нових технологій в галузі дистанційного зондування Землі. Наводиться схема поетапного створення нових технологій в ДЗЗ, обговорюються зміст і найбільш важливі аспекти робіт на кожному з етапів. Викладений підхід рекомендується для використання в якості методичної основи при формуванні технічних завдань і планів виконання відповідних досліджень і розробок в області ДЗЗ.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, аерокосмічне зображення, вимоги до ДЗЗ-технології, класифікування зображень, збирання даних, обсяг вибірки

ON THE TECHNOLOGY OF CREATION OF NEW TECHNOLOGIES IN THE AREA OF REMOTE SENSING OF THE EARTH

M. O. Popov

The methodical approach to the phased elaboration of new technologies in the area of remote sensing of the Earth is outlined. A scheme for the phased elaboration of new technologies in remote sensing is suggested, the content and the most important aspects of the work at each stage are discussed. This approach is offered to use as a methodological basis at the forming specifications and the implementation plans of relevant research and development in the area of remote sensing.

Keywords: remote sensing of the Earth, aerospace image, requirements for RS-technology, image classification, data collection, sample size

УДК 528.711.1:519.688:004.424

Програмний модуль оцінки субпіксельного зміщення знімків, отримуваних з квадрокоптеру

С. А. Станкевич^{1*}, С. В. Шкляр¹, А. Р. Лисенко²¹ ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, Київ, Україна² Національний технічний університет України “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

Описано математичну модель та програмний модуль для автоматичної оцінки субпіксельного зміщення аерознімків, що отримуються з квадрокоптеру. Вказані зміщення надалі потрібні для субпіксельного підвищення просторової розрізненості аерозображень.

Ключові слова: програмний модуль, субпіксельне зміщення зображень, квадрокоптер

© С. А. Станкевич, С. В. Шкляр, А. Р. Лисенко. 2018

Вступ

Враховуючи широке впровадження квадрокоптерів в практику аерознімання, підвищення просторової розрізненості одержуваних аерозображень — досить актуальна задача сьогодення [5]. Придбання більш потужної апаратури, яка задовольнить потреби певних тематичних задач, може бути недоцільним або неможливим як через її значну вартість, а в деяких випадках — через фізичні обмеження носія аерознімальної системи.

З стрімким набуттям популярності квадрокоптерів за їх можливості та відносно дешевизну, виникла необхідність у застосуванні традиційних методів вирішення даної проблеми, одним з яких є субпіксельна обробка послідовності зображень [3].

Постановка задачі

Субпіксельна обробка проводиться над геометрично зміщеними одне відносно одного на певну частку пікселя зображеннями. Результатом даної обробки є відновлене єдине результуюче зображення підвищеної розрізненості. Так як на процес реєстрації зображень з квадрокоптеру впливають стохастичні збурення, то необхідно розрахувати субпіксельний зсув між всіма зображеннями, що приймають участь у відновленні результуючого зображення. Перед початком оцінювання треба прив'язати вхідні зображення одне до одного, обрати одне з них як базове, а інші трансформувати для досягнення піксельної точності суміщення [2]. Оскільки сучасні квадрокоптери обладнуються виключно кадровими цифровими камерами, зображення в яких будується по законах центральної проекції, то домогтися такого суміщення можливо шляхом

афінного перетворення за системою опорних точок знімків [1].

Модель розрахунку субпіксельного зсуву

Нехай X — матриця першого зображення розмірності $m \times n$, Y — матриця другого зображення також розмірності $m \times n$, а x_{ij} та y_{ij} — значення пікселів в i -му рядку та j -му стовпці матриць X та Y відповідно.

Означимо необхідні матриці розмірностей $(m-2) \times (n-2)$: D — матриця зсуву по рядках, E — матриця зсуву по стовпцях та F — матриця різниць інтенсивностей оцінюваного пікселя. Їх елементи мають наступний вигляд:

$$d_{ij} = x_{lk} + y_{lk} - x_{(l-2)k} - y_{(l-2)k},$$

$$e_{ij} = x_{(l-1)(k+1)} + y_{(l-1)(k+1)} - x_{(l-1)(k-1)} - y_{(l-1)(k-1)},$$

$$f_{ij} = y_{(l-1)k} - x_{(l-1)k},$$

$$i=1:(m-2), j=1:(n-2), l=3:m, k=2:(n-1).$$

Тоді субпіксельний зсув можна розрахувати із $AC = B$, де матриця A розмірності 3×3 має вигляд

$$A = \begin{bmatrix} \langle D \circ D \rangle & \langle D \circ E \rangle & \langle D \rangle \\ \langle D \circ E \rangle & \langle E \circ E \rangle & \langle E \rangle \\ \langle D \rangle & \langle E \rangle & 1 \end{bmatrix},$$

де $X \circ Y$ — добуток Адамара, $\langle \cdot \rangle$ — оператор середнього арифметичного, а B — вектор розмірності 3×1 :

$$B = \begin{bmatrix} \langle F \circ D \rangle \\ \langle F \circ E \rangle \\ \langle F \rangle \end{bmatrix}.$$

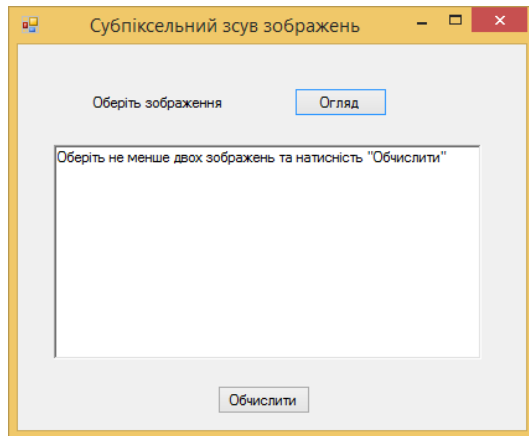
Вектор-стовпець $C = (u \ v \ z)^T$ містить результат, де u і v — величини субпіксельного зсуву по вертикалі та по горизонталі відповідно.

* E-mail: st@casre.kiev.ua. Тел./факс: +38 (044) 482 01 66

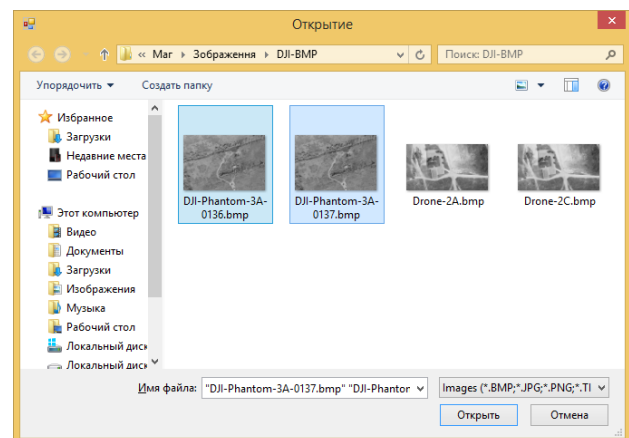
Програмний модуль

Викладену модель розрахунку субпіксельного зсуву реалізовано окремим програмним модулем оцінки субпіксельного зміщення аерознімків. Модуль виконано мовою програмування C++ у середовищі розробки Visual Studio 2017 із залученням відкритих бібліотек комп'ютерного зору, об-

робки зображень та чисельних алгоритмів загального призначення OpenCV. Модуль складається з головного діалогового вікна з інтерфейсом обрання зображень для оцінки їх субпіксельного зсуву, та підсистеми обчислювальної обробки наданих вхідних зображень. Головне діалогове вікно та інтерфейс обрання зображень показано на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Графічний інтерфейс модулю оцінки субпіксельного зміщення знімків: а – головне діалогове вікно, б – інтерфейс обрання вхідних зображень

Подальша субпіксельна обробка зображень для підвищення розрізненості виконується над їх яскравостями [3], але більшість знімальних камер сучасних квадрокоптерів є кольоровими. Тому вхідні кольорові аерозображення перетворюються програмним модулем на чорно-білі в градаціях сірого. Відомо багато алгоритмів такого перетворення [6], в основному лінійних. Попередні дослідження стверджують, що для візуального сприйняття дрібнодетальних зображень більш придатні перетворення сімейства Luminance [4], отже в програмному модулі було застосовано розповсюджену формулу

$$X_{\text{gray}} = 0.2989 X_{\text{red}} + 0.587 X_{\text{green}} + 0.1141 X_{\text{blue}},$$

де X_{red} , X_{green} , X_{blue} — піксельні значення в червоному, зеленому та синьому компонентах вхідного кольорового зображення, X_{grey} — піксельне значення інтенсивності перетвореного зображення.

Результат

Працездатність розробленого програмного модуля досліджено на аерознімках, отриманих з квадрокоптерів DJI Phantom 4 Pro (рис. 2 а, б) і DJI Phantom 3A (рис. 2 в, г). Вхідні зображення, зняті з інтервалом 2 с, попіксельно суміщалися за наборами опорних точок.

Оцінка субпіксельного зміщення кожної пари

знімків була отримана за допомогою розробленого програмного модуля. Результати виконання модуля ілюструються рис. 3.

Одержані оцінки субпіксельних зміщень тестових зображень добре погоджуються з визначеними візуально з великим збільшенням, а також вимірними для окремих пікселів детальних ділянок сцени.

Висновок

За допомогою розробленого програмного модулю продемонстровано можливість автоматичного визначення субпіксельного зміщення зображень, отримуваних з квадрокоптеру. Такі оцінки необхідні для подальшої субпіксельної обробки пар чи серій аерознімків з метою підвищення просторової розрізненості результуючих зображень.

Певним недоліком модулю можна вважати необхідність вживання додаткових заходів задля досягнення попіксельної ко-реєстрації зображень, що є непростю задачею, яка погано піддається автоматизації. Отже в подальшому програмний код модулю доцільно вбудувати в програмне забезпечення, що використовується для автоматизованої чи автоматичної ко-реєстрації зображень.

Разом з тим, розроблений програмний модуль є корисним та вартим застосування для підвищення просторової розрізненості знімків, отримуваних з квадрокоптеру.

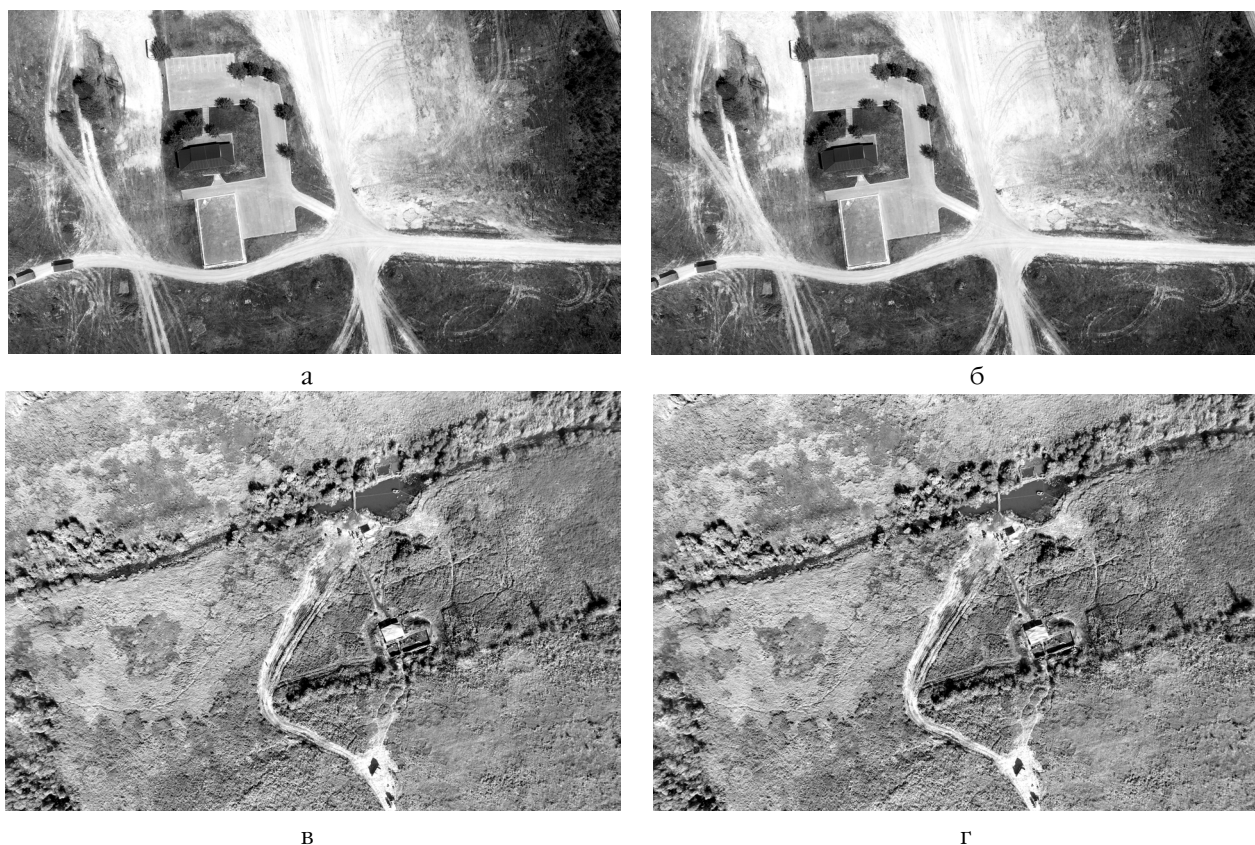
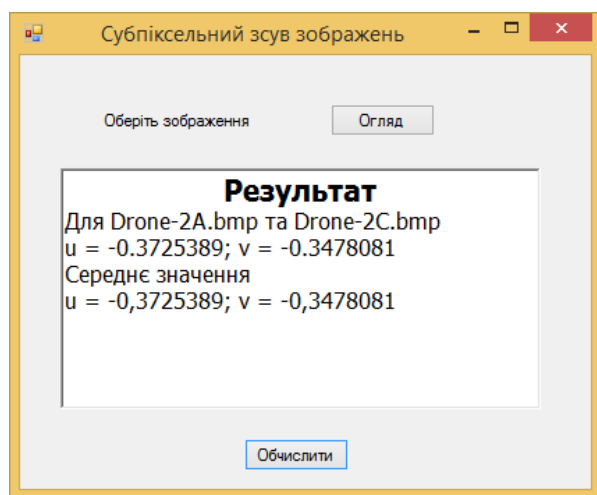
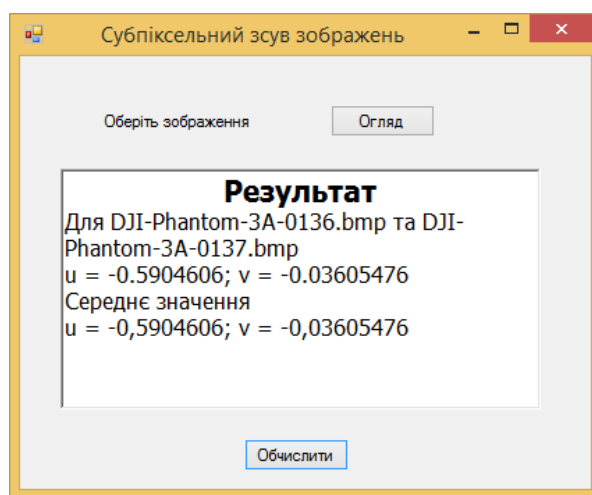


Рис. 2. Суміщені тестові аерозображення: а, б — пара вхідних аерозображень з квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro; в, г — пара вхідних аерозображень з квадрокоптера DJI Phantom 3A



а



б

Рис. 3. Результати оцінки субпіксельного зміщення: а – тестових аерозображень рис. 2 а, б; б – тестових аерозображень рис. 2 в, г

Література

1. Дорожинський О. Л. Фотограмметрія / О. Л. Дорожинський, З. Тукай. — Львів: Львівська політехніка, 2008. — 330 с.
2. Козлов А. А. Совмещение растровых изображений в системах технического зрения / А. А. Козлов, М. Ю. Литвинов, Н. В. Соловьев // Информационно-управляющие системы. — 2007. — № 6. — С.7–10.
3. Станкевич С. А. Підвищення просторової розрізненості аерознімання з квадрокоптеру на основі субпіксельної обробки зображень / С. А. Станкевич, М. С. Лубський, А. Р. Лисенко [Електронний ресурс] // Український журнал дистанційного зондування Землі. — 2017. — № 15. — С.40–42. — Режим доступу до журналу: <http://www.ujrs.org.ua/ujrs>. — Назва з екрана.
4. Kanan C. Color-to-Grayscale: Does the method matter in

- image recognition? / C. Kanan, G.W. Cottrell // PLoS ONE. — 2012. — Vol.7. — No.1. — e29740.
5. Kang W. Multisensor super resolution using directionally-adaptive regularization for UAV images / W. Kang, S. Yu, S. Ko, J. Paik // UAV Sensors for Environmental Monitoring / E.G. Toro, A. Tsourdos (Eds). — Basel: MDPI, 2018. — P. 272–294.
6. Ware C. Information Visualization: Perception for Design / C. Ware. — Amsterdam: Elsevier, 2012. — 536 p.

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ОЦЕНКИ СУБПИКСЕЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ СНИМКОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ С КВАДРОКОПТЕРА

С. А. Станкевич, С. В. Шкляр, А. Р. Лысенко

Описаны математическая модель и программный модуль для автоматической оценки субпиксельного смещения аэроснимков, получаемых с квадрокоптера. Указанные смещения в дальнейшем необходимы для субпиксельного повышения пространственного разрешения аэроизображений.

Ключевые слова: программный модуль, субпиксельное смещение изображений, квадрокоптер

SOFTWARE MODULE FOR ESTIMATING SUBPIXEL SHIFT OF IMAGES ACQUIRED FROM QUADCOPTER

Sergey A. Stankevich, Sergey V. Shklyar, Arthur R. Lysenko

Both mathematical model and software module for automatic estimating subpixel shift of aerial image acquired from quadcopter are described. The said shift henceforth will be required for super-resolution of fused aerial image.

Keywords: software module, image subpixel shift, quadcopter

УДК 528.06

Порівняння нового удосконаленого підходу комбінування суперечливих даних з правилом Ягера

С. І. Альперт *

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, Київ, Україна

Теорія свідчень Демпстера-Шейфера є найбільш ефективним підходом для обробки неточної та неповної інформації. Але правило комбінації Демпстера не може працювати з суперечливими даними, що може призвести до невірних результатів. Комбінування суперечливих частин свідчення є однією з найбільш складних задач. Підхід Ягера може обробляти суперечливі дані, але даний підхід не враховує взаємозв'язок між свідченнями. Запропоновано новий метод комбінування, який враховує взаємозв'язок між різними частинами свідчення та дає точні результати.

Ключові слова: правило комбінації Демпстера, теорія свідчень, правило Ягера, суперечливі свідчення

© С. І. Альперт. 2018

Вступ

На даний час дистанційне зондування Землі грає неабияку роль у вивченні стану рослинного покриву, пошуку корисних копалин, оцінці та контролю змін, які виникають у природному середовищі. Класифікування супутникових зображень є одним з надійних методів отримання достовірної інформації про основні характеристики земляного покриву [4–5]. Існує багато різноманітних методів класифікування даних. У статті розглянуто метод, який працює за наявності суперечливих джерел інформації, а саме метод Ягера. Запропоновано новий удосконалений метод комбінування даних за наявності суперечливих джерел інформації, який, на відміну від інших методів, враховує кореляцію між різними джерелами інформації та ефективно вирішує задачу комбінування даних.

Основні положення теорії свідчень Демпстера-Шейфера

Теорія свідчень є певним узагальненням теорії ймовірностей, її математичний апарат дозволяє оперувати не тільки з окремими подіями синглтонами або гіпотезами, але й зі сполученнями подій (гіпотез), причому кожне таке сполучення розглядається за методологією теорії Демпстера-Шейфера (ТДШ) як окрема нерозкладна подія (гіпотеза) A . У ТДШ ключовим поняттям є поняття “маси”, яке є узагальненням класичного поняття ймовірності. На відміну від байєсівської ймовірності, “маса” може ефективно описати незнання та відокремити поняття відсутності довіри від недовіри. “Маса” є мірою довіри до пов'язаної з нею гіпотези [1–4].

Сукупність вихідних (базових) гіпотез відносно стану об'єкта та всі можливі їх сполучення утворюють множину Ω , яка називається у ТДШ “основою аналізу” (*frame of discernment*). Вважається, що всі гіпотези з множини Ω (як базові, так і їхні сполучення) є взаємно незалежними та у сукупності повністю характеризують об'єкт. Якщо число базових гіпотез рівно Q , то загальна кількість підмножин у множині Ω складає величину 2^Q (сюди входять пуста множина $\emptyset$ та сама множина Ω).

Кожному елементу множини Ω надається, за певними правилами, відповідна маса m , причому область значень маси лежить в інтервалі від нуля до одиниці. Формально це записується таким чином:

- маса пустої множини дорівнює нулю: $m(\emptyset)=0$;
- сума усіх мас для кожної підмножини $A \subseteq \Omega$ дорівнює одиниці: $\sum_{A \subseteq \Omega} m(A)=1$.

На змістовному рівні масу m можна розглядати як міру довіри до пов'язаної з нею гіпотези; тому $m(A)$ ще називають базовою ймовірністю, а будь-яку підмножину A , для якої $m(A)>0$, називають фокальним елементом (*focal set*).

Гіпотези, або свідчення можуть одночасно формуватися кількома різними джерелами. У випадку, коли ці джерела взаємно незалежні, в ТДШ розроблено просте правило об'єднання (комбінування) свідчень. Припустимо, ми маємо множину — основу аналізу Ω з числом свідчень (гіпотез) Q , а також маємо P незалежних джерел ID_p ($1 \leq p \leq P$) цих свідчень. При цьому p — те джерело дає свою оцінку ймовірності (можливості) свідчення A_n у вигляді відповідної маси $m_p(A_n)$ або оцінку ймовірності (можливості) сполучення свідчень X у вигляді $m_p(X)$. Тоді об'єднання свідчень, або отримання комбінованого свідчення здійснюється за допомогою правила Демпстера:

* E-mail: sonyasonet87@gmail.com.
Тел.: + 030 95 901 57 37

$$m_D(X) = \frac{1}{1-K} \sum_{\substack{X_1 \cap \dots \cap X_R = X \\ \forall (X \neq \emptyset) \in 2^Q}} \prod_{1 \leq p \leq P} m_p(X_r) \quad (1)$$

де K — коефіцієнт конфліктності,

$$K = \sum_{\substack{X_1 \cap \dots \cap X_R = \emptyset \\ \forall (X \neq \emptyset) \in 2^Q}} \prod_{1 \leq p \leq P} m_p(X_r) \quad (2)$$

Коефіцієнт конфліктності K вказує, наскільки протилежними між собою є джерела (точніше, їх свідчення). Область значень коефіцієнта K знаходиться в інтервалі $[0; 1]$, при цьому нульове значення свідчить про відсутність протиріч в оцінках джерел, а чим сильніше ці протиріччя, тим ближче до одиниці стає величина K .

Ще слід враховувати, що в розрахунках за правилом Демпстера (1) приймається, що $m_p(\emptyset) = 0$.

Метод Демпстера-Шейфера використовується при побудові інтервальних оцінок достовірності гіпотез в умовах відсутності частини вхідних даних, при наявності неповної та неточної інформації, дає правило для комбінування даних від різних джерел, використовується при класифікації гіперспектральних зображень [13–17].

Зазначимо основні недоліки підходу Демпстера-Шейфера:

- 1) Правило об'єднання функцій довіри отримано при припущенні однакової надійності та достовірності різних джерел свідчень. Насправді інформація, що отримується з різних джерел, має різну ступінь достовірності, тобто різну цінність. Це може призводити до помилок. Тому треба визначати найбільш достовірні джерела свідчень.
- 2) Правило комбінації Демпстера може давати не досить точні результати, якщо коефіцієнт конфліктності приймає велике значення, тобто, коли між свідченнями (джерелами інформації) є досить великі протиріччя. Внаслідок цього може виникнути така ситуація, що події, яка в дійсності має найменшу вірогідність, може бути надана найбільша базова маса.

Ось чому дуже важливою є задача модифікації правила Демпстера у випадку суперечливих свідчень [7–12].

Правило Ягера

Розглянемо модифікацію правила комбінації Демпстера — правило Ягера, яке так само як і Демпстер припускає, що $m(\emptyset) = 0$ та визначається наступним чином:

$$m(A) = \sum_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n = A, A \neq \emptyset, \Theta} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(B_i), \quad (3)$$

де Θ — основа аналізу (базова множина, фрейм розрізнення), сукупність вихідних гіпотез відносно стану об'єкта та всі можливі їх сполучення.

$$m(\Theta) = \sum_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n = \Theta, 1 \leq i \leq n} \prod m_i(B_i) + K, \quad (4)$$

де

$$K = \sum_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n = \emptyset, 1 \leq i \leq n} \prod m_i(B_i). \quad (5)$$

Тобто ідея правила Ягера полягає у наданні маси перетинів конфліктних множин (гіпотез), що в перетині дають пусту множину базовій множині. Тобто ненульова маса пустої множини в основному розподіляється серед елементів базової множини (фрейму розрізнення). K означає масу, яка надається базовій множині після процедури комбінування. Правило Ягера використовує інформацію про конфлікт та незнання тільки при обчисленні базових мас множини Θ . Цей факт говорить про “обережність” даного правила. При комбінуванні неконфліктних свідчень, коли $K = 0$ правило Ягера буде співпадати з правилом Демпстера.

Описане правило Ягера може працювати із суперечливими джерелами інформації, але воно не враховує кореляцію між різними джерелами інформації, тобто не враховує асоціативний зв'язок між свідченнями, отриманих з різних джерел.

Тому, у даному випадку пропонується використовувати новий удосконалений метод комбінування даних за наявності великого значення коефіцієнта конфліктності на основі теорії свідчень Демпстера-Шейфера [6–7].

Новий удосконалений метод комбінування даних за наявності великого значення коефіцієнта конфліктності

Представлений метод складається з семи етапів:

- 1) Визначаємо відстань між двома частинами свідчення m_i та m_j :

$$d_{BPA}(m_i, m_j) = \sqrt{\frac{1}{2}(\|m_i\|^2 + \|m_j\|^2 - 2\langle m_i, m_j \rangle)}, \quad d_{BPA} \in [0, 1]. \quad (6)$$

$$\langle m_i, m_j \rangle = \sum_{k=1}^{2^n} \sum_{l=1}^{2^n} m_i(A_k) m_j(A_l) \frac{|A_k \cap A_l|}{|A_k \cup A_l|}, \quad k, l = 1, \dots, 2^n; \quad (7)$$

де $\frac{|A_k \cap A_l|}{|A_k \cup A_l|}$ — коефіцієнт Жаккара двох множин

A_k та A_l .

Коефіцієнт Жаккара дорівнює відношенню кількості елементів перетину множин до кількості елементів їхнього об'єднання. Був запропонований Полем Жаккардом в 1901 році.

У формулі (7) на коефіцієнт Жаккара множиться кожен доданок окремо.

$$\|m_i\|^2 = \langle m_i, m_i \rangle \text{ — звичайна евклідова норма.}$$

2) Визначаємо міру подібності між двома частинами свідчення m_i та m_j :

$$\text{sim}(m_i, m_j) = 1 - d(m_i, m_j). \quad (8)$$

3) Припускаємо, що число частин свідчення – n . Будуємо матрицю подібності:

$$SMM = \begin{bmatrix} 1 & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & 1 & \dots & s_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

4) Функція підтримки кожної частини свідчення m_i визначається, як:

$$\text{Sup}(m_i) = \sum_{j=1}^n s_{ij}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

5) Здійснюючи об'єднання даних, ми прагнемо дізнатися, яке саме свідчення (спектральний канал), який ми використовуємо, є надійним. Можливим є випадок, що одна частина свідчення є важливішою за іншу, і кожна частина свідчення має свою певну вагу у цілому свідченні. Наприклад, під час тривалих вимірювань деякі сенсори можуть бути більш надійнішими за інші завдяки високій стабільності; таким чином сенсори можуть відрізнятися за ступенем надійності. Ось чому, процедура надання ваги свідченню є досить важливою, особливо, коли свідчення, отримані з різних сенсорів мають високий коефіцієнт конфліктності. У цьому випадку задача полягає в тому, щоб визначити серед усіх свідчень, яке з них є більш надійним, а якому можна приділити менше уваги. Надійним шляхом вирішення даної задачі є наступний: якщо певна частина свідчення знаходить підтримку у інших свідчень, то тоді дане свідчення буде мати більшу вагу ніж та частина свідчення, яка має високий ступінь розбіжності (протиріччя) з іншими свідченнями. Беручи за основу дане правило, ми опишемо “ступінь надійності” свідчення, яке є вагою та відображає важливість кожної частини свідчення.

6) Надійність кожної частини свідчення визначається, як:

$$\text{Crd}(m_i) = \frac{\text{sup}(m_i)}{\sum_{i=1}^n \text{sup}(m_i)}. \quad (11)$$

Звідси також маємо: $\sum_{i=1}^n \text{Crd}_i = 1$. Слід зазначити,

що, чим коротша відстань від даної частини свідчення до інших частин свідчення, тим більшою є ступінь підтримки (функція підтримки) даної частини свідчення. Якщо частина свідчення отримує значну підтримку у інших частин свідчення, то її ступінь надійності є високою і, вона буде мати більший вплив на кінцевий результат об'єднання даних. Навпроти, якщо певна частина свідчення суперечить іншим свідченням, то її ступінь надій-

ності — низький, отже, ця частина свідчення має значно менший вплив на кінцевий результат комбінації даних отриманих з різних джерел. Таким чином, ступенем надійності є вага, яка є індикатором важливості даного свідчення.

7) Коефіцієнт ваги m_M свідчення для певної гіпотези a :

$$m_M(a) = \sum_{i=1}^n \text{Crd}_i(m_i) \times m_i(a). \quad (12)$$

8) Далі, використовуючи правило Демпстера, комбінуємо коефіцієнти ваги (12) $n-1$ раз за умови, якщо ми маємо n частин свідчення [1–3].

Висновки

Правило комбінації Демпстера не можна застосовувати за наявності занадто суперечливих джерел інформації, оскільки воно дає невірні результати. Альтернативний підхід Ягера полягає у наданні базової маси перетинів конфліктних гіпотез базовій множині. При цьому ненульова маса пустої множини розподіляється серед елементів базової множини (фрейму розрізнення). Коли коефіцієнт конфліктності — нуль, правило Ягера співпадає з правилом Демпстера.

Правило Ягера може працювати із суперечливими джерелами інформації, але воно не враховує кореляцію між різними джерелами інформації, тобто не враховує асоціативний зв'язок між свідченнями, отриманих з різних джерел.

Запропоновано новий метод комбінування даних, який відображає асоціативний взаємозв'язок між свідченнями, враховує відстань між свідченнями та може ефективно оперувати за наявності занадто суперечливих свідчень.

Метод об'єднання даних, отриманих з суперечливих джерел може використовуватися при розв'язанні різноманітних природноресурсних задач таких як: класифікування лісів, урбанізованих територій, сільськогосподарських земель, при пошуку корисних копалин, родовищ нафти та газу [6–8].

Література

1. Аковецкий В. И. Дешифрирование снимков / В. И. Аковецкий. — М.: Недра, 1983. — 320 с.
2. Альперт С. І. Оцінка точності класифікації космічних зображень на основі теорії Демпстера-Шафера / С. І. Альперт // Збірник праць XI-ої Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції “Історія розвитку науки, техніки та освіти” за темою “Розбудова дослідницького університету”, (Київ, 25 квітня 2013 р.). — Київ, 2013. — С. 242–245.
3. Альперт С. І. Новий удосконалений підхід до комбінування даних на основі теорії Демпстера-Шейфера / С. І. Альперт // Збірник матеріалів VII-ої Всеукраїнської молодіжної наукової конференції “Ідеї та новації в

- системі наук про Землю”, (Київ, 25–27 жовтня 2017). — К., 2017. — С. 26–27.
4. Кочуб Е. В. Анализ методов обработки материалов дистанционного зондирования Земли / Е. В. Кочуб, А. А. Топаз // Вестник Полоцкого государственного университета, 2012. — 132 с.
 5. Кузнецов А. В. Сравнение алгоритмов управляемой поэлементной классификации гиперспектральных изображений / А. В. Кузнецов, В. В. Мясников // Компьютерная оптика. — 2014. — Т. 38. — №3. — С. 494–502.
 6. Лурье И. К. Теория и практика цифровой обработки изображений / И. К. Лурье, А. Г. Косиков. — М.: Научный мир, 2003. — 356 с.
 7. Лялько В. И. Использование данных спутниковой съемки для изучения природоресурсных проблем / В. И. Лялько, А. Д. Федоровский, М. А. Попов [и др.] / Космічні дослідження в Україні 2002–2004. — К.: 2004. — С. 2–14.
 8. Марченко Н. А. Методика классификации объектов по данным дистанционного зондирования Земли / Н. А. Марченко, А. К. Авраменко // Системный анализ, управление и информационные технологии. Научное периодическое издание. — Харьков: Харьковский политехнический институт. — 2008. — Вып. №26. — С. 145–149.
 9. Попов М. Підхід до класифікації стану лісових ресурсів по багатоспектральних космічних зображеннях на основі принципу злиття даних та використання елементів ГС-технологій / М. Попов, О. Рябоненко, О. Петроченко // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского, сер. География. — 2003. — Т. 16 (55). — №2. — С. 142–150.
 10. Попов М. Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли / М. Попов, С. Станкевич // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. — 2006. — Т. 2. — №1. — С. 61–63.
 11. Попов М. Шляхи отримання космічної інформації в інтересах національної безпеки та оборони / М. Попов // Наука і оборона. — 2002. — №2. — С. 38–50.
 12. Chang C. I. Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis / C. I. Chang // Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. — 1164 p.
 13. Gong P. Integrated Analysis of Spatial Data from Multiple Sources: Using Evidential Reasoning and Artificial Neural Network Techniques for Geological Mapping / P. Gong // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. — 1996. — Vol. 62. — № 5. — P. 513–523.
 14. Lein J. K. Applying evidential reasoning methods to agricultural land cover classification / J. K. Lein // Int. Journal of Remote Sensing. — 2003. — Vol. 24. — № 21. — P. 4161–4180.
 15. Mertikas P. Exemplifying the Theory of Evidence in Remote Sensing Image Classification / P. Mertikas, M. E. Zervakis // Int. Journal of Remote Sensing. — 2001. — Vol. 22. — № 6. — P. 108–1095.
 16. Popov M. A. A Dempster-Shafer evidence theory-based approach to object classification on multispectral / hyperspectral images // M. A. Popov, M. V. Topolnitskiy // Proceedings of the 10th International Conference IEEE on Digital Technologies (DT'2014). — Zilina, Slovakia, 9–11 July 2014. — P. 296–300.
 17. Smets P. Constructing the pignistic probability function in a context of uncertainty / P. Smets, M. Henrion, R. D. Shachter, L. N. Kanal, J. F. Lemmer // Uncertainty in Artificial Intelligence. — North Holland, Amsterdam, 1990. — Vol. 5. — P. 29–40.

СРАВНЕНИЕ НОВОГО УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ПОДХОДА КОМБИНИРОВАНИЯ ПРОТИВОРЕЧИВЫХ ДАННЫХ С ПРАВИЛОМ ЯГЕРА

С. И. Альперт

Теория свидетельств Демпстера-Шейфера является наиболее эффективным подходом для обработки неточной и неполной информации. Но правило комбинации Демпстера не может работать с противоречивыми данными, что может привести к неверным результатам. Вот почему комбинирование противоречивых частей свидетельства является одной из наиболее сложных задач. Подход Ягера может обрабатывать противоречивые данные, но данный подход не учитывает взаимосвязь между свидетельствами. Предложен новый метод комбинирования, который учитывает взаимосвязь между разными частями свидетельства и дает точные результаты.

Ключевые слова: правило комбинации Демпстера, теория свидетельств, правило Ягера, противоречивые свидетельства.

COMPARISON OF THE NEW IMPROVED COMBINATION APPROACH THAT DEAL WITH CONFLICT DATA WITH YAGER'S SOLUTION APPROACH

S. I. Alpert

Dempster-Shafer evidence theory is the most effective approach to process imprecise and incomplete information. But Dempster's combination rule can not deal with conflicting data and can lead to illogical results. That's why the combination of conflicting bodies of evidence is one of the most difficult problems. Yager's solution approach can process conflicting data, but correlation among evidences is not taken into account. It was proposed a new combination method, that uses correlation among different bodies of evidence and give accurate results.

Keywords: Dempster's combination rule, evidence theory, Yager's solution approach, conflicting bodies of evidence.

УДК 004.9

Оперативный спутниковый мониторинг растительности и водоемов на территории городов

Д. К. Мозговой

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепр, Украина

Предложена методика оперативного мониторинга растительности и водоемов на территории городов по спутниковым снимкам сверхвысокого пространственного разрешения видимого и ИК диапазонов. В процессе обработки мультиспектральных снимков со спутника DubaiSat-2 получены векторные слои распознанных растительных и водных объектов. Анализ результатов автоматизированной обработки спутниковых снимков показал достаточно высокую точность выделения границ распознанных объектов и хорошую разделимость классов. Разработанная методика позволяет существенно повысить оперативность и достоверность обновления карт крупных городов при одновременном снижении финансовых затрат. Благодаря высокой степени автоматизации предложенная методика может быть реализована в виде геоинформационного веб-сервиса, функционирующего в интересах широкого круга пользователей.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, многоспектральные снимки, спектральные индексы, обработка изображений, обновление карт

© Д. К. Мозговой. 2018

Введение

Обеспечение устойчивого развития густонаселенных территорий при чрезвычайно высоком темпе развития городской инфраструктуры невозможно без получения регулярной и достоверной информации о состоянии и динамике изменений всех типов объектов, в том числе растительных и водных [2, 4, 7]. В настоящее время контроль антропогенных изменений растительности и водных объектов больших городов является одной из наиболее важных и актуальных задач экологического мониторинга мегаполисов во всем мире.

Обзор отечественных публикаций по тематике исследований

Задачам автоматического выделения растительности и водоемов по спутниковым снимкам посвящено достаточно много публикаций последних лет, в том числе и в отечественных электронных изданиях, например [2, 4, 7]. Однако в подавляющем большинстве статей в основном описаны примеры с многоспектральными данными низкого и среднего пространственного разрешения, а также с аэросъемкой. Поэтому с целью популяризации и более широкого внедрения в прикладную сферу технологий обработки данных ДЗЗ с современных спутников сверхвысокого разрешения, кроме узкоспециализированных научных статей, нужны также публикации, которые позволяют в первую очередь в наглядной и понятной даже для неспециали-

стов в области ДЗЗ и ГИС форме демонстрировать возможности спутниковой съемки сверхвысокого разрешения при решении различных прикладных задач.

Формулировка проблемы

Для регулярного обновления баз пространственных данных при актуализации карт мегаполисов традиционно использовались данные наземных измерений и аэрофотоснимки. При этом периодичность обновления карт городов была низкой (обычно один раз в несколько лет), что было обусловлено высокой трудоемкостью сбора и обработки данных. В условиях усиливающейся урбанизации задача повышения оперативности и достоверности обновления карт мегаполисов стоит на первом месте.

Возможные пути решения

Интенсивное развитие в последние годы многоспектральных спутниковых сенсоров сверхвысокого пространственного разрешения с одной стороны, и значительный прогресс в области современных информационных технологий обработки спутниковых снимков с другой стороны позволили существенно ускорить процесс сбора и обработки пространственных данных [1, 6, 11].

Цель и задачи исследований

Основной задачей исследований является разработка методики оперативного мониторинга растительности и водоемов на террито-

* E-mail: m-d-k@i.ua

Спутники с мультиспектральными сканерами сверхвысокого разрешения

Спутник	Год запуска	Страна-оператор	Разрешение			Полоса захвата, км	Точность геопривязки, м
			PAN/MS, м	Радиометрич. бит	Кол-во каналов		
Kompsat-2	2006	Корея	1.0/4.0	10	4	15	нд
GeoEye-1	2008	США	0.4/1.6	11	4	15	2...3
WorldView-2	2009	США	0.46/1.84	11	8	16	5
Pleiades- 1A	2011	Франция	0.5/2	12	4	20	4.5
Kompsat-3	2012	Корея	0.5/2	14	4	17	13
Pleiades- 1B	2012	Франция	0.5/2	12	4	20	4.5
DubaiSat-2	2013	ОАЭ	1.0/4.0	10	4	12	нд
SkySat-1	2013	США	0.8/2.0	11	4	8	нд
KazEOSat-1	2014	Казахстан	1.0/4.0	12	4	10...60	нд
Gaofen-2	2014	Китай	0.8/3.24	10	4	45	50
ASARCO-1	2014	Япония	0.5/2.0	11	6	10	10
WorldView-3	2014	США	0.3/1.2	11/14	8	13	3.5
SkySat-2	2014	США	0.8/2.0	11	4	8	нд
Deimos-2	2015	Канада	1.0/4.0	10	4	12	нд
TripleSat-1.2.3 (DMC-3)	2015	Великобритания	1.0/4.0	10	4	23	нд
Jilin-1A	2015	Китай	0.8/3.2	нд	4	48	нд
Kompsat-3A	2015	Корея	0.4/1.6	14	4	12	13
Cartosat-2C	2016	Индия	0.65/2.0	10	4	10	100
PeruSat-1	2016	Перу	0.7/2.0	12	4	10	нд
SkySat-3...7	2016	США	0.8/2.0	11	4	8	нд
Gokturk-1A	2016	Турция	0.7/2.8	12	4	20	10
SuperView- 1A/B	2016	Китай	0.5/2	11	4	12	20
WorldView-4	2016	США	0.3/1.2	11	4	13	3
Cartosat-2D/2E	2017	Индия	0.65/2.0	10	4	10	100
Mohammed-VIA	2017	Марокко	0.7/2.8	12	4	20	нд
SkySat-8...13	2017	США	0.8/2.0	11	4	8	нд
Cartosat-2F	2018	Индия	0.65/2.0	10	4	10	100
SuperView- 1C/D	2018	Китай	0.5/2	11	4	12	20

*н. д. — нет данных

рии городов по спутниковым снимкам сверхвысокого пространственного разрешения видимого и ИК диапазонов с целью повышения оперативности и достоверности обновления карт городов.

Исходные данные для исследований

В качестве тестового участка для отработки методологии автоматизированного распознавания растительности и водных объектов была выбрана территория города Дубай (рис. 1), одного из крупнейших и динамично развивающихся мегаполисов Объединённых Арабских Эмиратов. Этот город отличается очень высокими темпами изменений городской инфраструктуры (здания, дороги, парки, пляжи и др.), наличием районов как с высотной, так и с малоэтажной застройкой, а также большим количеством разнообразных промышленных и культурных объектов.

В качестве исходных данных были выбраны снимки сверхвысокого пространственного разрешения снятые спутником DubaiSat-2 22 декабря 2015 года, в видимом (рис. 2) и ИК-диапазонах (рис. 3).

Методология исследований

Суть исследований заключалась в проведении автоматизированного распознавания растительности и водных объектов на территории мегаполисов по спутниковым снимкам сверхвысокого пространственного разрешения видимого и ИК диапазонов и сравнения полученных результатов с результатами визуального дешифрирования [9, 10].

Работы, проведенные в рамках исследований, включали следующие этапы обработки и анализа снимков со спутника DubaiSat-2:

- предварительную обработку спутниковых снимков, включающую орторектификацию и повышение пространственного разрешения (рис. 4);
- тематическую обработку спутниковых снимков, включающую расчет спектральных индексов, бинаризацию, морфологическую фильтрацию и векторизацию распознанных растительных и водных объектов (рис. 5);
- определение точности автоматизированного распознавания растительных и водных объектов.

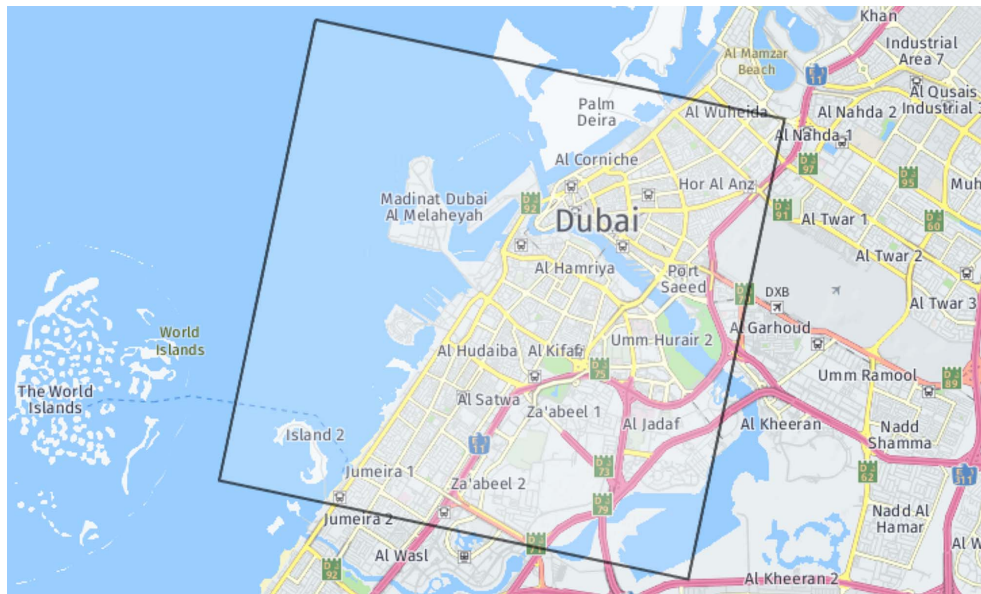


Рис. 1. Территория съемки

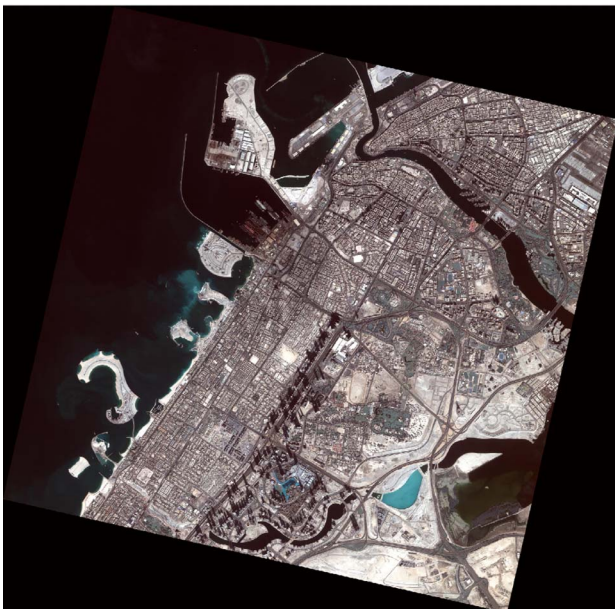


Рис. 2. Исходный снимок (каналы видимого диапазона)

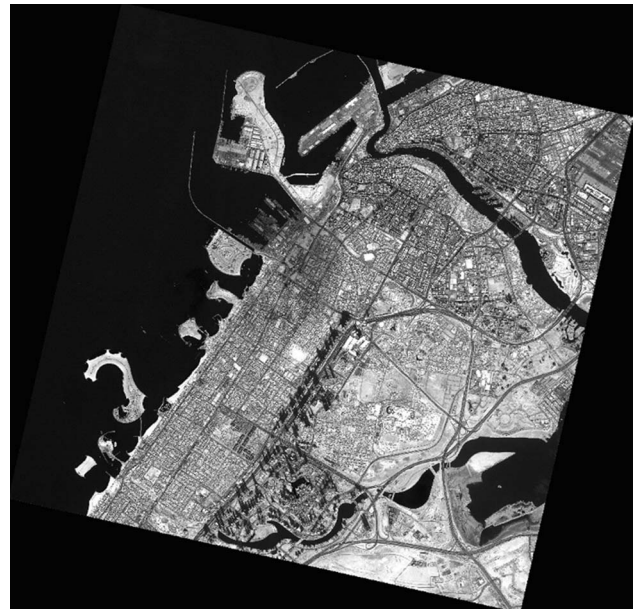


Рис. 3. Исходный снимок (канал ИК диапазона)

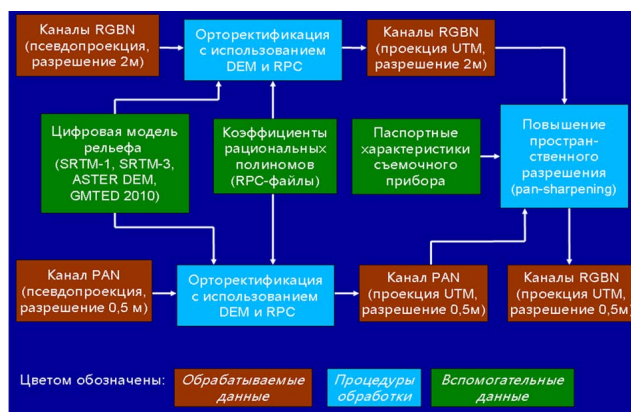


Рис. 4. Основные этапы предварительной обработки спутниковых снимков



Рис. 5. Основные этапы тематической обработки спутниковых снимков

Оценка точности классификации

Наиболее широко используемыми методами определения точности классификации спутниковых снимков являются следующие [8, 10]:

- сопоставление результатов классификации данных ДЗЗ с результатами синхронных наземных наблюдений и измерений, выполненных непосредственно во время спутниковой съемки (или с небольшим временным интервалом);
- сравнение с результатами автоматической классификации этих же данных, полученных с помощью сертифицированных программных пакетов по обработке спутниковых снимков (однако при этом сложно или невозможно оценить точность самого эталона);
- сравнение с результатами ручной классификации, проведенными операторами и оцененными экспертной группой (этот метод используется для сравнительно небольших объемов данных или для ограниченного набора тестовых областей, которые должны быть равномерно распределены на исследуемой территории).

Ввиду отсутствия данных наземных измерений по исследуемой территории, в данной работе для оценки точности классификации использован последний из перечисленных выше методов: сравнение результатов автоматической классификации с результатами ручной классификации, которая была выполнена для отдельных фрагментов RGB-изображения в интерактивном режиме в программной среде QGIS. Экспертная оценка точности полученного таким образом эталона в среднем составила 3...5% для растительных объектов и 2...3% для водных.

Метрики точности классификации

При обработке спутниковых снимков для количественной оценки точности автоматической классификации чаще всего используются следующие метрики [8, 10]:

- матрица ошибок классификации для одного класса, позволяющая определить количество нераспознанных пикселей класса, количество ложно распознанных пикселей класса, а также общую точность результата классификации;
- матрица соответствий для нескольких классов (она вычисляется практически во всех программных пакетах по обработке данных ДЗЗ);
- статистические показатели (например, хорошо известный и часто используемый коэффициент Каппа, вычисляемый по матрице соответствий).

В данном случае в качестве основных количественных показателей точности классификации были выбраны матрица соответствий для двух классов (вода и растительность) и коэффициент Каппа.

Требования к программному и аппаратному обеспечению

Размеры файлов мультиспектральных снимков сверхвысокого пространственного разрешения, как правило, достаточно большие (например, одна сцена, снятая в видимом и ИК-диапазоне, может занимать несколько Гбайт). Поэтому для оперативной обработки таких снимков в реальном времени желательно использовать современные компьютеры с многоядерными процессорами класса Intel I-7 или выше и объемом оперативной памяти не менее 64 Гбайт. Программное обеспечение может быть как платным (ERDAS, ENVI, ArcGIS и т. п.), так и свободным (SNAP, SAGA, GRAAS, QGIS и т. п.), работающим как в среде MS Windows, так и в среде Linux.

Для обеспечения большей степени автоматизации процедур обработки возможно использование соответствующих инструментов (например, Imagine Model Maker в пакете ERDAS, Graph Builder в пакете SNAP) или языков программирования (например, IDL в пакете ENVI, Python+GDAL в системе QGIS).

Результаты исследований

В ходе обработки исходных многоспектральных снимков со спутника DubaiSat-2 были получены RGB-снимки повышенного разрешения (рис. 6) и индексные изображения NDVI и NDWI (рис. 7).

В результате бинаризации, морфологической фильтрации и векторизации индексных изображений были получены векторные слои распознанных растительных и водных объектов (рис. 8). При этом точность автоматической классификации для различных тестовых участков была в пределах 86...93%, а значения коэффициента Каппа были в пределах от 0.71 до 0.85.

Анализ результатов обработки снимков показал достаточно высокую точность выделения границ распознанных объектов и хорошую разделимость классов растительности и воды на различных тестовых участках при одних и тех же настройках порогов бинаризации. Однако, следует отметить, что на затененных участках все же наблюдалось незначительное ложное выделение воды (см. рис. 8), а также ложное выделение растительности (рис. 9). Последнее, кроме того, может быть связано и с сезонным цветением воды.

Основные преимущества предложенной методики по сравнению с наземными методами измерений и аэрофотосъемкой [8, 10]:

- широкая обзорность (съемка обширных территорий за короткий срок);
- высокая оперативность (выполнение съемки и обработка занимают менее 1 суток);
- минимизация субъективных погрешностей (высокая степень автоматизации процедур обработки);

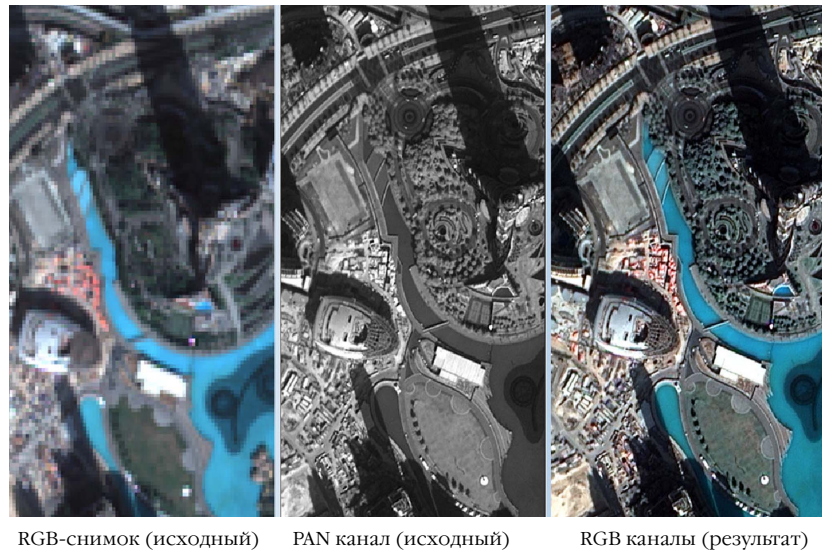


Рис. 6. Фрагменты исходных снимков и результат повышения разрешения

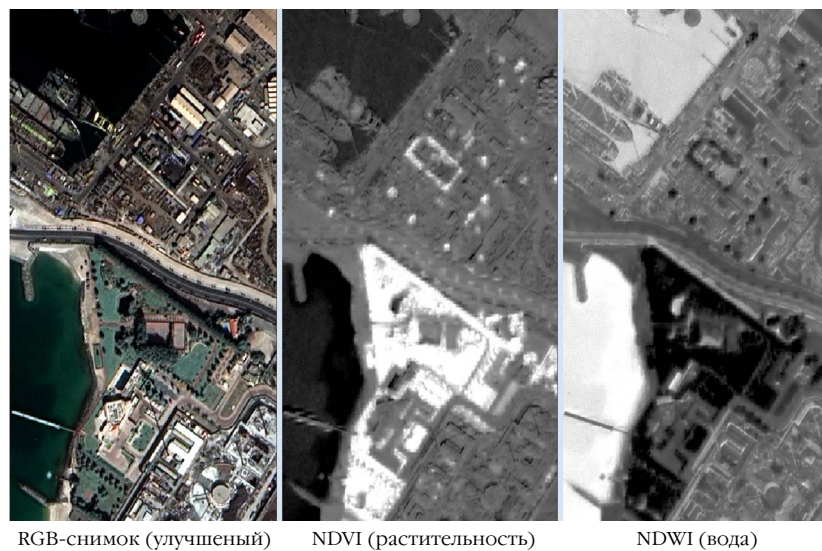


Рис. 7. Фрагменты RGB-снимка и индексных изображений NDVI и NDWI

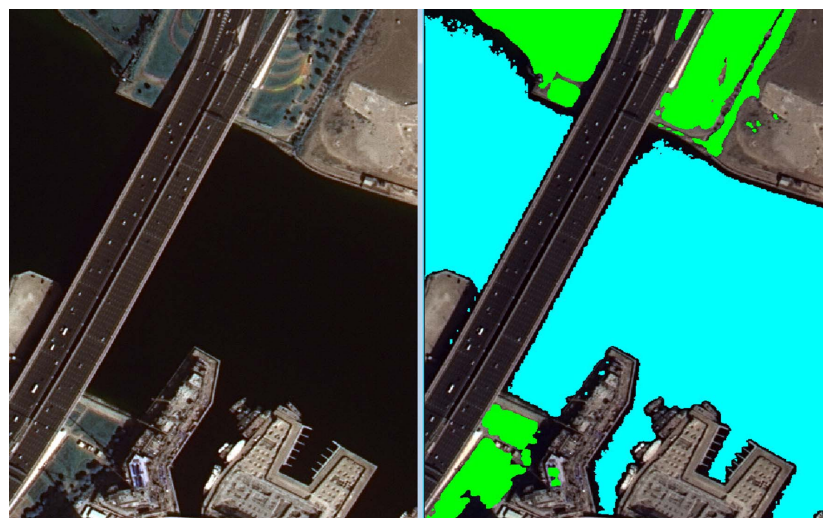
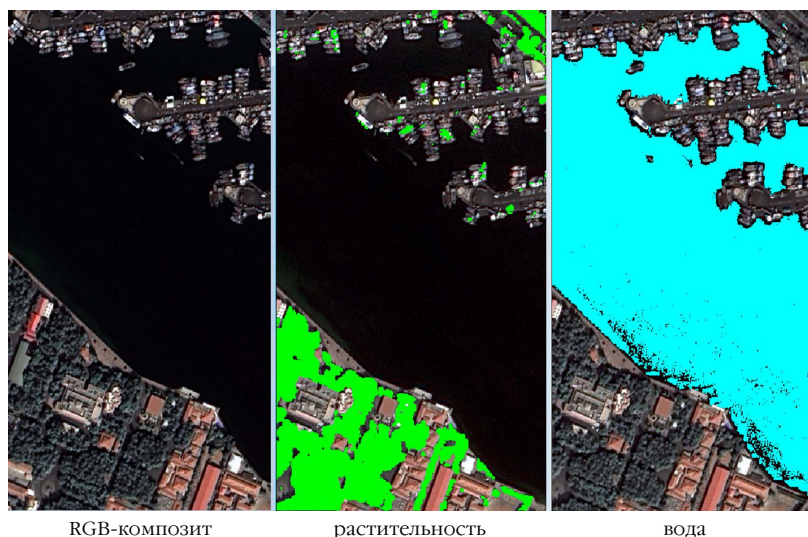


Рис. 8. Пример автоматизированного распознавания растительных и водных объектов



RGB-композит

растительность

вода

Рис. 9. Пример ложного выделения растительности (вверху посредине)

- максимальная достоверность (минимизация ошибок и исключение фальсификации);
- высокая периодичность (возможность осуществлять съемку с периодичностью до нескольких раз в сутки);
- междисциплинарность (возможность использования одних и тех же снимков для решения широкого перечня прикладных задач в интересах различных потребителей);
- отсутствие необходимости получения юридических разрешений на съемку объектов, что позволяет снимать любые желаемые объекты;
- полная безопасность (можно проводить мониторинг не контактируя при этом с опасным объектом, исключая риски для здоровья и жизни людей);
- максимальная доступность (можно снимать объекты, которые располагаются в труднодоступных местах);
- высокая детальность, достаточная для большинства практических задач (пространственное разрешение до 30 см для коммерческих спутников);
- синхронность получения данных (одновременное наблюдение за большим количеством объектов, расположенных на значительном удалении друг от друга);
- высокая экономическая эффективность (существенное сокращение затрат, особенно при использовании специализированных веб-сервисов).

Область практического применения предложенной методики достаточно обширна, поскольку она позволяет более эффективно и оперативно проводить обновление карт крупных городов, которые в настоящее время повсеместно используются представителями самых различных отраслей:

- государственными структурами (муниципальными

службами, контролирующими органами, ведомственными организациями и др.);

- коммерческими структурами (туристическими агентствами, торговыми фирмами, транспортными компаниями, частными предпринимателями и др.);
- населением, проживающим на территории мегаполисов (как правило, это самый массовый пользователь картографических веб-сервисов).

Использование в образовательном процессе

Материалы исследований использованы при подготовке лекционных и лабораторных занятий, включенных в состав учебно-методического комплекса «Обработка многоспектральных спутниковых снимков сверхвысокого пространственного разрешения», который преподается студентам старших курсов Днепровского национального университета имени Олеся Гончара в рамках учебной дисциплины «Системы ДЗЗ», а также используется при написании курсовых и дипломных работ. В ходе лабораторных работ студентами ведется экспериментальная отработка и тестирование предложенной методики с использованием многоспектральных снимков различных участков Земли, полученных с действующих спутников ДЗЗ.

Направления дальнейших исследований

В настоящее время ведутся работы по модернизации данной методики с целью последующей ее реализации в виде геоинформационного веб-сервиса [3, 5]. Это даст по сравнению с использованием специализированных программ и мощных компьютеров дополнительные существенные

организационные, технические и экономические преимущества, такие, как:

- возможность работы непосредственно в браузере, что не требует дополнительного программного обеспечения, устанавливаемого у клиента;
- программная и аппаратная независимость, что позволяет использовать данный веб-сервис на мобильных устройствах;
- возможность сохранения результатов обработки снимков на сервере, что позволяет всем клиентам пользоваться веб-сервисом независимо от их места нахождения;
- высокая экономическая эффективность (не требуется закупка мощных компьютеров и дорогостоящего программного обеспечения);
- минимальные требования к уровню подготовки пользователей (нет необходимости тратить много времени на изучение больших и сложных программных пакетов).

Также ведется тестирование предложенной методики с использованием многоспектральных снимков различных участков Земли, полученных с различных оптико-электронных спутников сверхвысокого разрешения с целью определения оптимальных параметров обработки для основных типов современных бортовых сканеров с учетом региона и условий съемки. Кроме того, проводится успешное тестирование упрощенной версии данной методики (без процедур предварительной обработки) с использованием многоспектральных аэрофотоснимков видимого и ИК-диапазонов с разрешением 7.5...15 см.

Выводы

Предложена методика оперативного мониторинга растительности и водоемов на территории городов по спутниковым снимкам сверхвысокого пространственного разрешения видимого и ИК-диапазонов, позволяющая существенно повысить оперативность и достоверность обновления карт крупных городов при одновременном снижении финансовых затрат. Благодаря высокой степени автоматизации и минимизации необходимых вычислений (по сравнению с методами, использующими сложные классификаторы и нейронные сети) разработанная методика может быть реализована в виде геоинформационного веб-сервиса, функционирующего как в интересах широкого круга государственных служб и коммерческих структур, так и в интересах населения мегаполисов.

Литература

1. Бурштинська Х. В. Дослідження методів класифікації космічних знімків високого розрізнення / Х. В. Бурштинська, Б. В. Поліщук, О. Ю. Ковальчук // Геодезія,

- картографія та аерофотознімання: зб. наук. пр. — Львів, — 2013, — Вип. 78. — С. 101–110.
2. Використання матеріалів дистанційного зондування землі при вирішенні завдань екологічної геоморфології в міських умовах (на прикладі долини р. Либідь в м. Києві) [Електронний ресурс] / Н. В. Пазинич, Л. П. Ліщенко, А. Г. Мичак, В. Є. Філіпович, О. М. Теремченко // Український журнал дистанційного зондування Землі. — 2015. — № 5. — С. 33–36. — Режим доступу до журналу: <http://www.ujrs.org.ua/ujrs>. — Назва з екрану.
3. Мозговой Д. К. Мониторинг природных и антропогенных процессов с помощью веб-сервиса Landsat Viewer / Д. К. Мозговой, В. В. Васильев // Вісник ДНУ. Ракетно-космічна техніка. — 2016. — Вип. 13, — Т. 24. — № 4. — С. 95–101.
4. Соколовська А. В. Космічний моніторинг екологічного стану міських територій (на прикладі міста Києва) / А. В. Соколовська // Косм. наука технол. — 2013. — № 19(4). — С. 44–49.
5. Станкевич С. А. Геоінформаційний сервіс оброблення даних для оцінювання стану рослинності урбанізованих територій / С. А. Станкевич, І. О. Пестова // Вісник геодезії та картографії. — 2014. — № 3. — С. 23–26.
6. Томченко О. В. Вегетаційні індекси, як інструмент оцінки і моніторингу стану земельних ресурсів / О. В. Томченко, А. В. Хижняк // Новітні технології: зб. наукових праць ПВНЗ “Університет новітніх технологій”. — 2016. — № 1 (1). — С. 13–15.
7. Філіпович В. Є. Особливості космічного моніторингу урбанізованих ландшафтів / В. Є. Філіпович // Фізична географія та геоморфологія. — 2013. — Вип. 3. — С. 143–150.
8. Automatic vegetation classification using multispectral aerial images and neural network [Електронний ресурс]. / V. V. Hnatushenko, D. K. Mozgovoy, I. Ju. Serikov, V. V. Vasyliiev // Системні технології. — Режим доступу: http://st.nmetau.edu.ua/journals/107/7_a_en.66-72.pdf. — Названня з екрану.
9. Mozgovoy D. K. Automated recognition of vegetation and water bodies on the territory of megacities in satellite images of visible and IR bands. ISPRS Ann. Photogramm / D. K. Mozgovoy, V. V. Hnatushenko, V. V. Vasyliiev // Remote Sens. Spatial Inf. Sci. — 2018. — IV-3. — P. 167–172.
10. Mozgovoy D. Accuracy Evaluation of Automated Object Recognition Using Multispectral Aerial Images and Neural Network / D. Mozgovoy, V. Hnatushenko, V. Vasyliiev // International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2018). — Shanghai, East China Normal University, May 11–14, 2018.
11. Satellite Missions Database [Електронний ресурс] / eo Portal Directory. — Режим доступу: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>. — Названня з екрану.

ОПЕРАТИВНИЙ СУПУТНИКОВИЙ МОНІТОРИНГ РОСЛИННОСТІ ТА ВОДОЙМ НА ТЕРИТОРІЇ МІСТ

Д. К. Мозговой

Запропоновано методику оперативного моніторингу рослинності та водойм на території міст за супутниковими знімками надвисокого просторового розрізнення видимого та інфрачервоного діапазонів. В процесі обробки мультиспектральних знімків зі супутника DubaiSat-2 отримані векторні шари розпізнаних рослинних і водних об'єктів. Аналіз результатів автоматизованої обробки супутникових знімків показав досить високу точність виділення кордонів розпізнаних об'єктів і хорошу роздільність класів. Розроблена методика дозволяє істотно підвищити оперативність і достовірність поновлення карт великих міст при одночасному зниженні фінансових витрат. Завдяки високому ступеню автоматизації запропонована методика може бути реалізована у вигляді геоінформаційного веб-сервісу, який може функціонувати в інтересах широкого кола користувачів.

Ключові слова: супутниковий моніторинг, багатоспектральні знімки, спектральні індекси, обробка зображень, оновлення карт

OPERATIONAL SATELLITE MONITORING VEGETATION AND WATER OBJECTS IN THE TERRITORY OF CITIES

D. K. Mozgovoy

A technique for the operational monitoring of vegetation and water objects in the territory of cities by satellite images of ultra-high spatial resolution of the visible and IR ranges is proposed. In the process of processing multispectral images from the satellite DubaiSat-2, vector layers of recognized vegetation and water objects were obtained. The analysis of the results of the automated processing of satellite images showed a sufficiently high accuracy of distinguishing the boundaries of recognized objects and a good separation of classes. The developed methodology allows to significantly increase the efficiency and reliability of updating maps of large cities while reducing financial costs. Due to the high degree of automation, the proposed methodology can be implemented in the form of a geoinformation web service, functioning in the interests of a wide range of users.

Keywords: satellite monitoring, multispectral images, spectral indices, image processing, map updating

УДК 631.4:551.43

Визначення впливу водного режиму ґрунтів на ступінь їх деградації з використанням космічних знімків та даних наземної польової завірки

І. Ф. Романчук *

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, Київ, Україна

Застосовано польові та дистанційні методи визначення вологості у верхньому шарі ґрунтового покриву. співставлення даних польових вимірювань вологості ґрунту та результатів обробки знімків Sentinel-2 виявило їх кореляційну залежність. на основі даних про вміст води в ґрунтовому шарі виявлено типи деградації присутні на території спостереження, проаналізовано стан рослинності. дослідження проведено на території Барішівського району Київської області, околиці м. Березань.

Ключові слова: вологість ґрунту, прогноз родючості, родючість ґрунту, Sentinel, мікрозападні форми рельєфу, індекс NDVI, індекс NWI

© І. Ф. Романчук. 2018

Вступ

Родючість ґрунтів перш за все залежить від наявності гумусу. За висновками періодичної доповіді про стан родючості ґрунтів державної установи “Інститут охорони ґрунтів України”, ґрунти, що втрачають значну частку гумусу, стають менш родючими [4]. Нажаль, процес дегуміфікації є сталим процесом. За результатами агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення протягом останніх 4-х турів (1986–2005 рр.) вміст гумусу в ґрунтах України зменшився на 0.5 % (рис. 1).

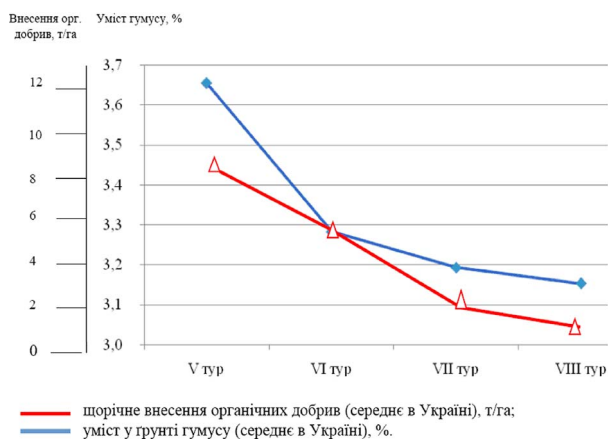


Рис. 1. Динаміка вмісту гумусу в ґрунті та внесення органічних добрив [4]

Втрачаючи гумус, ґрунти знижують свою родючість. основними факторами, які впливають на родючість є вміст поживних для рослин речовин, наявність

вологи, фізико-хімічний склад, біологічні властивості [2]. Виявлення водних властивостей і водного режиму ґрунтів є важливим фактором при їх раціональному використанні. Сезонна динаміка ґрунтових процесів в значній мірі протікає під впливом природних вод. Продуктивність ґрунтів найтіснішим чином пов'язана з їх водним режимом. Заходи меліорації, попередження посухи, боротьба з ерозією і засолення спираються на знання про гідрологію ґрунтів. [3]. Вміст води в ґрунті виявляє його тип та схильність до зміни властивостей [7].

Урожайність сільськогосподарських культур є тим кращою, чим більша родючість ґрунту. Негативним фактором родючості і врожайності є деградація ґрунтів. Оцінки та вивчення процесів деградації ґрунтів є актуальними для проведення сталого землекористування.

Метою роботи є визначення вологих ділянок ґрунтової поверхні за матеріалами дистанційного зондування Землі (ДДЗ) та виявлення типів деградації ґрунтів.

Методи досліджень

Методика визначення вологості ґрунтів, що пропонується, складається з трьох етапів. На першому — польові дослідження, відбір проб ґрунту, на другому — хімічний аналіз проб, їхня цифрова обробка, а на третьому — узгодження та кореляція результатів перших двох етапів.

Перший етап (польові дослідження) було проведено на досліджуваній ділянці (полігоні ДДЗ) Барішівського району Київської області. На північний схід від міста Березань було обрано ділянки сільськогосподарських угідь кукурудзи та пшениці. Координати центру досліджень: 50°20'32.52" пн. ш.

* E-mail: i.romanciuc@gmail.com

та 31°34'48.22" сх. д. На ділянках спостерігаються такі типи деградації ґрунтів, як переущільнення, поверхневий змив, підтоплення в межах мікрозападинних форм рельєфу.

На місцевості відбиралися проби для визначення вмісту вологості у ґрунтовому покриві. Проби ґрунту відбиралися по профілю мікрозападин. Найвищі точки опробування розташовані на вододілах; — далі на схилах мікрозападин, а найнижчі точки — у центральній частині мікрозападин.

Вологість ґрунту визначалась у лабораторних умовах термостатно-ваговим методом, що полягає у висушуванні та зважуванні зразків ґрунту. У лабораторії вологий ґрунт, який був відібраний на ділянках під час польових робіт спочатку зважували у бюксі та сушили у сушильній шафі при температурі 105°С не менш 6-ти годин, до постійної ваги. Далі зважували висушений ґрунт у бюксі.

Вологість ґрунту визначається за формулою:

$$H_2O = \frac{B_1 - B_2}{B_2 - B} \cdot 100\% \quad (1)$$

де H_2O — вологість ґрунту, (%) від маси сухого ґрунту, B — маса порожнього бюксу (r), B_1 — маса бюксу з вологим ґрунтом до сушки (z), B_2 — маса бюксу з сухим ґрунтом після сушки (r) [11].

За результатами даних встановлено, що найбільш сухою частиною поля є привододільні ділянки, а днища мікрозападин відповідають найвологішим показникам.

На другому етапі досліджень була проведена обробка даних дистанційного зондування Землі — космічних знімків (КЗ) супутника Sentinel-2 Європейського космічного агентства (<https://sentinels.copernicus.eu>). На офіційному сайті Sentinel було переглянуто та обрано знімки, які відповідали датам польових робіт.

Класифікація космічних знімків дозволила виявити найпроблемніші від'ємні форми рельєфу. Обробка космічних знімків включала методи класифікації: максимальної правдоподібності (*maximum likelihood*), відстані махаланобіса (*mahalanobis distance*), мінімальної відстані (*minimum distance*). Найкращі результати було отримано при використанні методу мінімальної відстані. Результати класифікації дозволили виявити найбільш вологі ділянки. На КЗ Sentinel-2 від 08.04.2016 чітко виділяються мікрозападини. Блакитні плями на класифікованих КЗ відображають найбільш зволожені ділянки території, які відповідають мікрозападинам (рис. 2).

Для виявлення скупчення мікрозападин, які характеризуються підвищеною зволоженістю земного покриття, ефективним є використання водних індексів, які обчислюються за матеріалами багатоспектральної та гіперспектральної космічної зйомки, використовуючи спектральне відбиття у інфрачервоному діапазоні

електромагнітних хвиль, що добре відображають зволожені ділянки земного покриття [7].

Вміст вологи у верхньому шарі ґрунтового покриття обчислювався за допомогою нормалізованого водного індексу (*normalized water index - nwi*), що розраховується на основі нормованої різниці спектрального відбиття в зеленій та середній інфрачервоній смугах спектра багатоспектральних супутникових даних. Індекс розраховується за формулою:

$$NWI = \frac{GR(560) - SWIR(1650)}{GR(560) + SWIR(1650)} \quad (2)$$

де $GR(560)$ — спектральне відбиття в діапазоні довжини хвиль 540–580 нм, що відповідає зеленому спектральному каналу (канал 3) зйомки Sentinel-2; $SWIR(1650)$ — спектральне відбиття в діапазоні довжини хвиль 1570–1660 нм, що відповідає середньому інфрачервоному каналу (11 канал) Sentinel-2.

За значеннями індексу було встановлено розповсюдження западин мікрорельєфу, які характеризуються підвищеною зволоженістю і, як правило, відповідають ділянкам живлення підземних вод [12, 7].

Вологість та родючість ґрунтів мають прямий взаємозв'язок. Щоб побачити ступень родючості, було використано вегетаційний індекс *ndvi* (*normalized difference vegetation index*) — нормалізований різницею вегетаційний індекс [6, 8, 7]. Вегетаційний індекс розраховується за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (3)$$

де NIR — значення спектрального відбиття в діапазоні довжин хвиль, що відповідає червоній зоні спектру, Red — значення спектрального відбиття в діапазоні довжин хвиль, що відповідає ближній інфрачервоній зоні спектру.

Індекси розраховувалися на наступні дати, які відповідали польовим роботам: 08.04.2016, 28.04.2016, 17.06.2016 та 17.07.2016 р.

Результати досліджень

Щоби зробити оцінку можливого кількісного зв'язку між значеннями водного індексу *nwi* та процентним вмістом вологи в поверхневому шарі ґрунту (10 см), для подібних метеорологічних умов на час зйомки, було виконано оцінку кореляції між значеннями вологості ґрунту поверхні в певних точках та індексу *nwi*, обчисленого за формулою (2) у пікселях, що відповідали точкам опробування.

Лінійна кореляція із використанням індексу розраховувалась за формулою:

$$Y = BX + A \quad (4)$$

де A, B — фіксовані коефіцієнти, X — змінна, яка відповідає вологості земного покриття у %. Ко-

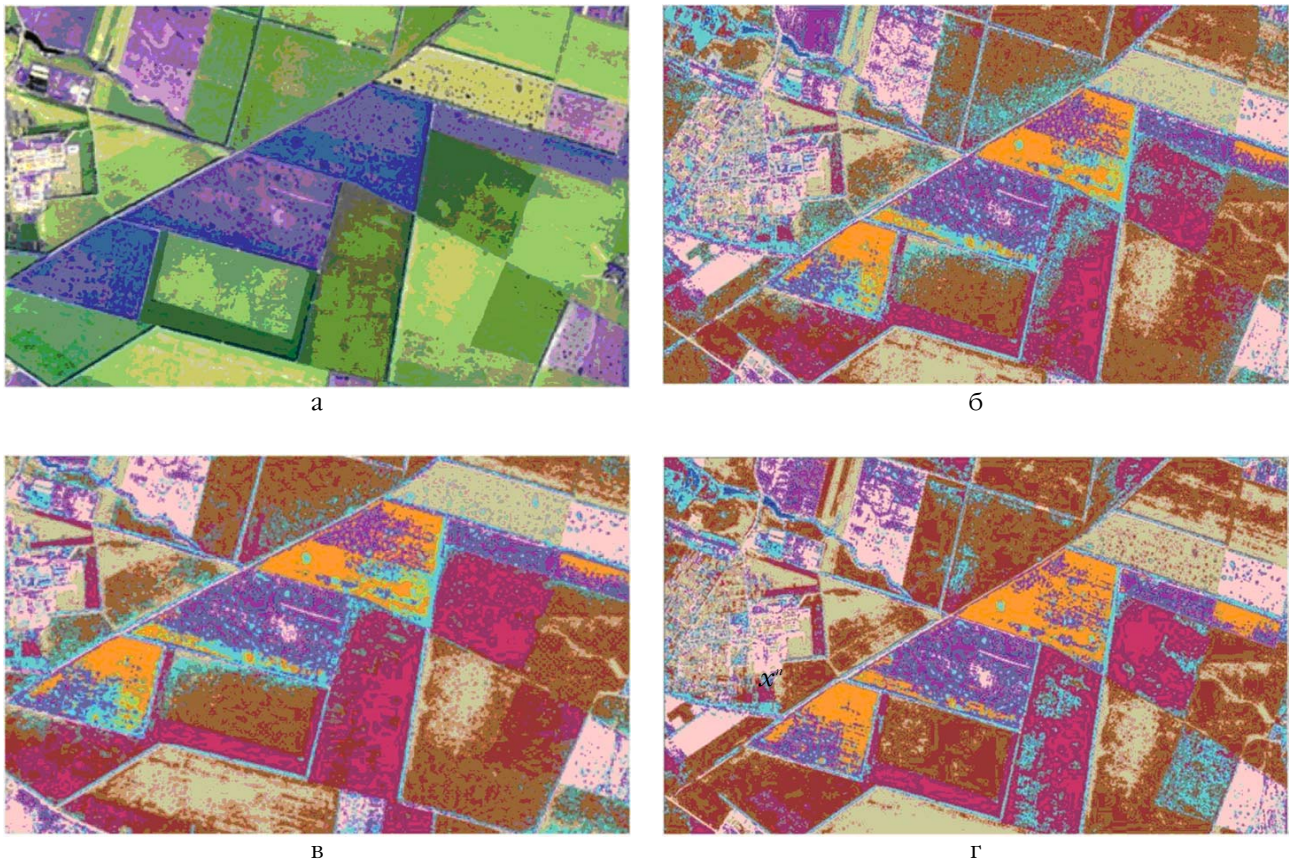


Рис. 2. Знімки супутника Sentinel-2 та класифікація сільськогосподарських угідь м. Березань: а) фрагмент знімку у комбінації каналів swir+nir+green; б) метод максимальної правдоподібності; в) метод відстані Махаланобіса; г) метод мінімальної відстані

ефіцієнт кореляції $R^2 = 0.56$. На рис. 3 залежність відображено прямою лінією.

Поліноміальна кореляція обчислена за формулою:

$$Y = a_0 + a_1x + \dots + a_n \quad (5)$$

де a — фіксовані коефіцієнти, x — змінна, яка відповідає вологості земного покриття у %. Поліноміальна кореляція другого порядку має значення $R^2 = 0.99$. На рис. 3 поліноміальна залежність відображена параболою.

Попередньо отримані кореляційні залежності між значенням вологості ґрунту та індексом nwi дозволяють проводити оцінку розподілу зволоженості відкритого ґрунтового покриття за даними Sentinel-2 за умови калібрування залежностей, використовуючи наземні завіркові дані [6].

У рамках дослідження для тестового полігону за даними Sentinel-2 виконано аналіз розподілу мікрозападинних форм рельєфу, які в лісостеповій зоні України мають значне поширення, можуть займати великі площі і впливати на водний режим території [10]. Окрім того в межах мікрозападин існують певні особливості ґрунтоутворення та рослинності.

Як правило навесні, після сніготанення та злив, на поверхню надходить значна кількість вологи на-

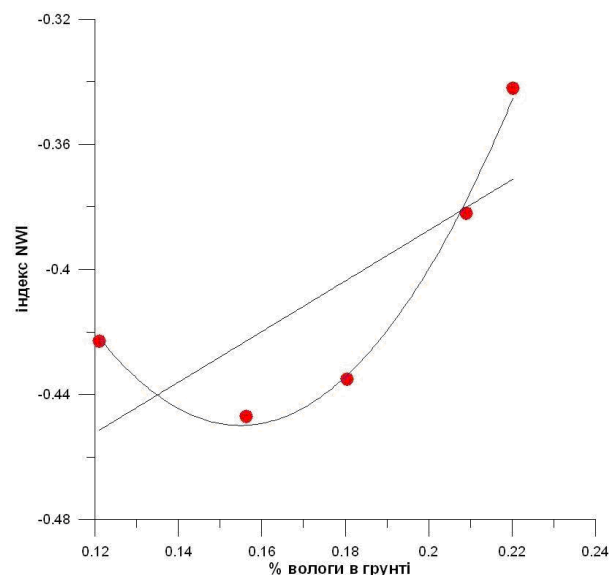


Рис. 3. Графік розподілу вологості ґрунтового покриття у точках опробування відібраних 08.04.2016р. точки — значення вологості поверхнього шару ґрунту, лінії—кореляційні криві

сичуючи та перенасичуючи ґрунтовий покрив [5]. У цей період у днищах мікрозападин накопичується значна кількість вологи. За результатами розрахунків відсотку вологості ґрунту та водного індексу

ndvi, можна побачити, що як правило центр мікрозападини в два рази вологіший за вододільні ділянки [6]. Застійний водний режим в центральних частинах значних за розмірами мікрозападин, глибина яких перевищує 1 м, призводить до заболочування, затримки росту посівів або їх вимокання. У перезволожених та заболочених мікрозападинах відбувається деградація орних земель, типові чорноземи заміщуються чорноземно-лучними ґрунтами. В результаті процесів оглеєння на дні мікрозападин змінюється видове різноманіття [1, 9, 10]. На ділянках дослідження днища заростають чагарниками і гідрофільною трав'янистою рослинністю: очерет (*Scirpus*), малочай болотний (*Euphorbia palustris*), а також мохи різних видів (*Bryophyta*).

Слід відмітити, що в межах неглибоких мікрозападин, весняне затоплення швидко зникає. Вже до початку літа пригніченість посівів у западинах зменшується, ближче до середини літа рослинність стає більш рівномірною. Ґрунти літом у мікрозападинах має кращу зволоженість. Внаслідок цього центральні частини мікрозападин посіви мають кращі показники біомаси, що підтверджує вегетаційний індекс *ndvi*.

У процесі розвитку збільшуються площа та глибина мікрозападин, спостерігається об'єднання низки западин долиноподібними безрусловими пониженнями у систему від'ємних форм рельєфу в межах яких формуються лугові ґрунти з іншими типами трав'янистості та чагарникової рослинності і з більш потужною кореневою системою та кроною (рис. 4, 5).

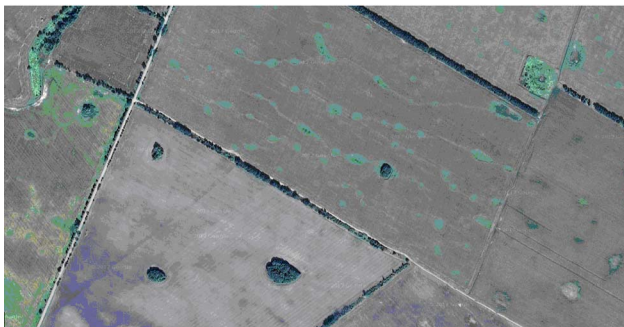


Рис. 4. Мікрозападини та долиноподібні пониження, що їх з'єднують

За даними карти схильності ґрунтів до переущільнення інституту ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського, на території дослідження виявлена висока загроза процесу переущільнення ґрунтового покриву. Ці процеси призводять до зниження циркуляції води у горизонтах ґрунтів, та як наслідок до площинного змиву. У пониженні ділянки полів змивається не тільки верхній гумусний шар ґрунтового покриву, а також добрива, якими обробляється поле [8]. У мікрозападинах таким чином концентрується не тільки вода, а й органічні та міне-

ральні речовини [1, 5]. Показники рослинності краще у мікрозападинах за рахунок більшого зволоження у літній період а також за рахунок змивання з поверхні поживних речовин у центр западин, таким чином формуючи родючу поверхню для рослинності.

Висновки

Дослідження підтвердили, що для розрахунків значення вологості ґрунтового покриву підходять знімки високої просторової розрізненості, а саме — КЗ Sentinel. Використаний водний індекс дає гарну кореляцію зі значеннями вологості ґрунтового покриву, відібраними на місцевості, що підтверджує доцільність його використання.

Методом спостереження вологості в межах детальних ділянок добре виявляється такий вид деградації як мікрозападинні форми рельєфу земної поверхні. виявлено два види впливу мікрозападин на стан ґрунтового покриву і врожайності. Перший — незворотна зміна ґрунту, рослинності, водообігу у значних за розмірами мікрозападинах (діаметр 200 м, глибина 1 м) і, як наслідок, виведення їх з орних земель. Другий — в межах мікрозападин незначних за розмірами та улоговин, що їх з'єднують відмічається підвищене зволоження, збільшення потужності гумусного шару та кількості добрив за рахунок змиву з оточуючих ділянок, що проявляється у покращенні показників рослинного покриву.

На території Баришівського району Київської області переважають такі типи деградації як виснажен-



Рис. 5. Загальний вигляд території дослідження на космічному знімку Google

ня ґрунтового покриву, нерівномірне зволоження поверхневих відкладів за рахунок просадкових явищ, площинний змив верхніх шарів ґрунту.

Література

1. Азімов О. Т. Дослідження геодинамічних процесів у зонах аномального масопереносу / О. Т. Азімов, В. М. Бублясь // Вісник КНУ. Геологія. — 2005. — №34–35. — С. 97–102.
2. Долгов С. И. Основные закономерности поведения по-

- чвенной влаги и их значение в жизни растений / С. И. Долгов. Биологические основы орошаемого земледелия. — М.: 1957. — С. 635–654.
3. Ковда В. А. Основы учения о почвах. Общая теория почвообразовательного процесса / В. А. Ковда. — Кн. 2. — М.: — Наука, 1973. — 468 с.
 4. Національна доповідь про стан родючості ґрунтів України [електронний ресурс] / Мін. аграрн. політ. України, Нац. акад. аграрн. наук. України; затвердж.: Присяжнюк М. В., — К.: 2010. — 113 с. — Режим доступу <http://www.ioqu.gov.ua/>. — Назва з екрану.
 5. Райська А. Ю. тенденція розвитку мікрозападинних морфоскульптур на меліоративних землях на прикладі осушувальної системи “кучинівка” / А. Ю. Райська, А. С. Гнида // Наукові записки СумДПУ імені А. С. Макаренка. Серія географічні науки. — 2017. — вип. 8. — С. 34–39.
 6. Романчук І. Ф. Оцінка вологості ґрунту за допомогою супутникових знімків Sentinel-2 (на прикладі Баришівського полігону Київської області) / І. Ф. Романчук, О. І. Сахацький, О. А. Апостолов // Допов. Нац. акад. наук Укр. — 2018. — № 1. — С. 60–66.
 7. Сахацький О. І. Використання матеріалів багатоспектральних супутникових зйомок для оцінки водообміну ґрунтових вод (на прикладі басейну р. Трубіж) / О. І. Сахацький // Геол. журн. — 2009. — № 3. — С. 79–89.
 8. Сахацький О. І. Методологія використання матеріалів багатоспектральної космічної зйомки для вирішення гідрогеологічних задач: дис. док. геол. наук: 05.07.12 : захищена 23.03.10 / Сахацький Олександр Ілліч. — К., 2009. — 384 с.
 9. Слюта В. Б. Характеристика западинного рельєфу басейну р. Удай, його особливості та класифікація / В. Б. Слюта // Меліорація і водне господарство. — 2011. — вип. 99. — С. 137–147.
 10. Стародубцев В. М. К оценке пространственной неоднородности почвенного покрова равнинной лесостепи / В. М. Стародубцев, Л. В. Анискевич, Б. В. Урбан // Научные труды sworld. — 2015. — №3 (40). — Т. 11. — С. 113.
 11. Цитович И. К. Химия с сельскохозяйственным анализом / И. К. Цитович. — Изд. 2-е, Перераб и доп. — М.: Колос, 1974. — 527 с.
 12. Шестопалов В. М. В. Н. О формировании западно-канальных структур миграции / В. М. Шестопалов, В. Н. Бублясь // Геол. журн. — 2016. — №3 (356). — С. 73–88.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЕ ВОДНОГО РЕЖИМА ПОЧВЫ НА СТЕПЕНЬ ИХ ДЕГРАДАЦИИ ИСПОЛЬЗУЯ КОСМИЧЕСКИЕ СНИМКИ И ДАННЫЕ НАЗЕМНОЙ ПОЛЕВОЙ ЗАВЕРКИ

І. Ф. Романчук

Использованы полевые и дистанционные методы определения влажности в верхнем слое почвы. Сопоставлением данных полевых измерений влажности почвы и результатов обработки снимков Sentinel-2 выявлена их корреляционная зависимость. На основе данных о содержании влажности в почвенном слое определен тип деградации на территории исследования, проанализировано состояние растительности. исследования проводились на территории барышевского района Киевской области, близ г. Березань.

Ключові слова: влажность почвы, деградация почвы, снимки sentinel, микрозападинные формы рельефа, индекс ndvi, индекс nwi

INVESTIGATION THE INFLUENCE OF SOIL'S MOIDTURE REGIME ON THEIR DEGRADATION USING THE REMOTE SENSING AND GROUND FIELD VERIFICATION

I. F. Romanciuc

In the article were used the field and distance methods of determination of moisture content in the upper layer of soil cover. Comparison of field measurements of soil moisture and Sentinel-2 image processing results revealed their correlation. On the basis of the moisture content data in the soil layer and the vegetation state analysis the soil fertility prediction was made. The research were done near Berezan, the Baryshivskyi raion in east-central Kiev Oblast of Ukraine.

Keywrds: Soil Moisture, Soil Degradation, Sentinel, Microfacial Relief, NDVI Index, NWI Index

ПРАВИЛА ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ АВТОРІВ

Дані Правила складено на основі “Вимог ВАК до наукової статті, опублікованої у фаховому виданні” (<http://lib.exdat.com/docs/740/index-3150.html>) а також “Положення про електронні наукові фахові видання” (<http://vak.org.ua/fv/>).

Представлення рукописів. Рукописи надсилають до редакції в електронному вигляді за адресою: o.kudriashov@ujrs.org.ua. До рукопису додають акт експертизи установи де виконана робота, відомості про авторів (ім'я, по-батькові, прізвище, посада, науковий ступінь та вчене звання, повна офіційна назва установи, адреса, телефон та електронна адреса відповідального автора), а також “Авторську згоду” за підписом відповідального автора (скан у форматі JPEG або PDF) (Додаток).

Загальні вимоги. Стаття може бути написана українською, російською або англійською мовами і повинна мати резюме (abstract), а також ключові слова (keywords). Анотація повинна висвітлювати результати досліджень а не перелік питань, що розглядаються у статті. Рекомендується розбити матеріал статті на розділи (вступ, висновки і т. ін.). У кінці рукопису розміщують список використаних джерел, а після нього — назву статті, ініціали та прізвища авторів, резюме та ключові слова двома мовами, (російською та англійською, українською та англійською, українською та російською, відповідно до мови статті).

Оформлення рукопису. Формат документу — Word 97–2003. Текст форматують *без переносів, абзацних відступів та інтервалів до та після рядка*. Формат графічних додатків — TIFF, розрізнення (фактичне!) 300 dpi/inch у форматі документа. Формат документу — A4.

Структура рукопису:

- УДК
- Назва статті
- Ініціали та прізвище автора (авторів)
- Повна офіційна назва установи (установ) де виконано роботу, місто, країна (якщо автори працюють у різних установах *перед* назвою установи та *після* прізвища автора ставлять однакову цифру (верхній індекс)
- Електронна адреса та/або тел./факс відповідального автора. Перед нею та після прізвища відповідального автора ставлять астериск (зірочку)
- Резюме мовою статті (слово “Резюме” не пишуть)
- Ключові слова мовою статті
- Знак авторського права, ініціали та прізвища авторів. Рік
- Текст статті
- Список літератури (“Література”)
- Назва статті, ініціали та прізвища авторів, резюме, а також ключові слова двома мовами окрім мови статті (мається на увазі, що йдеться про три мови: українську, російську та англійську)

Текст. Якщо Ви пишете українською мовою зверніть увагу на відмінювання прізвищ які закінчуються на приголосний або **о**. Адже жіночі прізвища не відмінюються, а чоловічі обов'язково відмінюються.

Формули набирайте у редакторі Microsoft Equation і не вставляйте їх у текст як зображення. Будь ласка, не користуйтеся програмою Math Type.

Таблиці. Треба всіляко прагнути аби таблиці мали книжну орієнтацію. Формат таблиць — MS Word..

Ілюстрації (знімки, діаграми, схеми) вмонтовують у документ Word і представляють їх *окремими файлами* у форматі TIFF. Розрізнення — 300 dpi/inch у масштабі публікації. Рисунки повинні мати умовні позначення, наприклад, у вигляді прямокутників з цифрою поруч. *Назву рисунка та пояснювальні надписи треба винести у текст.*

Література. Список літератури складають відповідно до ДСТУ ГОСТ 7.1:2006.

Посилання на літературне джерело подають у квадратних дужках. У дужках вказують порядковий номер роботи, яку включено у список джерел.

Список літератури складають за абеткою (алфавітом).

ДОДАТОК

Авторська згода

Автори, направляючи рукопис у редакцію Українського журналу дистанційного зондування Землі, погоджуються з тим, що редакції передаються права на захист і використання рукопису (журналу переданого до редакції матеріалу, в т. ч. такі охоронювані об'єкти авторського права як фотографії автора, рисунки, схеми, таблиці тощо), в тому числі на відтворення у пресі та мережі Інтернет, на поширення, на переклад рукопису на будь-які мови, експорту та імпорту примірників журналу зі статтею авторів з метою розповсюдження, на доведення до загального відома. Зазначені вище права автори передають редакції без обмеження терміну і на території всіх країн світу без обмеження в т. ч. на території України.

Автори гарантують наявність у них виняткових прав на використання переданого редакції матеріалу. Редакція не несе відповідальності перед третіми особами за порушення даних авторами гарантій. За Авторами залишається право використання їх опублікованого матеріалу, його фрагментів і частин в особистих, у тому числі наукових і освітніх цілях. Права на рукопис вважаються переданими Авторами редакції з моменту підписання до друку випуску журналу, в якому він публікується. Передрук матеріалів, опублікованих у журналі, іншими фізичними та юридичними особами можливий тільки зі згоди редакції, з обов'язковим зазначенням випуску журналу, в якому було опубліковано матеріал.

Я, (відповідальний автор), підтверджую, що я достатньою мірою брав участь у розробці концепції/дизайну цієї роботи, аналізі даних, а також написанні рукопису для прийняття відповідальності за це. Я ознайомлений з остаточним варіантом рукопису і затвердив його для публікації. Жодного рукопису з аналогічним змістом не було опубліковано під моїм авторством і не розглядається для публікації в інших виданнях. Я також ознайомлений з вищенаведеними умовами опублікування рукопису та приймаю їх.

Дата, підпис

ПРАВИЛА И РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ АВТОРОВ

Данные Правила составлены на основе “Требований ВАК Украины к научной статье, опубликованной в научном издании” (<http://lib.exdat.com/docs/740/index-3150.html>), а также “Положения об электронных научных изданиях” (<http://vak.org.ua/fv/>).

Редакция рассматривает и принимает материалы на украинском, русском и английском языках с соблюдением авторских прав и этических норм научной публикации.

Представление рукописей. Рукописи представляют в редакцию в электронном виде по адресу: o.kudriashov@ujrs.org.ua.

К рукописи прилагается акт экспертизы учреждения, где выполнена работа, сведения об авторах (учреждения, должности, научные степени и ученые звания), а также “Авторское соглашение” за подписью ответственного автора (скан в формате JPEG/PDF см. Приложение).

Общие требования. Статья может быть написана на украинском, русском или английском языках и должна иметь резюме (abstract), а также ключевые слова (keywords). Аннотация должна содержать основные результаты исследований, а не перечень вопросов, рассмотренных в статье. Рекомендуется разбить материал статьи на разделы (введение, выводы и т. д.). В конце рукописи размещают список использованной литературы, а после него — название статьи, инициалы и фамилии авторов, резюме и ключевые слова на двух языках (русском и английском, украинском и английском, или на украинском и русском, соответственно языку, на котором написана статья).

Оформление рукописи. Формат документа — Word-97–2003. Формат графических приложений — TIFF, разрешение — 300 dpi/inch. Размер страницы — A4. Текст форматируют *без переносов*,

абзацных отступов, выступов и интервалов до и после строки.

Структура рукописи

- УДК
 - Название статьи (желательно без аббревиатур)
 - Инициалы и фамилия автора (авторов)
 - Официальное название учреждения (учреждений) где выполнена работа, город, страна
- Если авторы работают в разных учреждениях, *перед* названием учреждения и *после* фамилии ставят одинаковую цифру (верхний индекс)
- Электронный адрес или тел/факс ответственного автора. Перед ним и после фамилии ставят астериск (звездочку)
 - Резюме на языке статьи (слово “Резюме” не пишут)
 - Ключевые слова на языке статьи
 - © (знак авторского права), инициалы и фамилии автора/авторов. Год
 - Текст статьи
 - Список литературы (“Литература”)
 - Название статьи, инициалы и фамилии авторов, резюме (abstract), а также ключевые слова на двух языках (русском и английском; русском и украинском, украинском и английском соответственно).

Таблицы, формулы. Формат таблиц в тексте — MS Word. Формулы следует набирать в редакторе *Microsoft Equation* и не вставлять их в текст в виде изображений.

Пожалуйста, не набирайте формулы в программе Math Type.

Иллюстрации. Иллюстрации (снимки, схемы, диаграммы) вмонтируют в документ Word и представляют *отдельными файлами* в формате TIFF с разрешением не меньшим 300 dpi/inch в масштабе публикации. Рисунки должны иметь условные зна-

ки — например в виде “кирпичиков” с цифрой справа. *Название рисунка и легенду нужно вынести в текст.*

Литература. Список литературы составляют в соответствии с ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 .Ссылки на ли-

тературный источник в тексте подают в квадратных скобках. .Список литературы делают *по алфавиту*. В алфавитном порядке сначала идут источники на русском и украинском языках, а после — на иных языках — в порядке латинского алфавита.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Авторское соглашение (документ должен быть подписан ответственным автором публикации)

Авторы, направляя рукопись в редакцию “Украинского журнала дистанционного зондирования Земли”, соглашаются с тем, что редакции передаются права на защиту и использование рукописи (переданного в редакцию журнала материала, в т. ч. такие охраняемые объекты авторского права как фотографии автора, рисунки, схемы, таблицы и т. д.), в том числе на воспроизведение в печати и в сети Интернет; на распространение; на перевод рукописи на любые языки; экспорта и импорта экземпляров журнала статьи авторов с целью распространения, на доведение до всеобщего сведения. Указанные выше права авторы передают редакции без ограничения срока их действия и на территории всех стран мира без ограничения, в т. ч. на территории Украины. Авторы гарантируют наличие у них исключительных прав на использование переданного редакции материала. Редакция не несет ответственности перед третьими лицами за нарушение данных авторами гарантий. За авторами сохраняется право использования опубликованного материала, его фрагментов и частей в личных, в том числе научных и образовательных целях. Права на рукопись считаются переданными авторами редакции с момента подписания в печать выпуска журнала, в котором он публикуется. Перепечатка материалов, опубликованных в журнале, другими физическими и юридическими лицами возможно только с согласия редакции, с обязательным указанием выпуска журнала, в котором был опубликован материал.

Я, (ответственный автор), подтверждаю, что я в достаточной степени участвовал в разработке концепции/дизайна этой работы, анализе данных, а также написании рукописи для принятия ответственности за это. Я ознакомлен с окончательным вариантом рукописи и утвердил его для публикации. Ни одна рукопись с аналогичным содержанием не была опубликована под моим авторством и не рассматривается для публикации в других изданиях. Я также ознакомлен с вышеуказанными условиями опубликования рукописи и принимаю их.

Дата, подпись

Адрес редакции: Украина, 01601, г. Киев, МСП, ул. Олесь Гончара, 55-Б, Редакция “Украинского журнала дистанционного зондирования Земли”. Тел.: + (38044) 486 9405, 484 04 85; факс: + (38044) 486 9405, 486 1430. www.ujrs.org.ua/ujrs, E-mail: info@ujrs.org.ua

основи. Максимальні ефективні товщі відмічаються в свердловині № 2 (Чернетчинська) і № 9 (Хухрянська), де вони відповідно складають 30 і 28 м.

Виявлення в свердловинах 1, 5, 6, 9 покладів ВВ, пов'язаних із зонами підвищеної тріщинуватості порід фундаменту та низів осадової товщі нижнього карбону, а також наявність майже в усіх свердловинах тектонітів, катаклазів, слідів гідротермальної та метасоматичної діяльності свідчать про інтенсивне роздроблення порід та флюїдодинамічні процеси у зонах тріщинуватості. Відображення цих зон у ландшафті свідчить про їх неотектонічну активність.

За даними багатьох дослідників [184–186], в присутності ВВ багато металів з перемінною валентністю переходять в більш рухомі форми. Мігруючи по зонах розломів у більш високі горизонти, вони накопичуються в ґрунтовому шарі. Ці процеси, очевидно, проходять інтенсивніше в неотектонічно активних зонах розломів та зонах підвищеної тріщинуватості. Про це свідчать результати геохімічної зйомки ґрунтів, виконаної у межах району досліджень.

Створення бази даних на територію Хухринсько-Чернетчинської площі в середовищі ArcGIS

На першому етапі були проведені роботи по введенню всіх зібраних даних на територію дослідження в середовище ArcGIS (рис. 2.56):

- Свердловини. (продуктивні, непродуктивні).
- Карта розломів, крайові та регіональні порушення.
- Ізогпси структурного горизонту В 20, В21.
- Контур родовища за даними сейсморозвідки.
- Геохімічні аномалії.
- Теплові аномалії на території родовища.

Для створення гіперкубу даних було проведено ряд додаткових досліджень, а саме:

- побудова морфометричних показників рельєфу (карт глибини розчленування рельєфу);
- побудова карт товщин;
- виділення лінеamentів та їх зон і створення карт щільності лінеamentів
- побудова неотектонічної схеми з виділенням неотектонічних блоків різного ступеню активності
- спектрометрування для виявлення оптичних аномалій рослинного покриття (див. рис. 2.56).

Таблиця 2.9.

Проявлення структур різного рангу на результуючій карті розподілу вихідної ймовірності (результат інтеграції геопросторових даних, див. рис. 2.55)

Назва	Ранг структури	Значення ймовірності
Безіменне	родовище газове	від 0.75 до 0.35
Одеське	родовище газове	від 0.75 до 0.45
Голіцінське	родовище газоконденсатне	0.95
Південноголіцінське	родовище газове	від 0.85 до 0.60
Шмідтівське	родовище газоконденсатне	0.95
Архангельське	родовище газове	0.85
Штормове	родовище газоконденсатне	0.85
Кримське	родовище газове	від 0.85 до 0.60
Біостромна	підготовлена до буріння	0.15
Південнофлангова	-«-	0.15
Чарівна	-«-	0.15
Малікова	-«-	0.50
Мирна	-«-	0.15
Рифтова	-«-	0.6
Осстрова	-«-	0.6
Понійська	-«-	0.7
Сельського	-«-	0.5
Штормова Глибинна	-«-	0.65
Шпильова	-«-	від 0.75 до 0.50
Прибійна	-«-	від 0.75 до 0.50
Сх.Шмідта	-«-	від 0.75 до 0.50
Альбатрос	-«-	0.85
Комсомольська	виявлені геофіз. дослідж	від 0.75 до 0.50
Зональна	-«-	0.5
Північноголіцінська	-«-	від 0.85 до 0.50
Миколаївська	-«-	0.15
Мартівська	-«-	бракданих
Західнокрейдіяна	-«-	0.45
Міжводненська	-«-	0.75
Прадніпровська	структура, виведена з буріння з негативним результатом	0.15
Флангова	-«-	0.10
Гамбурцева	-«-	0.15
Федорівська	-«-	0.25
Каркініцька	-«-	0.45 на заході до 0.05 на сході
Десантна	-«-	0.05
Дельфін	-«-	0.15

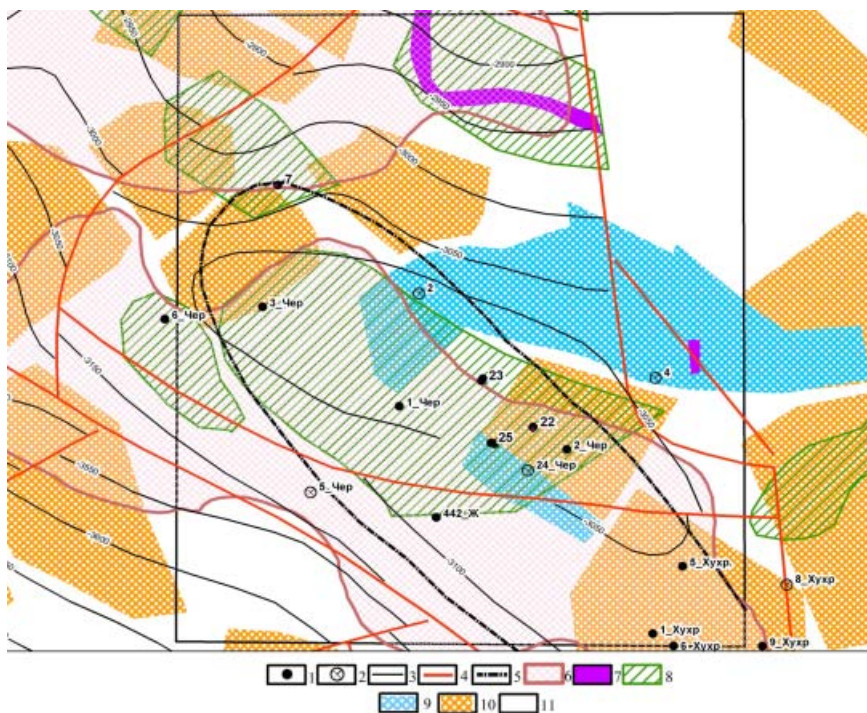


Рис. 2.56. База даних на територію Хухринсько-Чернетчинської площі в середовищі ArcGIS 9.3.

1 — свердловини продуктивні; 2 — свердловини непродуктивні; 3 — ізогіпси покрівлі відбивного горизонту В-21; 4 — розривні порушення; 5 — контур ЗНК; 6 — геохімічні аномалії (В. І. Ланчинський, 1992–1996 рр.); 7 — аномалії термопрофілю (І. Ф. Осадчий, 1998 р.); 8 — оптичні аномалії рослинного покриву (О. І. Архіпов, 1994–1996 р.) [187]; неотектонічні блоки: 9 — понижені; 10 — підвищені; 11 — територія досліджень

Методика автоматизованої побудови морфометричних показників рельєфу

Морфоструктурний аналіз полягає у встановленні взаємозв'язків між експонованим рельєфом і структурами земної кори. В основі його лежить положення про те, що як форми та комплекси форм рельєфу, так і окремі його морфографічні, морфометричні і динамічні характеристики обумовлені диференційованими проявами ендегенних процесів. Таким чином, вони обумовлені напрямком та інтенсивністю тектонічних рухів, передусім новітніх, складом гірських порід та формою їх залягання. Принцип морфоструктурного (структурно-геоморфологічного) аналізу полягає у вирішенні “зворотної задачі”, тобто у відшукуванні рис геологічної структури і тектонічних рухів, відображених у рельєфі [168–171]. При морфоструктурному аналізі всебічно аналізується рельєф і виявляються лінійні та площинні морфоструктури.

Лінійні морфоструктури корелюють з лінійними геологічними тілами — передусім розломами і розломними зонами, зонами тріщинуватості, флексурами тощо. На морфоструктурній схемі, яка складається за результатами дешифрування, в залежності від ширини відповідної структури і масштабу схеми, вони можуть бути представлені як лінійні об'єкти або як вузькі, видовжені блоки (останні найчастіше прилеглі до потужних розломних зон).

Площинні морфоструктури відповідають ізометричним блокам, конфігурація яких визначається

формою лінійних об'єктів, що їх обмежують. Площинні морфоструктури можуть мати округлу форму (відповідають кільцевим структурам, куполам, мульдам), еліпсоподібну (корелюють з брахіскладками), форму багатокутника (блоки земної кори низьких порядків, обмежені лінійними розломами типу наскрізних).

При структурно-геоморфологічних дослідженнях використовувалася апріорна структурна та геоморфологічна інформація в програмному продукті ArcGIS. Враховуючи, що багато видів розчленовування рельєфу прямо або побічно відбивають тектонічні рухи і структури, прийоми гіпсометричного аналізу займають важливе місце. В зв'язку з цим був проведений аналіз розчленовування рельєфу, одним з яких є ступінь вертикального розчленовування, а саме — визначення “енергії” рельєфу — відношення різниці екстремальних висот в межах цієї ділянки до його площі. Це дає матеріал для структурно-геоморфологічного аналізу з подальшою структурною інтерпретацією, яка дозволяє встановити зв'язок між ступенем розчленовування і тектонічними рухами. Для реалізації структурно-геоморфологічних досліджень запропоновано модель проведення структурно-геоморфологічного ГІС-аналізу, основана на морфометричному методі пошуку тектонічних структур, розробленому В. П. Філософовим [168, 189, 190, 191].

В якості вихідних даних використовувалися матеріали радарної топографічної зйомки SRTM пер-

шого рівня. Оцінка точності матриці висот SRTM [209] показала, що вона відповідає масштабу 1:100 000. Розрахунок морфометричних показників рельєфу здійснювався в ArcGIS 9.3.

Для автоматизованого розрахунку глибини розчленування рельєфу (різниця між максимальною і мінімальною абсолютними відмітками рельєфу в межах одиниці площі) в середовищі ModelBuilder були розроблені геоінформаційні моделі, об'єднані у набір інструментів "Морфометрія рельєфу" (рис. 2.57).

Створення карт щільності лінеamentів на територію Хухринсько-Чернетчинської площі в середовищі ArcGIS

Окрім морфометричних показників, для створення вихідного куба геопросторових даних був проведений пошук додаткових ознак (зон геодинамічного впливу активних розривних порушень, за якими можна з високою точністю локалізувати родовища ВВ. Для цього виконувався лінеamentний аналіз для виявлення розривних порушень і зон

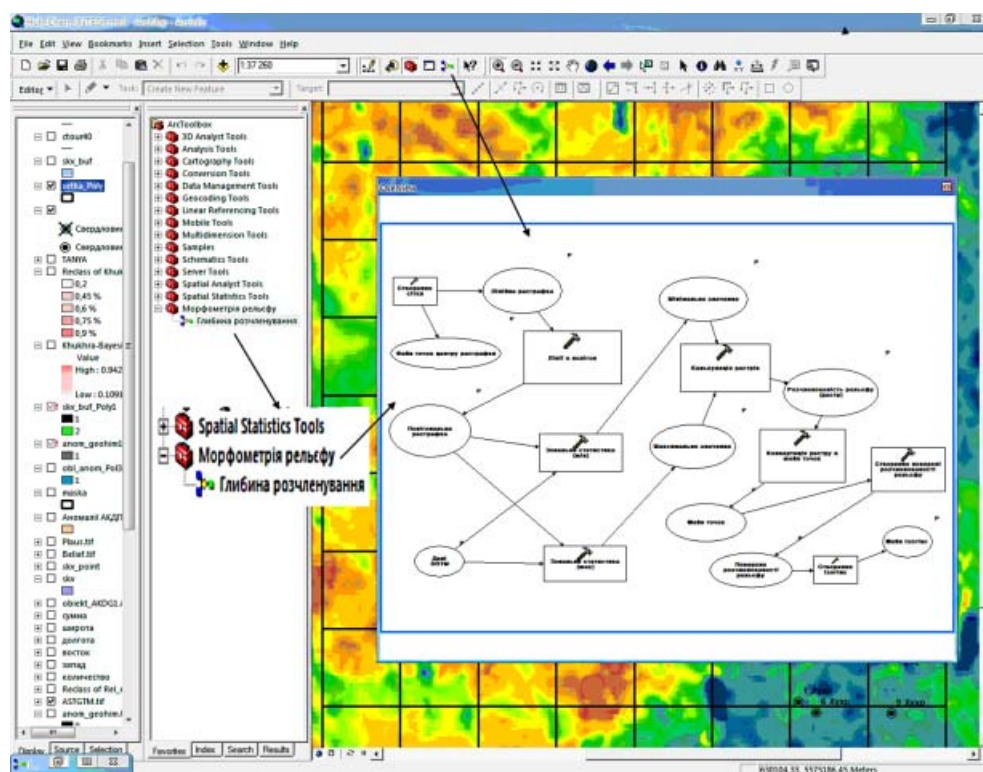


Рис. 2.57. Геоінформаційна модель "Глибина розчленування рельєфу"

Вихідними шарами в кожній моделі виступали SRTM, а також векторний полігональний шар у вигляді мережі квадратів розміром 1×1 км, що покриває повністю територію досліджень. Побудова цих полігонів була здійснена за допомогою інструменту "Create Fishnet" набору "Data Management Tools".

У рамках кожного квадрата розміром 1×1 км визначалися максимальні і мінімальні абсолютні відмітки висоти місцевості. Ці дані зберігалися як окремі грід-моделі, а потім розраховувалася їхня арифметична різниця. Результат конвертувався у векторний точковий шар, по якому створювалася поверхня глибини розчленування рельєфу на територію Хухрянського родовища (рис. 2.58).

Таким чином, була отримана растрова поверхня, яка відображає значення глибини розчленування рельєфу на території Хухрянського родовища для внесення до гіперкуба даних.

їхнього геодинамічного впливу за даними ДЗЗ. Для аналізу лінійних елементів використовувалися два різних підходи: статистичний аналіз і побудова лінеamentів.

У статистичному аналізі оцінювалося розташування лінійних елементів кожного напрямку на досліджуваній площі.

Характеристики рельєфу, що формують особливості зображень космічних знімків, визначені поступовими та імпульсними, вертикальними та горизонтальними рухами земної кори [193, 194]. Компоненти природно-територіальних комплексів різного рангу чітко реагують на зміни фізичних полів, механічні переміщення блоків, геохімічні перетворення, які визначаються локальними та регіональними закономірностями переносу речовини та енергії у надрах. Вирішуючи зворотну задачу, тобто аналізуючи особливості природно-територіальних комплексів, можна відтворити геодинамічну модель досліджуваного регіону.

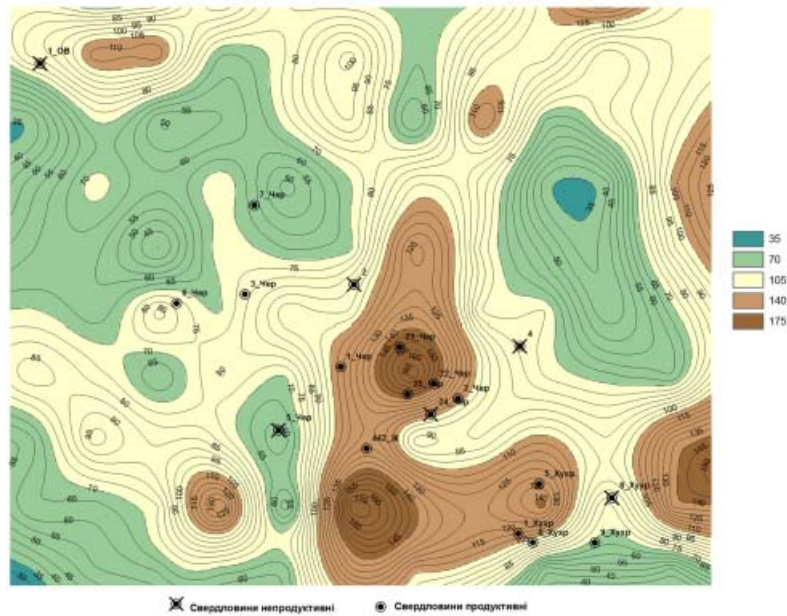


Рис. 2.58. Поверхня глибини розчленування рельєфу на Хухринсько-Чернетчинську площу

Результатом дешифрування космічних знімків із виділенням прямолінійних елементів зображення є вихідна схема лінеamentів (рис. 2.59). Її складовими є різноспрямовані лінії — елементарні лінеamenti відповідного порядку. Порядок лінеamentів визначається масштабом і розрізненням вихідного зображення.

Розташування лінеamentів на вихідній схемі, особливо у платформених регіонах, не дозволяє однозначно судити про розташування тектонічних дислокацій, тому вихідна схема лінеamentів повинна підняти подальшому обробленню. Завданням перетворення вихідної схеми лінеamentів є перехід

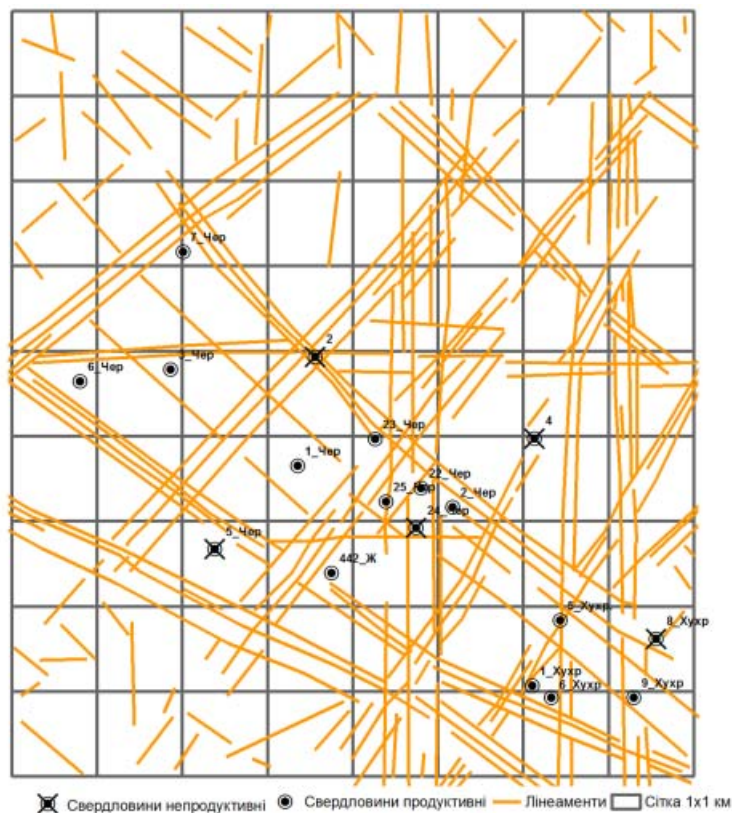


Рис. 2.59. Вихідна схема лінеamentів

до континуального поля лінеamentів, яке відображає просторові неоднорідності тектонічних напружень. При цьому головним завданням аналізу залишається виявлення розломів і геодинамічних зон. Похідні карти лінеamentів дозволяють перейти до аналізу континуального лінеamentного поля, яке відображає просторову неоднорідність тектонічної роздробленості земної кори, її тектонічно-напружений стан.

Ступінь генералізації дистанційних даних, що є основою для виділення лінеamentів, та масштаб підсумкових карт визначають розмір вікна-гріда. У той же час, варіювання параметрами інтерполяції дозволяє виділяти аномалії поля лінеamentів у залежності від масштабу та особливостей геологічної будови території. Щільність і частота лінеamentів відображається ізолініями із пошаровим зафарбуванням.

За допомогою створеної методики побудови похідних карт лінеamentів на основі ПС створюються карти (у вигляді поверхонь та ізоліній):

- загальної щільності лінеamentів;
- щільності лінеamentів певних напрямків;
- частоти лінеamentів;
- щільності вузлів перетину лінеamentів;
- анізотропії лінеamentів.

Взагалі похідні карти лінеamentів можна поділити на такі групи: площинні карти лінеamentів, карти напрямків лінеamentів, карти інтерпретації поля лінеamentів. До першої групи належать карти частоти лінеamentів, загальної (питомої) щільності лінеamentів, щільності лінеamentів певного простягання. При побудові площинних карт лінеamentів ключовим моментом є вибір розмірів елементарного вікна, у межах якого підраховуватимуться наступні показники: кількість лінеamentів, їхня довжина. Зазвичай використовуються елементарні вікна розміром від 0.5×0.5 км для великомасштабних зображень до 5×5 км для середньомасштабних. В елементарному вікні площею s визначаються кількість лінеamentів n , довжина окремих лінеamentів $l_1, l_2, \dots, l_n$, кількість лінеamentів s . За допомогою цих параметрів можна обчислити:

$$\text{площинну частоту лінеamentів: } F_s = \frac{n}{s}, \quad (2.72)$$

загальну (питому) щільність лінеamentів:

$$F_s = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{s}, \quad (2.73)$$

$$\text{середню довжину лінеamentів } L = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{n}. \quad (2.74)$$

Розміри елементарного вікна визначають значення вищенаведених величин, показники яких при збільшенні або зменшенні величини вікна змінюються непропорційно. Як зазначають Л. Н. Васильєв, В. М. Моральов та інші, базуючись на аналізі лінеamentних мереж Кольського півострова, при

збільшенні величини елементарного вікна у два рази довжина і щільність лінеamentів збільшуються непропорційно — менше, ніж у чотири рази. Такі перетворення свідчать про скейлінговий характер лінеamentів [195].

Карти інтерпретації лінеamentів дозволяють аналізувати континуальні лінеamentні поля і мережі. Серед них найважливіше практичне значення мають карти щільності вузлів лінеamentів та анізотропії поля лінеamentів, а також лінеamentних зон. Карти щільності вузлів лінеamentів, або “тектонічної напруженості” будуються шляхом підрахунку вузлів перетину лінеamentів у елементарному вікні:

$$T_s = \frac{c}{s} = n - \frac{l}{s}. \quad (2.75)$$

Карти анізотропії поля лінеamentів відображають неоднорідності довжин лінеamentів, що входять до взаємоперпендикулярних систем. Показник анізотропії обчислюється за формулою:

$$A = |\Sigma l_a - \Sigma l_c| + |\Sigma l_b - \Sigma l_d|, \quad (2.76)$$

де l_a, l_b, l_c і l_d — довжини лінеamentів у взаємоперпендикулярних секторах роздіаграми [195]. Карти лінеamentних зон будуються на основі карти щільності лінеamentів — прослідковуються ланцюжки аномалій щільності, які і виділяються як лінеamenti зони. Останні корелюють з регіональними глибинними розломами. Ізометричні аномалії щільності дещо більшої величини вказують на положення структурних вузлів, тобто вузлів перетину різноспрямованих розломів.

Щільність лінеamentів інтерпретується як канали міграції ВВ та зони розуцільнення, що просторово збігаються з пастками ВВ, за якими відбувається перенос енергії та речовини з нижніх горизонтів земної кори в осадовий чохол. Розрахунки полів щільності лінійних елементів різного напрямку проводилися в ArcGIS у напівавтоматичному режимі для подальшої геолого-геофізичної інтерпретації (рис. 2.60–2.63).

Крім цього, в залежності від простягання, були виявлені як позитивні, так і негативні ознаки нафтогазоносності, одні з яких сприяють формуванню умов для міграції та локалізації ВВ в осадовому чохлі, а інші навпаки екранують процес перетікання ВВ.

Отримані поверхні були приведені до просторового розрізнення 30 м для подальшого їх використання в гіперкубі даних для інтегрування всіх шарів вихідних даних.

Процедура інтегрування геопросторової інформації

Вихідними даними для інтеграції на Хухринсько-Чернетчинську площу є просторові шари, що містяться у відповідних файлах різних форматів і систем координат [196]:

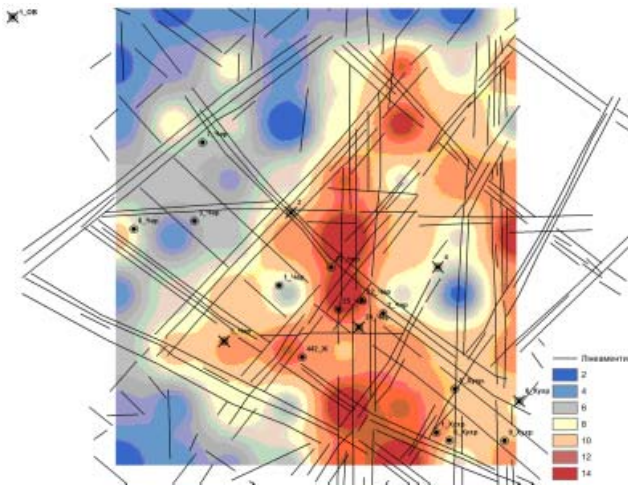


Рис. 2.60. Щільність частоти лінементів

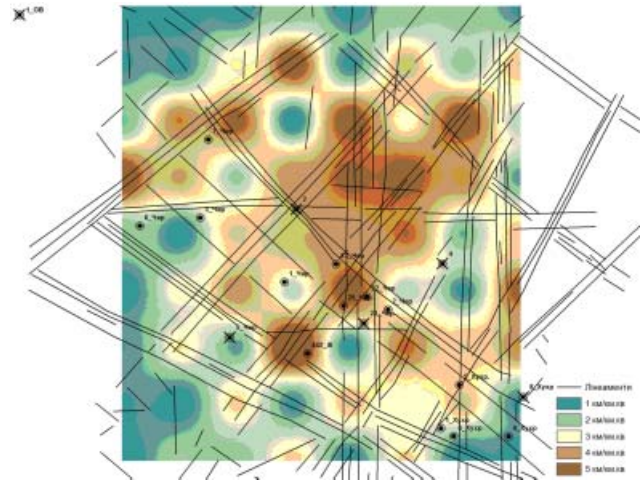


Рис. 2.61. Загальна щільність лінементів у східному напрямку

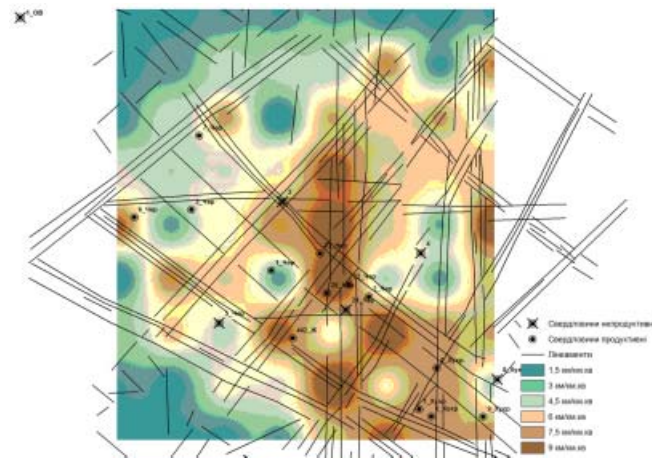


Рис. 2.62. Загальна щільність лінементів у західному напрямку

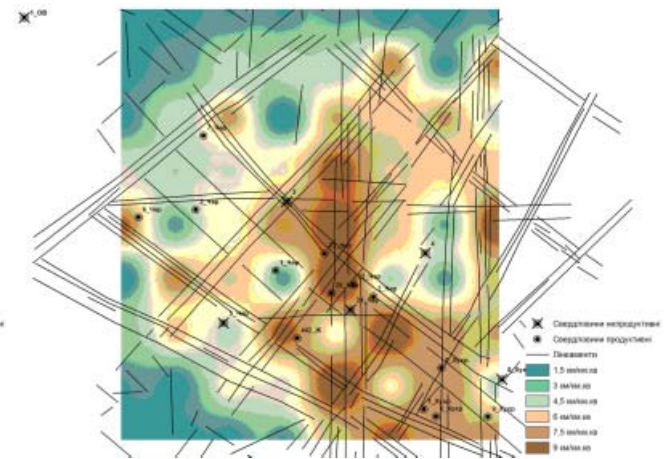


Рис. 2.63. Загальна щільність лінементів

- супутникові зображення Landsat/ETM+, 6 спектральних каналів, формат ENVI BSQ;
- рельєф місцевості SRTM v3, формат DEM HGT;
- температура поверхні [K], формат ENVI BIN;
- карти щільності лінементів, 4 шт. з кроком 45°, формат GeoTIFF;
- карта структурних горизонтів, формат ArcGIS SHP;
- карта неотектонічних блоків формат ENVI BIN;
- карта геохімічних аномалій, формат GeoTIFF;
- площі оптичних аномалій, рослинного покриття формат ENVI BSQ;
- розташування продуктивних/непродуктивних свердловин, формат GeoTIFF;
- карти товщин, формат GeoTIFF;
- карта глибини розчленування рельєфу, формат GeoTIFF.

Після підключення всіх джерел створюються зв'язки між вхідними файлами, перетворювачем та вихідним файлом. В результаті виконання створеного проекту був сформований вихідний

куб геопросторових даних, готових до інтеграції.

За результатами інтеграції геопросторових даних тестового прикладу одержано розподіл вихідної ймовірності, показаний на рис. 2.64.

Графічний образ просторового розподілу інтегрального індикатора дистанційних та геолого-геофізичних даних можна трактувати як комплексну оцінку нафтогазоперспективності досліджуваної площі. Так, ділянка, яка розташована на північний захід від родовища найменш придатна для подальшого вивчення. Ділянка в центрі родовища між продуктивними свердловинами №№ 23, 22, 25, 442, 1, 5 виявлена яка найбільш вірогідна, св. № 24 (розташована в цій самій зоні) — непродуктивна скоріше за все тому, що вона попадає на перетин зон лінементів (див. рис. 2.63). Непродуктивні свердловини №№ 2, 4, 5 — розташовані в зонах 30% вірності. Як перспективні можна визначити дві ділянки: перша — у північно-західному кутку (60–75% імовірності), яка поділяється на декілька, з яких дві є

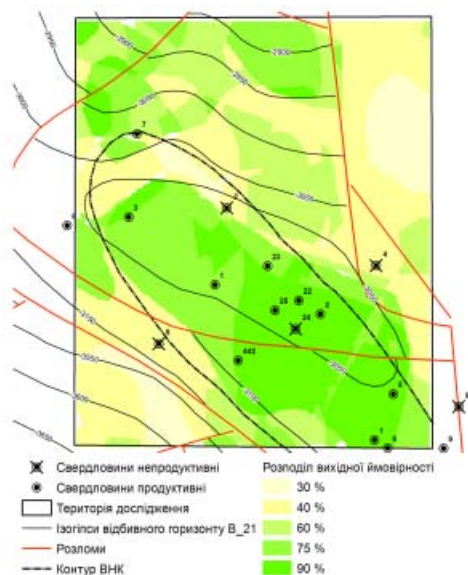


Рис. 2.64. Хухринсько-Чернетчинська площа. Розподіл вихідної ймовірності за результатами інтеграції геопросторових даних

найбільш перспективними (на північний захід від св.№ 7 та на півночі) та друга — в центральній частині родовища між свердловинами № 1, 3 2.

2.11. Інтеграція дистанційних та геолого-геофізичних даних при пошуках покладів нафти та газу на суходолі

2.11.1. Інтеграція дистанційних та геолого-геофізичних даних за удосконаленням методом Демпстера-Шейфера

Великі об'єми даних, які отримуються від різних інформаційних джерел при вирішенні природоресурсних завдань, вимагають наявності адаптованого і гнучкого науково-методичного апарату їх інтеграції та сумісного оброблення. Існує багато підходів до вирішення зазначеного питання. Серед них: метод Байеса [199]), теорія неточних ймовірностей (П. Воллі [200], Т. Файн [201], В. Кузнецов [202]), теорія можливостей (Л. Заде [203], Д. Дюбуа і Г. Прад [204]), підхід Демпстера-Шейфера (А. Демпстер [205], Г. Шейфер [206], Р. Ягер [207], Ф. Сметс [208], Т. Інагакі [209]). Таке різноманіття підходів до інтегрування даних породжує проблему вибору підходу, який може бути застосований для конкретної ситуації. Нижче ми будемо спиратися на підхід Демпстера-Шейфера, оскільки запропоновані і розвинені названими вченими методи дозволяють доволі просто здійснювати інтеграцію даних, а також мають низку інших переваг.

Теорія свідчень Демпстера-Шейфера (ТСДШ) може бути інтерпретована як узагальнена теорії ймовірності. Так у теорії ймовірності свідчення пов'язані тільки з однією із можливих подій. У ТСДШ свідчення може бути пов'язано одночасно з кілько-

Висновки

Таким чином, класифікація дистанційних даних з урахуванням геолого-геофізичної складової дає можливість без створення спеціальних бібліотек для геологічних об'єктів визначати ступінь подібності прогнозних ділянок і типових еталонів на певний регіон та виокремлювати ділянки різного рангу перспективності. Для створення гіперкубу даних та їх подальшої інтеграції здійснювались перетворення даних за допомогою процедур трансформації. В результаті інтеграції створюється графічний образ просторового розподілу інтегрального індикатора дистанційних та геолого-геофізичних даних, який можна трактувати як комплексну оцінку нафтогазоперспективності досліджуваної площі. Коefіцієнт кореляції Спірмена, за даними 13 розвідувальних свердловин, становить 0.786, що свідчить про достатню ефективність запропонованої методики [197]. Запропонований підхід дозволяє інтегрувати зазначені дані, будувати карти просторового розподілу функції довіри схожості з позитивними структурами покладів ВВ, що є підставою для прийняття інформаційних рішень [198].

ма можливими подіями — множиною подій. В результаті, в ТСДШ вони можуть мати сенс на більш високому рівні абстракції без необхідності вдаватися до припущень щодо свідчення в межах множини. Там, де свідчення достатньо обґрунтовані та дозволяють однозначно визначити їх ймовірність, ТСДШ використовує модель традиційної ймовірності. Однією з її найбільш важливих особливостей є те, що вона дозволяє усунути неоднозначність визначення різного рівня точності в відношенні інформації та виключає необхідність у додаткових припущеннях щодо її подання. Крім того, вона дозволяє визначити пряму невизначеність відгуку системи у випадку, коли неточності на вході та на виході характеризуються множиною або інтервалом.

В рамках ТСДШ є три важливі функції, на які слід звернути увагу:

функція базового ймовірнісного розподілу (Basic Probability Assignment — BPA), або функція маси (m);

- функція довіри (Belief — Bel);
- функція правдоподібності (Plausibility — Pl).

Функція базового ймовірнісного розподілу (функція маси) є основою теорії свідчень. В загальному випадку, термін “базова ймовірність розподілу” не відноситься до ймовірності в класичному сенсі. BPA, яка характеризується m, лежить в інтервалі [0, 1], де BPA пустої множини $\emptyset$ дорівнює 0, а сума всіх підмножин її дорівнює 1. Значення

ВРА для множини A , яке можна записати як $m(A)$, виражає частку всіх відповідних і наявних свідчень, які підтримують твердження, що певний елемент Ω (універсальна множина або основа аналізу) належить множині A , але не її підмножині [206]. Значення $m(A)$ характеризує тільки множину A і не надає ніяких додаткових даних щодо її підмножин. Будь-які додаткові свідчення підмножини A представляються іншими значеннями ВРА ($B \subset A$) $m(B)$, які характеризують підмножину B . Формально m може бути представлена за допомогою наступних трьох рівнянь:

$$m: P(\Omega) \rightarrow [0,1], \quad (2.77)$$

$$m(\emptyset) = 0, \quad (2.78)$$

$$\sum_{A \in \Omega} m(A) = 1, \quad (2.79)$$

де $P(\Omega)$ — характеризує множину Ω , $\emptyset$ — пуста множина, A — характеризує множину, яка задовольняє вимозі $A \in \Omega$.

Деякі дослідники вважають правильним інтерпретувати функцію базового ймовірнісного розподілу як класичну ймовірність [211, 212]. Це іноді корисна інтерпретація ТСДШ, проте вона не демонструє повний спектр репрезентативних можливостей ВРА. Тому, в загальному випадку, ВРА не можна порівняти до класичної ймовірності.

Завдяки величині функції базового ймовірнісного розподілу можуть бути визначені верхня і нижня границі довірчого інтервалу. Цей інтервал містить точну ймовірність множини інтересів (в класичному розумінні) і обмежений двома неадитивними безперервними величинами — *Belief* і *Plausibility*. Нижня границя множини A (*Belief*) визначається як сума всіх ВРА, які належать підмножині B множини інтересу A ($B \subseteq A$). Верхня межа (*Plausibility*) є сумою всіх ВРА множини B , які перетинаються з множиною інтересу A ($B \cap A \neq \emptyset$).

У загальному випадку, для всіх A , які задовольняють умові $A \in \Omega$ [206],

$$Bel(A) = \sum_{B|B \subseteq A} m(B), \quad (2.80)$$

$$Pl(A) = \sum_{B|B \cap A \neq \emptyset} m(B). \quad (2.81)$$

Величини *Belief* і *Plausibility* є неадитивними. Це означає, що сума всіх значень величини *Belief* може не дорівнювати 1, так само як і для *Plausibility*.

Використовуючи вираз (4) можна визначити значення функції маси таким чином:

$$m(A) = \sum_{B|B \subseteq A} (-1)^{|A-B|} Bel(B), \quad (2.82)$$

де $|A-B|$ — різниця двох основних множин.

Крім того, величини *Belief* і *Plausibility* можуть бути отримані одна з одної. Так, наприклад, значен-

ня функції *Plausibility* може бути отримано за допомогою функції *Belief* як:

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}), \quad (2.83)$$

де $\bar{A}$ — протилежна подія A .

Визначення функції *Plausibility* з точки зору функції *Belief* виходить з того, що сума всіх основних свідочств повинна дорівнювати 1.

$$Bel(\bar{A}) = \sum_{B|B \subseteq \bar{A}} m(B) = \sum_{B|B \cap A = \emptyset} m(B), \quad (2.84)$$

$$\sum_{B|B \cap A = \emptyset} m(B) = 1 - \sum_{B|B \cap A \neq \emptyset} m(B). \quad (2.85)$$

Наслідком рівнянь (2.84) і (2.85) є можливість визначення значення двох інших функцій при умові, що відома будь-яка одна з $m(A)$, $Bel(A)$, $Pl(A)$. Величина ймовірності події (в класичному розумінні) перебуває в межах нижньої і верхньої границь — *Belief* і *Plausibility*, відповідно (рис. 2.65).

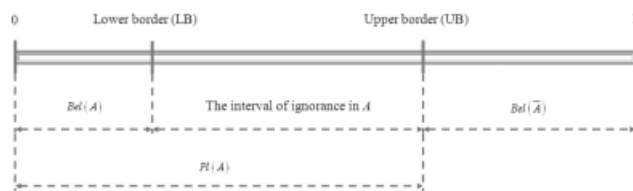


Рис. 2.65. Співвідношення між довірою та правдоподібністю події A

$$Bel(A) \leq P(A) \leq Pl(A). \quad (2.86)$$

Ймовірність визначається однозначно, якщо $Bel(A) = P(A)$. У цьому випадку, це відповідає класичній теорії ймовірності, тобто всі ймовірності $P(A)$ однозначно визначаються для всіх підмножин A універсальної множини Ω [207, с. 97]. В іншому випадку функції $Bel(A)$ і $Pl(A)$ можна розглядати як нижню і верхню границю ймовірності, відповідно, де фактичне значення ймовірності знаходиться в інтервалі, що описується. Верхня і нижня границі ймовірності, які отримані іншими теоретико-інформаційними підходами, не можуть бути безпосередньо інтерпретовані як функції *Belief* і *Plausibility* [213, с. 216].

Демпстером було запропоновано комбінаційне правило. Відповідно до нього значення функцій *Belief* і *Plausibility* виводяться на основі поєднання основних свідчень. Зазначене правило дозволяє об'єднати кілька значень функцій *Belief* на основі значень функції маси (m). Ці функції визначені однією системою розпізнавання, але базуються на незалежних свідченнях. Питання про незалежність є вирішальним чинником при об'єднанні даних.

Комбінаційне правило Демпстера представляє собою чисту логічну операцію "І" (AND). Воно базується на операції кон'юнкції свідчень [214]. Зокрема, комбінація свідчень, яку ще можна назвати інтегруванням m_{12} , розраховується за такою формулою [206]:

$$m_{12}(A) = \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B) m_2(C)}{1 - K}, A \neq \emptyset, \quad (2.87)$$

$$K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) m_2(C). \quad (2.88)$$

Коефіцієнт K характеризує конфліктність джерел та визначається як сума значень функції маси всіх множин, перетин яких є порожнім. Це правило є комутативним, асоціативним, але неїдемпотентним або безперервним. Таким чином, платформа для інтегрування даних від різних джерел може бути представлена сукупністю виразів (2.87) та (2.88).

Знаменник $(1-K)$ в правилі Демпстера (209) представляє із себе нормалізуючий фактор. Нормалізація звичайно потрібна, але L. Zadeh показав [215], що в умовах значного конфлікту між джерелами така операція може приводити до невірних оцінок (проблема суперечливих свідочств, [207]). Тому було запропоновано новий метод інтегрування даних від різних джерел. Суть його полягає в наступному.

Припустимо, за результатами аналізу даних сформована основа аналізу Ω з кардинальним числом 2^N , яка включає усю сукупність гіпотез, пусту множину $\emptyset$ та безпосередньо саму множину Ω . Сукупність гіпотез характеризується розподілом мас у вигляді відповідного вектора $\mathbf{m}$. За результатами аналізу даних i -го джерела сформована сукупність гіпотез A , яка охарактеризована ВРА $\mathbf{m}_i$, а за результатами аналізу даних j -го джерела — сукупність гіпотез B , яка охарактеризована ВРА $\mathbf{m}_j$. Тоді відстань між двома сукупностями гіпотез (двома відповідними ВРА) може бути обчислена за допомогою наступного виразу [216]:

$$d_{BPA}(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) = \frac{\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{m}_j}{\|\mathbf{m}_i\| \cdot \|\mathbf{m}_j\|}. \quad (2.89)$$

Для визначення конфліктності двох інформаційних джерел використовуємо такий вираз [217]:

$$\text{conf}_{BPA}(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) = \Psi(m_i, m_j) \cdot P_i(A_{\max}) \cdot P_j(B_{\max}), \quad (2.90)$$

де $P_i(A_{\max}), P_j(B_{\max})$ — імовірність гіпотези за результатами аналізу даних i -го та j -го джерел, відповідно, $\Psi(m_i, m_j)$ розраховується таким чином:

$$\Psi(m_i, m_j) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } A_{\max} \cap B_{\max} \neq \emptyset; \\ 1, & \text{якщо } A_{\max} \cap B_{\max} = \emptyset; \end{cases} \quad (2.91)$$

де $A_{\max}, B_{\max}$ — гіпотеза, яка має максимальне значення імовірності, за результатами аналізу даних i -го та j -го джерел, відповідно.

Корельованість двох сукупностей гіпотез може бути розрахована як

$$\text{cor}_{BPA}(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) = \begin{cases} \frac{P_i(A_{\max}) + P_j(B_{\min})}{2}, & \text{якщо } A_{\max} = B_{\max}; \\ \frac{P_i(A_{\max}) + P_j(B_{\min})}{2}, & \text{якщо } A_{\max} \neq B_{\max}. \end{cases} \quad (2.92)$$

Такий підхід можна пояснити наступним чином. Конфлікт між двома відповідними ВРА може бути інтерпретований так: перше джерело підтримує одну гіпотезу, а друге — іншу, і зазначені гіпотези несумісні (їх перетин дає пусту множину). Введений коефіцієнт конфлікту відображає ступінь розбіжності пари максимальних суб'єктивних ймовірностей конфліктуючих джерел, проте він не дає можливості оцінити різницю між двома неконфліктними джерелами. З огляду на це, запропоновані відстань $d_{BPA}(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j)$ та коефіцієнт корельованості $\text{cor}_{BPA}(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j)$ двох сукупностей гіпотез дозволяє оцінити різницю між конфліктними або неконфліктними джерелами з різних сторін — з геометричної та логічної точок зору.

Також необхідно відмітити, що розрахунок відстані, що представлена виразом (13), коефіцієнтів конфліктності та корельованості передбачає трансформацію значення ВРА у імовірність. Для цього скористаємось таким виразом:

$$P(A_n) = \text{Bel}(A_n) + \frac{\text{BEL} \text{Bel}(A_n) + (1 - \text{BEL}) \text{Pl}(A_n)}{\sum_{n=1}^N (\text{BEL} \text{Bel}(A_n) + (1 - \text{BEL}) \text{Pl}(A_n))} \cdot (1 - \text{BEL}), \quad (2.93)$$

де $\text{Bel}(A_n), \text{Pl}(A_n)$ — значення довіри і правдоподібності для n -ої гіпотези, відповідно;

$$\text{BEL} = \sum_{n=1}^N \text{Bel}(A_n). \quad (2.94)$$

Тоді, для того щоб кількісно характеризувати схожість двох сукупностей гіпотез з урахуванням наведених вище показників, будемо використовувати таку міру [218]:

$$\text{Sim}(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) = \text{Sim}_{ij} = 1 - r(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j). \quad (2.95)$$

Враховуючи відстань між сукупностями гіпотез $d_{BPA}(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j)$, їх корельованість $\text{cor}_{BPA}(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j)$ та конфліктність джерел $\text{conf}_{BPA}(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j)$ величину $r(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j)$ запропоновано визначати як

$$r(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) = \frac{d_{BPA} + \text{cor}_{BPA} + \text{conf}_{BPA}}{1 - d_{BPA} \text{cor}_{BPA} + d_{BPA} \text{conf}_{BPA} + \text{cor}_{BPA} \text{conf}_{BPA} - d_{BPA} \text{cor}_{BPA} \text{conf}_{BPA}}. \quad (2.96)$$

Якщо в результаті проведеного аналізу є L інформаційних джерел і відповідна кількість ВРА, то можна побудувати матрицю схожості SMM [218]

$$\mathbf{SMM} = \begin{bmatrix} 1 & Sim_{1,2} & \dots & Sim_{1,L} \\ Sim_{2,1} & 1 & \dots & Sim_{2,L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Sim_{L,1} & Sim_{L,2} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.97)$$

яка відображає кількісно взаємозв'язки між ВРА і дозволяє розрахувати ступень підтримки кожної окремої гіпотези в різних джерелах. Підтримка гіпотези, якій відповідає маса m_p , може бути розрахована шляхом підсумовування елементів відповідного рядку матриці (219):

$$Sup(m_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^L Sim_{i,j}; i=1,2,\dots,L. \quad (2.98)$$

Введемо нормування величин підтримки гіпотез у вигляді:

$$Crd(m_i) = \frac{Sup(m_i)}{\sum_{i=1}^L Sup(m_i)}; i=1,2,\dots,L. \quad (2.99)$$

Тепер можна розрахувати середньозважену масу $m_{average}$ гіпотези як

$$m_{average} = \sum_{i=1}^L Crd(m_i) \cdot m_i; i=1,2,\dots,L. \quad (2.100)$$

Після цього здійснюється комбінування середньозважених мас гіпотез, для чого послідовно $2^L - 1$ разів застосовується звичайне правило Демпстера.

Після проведеного комбінування необхідно прийняти рішення щодо досліджуваного об'єкта (явища). Його особливість полягає у том, що отримані оцінки у вигляді функцій довіри *Belief* і правдоподібності *Plausibility* формують інтервал, в якому знаходиться дійсне значення ймовірності відповідної гіпотези. Тобто виникає необхідність у її визначенні. Для цього у [219] запропоновано застосовувати ієрархічний підхід Дезера-Смарандаке, який є по-кроковим.

Припустимо, є основа аналізу $\Omega = \{A^1, A^2, A^3\}$ і гіпотези розподілені так: $A^1, A^2, A^1 \cup A^2, A^1 \cup A^3, A^2 \cup A^3, A^1 \cup A^2 \cup A^3$, тоді графічне пояснення зазначеного підходу наведено на рис. 2. 66.

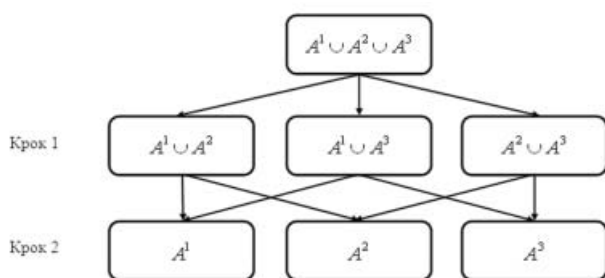


Рис. 2.66. Графічне пояснення ієрархічної ймовірносної трансформації Дезера-Смарандаке

Математично його можна записати таким чином:

$$HDSmP(A(n-1)) = m(A(n-1)) + \sum_{\substack{A(n) \supset A(n-1) \\ A(n), A(n-1) \in \Omega}} [m(A(n)) \cdot R(A(n-1), A(n))], \quad (2.101)$$

де $R(A(n-1), A(n))$ пропорційний перерозподілюючий коефіцієнт, який може бути визначений як

$$R(A(n-1), A(n)) = \frac{m(A(n-1))}{\sum_{\substack{A(n) \supset A(n-1) \\ A(n), A(n-1) \in \Omega}} m(A(n-1))}, \quad (2.102)$$

n — крок трансформації.

Наведені вище поняття та вирази дозволяють представити новий метод інтеграції даних з урахуванням корельованості і узгодженості гіпотез та конфліктності джерел, який наведений на рис. 2.67.

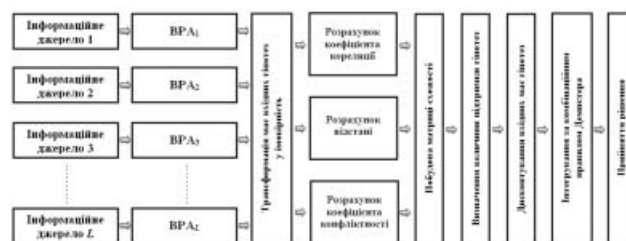


Рис. 2.67. Структурно-логічна схема запропонованого методу

Він може бути описаний такою послідовністю кроків:

Крок 1. Трансформуються ВРА вхідних гіпотез у імовірність — вираз (232);

Крок 2. Розраховуються попарні відстані між усіма сукупностями гіпотез — вираз (228);

Крок 3. Розраховуються попарні конфлікти джерел — вираз (229);

Крок 4. Розраховуються попарні коефіцієнти кореляції між усіма сукупностями гіпотез — вираз (16);

Крок 5. Розраховуються підтримки всіх існуючих гіпотез — вираз (237);

Крок 6. Здійснюється нормування величин підтримки гіпотез — вираз (238);

Крок 7. Розраховуються середньозважені маси гіпотез — вираз (239);

Крок 8. Здійснюється комбінування середньозважених мас гіпотез, для чого послідовно $2^L - 1$ разів застосовується звичайне правило Демпстера;

Крок 9. Приймається рішення щодо досліджуваного об'єкта (явища) — вирази (240) та (241).

Для перевірки наведених вище положень було проведено інтегрування геолого-геофізичних даних та даних ДЗЗ для Липоводолинського родови-

ща на предмет пошуку ВВ. Загальна кількість інформаційних шарів — 18. Були застосовані два методи: класичний метод Демпстера-Шейфера та метод, запропонований авторами.

Під час застосування класичного методу Демпстера-Шейфера були використані усі 18 інформаційних шарів та апіорні дані — результати геологорозвідки, які у подальшому використовувались для побудови (формування) відповідних гіпотез. Результат застосування класичного методу наведений на рис. 2.66. З його аналізу видно, що для значної площі родовища значення функції довіри складає 0. Це пов'язано в першу чергу з тим, що класичне комбінаційне правило Демпстера не завжди адекватно комбінує суперечливі свідчення, особливо в тих випадках, коли їх маса дорівнює 0.

Під час застосування методу, що запропонований, були використані 9 інформаційних шарів.

Результат застосування запропонованого методу наведений на рис. 2.67. З його аналізу видно, що уся площа родовища класифікована на предмет наявності ВВ. Крім того, під час побудови зазначеної карти була проведена ймовірнісна трансформація інтегрованих даних для визначення точкової оцінки відповідних гіпотез, яка знаходиться між значенням функції довіри та правдоподібності. Тобто метод, який запропонований, позбавлений недоліків, що характерні для комбінаційного правила Демпстера, та дозволяє перейти від інтервальної оцінки до точкової.

2.1.1.2. Інтеграція дистанційних та геолого-геофізичних даних за удосконаленою моделлю Байєса

Класична модель Байєса застосовується при картуванні нафтогазоперспективних ділянок на основі гіперкубу дистанційних та геолого-геофізичних даних [220]. За нею розраховуються апостеріорні ймовірності належності растрових елементів гіперкубу позитивному еталону, яким вважаються просторова околиця продуктивних розвідувальних свердловин [221]. Необхідні для цього розподіли значень апіорних та умовних ймовірностей елементів гіперкубу оцінюються заздалегідь визначеними позитивними та негативними просторовими еталонами.

Апостеріорна ймовірність позитивного еталона $P^+(x)$ для поточного елемента $x \in X$ гіперкубу даних X дорівнює [24]:

$$\frac{P^+ \cdot P(x|X^+)}{P^+ \cdot P(x|X^+) + P^- \cdot P(x|X^-)}, \quad (2.103)$$

де P^+ , P^- — апіорні ймовірності позитивного та негативного еталонів, $P(x|X^+)$, $P(x|X^-)$ — умовні ймовірності належності елемента x позитивному X^+ та негативному X^- еталонам гіперкубу даних.

Оцінювання умовних ймовірностей $P(x|X^+)$ і

$P(x|X^-)$ здійснюється за різноманітними статистичними моделями, наприклад, на основі інформаційної дивергенції $D(x|y)$ (2.104) або статистичної метрики Бхаттачарія $B(x|y)$ (2.105) між елементами гіперкубу x та y [223]:

$$\frac{P^+ \cdot P(x|X^+)}{P^+ \cdot P(x|X^+) + P^- \cdot P(x|X^-)} \quad (2.104)$$

$$B(x|y) = \int_U \sqrt{f[x(u)]f[y(u)]} du, \quad (2.105)$$

де $f[\cdot]$ — щільність ймовірності розподілу багатовимірного сигналу в елементі гіперкубу, U — область можливих радіометричних значень сигналу.

Щільності розподілів радіометричних значень сигналів в позитивних $f(X^+)$ та негативних $f(X^-)$ еталонах може бути оцінено за відповідними гістограмами гіперкубу даних. Інформаційна дивергенція (2.104) та відстань Бхаттачарія (2.105) дозволяють обчислити необхідні умовні ймовірності еталонів в кожному елементі гіперкубу [224]:

$$B(x|y) = \int_U \sqrt{f[x(u)]f[y(u)]} du, \quad (2.106)$$

$$P(x|X^+) \equiv 1 - \exp[-B(x|X^+)], \quad P(x|X^-) \equiv 1 - \exp[-B(x|X^-)], \quad (2.107)$$

де n^+ , n^- — потужності статистичних вибірок позитивного та негативного еталонів.

Безпосереднє оброблення гіперкубу даних за (2.104) і (2.105) суттєво ускладнює наявність шарів даних логічного (булевського) типу — геологічні розломи, бінарні аномалії, тощо. В цьому разі оцінки інформаційної дивергенції або інших статистичних метрик часто okazуються виродженими, і тому обчислити ймовірності (2.106) і (2.107) не вдається. З іншого боку, шари Булевських даних є математичною ідеалізацією розподілу реальних фізичних параметрів із своїми статистичними законами, які можливо оцінити за гістограмами навчальних вибірок. Отже при практичному використанні гіперкубів даних із окремими Булевськими шарами класична Байєсівська модель (2.103) потребує попередньої передоброби вхідних даних з метою запобігання вироджених оцінок умовних ймовірностей. Для цього існує декілька шляхів: штучне розмиття бінарних даних, просторова інтерполяція, евристична трансформація та ін. У нашому випадку було застосовано попереднє оцінювання статистичних характеристик ймовірнісних розподілів з відповідною корекцією вхідних даних перед виконанням інтеграції.

Байєсівську інтеграцію дистанційних і геолого-геофізичних даних за удосконаленими моделями (2.106) і (2.107) виконано на гіперкубі з 18 шарів даних, як і в попередній частині (рис. 2.68, 2.69). Результати показано на рис. 2.70 та 2.71.

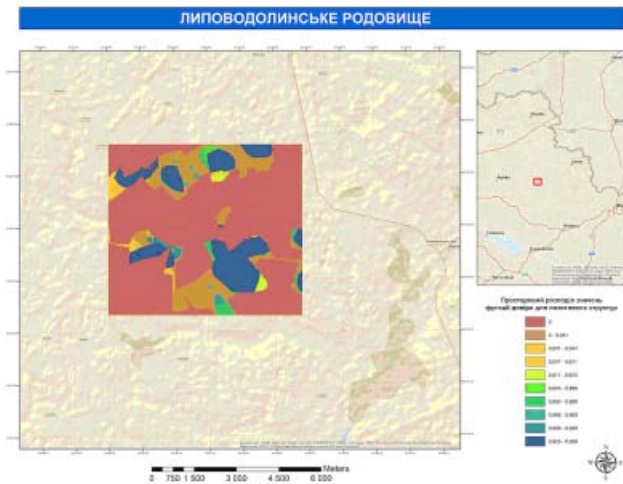


Рис. 2.68. Результат застосування класичного методу Демпстера-Шейфера для Липоводолінського родовища

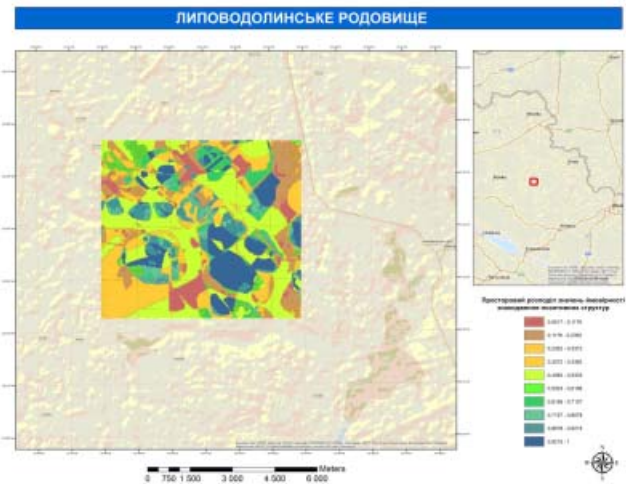


Рис. 2.69. Результат застосування запропонованого методу для Липоводолінського родовища

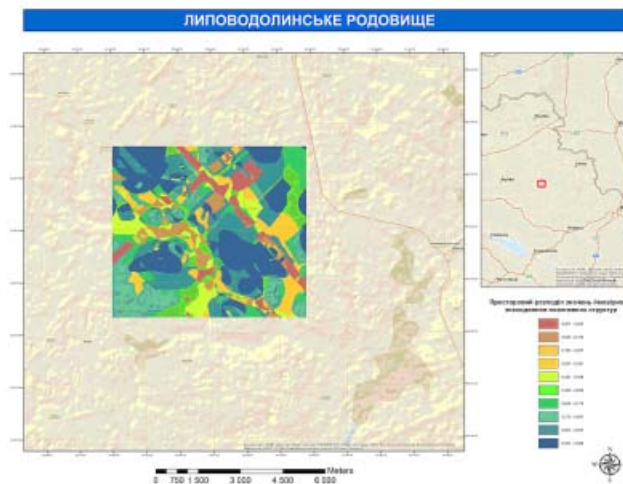


Рис. 2.70. Результат застосування Байєсівської інтеграції даних на основі інформаційної дивергенції для Липоводолінського родовища

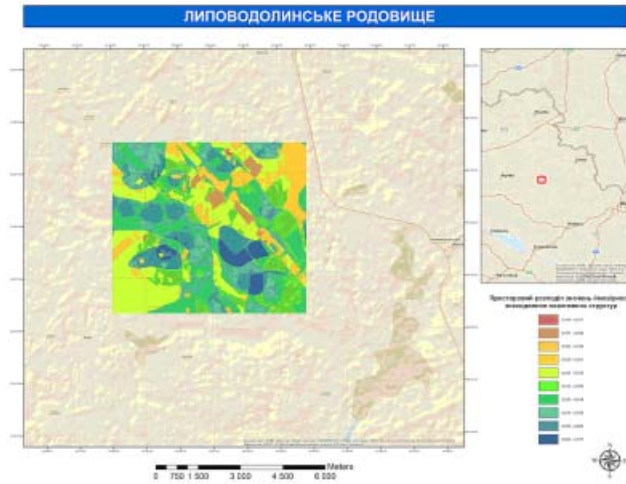


Рис. 2.71. Результат застосування Байєсівської інтеграції даних на основі метрики Бхаттачарія для Липоводолінського родовища

2.11.3. Геологічна інтерпретація отриманих результатів інтеграції даних для Липоводолінського родовища

Дослідження інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних при пошуках покладів нафти та газу проводилося на Липоводолінському нафтогазоконденсатному родовищі. Воно в тектонічному відношенні знаходиться в західній частині приосьової зони ДДЗ і входить до складу Артюхівсько-Липоводолінського валу.

У 1962 році структурно-картувальним бурінням в палеогенових відкладах було виявлено Липоводолінське підняття. За даними сейсмічних робіт MBX побудовані структурні карти покрівлі горизонту IV, горизонтів Vv2 та Vv3. В 1972 р. на площі пробурена параметрична свердловина № 453. Сейсмічними дослідженнями МСГТ виділено два склепіння — Липоводолінське та Пенківське [225].

В геоморфологічному відношенні площа Липоводолінської нафтогазоносної структури розташована на правобережжі р. Хорол в межах новохарківської неогенової тераси [226]. Склепіння структури підкреслюється дискордантним закладанням правостороннього притоку — балки р. Хорол, верхів'я якої розгалужується, охоплюючи припіднятий блок рельєфу в межах склепіння структури з обох боків, утворюючи вилкоподібний плановий рисунок (рис. 2.72). На космічних знімках цей блок чітко фіксується за короткими лівими та правими притоками основних балок, які стікають з вершини блоку, що підкреслюється площинним зливом поверхневих ґрунтів з площини блоку та свідчить про його неотектонічну активність. Схожий по активності блок спостерігається північно-західніше свердловини № 9, від якої він відділений лінеamentом. Можливо, тут слід очікувати структурне ускладнення у відкладах нижнього карбону.

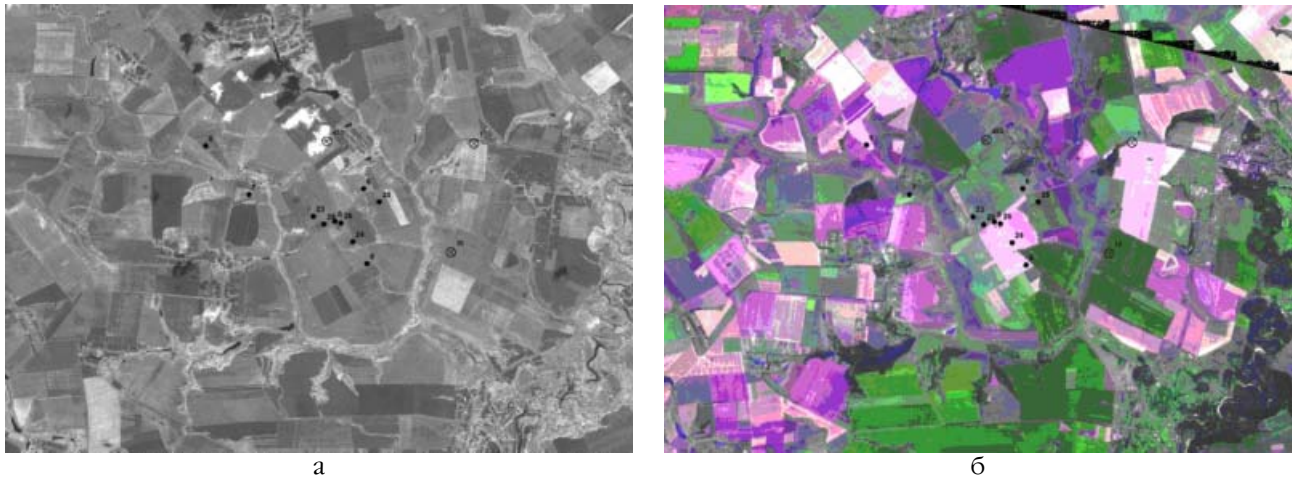


Рис. 2.72. Липоводолінське нафтогазоносне родовище. Склепіння структури підкреслюється вилокподібним плановим рисунком верхів'я балки, правого притоку р. Хорол: (а — Landsat/TM, б — EOS/ASTER)

З метою уточнення геологічної будови Липоводолінського нафтогазового родовища було застосовано інтегрування геолого-геофізичних даних, оптичних аномалій рослинного покриву, результатів дешифрування багатоспектральних космічних знімків, з виділенням лінеamentів та їх зон. Космічна радарна топографічна зйомка SRTM дозволила побудувати схему морфотектозогіпс та виділити крупні неотектонічні блоки. Всі результати зведені на схему структурно-геоморфологічних досліджень (рис. 2.73).

Результат застосування класичного методу Демпстера-Шейфера для прогнозування нафтогазоносності на території Липоводолінського родовища (див. рис. 2.68) свідчить, що більшості території значення функції довіри складає 0. Із запропонованих 10 свердловин 3 знаходяться на цій території, тобто не було враховано їх значення. Складається враження, що дуже високу вагову оцінку отримали тільки неотектонічні підняття.

Результатом аналізу нафтогазоносності за допомогою запропонованого методу інтеграції геопросторових даних з урахуванням корельованості і узгодженості гіпотез та конфліктності інформаційних джерел є карта розподілу вихідної ймовірності, за якою можна дати комплексну оцінку нафтогазоперспективності досліджуваної площі (див. рис. 2.69). Слід звернути увагу, що використання цього методу краще підкреслює блокову неоднорідність родовища, що підтверджено геологічною розвідкою. Крім того, непродуктивні свердловини №10, №453 віднесені до низької прогнозовної вірогідності 20 та 40% відповідно, продуктивні свердловини №9, №23, №24, №26, №28 — до прогнозовної вірогідності 90%, а 7 та 8—80%.

Результат застосування Байєсівської інтеграції даних на основі інформаційної дивергенції для Липоводолінського родовища представлено на рис. 2.70. Територія, яка розташована на північний захід від родовища, потребує подальшого вивчення. Ділянка в

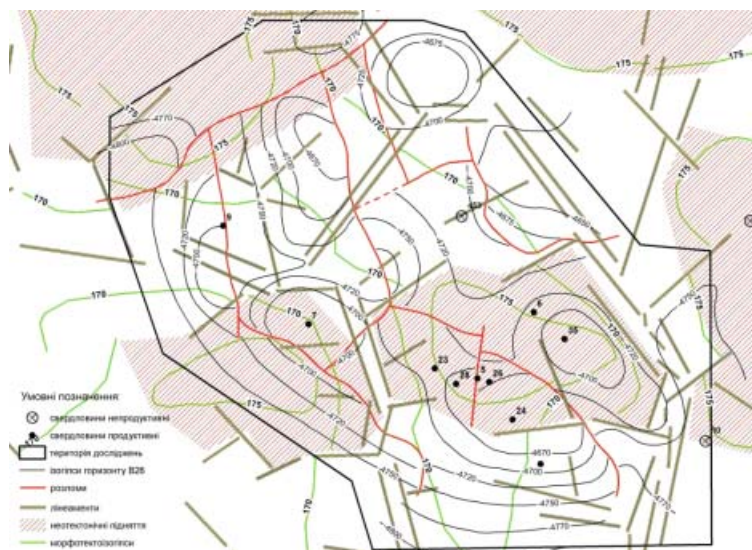


Рис. 2.73. Липоводолінське нафтогазоносне родовище. Дані структурно-геоморфологічних досліджень для подальшої інтеграції

центрі родовища в районі продуктивних свердловин №8, №23, №24, №26, №28 виявлена як найбільш вірогідна (>80%), свердловина №453 (розташована в цій самій зоні) — непродуктивна скоріше за все тому, що вона попадає на перетин зон лінеamentів та знаходиться поблизу розлому (див. рис. 2.73). Непродуктивна свердловина №10 розташована в зоні 20% ймовірності нафтогазоперспективності. Як перспективні та потребує додаткових досліджень можна визначити дві ділянки: перша — у північно-східному районі дослідження (60–80 % ймовірності) та ділянка біля свердловини №7 (> 80%).

Карта ймовірності нафтогазоперспективних ділянок отримана методом застосування Байєсівської інтеграції даних на основі статистичної метрики Бхатачарія (див. рис. 2.71) близька за результатами, отриманими попереднім методом. Вона також підкреслює роздільність території родовища. Але непродуктивні свердловини №10, №453 розташовані в зоні ймовірностей нафтогазоперспективності

50–60%. Слід відмітити, що усі продуктивні свердловини знаходяться на ділянках високої ймовірності нафтогазоносності.

Таким чином, проведено інтеграцію дистанційних та геолого-геофізичних даних при пошуках покладів нафти та газу на території Липоводолинського нафтогазоконденсатного родовища наступними методами:

- класичним методом Демпстера-Шейфера;
- удосконаленим методом на основі ТСДШ з урахуванням корельованості/узгодженості гіпотез та конфліктності джерел;
- за Байєсівською моделлю на основі інформаційної дивергенції;
- за Байєсівською моделлю на основі статистичної метрики Бхатачарія.

Найбільш інформативним результатом для геологічної інтерпретації здається застосування Байєсівської інтеграції даних на основі статистичної метрики Бхатачарія.

2.12. Евристичні методи оцінювання ділянок нафтогазоперспективних територій на основі міждисциплінарної інтеграції космічної та наземної інформації

Успішний пошук покладів ВВ потребує перероблення інформації різної фізичної природи і врахування знань, отриманих з самих різних галузей науки. Такий підхід можна назвати мультидисциплінарним або міждисциплінарним [227, 228]. Нижче розглянуто деякі евристичні методи оцінювання ділянок нафтогазоперспективних територій на основі міждисциплінарної інтеграції космічної та наземної інформації.

Особливості методології пошуку ВВ на основі оброблення матеріалів космічної зйомки в комплексі з даними наземних спостережень полягає в тому, що космічне зображення є природним інтегратором інформації та відображає процеси, що відбуваються як на поверхні, так і на глибинних горизонтах. При цьому в методології пошуку вже присутній міждисциплінарний підхід, оскільки рішення не приймається за однією ознакою, а вимагає багатокритеріальної оптимізації кількості показників, отриманих на основі інтеграції результатів багатьох досліджень.

Відомо, що над покладами ВВ мають місце зони підвищених і понижених механічних напруг, які зумовлюють зміну різних видів полів, інтенсивне перенесення тепла, рідких і газоподібних флюїдів, а також окисно-відновні процеси в зонах аномально низьких значень механічних напруг, що ототожнюються з ділянками підвищених фільтраційних властивостей гірських порід. Окислення ВВ при міграції по таких ділянках супроводжується виділенням енергії, зміною рН і Eh, що викликає перерозподіл хімічних елементів у системі вода-грунт, а також переходом реагуючих речовин (у тому числі ВВ, особливо ненасичених) із одного хімічного стану в інший, утворенням нових мінералів, зміною фізич-

них та мікробіологічних властивостей порід. Масштаби цих процесів визначаються структурою полів механічних напруг, характером геохімічних бар'єрів і мігруючих флюїдів, інтенсивністю і типом міграції, темпами тепломасообміну та іншими особливостями геологічної обстановки. В силу перерахованих обставин у зонах аномально низьких напружень формуються аномалії різних полів (табл. 2.10) [230].

Мета даного дослідження — на прикладі нафтогазоперспективних територій обґрунтувати можливість використання методів генетичного алгоритму та аналітичних мереж при оцінюванні і виборі ділянок для наступних нафтогазоперспективних робіт на основі міждисциплінарної інтеграції космічної та наземної інформації.

Завдання оцінки ділянок може бути сформульовано таким чином: наскільки подібний об'єкт розпізнавання (ділянка досліджуваної території) схожа з “узагальненим портретом” родовища ВВ. Його створення пов'язано з перебором усіх поєднань ознак, число яких в задачі синтезу компромісного варіанту, в залежності від кількості ознак і використаних ділянок родовищ, може досягти надзвичайно великих значень і при використанні методу прямого перебору стає громіздким завданням. Переконалися в цьому можна, аналізуючи рівняння:

$$N = \prod_{j=1}^m \sum_{r=b_{j\min(j)}}^{b_{j\max(j)}} b_{jr}, \quad (2.108)$$

де b_{jr} — значення r -ого варіанту j -ї ознаки ділянки родовища ВВ; $b_{j\min(j)}$ і $b_{j\max(j)}$ — мінімальне і макси-

Таблиця 2.10.

Класифікація полів, які трансформуються у зонах мінеральних напруг земної кори (за Л. М. Зорькіним, О. Л. Кузнецовим, А. В. Петуховим, 1979 р.)

Клас полів	Група полів	Параметри (компоненти), які змінюються в зонах аномальних напруг
Фізичні	Електромагнітні	Швидкість електричних хвиль, напруженість поля, електричний опір, магнітна сприйняливість, градієнти електромагнітних, електричних та магнітних полів
	Гравітаційні	Густина, локальний приріст сили тяжіння та їх градієнти
	Сейсмоакустичні	Швидкість поздовжніх та поперечних хвиль та їх коефіцієнти поглинання, інтенсивність акустичної емісії у гірських масив
	Радіаційні Термобаричні	Інтенсивність γ — випромінювань (α і β) Тензори напруг, деформацій, орієнтування та величина головних осей напруг, температура, тепловий потік, теплопровідність, теплоємність
Хімічні	Атомні	Концентрація ліофільних, нерадіоактивних та радіоактивних елементів
	Іонні	Концентрація аніонів та катіонів
	Молекулярні	Концентрації газів, неорганічних та органічних сполук мінералів
Біохімічні	Мікрофлористичні	Специфічні бактеріальні популяції та сумчасті гриби, які окислюють ВВ
	Макрофлористичні	Зміщення періодів вегетації ряду вищих рослин, зміна забарвлення листків, квітів, стовбурів рослин, морфологічні зміни (гігантизм та ін.)
	Фітогеохімічні	Концентрації хімічних елементів та їх сполук у рослинах

мальне значення j -ї ознаки; $r = \min(j), 2, 3, \dots, \max(j)$; $j = 1, 2, \dots, m$; m — кількість ділянок родовищ (еталонних об'єктів).

У зв'язку з цим для скорочення процедури формування компромісного варіанту інформативних ознак наявності ВВ і оцінки нафтогазоперспективності ділянок скористаємося еволюційним принципом мікробіології, а саме методом генетичних алгоритмів (ГА). Серед різних методів вирішення комбінаторних і оптимізаційних завдань генетичні методи належать до класу евристичних методів пошуку квазіоптимальних рішень. За аналогією, механізм селекції переноситься на вирішення прикладних завдань у вигляді гіпотези, висунутої J. H. Holland: хороші схеми рішень при схрещуванні народжують нові схеми більш високої якості [230]. У даному випадку запозичення з мікробіології еволюційних методів для математичного моделювання пошуку ВВ на основі генетичних алгоритмів слугує прикладом міждисциплінарного підходу у вирішенні технічних задач [231].

У всіх ГА можна виділити основні етапи вирішення завдань. Методологічну основу ГА становить гіпотеза селекції, яка полягає в тому, що чим вище пристосованість особини, тим вище ймовірність того, що деяка частина потомства цієї особи буде містити ще більш високі характеристики ознак, що визначають пристосованість. Еволюційні фактори в ГА реалізуються відповідними обчислювальними процедурами, які значно скорочують кількість обчислень за рахунок відсіву неперспективних варіантів.

Перше покоління складу ознак генерується випадковим чином. До нього застосовуються операції схрещування і мутації для формування нових наборів ознак, до яких уживають операцію селекції — у другому поколінні відбирають тільки найкращі за заданим критерієм (2.109). Після схрещування і мутації породжується третє покоління, і так еволюція відбувається від покоління до покоління поки не настане стагнація, тобто кількість ознак кращого складу в поколінні перестане поліпшуватися (рис. 2.74). Це дозволяє за прийнятний час з безлічі поєднань інформативних ознак продуктивних ділянок сформувати “узагальнений портрет” нафтогазоносної ділянки у вигляді набору певних ознак.

Для всіх сформованих наборів (комплектів) значень ознак обчислюється функція фітнесу, за максимальним значенням якої вибирається компромісний варіант для кожної X_r хромосоми [232, 233]:

$$FF(X_r) = \min_{l=1}^k \{F_{rl}\}, \quad (2.109)$$

$$F_{rl} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m p_j G(b_{jr}, a_{jl}), \quad (2.110)$$

$$G(b_{jr}, a_{jl}) = 1 - S(b_{jr}, a_{jl}), \quad (2.111)$$

$$S(b_{jr}, a_{jl}) = \frac{|(a_{jl} - b_{jr})|}{|a_{jl}|}, \quad (2.112)$$

де: F — функція приналежності; G — функція відповідності; S — функція близькості; k — кількість ділянок родовищ ВВ; $l = 1, 2, \dots, k$; m — кількість інфор-

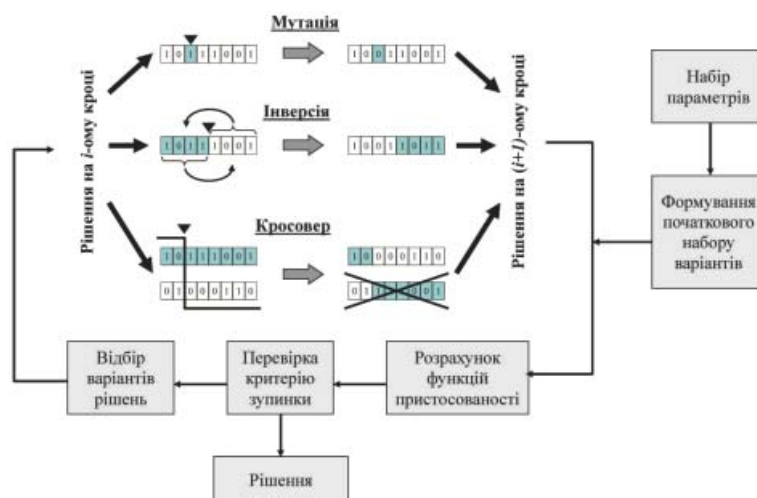


Рис. 2.74. Принцип роботи генетичних алгоритмів

мативних ознак; a_{ji} — значення j -ї ознаки i -ї ділянки родовища ВВ; p_j — значення вагового коефіцієнта j -ї ознаки i -ї свердловини, $j = 1, 2, \dots, m$; n — кількість сформульованих наборів (комплектів) значень ознак; b_{jr} — значення j -ї ознаки r -го варіанту набору значень ознак, $r = 1, 2, \dots, n$.

На лінгвістичному рівні абстракції задача оцінки нафтогазоперспективності ділянки може бути сформульована таким чином: наскільки об'єкт розпізнавання відповідає компромісному набору ознак (у нашому випадку це ділянки досліджуваної території).

Для формалізації процесу автоматичного порівняння ділянок з компромісним комплектом ознак пропонується застосувати методологію класифікації дискретних об'єктів. Для цього були використані алгоритм і програма на основі методу багатокритеріальної оптимізації [236]. Для вирішення таких завдань використовуються алгоритми, які засновані на обчисленні оцінок, що складаються з наступних етапів: введення функції близькості порівнюваних величин — S , обчислення оцінки для функції близькості — функції відповідності — G , обчислення оцінок відповідності ознак досліджуваної ділянки території інформативним ознакам ділянки, прийнятої за еталон — функції приналежності F . Оцінка ступеня відповідності досліджуваної ділянки компромісному комплекту ознак визначається автоматично за значенням функції приналежності.

Для позначення компромісних інформаційних ознак і досліджуваних ділянок використовується нумерація від 1 до m . Тоді $a = (a_1, a_2, \dots, a_1, \dots, a_m)$ — безліч компромісних інформативних ознак, де a_j — j -та інформативна ознака ділянок родовищ ВВ, m — кількість інформативних ознак ділянок родовищ ВВ, $b_c = (b_{c1}, b_{c2}, \dots, b_{cp}, \dots, b_{cn})$ — безліч характеристик досліджуваної ділянки, де b_{cj} — j -та інформативна ознака c -ї досліджуваної ділянки B_c , n — кількість інформаційних ознак досліджуваної ділянки, де $n = m$.

Тепер завдання класифікації ділянок за нафтога-

зоперспективністю може бути формалізовано як багатокритеріальна оптимізація m критеріїв, кожен з яких є функцією відповідності досліджуваної ділянки компромісному набору ознак.

На відміну від прямих методів, розрахованих на свою природою АТП, які претендують на високу ефективність, даний підхід відповідає сучасним уявленням про нелінійний і нерівномірний характер процесів нафтогазонакопичення. Це обумовлює відому невизначеність локалізації покладів і математичну некоректність (в розумінні Ж. Адамара — А. Тихонова) прямої і зворотної задач розвідувальної геофізики (пошукової геохімії) [236]. Таким чином, він може бути корисний, перш за все, при виборі перспективних ділянок для детальних геофізичних досліджень, ранжирування прогнозно-нафтогазоносних площ при введенні їх в пошукове буріння, а також для екологічного моніторингу нафтогазовидобувних районів.

На другому етапі досліджень виконуються детальна оцінка та вибір найперспективнішої ділянки для подальшої нафтогазопошукової розвідки на прикладі дослідження двох ділянок (A та B), які отримали на першому етапі найбільший бал за цільовою функцією приналежності F . Це здійснюється методом аналітичних мереж (МАН) [235, 236]. Вибір цього методу обумовлений тим, що МАН дозволяє обробляти більш різноманітні і складні структури з урахуванням залежності між рівнями і зворотними зв'язками між елементами рівнів, тим самим досягаючи більшої об'єктивності і достовірності в прийнятті рішень. У мережних задачах компоненти розглядаються як взаємодіючі об'єкти, які впливають один на одного щодо чітко сформульованого керуючого критерію. Будь-яке рішення в МАН представлене у вигляді орієнтованої мережі, на відміну від методу аналізу ієрархій (МАІ), де потоки спрямовані зверху вниз.

Для визначення найбільш нафтогазоперспективних ділянок на основі МАН проводиться струк-

тування проблеми у вигляді мережевої моделі (рис. 2.75), на основі якої визначаються взаємозв'язки між запропонованими альтернативами і узагальненими критеріями вибору.

Розглянемо більш детально процес оцінки і вибору території для нафтогазоперспективних робіт. В ході роботи використовується програмний продукт *Super Decision*. Розрахунок складається з трьох кроків.

Крок 1. Визначення експертами в предметній області пріоритетів, за якими будуть оцінюватися кожна ділянка. Оцінка проводилася за шкалою інтенсивності від 1 до 9, яка запропонована Т. Сааті [236]. Потім в *Super Decision* будуються взаємозв'язки між критеріями та альтернативами і по кожному вносяться експертні оцінки (рис.2.76).

Крок 2. Розрахунок суперматриці і граничної матриці елементів взаємозв'язку. Визначаються нафтогазоперспективність, затрати та ризики на кожній ділянці по окремим узагальненим критеріям (рис. 2.77).

Крок 3. Використовуючи стандартну адитивну (ймовірнісну) формулу (additive (probabilistic)) з урахуванням узагальнених критеріїв і експертних оцінок по пріоритетах вибраних критеріїв на основі кінцевого ранжування об'єктів отримують фінальні результати оцінки ділянок (рис. 2.78).

Таким чином, можна сказати, що евристичні методи — генетичні алгоритми, аналітичні мережі, міждисциплінарна інтеграція космічної та наземної інформації — дозволяють успішно оцінювати нафтогазоперспективність ділянок.

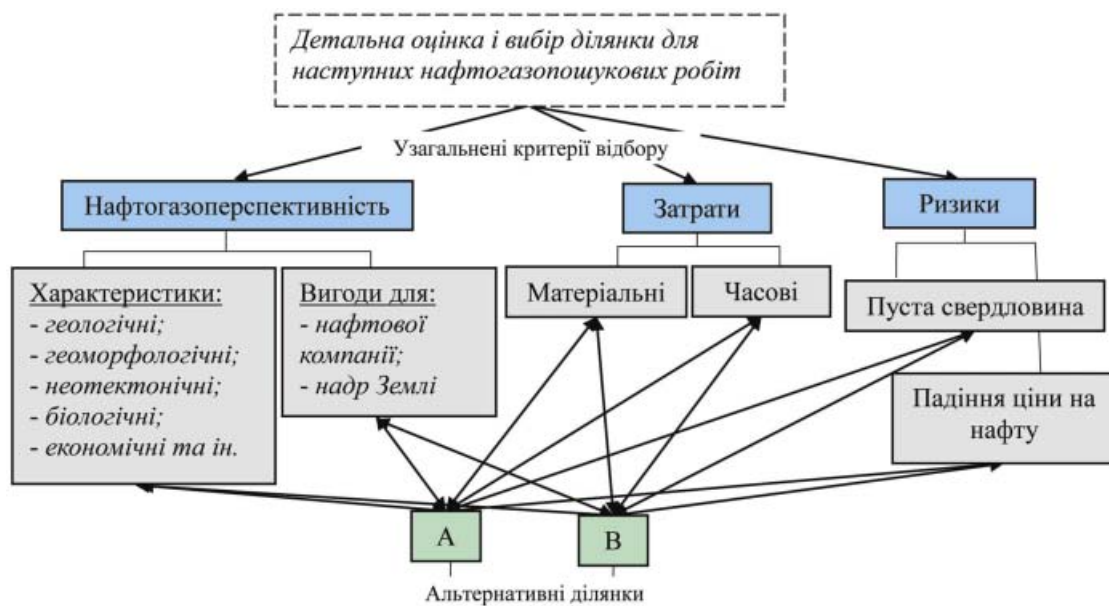


Рис. 2.75. модель детальної оцінки і вибору ділянок території для нафтогазоперспективних робіт

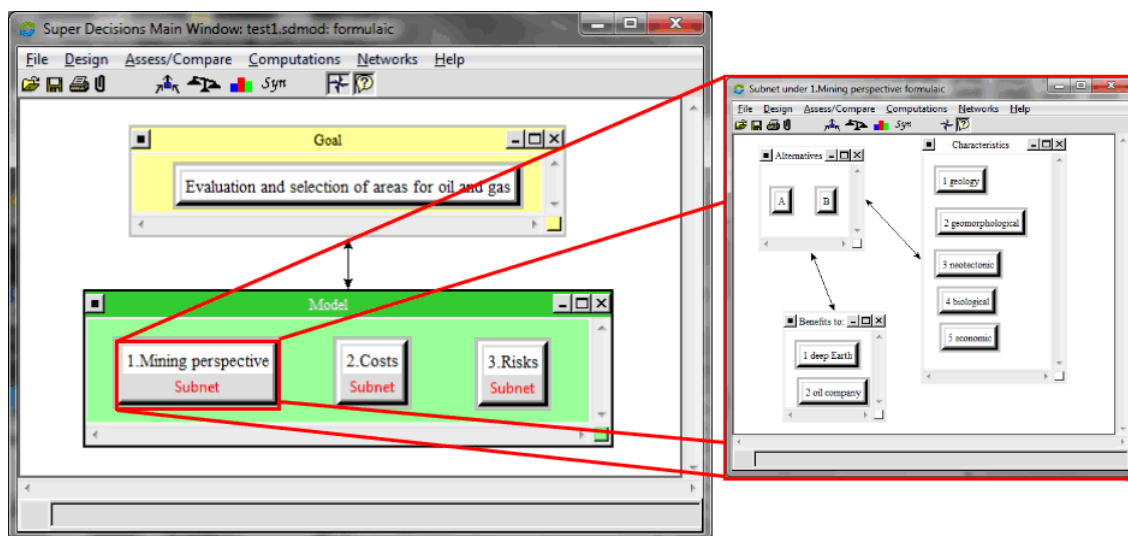


Рис. 2.76. Приклад побудови взаємозв'язків між критеріями та альтернативами в Super Decision

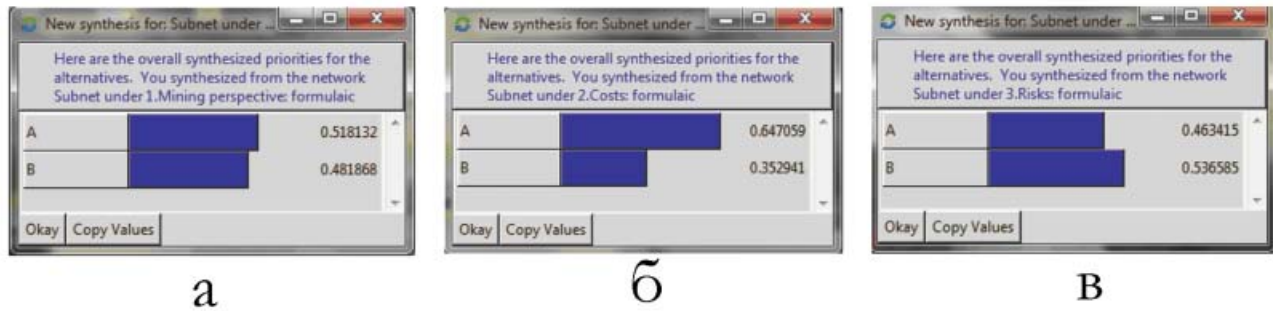


Рис. 2.77. Результати детального дослідження нафтогазоперспективних ділянок по окремих узагальнених критеріях: а — “Нафтогазоперспективність”; б — “Затрати”; в — “Ризики” в програмному вікні *Super Decision*

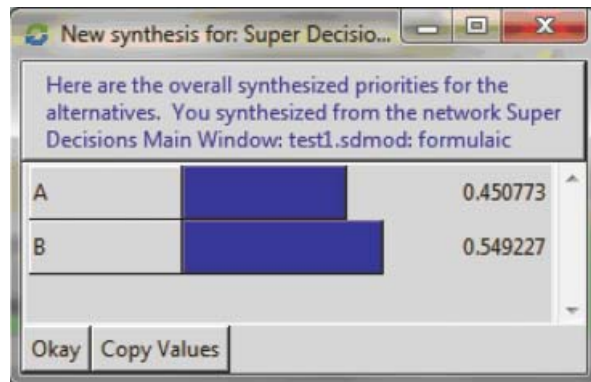


Рис. 2.78. Результати оцінки і вибору ділянок для подальших нафтопошукових робіт

2.13. Оцінка нафтогазоперспективності ділянок Дніпровсько-Донецької западини на основі міждисциплінарної інтеграції аерокосмічної і наземної інформації

Для апробації підходу, розглянутого у п. 2.1.2, була вибрана Турутинсько-Рогінцівська зона структур. У тектонічному відношенні вона належить до Великобубнівського структурного валу, що знаходиться в північно-західній частині північної прибортової зони ДДЗ (рис. 2.79), яка характеризується блоково-ступінчастою будовою фундаменту з поступовим зануренням блоків у бік осової частини западини [237]. Неотектонічна активність блоків фундаменту обумовила особливості формування рельєфу, про що свідчать сучасні інтенсивні гравітаційні процеси в межах цих блоків, та пряме відображення основних структурних елементів ДДЗ в рельєфі. Так, долина р. Ромен, яка простягнулася на ділянці Турутинсько-Рогінцівської зони структур з північного заходу на південний схід, успадковує частину крайового розлому. Зони лінеamentів, які виділені за комплексом структурно-геоморфологічних ознак та розділяють на блоки всю зону, можуть відповідати малоамплітудним розломам, або ж зонам підвищеної тріщинуватості в породах фундаменту і осадовій товщі і також бути шляхами флюїдопровідності.

В рельєфі Турутинсько-Рогінцівська зона — це густо розчленоване ярами та балками лівобережжя та правобережжя р. Ромен в межах неогенової Новохарківської тераси з абсолютними відмітками від

160 до 187 м. Більш інтенсивне розчленування припадає на ділянки розташування родовищ. Це невеликі балки із значним розвитком бокових розгалужень, які ускладнюють схили ріки Ромен. Крупні, видовжені балки розташовані майже паралельно напрямку долини р. Ромен. Сама долина на всій протяжності має майже однакову ширину та лише ускладнюється ділянками терасових рівнів, а в найбільш активних, з точки зору неотектоніки, місцях досить значними конусами виносу.

Розмір площі, що досліджувалась, складає 540 км². Дослідження виконано у два етапи: на регіональному та детальному рівні. У першому випадку територія була розділена на 139 елементарних ділянок розміром 2 × 2 км² (рис. 2.80). Оскільки в межах Турутинсько-Рогінцівської зони структур існують родовища ВВ, є можливість на основі інформативних ознак ділянок сформувати компромісний склад ознак, значення яких максимально відповідають параметрам кожного з присутніх на території родовища ВВ.

У межах Турутинсько-Рогінцівської зони структур розташована ціла низка родовищ ВВ, які використані нами у якості вхідної інформації — еталонних об'єктів (ділянок родовищ): Бабчинське нафтогазоконденсатне, Великобубнівське та Володимирівське газоконденсатні, Східнорогінцівське, Житне та

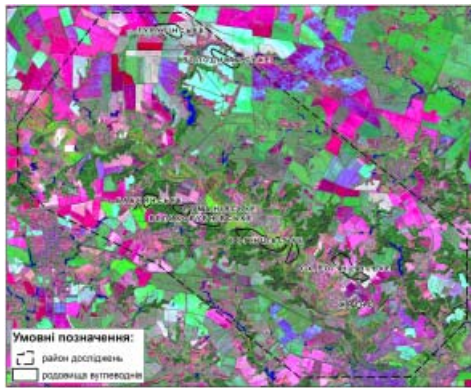


Рис. 2.79. Турутинсько-Рогінцівська зона структур. Фрагмент космічного знімку Landsat-8, 30.08.2015 р., (комбінація спектральних каналів 6, 5, 3)

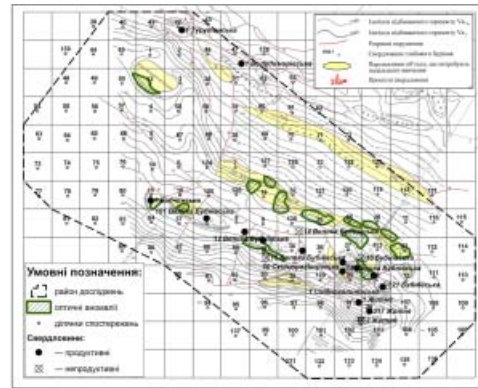


Рис. 2.80. Турутинсько-Рогінцівська зона структур. Структурна карта за горизонтами відбиття $V_{B_{2n}}$ та V_{B_3} з результатами попередніх аерокосмічних досліджень

Турутинське нафтове родовище. Крім того, у цій зоні розташовані структури, які за різними даними можуть бути продуктивні: Плужниківська, Пд. Бочаренківська, Горова, Пн.-Рогінцівська, Пн.-Калинівська, Погрібська, Романівсько-Бабчинська, Сх.-Калинівська.

У якості вхідної інформації були використані:

- топографічні карти масштабів 1:50 000–1:100 000;
- структурні карти масштабів 1:200 000–1:25 000 за різними відбивними горизонтами;
- матеріали багатоспектральних космічних зйомок;
- дані радарної топографічної зйомки (SRTM);
- основні відомості про нафтогазоносність еталонних родовищ та промислові дані щодо продуктивності свердловин, які пробурені в межах району досліджень (параметричні, пошукові, розвідувальні, експлуатаційні).

Для виявлення оптичних аномалій рослинності та ґрунтів (див. рис. 2.80) над прогнозними об'єктами, були використані матеріали багатоспектральної космічної зйомки, а також результати наземних фотометрувань, які виконано у попередні роки науковцями ЦАКДЗ. Їх вибір охоплював весь часовий діапазон вегетації різних видів рослин і стану ґрунтів з метою встановлення періодів реєстрації оптичних аномалій, обумовлених покладами ВВ. Так, наприклад, на Східнорогінцівській та Житній площах космічна зйомка виконана у період травня–червня та кінця серпня різними системами. У цей період відбувається найбільш різка зміна фізіологічного стану рослинного покриву, й тому він може бути найінформативнішим (інтенсивність оптичних аномалій оцінена в відносних балах від 1 до 10).

Неотектонічно-активні ділянки виділено за наступними геоіндикаційними ознаками:

- аномально підвищені ділянки різних геоморфологічних рівнів;
- наявність аномально розташованих терасових рівнів у долині р. Ромен;
- аномальне зміщення русла р. Ромен;
- центробіжне розтікання яружно-балкової мережі;

- асиметрія схилів;
- розвиток донних врізів, молодих ярів та конусів виносу.

Вся територія Турутинсько-Рогінцівської зони структур за вище перерахованими ознаками була розбита на неотектонічні блоки, охарактеризовані в балах від 1 до 10 (рис. 2.81).

Крім того, були використані тематичні схеми гравітаційного поля, залишкових аномалій гравітаційно-

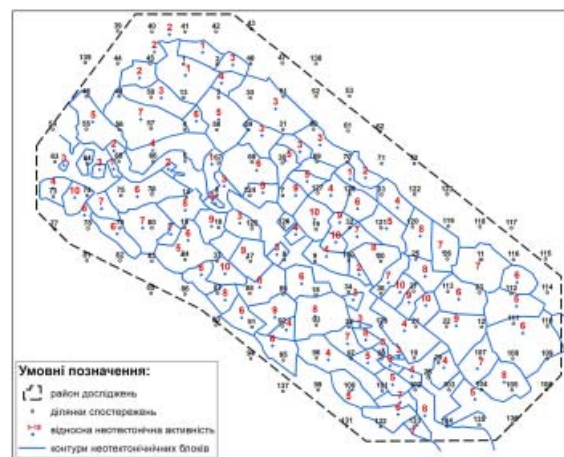


Рис. 2.81. Турутинсько-Рогінцівська зона структур. Схема відносної неотектонічної активності блоків

го поля, аномального магнітного поля, температур на зрізі –3 500 та –5 000 метрів, а також температур підшови свити C_2^1 башкірського ярусу середнього карбону і підшови відкладів верхньові верхньовізейського під'ярусу нижнього карбону, геотермічної ступені, ізоспленді і палеотемператур верхньовізейсько-серпухівського нафтогазоносного комплексу. На рис. 2.82 і 2.83, в якості прикладу, надані дві з них.

Була створена програма, за допомогою якої на основі ознак ділянок родовищ ВВ отримано компромісний варіант комплексу інформативних ознак (за максимальним значенням функції = 0.865) для оці-

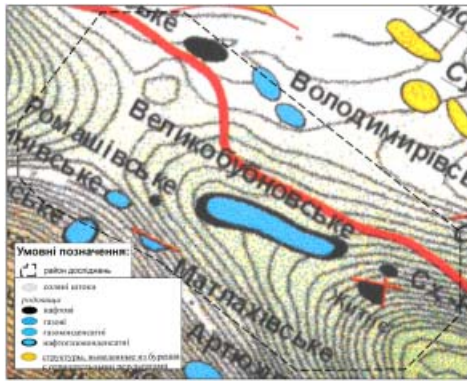


Рис. 2.82. Фрагмент схеми гравітаційного поля



Рис. 2.83. Фрагмент схеми залишкових аномалій гравітаційного поля

нки нафтогазоперспективності 139 ділянок Турутинсько-Рогінцівської зони структур ДДЗ на регіональному рівні (табл. 2.11).

В результаті вище виконаного аналізу присутності ВВ для оцінки перспективності ділянок Турутинсько-Рогінцівської зони структур ДДЗ на регіональному рівні було вибрано наступні інформативні ознаки:

- інтенсивність залишкових аномалій гравітаційного поля ($-16 \dots +4$ мГал);
- інтенсивність гравітаційного поля ($-5 \dots +2$ мГал);
- величина геотермічної ступені ($20-40$ м/°С);
- інтенсивність магнітного поля ($-500 \dots 0$ нТл);
- температура на зрізі 3 500 м ($140-180$ °С);
- температура на зрізі 5 000 м ($140-180$ °С);
- температура підшви відкладів верхньовізейського під'ярусу нижнього карбону ($75-150$ °С);
- неотектонічна активність блоків (1–10);
- інтенсивність оптичних аномалій (1–10).

У табл. 2.12 надано інформативні ознаки окремих ділянок родовищ ВВ Турутинсько-Рогінцівської зони структур, а також результати обчислення значення функції приналежності F для цих ділянок.

Отриманий комплект компромісних значень інформативних ознак було використано для порівняння з ним характеристик (ознак) при класифікації кожної із 139 ділянок (див. рис. 2.83) Ту-

Таблиця 2.11.

Компромісні значення інформативних ознак оцінки нафтогазоперспективності ділянок

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ознаки									
Значення	-5	-9	40	-210	100	150	100	6	9
Ознак									

* номери ознак відповідають таб. 2.12

рутинсько-Рогінцівської зони структур ДДЗ, шляхом послідовного обчислення функції приналежності F .

Результати оцінки нафтогазоперспективності ділянок Турутинсько-Рогінцівської зони структур ДДЗ на основі методу генетичних алгоритмів і міждисциплінарної інтеграції аерокосмічної та наземної інформації наведено на рис. 2.84. Відносна перспективність дослідних ділянок представлена в градієнтних кольорах, значення яких пропорційні їхній нафтогазоперспективності.

ДДЗ на основі методу генетичних алгоритмів і міждисциплінарної інтеграції аерокосмічної та наземної інформації наведено на рис. 2.84. Відносна перспективність дослідних ділянок представлена в градієнтних кольорах, значення яких пропорційні їхній нафтогазоперспективності.

Таблиця 2.12.

Значення інформативних ознак ділянок родовищ ВВ.

№№ ділянок родовищ ВВ	Функція F (фітнес-функція)	Значення окремих ознак								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	0.81	-4	-10	45	-210	120	150	150	10	10
27	0.81	-2	-6	45	-215	100	145	80	8	9
22	0.83	-3	-9	45	-185	110	140	80	7	8
10	0.84	-5	-10	45	-200	100	145	100	5	6
16	0.82	-4	-3.5	40	-270	90	130	100	7	9
17	0.82	-5	-4	40	-275	150	140	110	7	9
18	0.82	-5	-5.5	40	-250	100	150	100	7	6
15	0.82	-3	-2	40	-260	100	130	95	6	9
29	0.81	-6	-12	40	-185	110	150	100	5	6
Вагові коефіцієнти		3	4	2	3	4	4	4	8	8

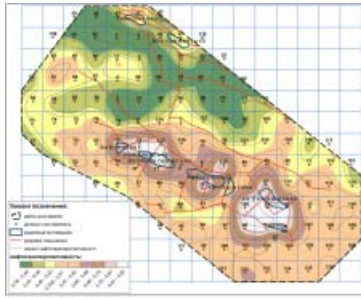


Рис. 2.84. Результати оцінювання нафтогазоперспективності ділянок Турутинсько-Рогінцівської зони структур ДДЗ

Таким чином, на прикладі дослідження двох ділянок показано можливість отримання детальної оцінки нафтогазоперспективності території методом МАМ. На прикладі Турутинсько-Рогінцівської зони ДДЗ показано можливість використання евристичних методів генетичного алгоритму та аналітичних мереж для оцінки нафтогазоперспективності і вибору ділянок для наступних пошуково-розвідувальних робіт на основі міждисциплінарної інтеграції космічної і наземної інформації різної фізичної природи та даних різної розмірності.

2.14. Застосування адаптивних спектральних індексів для пошуку покладів вуглеводнів з використанням матеріалів космічної зйомки й наземного фотометрування

Вплив покладів ВВ на спектральні характеристики рослин розглядається в багатьох роботах. Результати спектрометрування пшениці над Глібовським газовим родовищем (Крим, Україна), де значні об'єми міграції ВВ з родовищ нафти й газу спостерігаються в зонах розламі, отримані польовим спекторадіометром *Fieldspec3FR* у сонячну погоду 28 травня 2010 р. [238]. Установлено, що в місцях аномально високих концентрацій газоподібних ВВ у ґрунті значення вегетаційних індексів положення червоного краю (*Red-edge Position — REP*) і мерісовського наземного хлорофільного індексу (*MERIS Terrestrial Chlorophyll Index — MTCI*) зменшуються в порівнянні з їхніми значеннями для фонові ділянки за межами родовища. Це може дозволити використати при пошуку газу даних сенсорів, які мають у зоні червоного краю необхідні 3 канали й відповідний просторове розрізнення, як, наприклад, *RapidEye* (*MSI Multi Spectral Imager DLR Waveband: 4 VIS + 1 NIR band: — 510 nm, 520–590 nm, 630–68 nm, 690–730 nm, 760–850 nm Spatial resolution: 6.5 m*).

При гіперспектральній зйомці спекторадіометром *Fieldspec3FR* формуються значення в діапазоні 350–2500 нм у спектральних зонах розміром 1 нм. Гіперспектральна космічна інформація вимагає нових підходів до аналізу даних, так для дешифрування застосовується спектральна функція зсуву по довжині хвилі електромагнітного випромінювання, як інтегральний показник спектральних характеристик елементів ландшафтів [239]. Значення кута нахилу спектральної функції зсуву зростає зі збільшенням частки рослинності на знімку й зменшенням ділянок без рослинності (ґрунт, дороги, дахи і т. д.).

Пропонується інформативні спектральні характеристики газових родовищ виробляти на основі спектрального індексу — показника, що розраховується в результаті операцій з різними спектральними діапазонами (каналами) даних наземного й дистанційного зондування. У цей час існує багато варіантів спектральних індексів. Вони підбирають-

ся експериментально (емпіричним шляхом), виходячи з відомих особливостей кривих спектральної відбивної здатності рослинності й ґрунтів.

При обробленні космічних знімків у програмному комплексі *ENVI* є спеціальний калькулятор спектральних вегетаційних індексів, який дозволяє розрахувати 27 вегетаційних індексів, використовуваних для оцінки стану рослинності, вмісту пігментів, азоту, вуглецю, води [240]. При роботі з гіперспектральним знімком може бути виконані розрахунки всіх 27 індексів. Це розраховані в різних спектральних зонах індекси — “зеленості”, ефективності використання світла, вмісту вуглецю у вигляді лігніну й целюлози та ін.

Емпіричні спектральні індекси за гіперспектральними супутниковими даними були використані для побудови карт хвойних, що належать сімейству кіпарисових у Кордільєрах Південної Америки [238], а вирішення завдання класифікації покриттів ландшафту по багатоспектральним зображенням виконується шляхом оптимізації складу індексів, що забезпечує максимальну роздільність класів з використанням дивергенції Кульбака-Лейблера [242].

Алгоритм визначення адаптивних спектральних індексів

Значення спектрограми, одержані спекторадіометром *Fieldspec3FR* L_k , позначимо $L_{k+1}, \dots, L_{k+K}$, де $k = 350 \text{ нм}$, $K = 2150 \text{ нм}$. З отриманих спектрограм моделюються канали *Landsat 7* у вигляді середніх значень спектральних діапазонів, що відповідають табл. 2.13. Середні значення позначаються як $L(\lambda_p)$, $p = 1, 2, \dots, P$, де P — кількість спектральних каналів.

Пропонується адаптивний спектральний індекс (*Adaptive Spectral Index — ASI*) визначати за оптимальними довжинами хвиль, що одержані за умови максимального модулю різниці між значеннями індексів для еталонних точок на ділянках, газопродуктивність яких підтверджена бурінням (сигнал), $ASI(s_p)$ та для ділянок без покладів ВВ (фон) $ASI(f)$ [244].

Таблиця 2.13.
Спектральні канали Landsat-7 [243]

№ каналу	Band 1 (B1)	Band 2 (B2)	Band 3 (B3)	Band 4 (B4)	Band 5 (B5)	Band 6 (B6)	Band 7 (B7)
Спектральний діапазон, нм	450–515	525–605	630–690	750–900	1550–1750	10400–12500	20900–23500

В цьому дослідженні алгоритм побудований на оцінці вздовж маршруту відстані між середніми значеннями спектральних індексів з урахуванням їхніх середньоквадратичних відхилень. Визначення оптимальних довжин хвиль (λ_p і λ_q ($p = 1, 2, \dots, P-1$), ($q = 2, 3, \dots, P$), де P — кількість спектральних каналів, визначається за наведеним далі алгоритмом.

Для спектрів області покладу ASI визначається відповідно виразу

$$ASI(s_i) = \frac{L(\lambda_p, s_i) - L(\lambda_q, s_i)}{L(\lambda_p, s_i) + L(\lambda_q, s_i)}, \quad (2.113)$$

де s_i — точки області родовища, ($i = 1, 2, \dots, I$), $p = 1, 2, \dots, P-1$, $q = 2, 3, \dots, P$.

Для спектрів фонові області ASI визначається відповідно виразу

$$ASI(f_i) = \frac{L(\lambda_p, f_i) - L(\lambda_q, f_i)}{L(\lambda_p, f_i) + L(\lambda_q, f_i)}, \quad (2.114)$$

де f_i — точки фонові області, ($j = 1, 2, \dots, J$).

На основі середніх значень SI для області родовища $ASI(S)$ і поза родовищем — $ASI(F)$ обчислюється модуль їхньої різниці M

$$M = |ASI(S) - ASI(F)|. \quad (2.115)$$

Для підвищення точності ухвалення рішення про газоперспективність й урахування варіабельності значень індексів уздовж маршруту пошуку визначаються середньоквадратичні відхилення $\sigma[ASI(S)]$ для $ASI(s_i)$ та $\sigma[ASI(F)]$ для $ASI(f_i)$.

Для множини N впорядкованих пар значень λ_p і λ_q відліків складаємо декартовий добуток N^2 і обчислюємо значення

$$M_n = \frac{|\Delta ASI| - \sigma[ASI(S)] - \sigma[ASI(F)]}{|\Delta ASI|}. \quad (2.116)$$

З отриманих значень M_n вибираємо найбільші, для пар каналів яких у кожній точки маршруту обчислюються значення ASI .

Для моделі Landsat-7, побудованої по даним спектро радіометра *Fieldspec3FR*, визначення оптимальних каналів p і q ($p = 1, 2, \dots, P-1$, $q = 2, 3, \dots, P$), де P — кількість спектральних каналів, проводиться по алгоритму (1), (2) із зазначенням номерів каналів. Для моделі знімка Landsat-7 у відповідності з виразами (1), (4) були отримані значення M_n , які представлені на рис. 2.85.

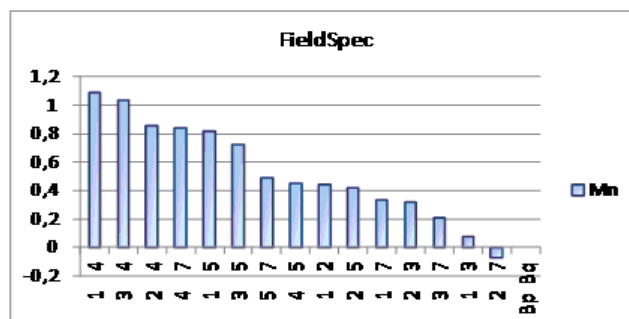


Рис. 2.85. Значення M_n для моделі Landsat 7 по даним спектро радіометра *Fieldspec3FR*, де значення B_p , B_q зазначені в табл. 2.13

Для знімка Landsat-7 за спектрами області родовища ASI визначаються відповідно до виразу

$$ASI(s_i) = \frac{L(p, s_i) - L(q, s_i)}{L(p, s_i) + L(q, s_i)}, \quad (2.117)$$

де s_i — точки області родовища, ($i = 1, 2, \dots, I$), $p = 1, 2, \dots, P-1$, $q = 2, 3, \dots, P$.

Для знімка Landsat-7 за спектрами фонові області визначаються відповідно до виразу

$$ASI(f_i) = \frac{L(p, f_i) - L(q, f_i)}{L(p, f_i) + L(q, f_i)}, \quad (2.118)$$

де f_i — точки фонові області, ($j = 1, 2, \dots, J$).

Також для знімка Landsat-7 від 6 червня 2010 р. у відповідності з виразами (5), (6) і (3), (4) були отримані значення M_n , які представлені на рис. 2.86. В отриманих результатах введені позначення B_p й B_q , які відповідні до позначень спектральних каналів Landsat-7.

Порогове значення для розділення класів сигналу й фона обирається у вигляді середнього значення по всій вибірці й допускається, що дві вибірки $ASI(s_i)$ й $ASI(f_i)$ обсягами $i = 1, 2, \dots, I$ і $j = 1, 2, \dots, J$ є нормально розподіленими випадковими величинами. За вибіркою даними перевіряється нульова гіпотеза про рівність математичних очікувань цих випадкових величин $ASI(S)$ і $ASI(F)$. Якщо нульова гіпотеза виконана, тобто $ASI(S) - ASI(F) = 0$, тоді, виходячи з незалежності вибірок, оцінка дисперсії різниці вибірових середніх рівна. Отже, статистика для перевірки нульової гіпотези визначається у відповідності до виразу

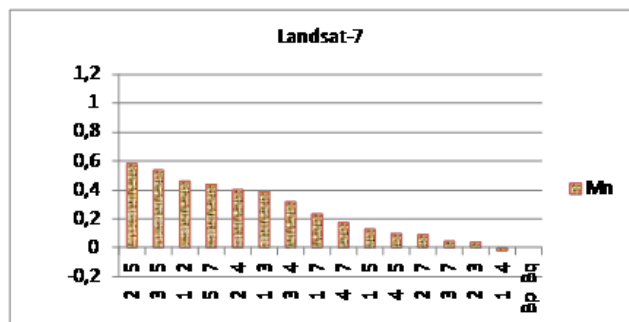


Рис. 2.86. Значення M_n по даним Landsat 7, де значення B_p , B_q вказані в табл. 2.13

$$t = \frac{|ASI(S) - ASI(F)|}{\sqrt{\frac{D_s^2 + D_F^2}{I + J}}} \quad (2.119)$$

Після того, як розраховано, його необхідно порівняти з коефіцієнтом Ст'юдента, наведеним у таблиці [245]. При порівнянні критерію вірогідності різниці двох середніх арифметичних з коефіцієнтом Ст'юдента можливі два випадки:

1. $t \geq t_{\alpha}$. Різниця двох порівнюваних середніх арифметичних достовірна, тобто з погляду математичної статистики вони відрізняються друг від друга з обраною довірчою ймовірністю.

2. $t < t_{\alpha}$. Різниця двох порівнюваних середніх арифметичних недостовірна, тобто не можна сказати, що одне середнє арифметичне більше або менше другого.

У результаті перевірки гіпотези встановлено, що різниця двох порівнюваних середніх арифметичних достовірна для моделі Landsat-7 для всіх, за винятком двох найменших M_n (див. рис. 2.85) ASI (Band 1, Band 3) і ASI (Band 2, Band 7). Для знімка Landsat 7 — достовірна для всіх ASI , за винятком трьох найменших M_n (див. рис. 2.86) ASI (Band 3, Band 7), ASI (Band 2, Band 3) і ASI (Band 1, Band 4).

Для реалізації алгоритму було розроблено пакет програм на мові *ruby* [246]. *Ruby* — це інтерпретована, повністю об'єктно-орієнтована мова програмування з чіткою динамічною типізацією. Мова відрізняється високою ефективністю розробки програм і увібрало в себе кращі риси *Perl*, *Java*, *Python*, *Smalltalk*, *Eiffel*, *Ada* і *Lisp*. Також деякі риси запозичені із мов програмування *Python*, *Lisp*, *Dylan* та *CLU*. Багато платформова реалізація інтерпретатора мови *Ruby* поширюється як вільне програмне забезпечення. Код проекту розповсюджується під ліцензіями *BSD* ("2-clause BSD") і "Ruby", яка посиляється на останній варіант ліцензії *GPL* і повністю сумісна з *GPLv3*.

Перша програма усереднює вимірювання *FieldSpec3FR* всіх значень "яскравості" для визначеної довжини хвилі в точці, в якій відбувалось вимірювання. На вхід програми подаються дані вимірювань, які виконано за допомогою *FieldSpec3FR*. З спектрограм, одержаних спектро радіометром 28 травня 2010 р., моделюються спектральні канали

Landsat-7 відповідно табл. 2.13. Друга програма для вимірювання *FieldSpec3FR* виконує алгоритм, що описаний (2.113)–(2.116).

Обчислення даних, що отримано бортовою апаратурою Landsat-7 6 червня 2010 р., виконується у відповідності з виразами (2.117)–(2.118) та (2.113)–(2.116). Для цього на космічному знімку було виділено ділянки над покладами та поза ними відповідно до району, що досліджується, координати пікселів відповідають координатам наземного спектрометрування.

Дослідження адаптивних спектральних індексів виконано за даними спектрометрування поля пшениці над Глібовським газовим родовищем. Спектри визначено співробітниками ЦАКДЗ за допомогою спектро радіометра *FieldSpec3FR* 28 травня 2010 р. [247]. Схема маршруту наземної спектрометричної зйомки (рис. 2.87) з номерами точок і їхніх координат повинна включати ділянки, у яких виконується вимірювання спектрів відбиття на фоновій ділянці за границями родовища і над родовищем. Також вибирається синхронний знімок Landsat-7, з якого знімаються піксели, що відповідають координатам наземної зйомки.



Рис. 2.87. Схема маршрутів проведення спектрометричної зйомки на Глібовському газовому родовищі 28 травня 2010 р. (22 точки з номерами 95–116)

Для тих же точок береться синхронний знімок Landsat-7, з якого вибираються піксели, що відповідають координатам наземної зйомки. Як приклад, для всієї траси точок (95–116) для моделі Landsat-7 (по даним *FieldSpec3FR*) показані значення спектральних індексів FS 1 4 і FS 4 7, які представлені на

рис. 2.91, а для знімка Landsat-7 — значення FS 4 7 і FS 2 5, які представлені на рис. 2.92, ($n = 95, 96, \dots, 116$ — номер точки). Становить інтерес подивитися значення спектральних індексів каналів, що відповідають індексу NDVI ($0.63\text{--}0.69 \text{ мкм}$) і ($0.75\text{--}0.90 \text{ мкм}$), значення якого наведені на рис. 2.90.

За даними, представленими на рис. 2.88, 2.90, видно, що для ділянок з родовищем і без родовища виконана правильна класифікація для Landsat-7 і *FieldSpec3FR*. Однак відстань від граничного значення для даних спектрорадіометра менше змінюється по множині точок (FS 1 4, що відповідає спектральним інтервалам $0.45\text{--}0.515$ і $0.75\text{--}0.90 \text{ мкм}$) і для різних спектральних індексів. Для даних знімка Landsat-7 (LS 4 7, що відповідає спектральним інтервалам $0.75\text{--}0.90 \text{ мкм}$ і $2.09\text{--}2.35 \text{ мкм}$) поряд із точками зі значним перевищенням порога є точки близькі до граничних значень. За результатами на рис. 2.90, що відповідають індексу NDVI ($0.63\text{--}0.69 \text{ мкм}$) і ($0.75\text{--}0.90 \text{ мкм}$), для моделі по даним *FieldSpec3FR* виконана правильна класифікація, а для даних Landsat-7 маємо невірні рішення для декількох точок маршруту.

Методичне забезпечення на основі адаптивних спектральних індексів для інформаційного інтегрування даних багатоспектрального аерокосмічного знімання та польової спектрометрії.

1. Вхідна інформація: дані багатоспектральної польової спектрометрії та аерокосмічного знімання. Спектрометрування місцевості виконується портативним спектрорадіометром *FieldSpec3FR*. Схема маршруту наземної спектрометричної зйомки з номерами точок і їхніх координат повинна включати ділянки, у яких виконується вимірювання спектрів відбиття на фоновій ділянці за границями родовища й над родовищем. Також вибирається синхронний знімок Landsat-7, з якого знімаються піксели, що відповідають координатам наземної зйомки.

2. Алгоритм методичного забезпечення інтегрування даних багатоспектрального аерокосмічного знімання, польової спектрометрії і геолого-геофізичних даних при вирішенні завдань дистанційного пошуку покладів корисних копалин включає режими навчання та пошуку. В режимі на-

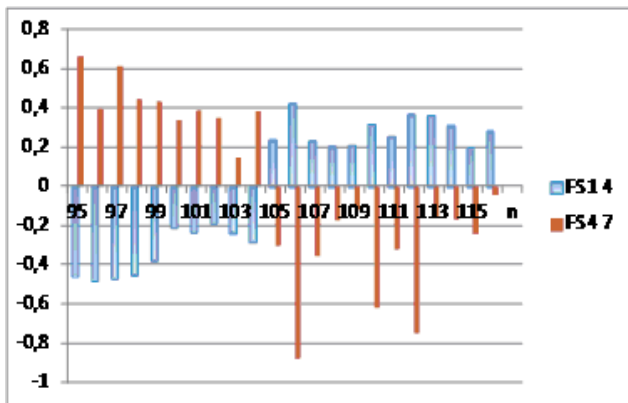


Рис. 2.88. Значення уздовж траси по даним спектрорадіометра *FieldSpec3FR*, де позначено FS 1 4 є спектральний індекс ASI (Band 1, Band 4) і FS 4 7 — ASI (Band 4, Band 7)

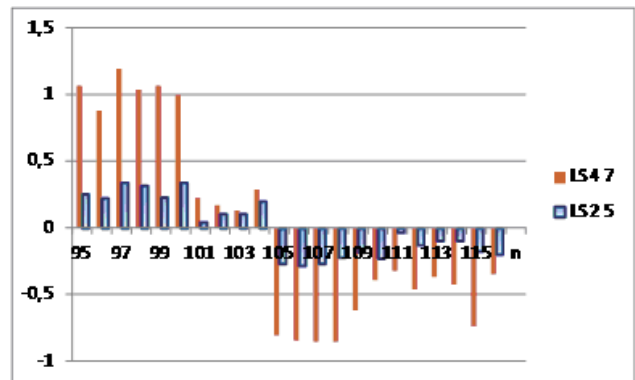


Рис. 2.89. Значення ASI уздовж траси по даним знімка Landsat-7, де позначено LS 4 7 є спектральний індекс ASI (Band 4, Band 7) і LS 2 5 — ASI (Band 2, Band 5)

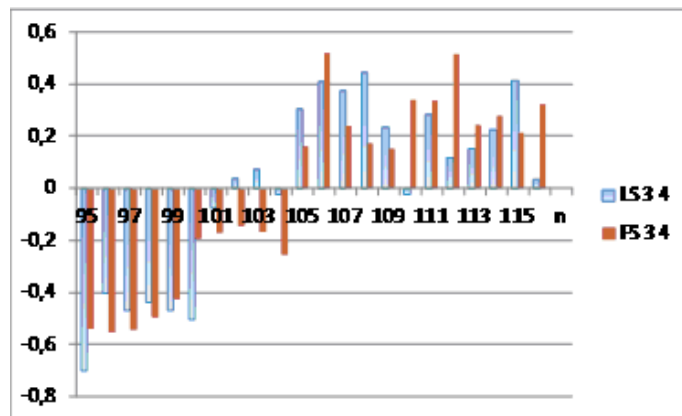


Рис. 2.90. Значення для пар каналів, що відповідають індексу NDVI, де позначено LS 3 4 є спектральний індекс ASI (Band 3, Band 4) за даними знімка Landsat-7 і FS 3 4 — ASI (Band 3, Band 4) по даним спектрорадіометра *FieldSpec (r) 3 FR*

вчання у відповідності до виразів (2.113)–(2.116) визначаються максимальні значення M_n , за якими вибираються пари каналів, які є інформативними для пошуку корисних копалин. Значення M_n визначаються для багатоспектральної польової спектрометрії та космічного знімання. Для одержаних пар каналів в кожній точці маршруту обчислюються значення ASI багатоспектрального космічного знімання та польової спектрометрії. Інтегрування даних багатоспектрального космічного знімання та польової спектрометрії має на меті підвищення достовірності пошуку ВВ, яке досягається близькістю результатів, одержаних аерокосмічним і польовим методами. Для інтегрування даних багатоспектрального космічного знімання та польової спектрометрії застосовується спосіб логічного поділу класу на підкласи, що полягає в тому, що ділене поняття повністю ділиться на два взаємовиключних поняття. Дихотомічний поділ є способом утворення взаємовиключних підрозділів одного поняття або терміна й служить для класифікації елементів. Як міра розходження результатів пошуку ВВ, що задаються дихотомічними ознаками використовується відстань Хемінга. Вона задається за допомогою формули [248] таким чином:

$$d_H(X_i, X_j) = \sum_{k=1}^l |x_i^{(k)} - x_j^{(k)}|. \quad (2.120)$$

У відповідності до виразу (2.120) визначається відстань Хемінга для пар значень ASI для спектро-радіометра FieldSpec3FR і знімка Landsat-7 вздовж маршруту знімання. Інтегруються ті канали багатоспектрального аерокосмічного знімання та польової спектрометрії, які мають найменшу відстань Хемінга для пар значень ASI.

Проведені дослідження показали принципову можливість використання адаптивних спектральних індексів для виявлення просочування природного газу за даними наземних спектрограм і космічних знімків. Потрібно відзначити, що для даних FieldSpec3FR в адаптивних спектральних індексах найбільш часто зустрічається канал Band 4 (0.75–0.90 мкм), а для Landsat-7 — Band 5 (1.55–1.75 мкм).

Розроблено методичне забезпечення на основі адаптивних спектральних індексів для інформаційного інтегрування даних багатоспектрального космічного знімання та польової спектрометрії. Критерієм вибору пар каналів адаптивних спектральних індексів для інтегрування даних багатоспектрального космічного знімання та польової спектрометрії являється мінімум відстані Хемінга (2.120). Результати отримані для поля пшениці над Глібовським газовим родовищем і для узагальнення методичного забезпечення необхідні дослідження на інших родовищах і рослинах.

2.15. Визначення меж покладів вуглеводнів методом мультифрактальної сегментації даних дистанційного спектрометрування рослинних покривів

2.15.1. Концепція дослідження

Метод, який застосовується для визначення меж покладів ВВ, заснований на фітоіндикаційних властивостях самоорганізації рослинних покривів і мультифрактальних властивостях структур спектрів відбиття. Мультифрактальний аналіз структури спектрів відбиття дозволяє визначити варіабельності спектрів розмірностей Реньї і показників Гельдера мультифракталу; по значеннях варіабельності виконується сегментація ділянок покладів ВВ.

Фітоіндикаційні методи отримали широке розповсюдження при вирішенні галузевих задач екології, пошуку корисних копалин, сільського господарства та ін. Фітоіндикація, як розділ екології рослин, вивчає зв'язок ботанічних об'єктів з чинниками довкілля, а також дозволяє проводити індикацію умов середовища за допомогою рослин і рослинних покривів (видів, комплексів, угруповань). Фітоіндикація як спосіб практичного використання видимих ознак стану рослин, а також рослинного покриву, застосовується для отримання інтегрованої оцінки і якісної характеристики довкілля.

Подальший розвиток методів фітоіндикації пов'яза-

ний із спектрометруванням рослин і рослинних покривів, яке проводиться дистанційним способом, і подальшим аналізом спектральних характеристик. Такий вид фітоіндикації доречно назвати "спектрометрична фітоіндикація". Ці методи діагностики дозволяють виконувати об'єктивну оцінку стану рослинності, навіть за відсутності явних видимих ознак змін в рослинах, за допомогою неінвазивних дистанційних оптичних засобів зондування. Методами спектрометричної фітоіндикації проводиться більш детальна діагностика дії чинників зовнішнього середовища на рослини, чим це надає просте візуальне спостереження. Сучасна техніка дозволяє реєструвати спектри відбиття рослин на значній відстані, включаючи спостереження з космосу [229, 248]. Спектрометрична фітоіндикація, що заснована на аналізі спектральних характеристик рослин, знаходить застосування в геологорозвідці [248–250]. Вивчення оптичних властивостей листя, кількісна оцінка поглинання, пропускання і відбиття ними світла, має вагоме значення не тільки для розуміння загальних принципів засвоєння сонячної енергії, механізмів фотосинтезу і адаптаційних процесів в рослинах, але також є важливою складовою частиною багатьох методик ДЗЗ.

Більшість дослідників в області фізіології рослин і суміжних наукових напрямів відзначає складну організацію листя вищих рослин як оптичної системи. Наголошується специфічна, тонко організована і динамічна структура з можливістю направленої зміни в змісті пігментів листя, здібністю до ефективної утилізації енергії сонячного випромінювання для фотосинтезу і пристосування до дії цього випромінювання в найрізноманітніших екологічних ситуаціях. Не дивлячись на те, що листя різних рослин мають різні розміри, морфологією, анатомічну будову і свої біохімічні і фізіологічні особливості, проте, в принципах і механізмах здійснення первинних фотосинтетичних процесів, які протікають в спеціалізованих органідах (хлоропластах), простежується спільність і одноманітність [251, 252].

Тільки частина світу, падаючого на лист, відображається від нього. В спектрометрії розрізняють дзеркальне (на гладких, блискучих поверхнях) і дифузне (розсіяне) віддзеркалення. Віддзеркалення листя, головним чином, характеризується як дифузне. Світло, проникаючи в товщу листа, сильно розсівається і багато разів змінює свій напрям. Це зв'язано з тим, що як на поверхні, так і в товщі листа, існує безліч поверхонь розділу, що мають різні коефіцієнти заломлення: кутикула, епідерміс, клітки паренхіми, заповнені повітрям міжклітинники. Схожі ефекти відбуваються при проходженні світла через клітки. Тут існують відмінності в коефіцієнтах заломлення між повітрям, рідкою фазою, клітинними стінками, розсіюванням на субклітинних структурах. В результаті, за відсутності сильного поглинання, оптичні шляхи світла значно збільшені в порівнянні з геометричною товщиною листа. Завдяки цьому листя поглинає значно більше світла, ніж екстраговані з них пігменти або ізольовані хлоропласти; інакше виглядають і їх спектральні характеристики. Елементний біохімічний склад рослин дуже багатоманітний, а його кількісний склад зазнає істотні зміни під впливом чинників середовища.

Наведений вище короткий виклад фізіологічних аспектів організації оптичних властивостей (фізіологічний рівень опису) рослин і покривів дозволяє розглядати їх як складні системи, з великої кількості елементів будови, яка має складну цілісну, самоорганізуючу структуру, що не піддається дослідженню по частинах, з нелінійною взаємодією між елементами.

Авторами встановлено, що процеси самоорганізації в рослинах під дією чинників середовища можна спостерігати по структурі спектрів відбиття, для яких характерні степеневий частотний розподіл і утворення локальних фрактальних структур [249, 250]. Під складністю системи слід розуміти її несводимість до простої суми своїх частин. Описати структуру такої системи, навіть на статисти-

стичному рівні, неможливо за допомогою однієї або декількох мод, або декількох гармонік. Складні системи завжди є істотно нелінійними. До них не можна як до лінійних систем застосовувати принцип суперпозиції, який передбачає розкладання системи на незалежні складові, і вивчати властивості системи по частинах. Тому дослідження і опис процесів самоорганізації по спектрах відбиття рослин повинні виконуватися для всієї сукупності послідовності спектральних інтервалів видимого і частково ультрафіолетового діапазонів електромагнітного випромінювання, з певною спектральною розрізненістю.

Вибір математичного апарату для опису змін в структурі рослин під впливом ВВ за спектром відбиття вимагає формалізації поняття структури і утворення структур, а також вибору достатньо універсального математичного апарату для дослідження структурних змін. Слідуючи монографії [253], визначимо поняття структури системи таким чином. Під структурою системи прийнято розуміти спосіб організації елементів і характер зв'язку між ними. При цьому не істотно, яка природа елементів. Кажучи про структуру системи, ми не звертаємо уваги на те, які елементи складають систему, а розглядаємо лише сукупність відносин між ними. Структура системи, визначена як сукупність відносин, задає зв'язок між елементами системи.

Достатньо універсальним і ефективним в прикладних дослідженнях структур з локальними фрактальними властивостями є математичний апарат статистичних фракталів. Статистичні фрактали мають також іншу назву — мультифрактали.

2.15.2. Мультифрактальний аналіз спектрограм рослинного покриву на родовищах вуглеводнів

Морфологія (форма) багатьох природних об'єктів характеризується не тільки фрактальними властивостями, але і мультифрактальною структурою складу матеріалу. Параметри структури об'єктів визначаються шляхом проведення статистичного мультифрактального аналізу по спектральних характеристиках, які представлені в спектрограмах. Техніка проведення мультифрактального аналізу достатньо універсальна і, при різних модифікаціях, може бути використана не тільки для характеристики змін в геометричних формах об'єктів, але і для визначення структурних змін у складі матеріалу. Основи теорії мультифрактальних мір і мультифракталів як розділу фрактальної геометрії були розвинуті в роботах багатьох вчених і узагальнені в монографії [254]. Подальший розвиток цієї теорії, і її успішне застосування, в дослідженні родовищ ВВ

ґрунтується на узагальненні універсальних властивостей статистичної ентропії Реньї, яка закладена в основу мультифрактального аналізу.

Аналіз змін в структурі спектру відбиття рослинного покриву (пшениці) проводиться на прикладі Глібовського родовища газу. Значення коефіцієнтів спектрального відбиття (КСВ) представлено спектрограмами зі спектральною розрізненістю 1 нм, діапазон електромагнітних хвиль (розбитий на 400 рівних спектральних інтервалів

$$k = k_j = k(\lambda_j), \lambda = [350, 749 \mu\text{m}], j = \overline{1, 400}. \quad (2.121)$$

Дистанційні вимірювання були виконані по лінійному маршруту, який перетинав відому межу покладу природного газу. На маршруті проводилися вимірювання в 16 контрольних ділянках, по 4 вимірювання на ділянку. Всього було отримано 64 спектрограми.

В теорії мультифракталів прийнято розглядати фрактальний об'єкт як точкову множину, вкладену в обмежену область V , m -вимірною евклідова простору E^m . В загальному випадку область V розбивається на "кубічні" m -вимірні комірки, в яких містяться елементи точкової множини. Для статистичного опису точкової множини досліджується розподіл його елементів за комірками змінного розміру r . Керуючись цими загальними міркуваннями стосовно аналізу спектрограм, значення КСВ квантується на цілочисельні відліки (далі кванти). В результаті кожна спектрограма представляється як одновимірна спектральна область, що розбита на $N(r)$ одновимірних комірок спектральних інтервалів розміром r з номерами $i = 1, 2, \dots, N(r)$. Розподіл квантів у кожній зайнятій i -ї комірці характеризується числом $k_i(r)$.

Сумарна кількість комірок $N(r)$ залежить від розміру комірки r . Мірою (ймовірнісною) вмісту i -ї комірки є частка $p_i(r)$ від загального числа L квантованих значень КСВ (квантів) у всіх комірках

$$p_i(r) = \frac{k_i(r)}{L}, \sum_{i=1}^{N(r)} p_i(r) = 1.$$

Повний набір $\{p_i(r)\}_{i=1}^{N(r)}$ при мінімальному значенні r , дає опис розподілу квантів в спектрограмі. Проте, якщо статистична сума, яка вводиться до розгляду, $M(q, r)$, пов'язана з розміром r степеневу залежністю (4.2), або лінійною залежністю (4.3) в білогарифмічних координатах

$$M(q, r) = \sum_{i=1}^{N(r)} p_i^q(r) = c(q) r^{-\tau(q)}, \quad (2.122)$$

$$\ln(M_q(r)) = \ln(c(q)) - \tau(q) \ln(r), \quad (2.123)$$

то про такий розподіл можна взяти набагато більше, провівши для цього мультифрактальний аналіз його структури. З виразу (4.3) визначається

функція масштабних інваріантів $\tau(q)$, яка залежна тільки від степені q і незалежна від розміру комірки r , та визначаються розмірності Реньї $D(q)$ мультифрактальної структури

$$\tau(q) = -\lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{\ln(M(q, r))}{\ln(r)} \right], \quad D_q = \frac{\tau(q)}{1-q}. \quad (2.124)$$

Для зменшення похибки спектрометрування на кожній контрольній ділянці маршруту проводиться кілька вимірювань. Спектрограми як вектори квантованих значень КСВ, які представлені одновимірними масивами даних, покомпонентно підсумовуються і об'єднуються в одну спектрограму. За змінний розмір r комірки об'єднаної спектрограми квантованих значень КСВ приймається розмір спектральних інтервалів. Співвідношення (2.121–2.124) зберігають силу для об'єднання довільної кількості спектрограм.

Наявність мультифрактальної структури передбачає виконання 2-х умов.

Умова 1. Степенева залежність статистичної суми (2.122) від розміру комірки r для кожного значення показника степені q .

Умова 2. Розмірності Реньї є незростаюча функція степені q , $D_q \geq D_{q'}$ для $q' > q$.

На рис. 2.91 наведено проміжні результати оброблення спектрограм 2-ї ділянки маршруту родовища ВВ. Обчислення проведені за співвідношеннями (2.123), (2.124).

На рис. 2.91 а наведено 5 графіків залежності статистичної суми $M_q(r)$ для 9 розмірів комірок $r = \{r_j\}_{j=1}^9$ при значеннях $q = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$. Розміри комірок спектральних інтервалів даються в частках всього спектрального діапазону (2.121), який прийнятий за одиницю розміру:

$$r = \{1/100, 1/50, 1/25, 1/20, 1/10, 1/5, 1/2, 1\}.$$

По графіках можна зробити висновок, що обчислені значення статистичної суми для різних розмірів комірок r (показані точками на графіках) з достатньою точністю апроксимуються прямою лінією. Для кожного фіксованого значення q має місце степенева функціональна залежність статистичної суми від розміру комірки r , що відповідає лінійній залежності в білогарифмічних координатах графіків, і відповідає співвідношенню (2.123). Аналогічна залежність має місце для значень $-90 \leq q \leq 90$, обчислених з кроком $h_q = 0.125$. Графіки (див. рис. 2.91 а) демонструють виконання умови 1 наявності мультифрактальної структури спектру відбиття. Слід зазначити наступну властивість статистичної суми $M(q, r)$, — вибір великих значень $q \gg 1$ сприяє підвищенню внеску комірок з великими значеннями p_i в статистичну суму, а вибір значень $q \ll -1$ підвищує внесок комірок з відносно малими значеннями p_i . Залежно від степені q логарифм статис-

тичної суми $\ln M(q, r)$ приймає значення різних знаків.

На рис. 2.91 а в графічному вигляді приведені результати подальшого мультифрактального аналізу 4-х спектрограм 2-ї ділянки маршруту родовища ВВ. Графік функцій $\tau(q)$ побудований згідно співвідношенню (2.124) для значень $-90 \leq q \leq 90$ з кроком $h_q = 0,125$. Функція масштабних інваріантів $\tau(q)$ не залежить від розміру комірки, і обчислена як кутові коефіцієнти прямих лінійної регресії залежності статистичних сум від r (див. рис. 2.91 б). Степеневий параметр $\tau(q)$ є функціональним інваріантом масштабних змін розміру r .

На рис. 2.92 а приведенний графік функцій розмірностей Реньї D_q (узагальнених фрактальних розмірностей) мультифрактальної структури спектру

відбиття рослинного покриву 2-ї ділянки маршруту досліджень. На рис. 2.92 б демонструється мультифрактальний спектр структури.

Обчислення і графік функції $D(q)$ (див. рис. 2.92 а), показують, що необхідна умова існування структури з мультифрактальними властивостями виконана. Складна структура об'єкту описується спектром значень розмірностей Реньї D_q . Розмірність D_0 відповідає хасдорфовій розмірності. Із співвідношень (2.122), (2.124) для $q = 0$ виводиться рівність, $M(0, r) = N(r) \propto r^{-\tau(0)} = r^{-D_0}$, яка визначає фрактальну розмірність досліджуваної структури. Обчислена за спектрограмами фрактальна розмірність рослинного покриву $D_0 = 1$. Ця розмірність Реньї відповідає хасдорфовій розмірності, проте вона є найгрубішою характеристикою, яка визначає

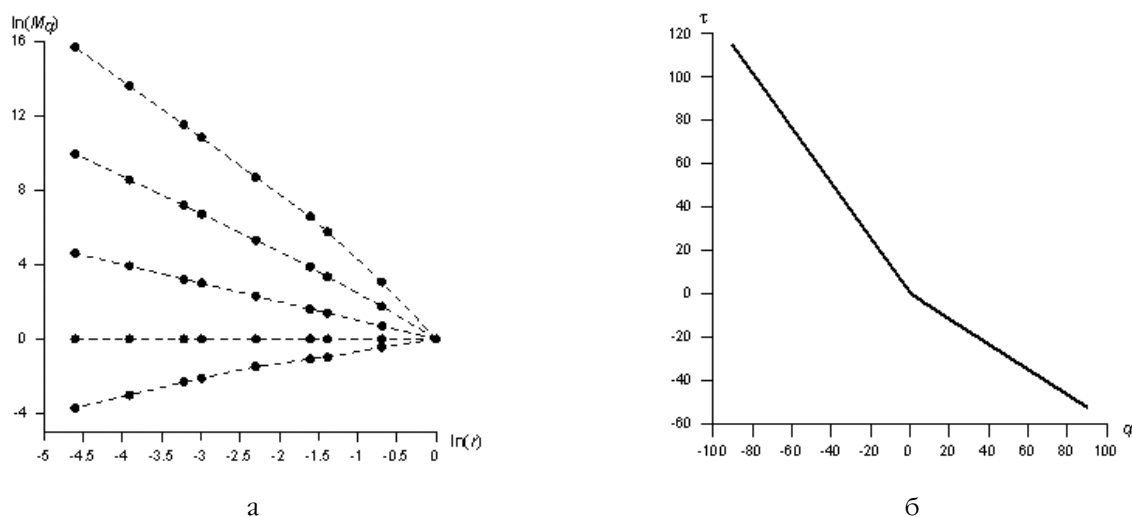


Рис. 2.91. Графіки мультифрактальних характеристик спектрів відбиття 2-ї ділянки маршруту.

а — Графіки в білогарифмічних координатах статистичної суми $M_q(r)$ степенів $q = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ (розташування графіків по значеннях q — зверху-донизу); б — Графік функції $\tau(q)$, $-90 \leq q \leq 90$ з кроком $h_q = 0.125$

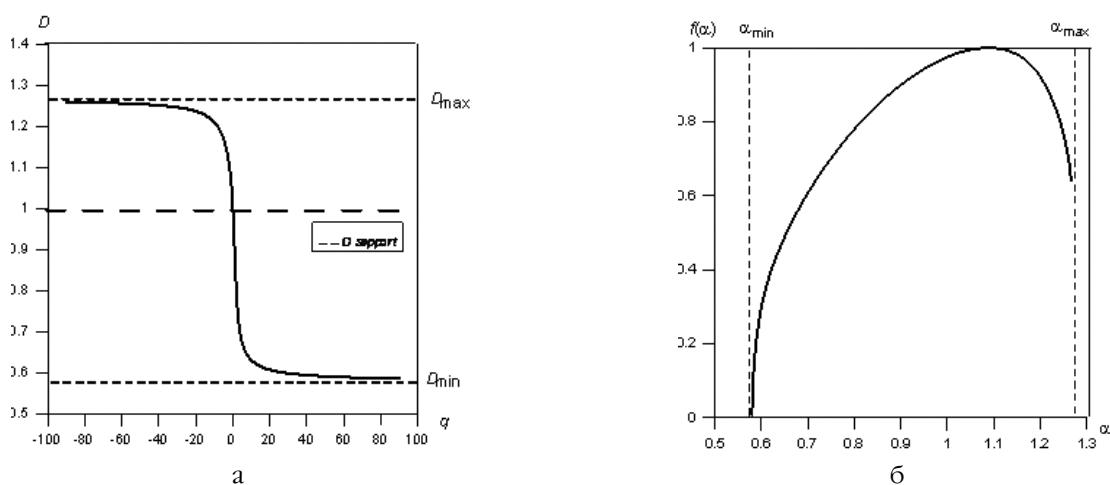


Рис. 2.92. Графічне представлення результатів мультифрактального аналізу спектру відбиття рослинного покриву 2-ї ділянки маршруту. а — графік розмірностей Реньї мультифрактальної структури, б — графік функції мультифрактального спектру $f(\alpha)$ — мультифрактальний спектр

розмірність носія (support) мультифрактальної множини, але не визначає його структуру, що характеризується статистикою заповнення комірок квантами. Рівність $D_0=1$ свідчить про те, що в спектрограмах немає незаповнених квантами комірок. В кожній комірці спектрограм квантовані значення КСВ відмінні від 0. В цьому випадку хаусдорфова розмірність рівна топологічній розмірності носія.

Максимального значення розмірність Реньї мультифракталу досягає при $q \rightarrow -\infty$, $D_{\max} = D_{-\infty}$, а мінімального $D_{\min} = D_{\infty}$ при $q \rightarrow \infty$. В реальних дослідженнях обчислення цих значень виконується для малих і великих величин q . В даному прикладі ці величини розмірностей Реньї мультифрактала характеризують варіабельність (розмах мінливості) структури, і дозволяють ввести визначення варіабельності розмірностей Реньї $\delta^{(R)}$ мультифрактального спектру

$$\delta^{(R)} = D_{\max} - D_{\min} . \quad (2.125)$$

У випадку, коли кванти, розподілені по всіх $N(r)$ комірках рівномірно, всі розмірності Реньї різних порядків рівні і дорівнюють розмірності носія D_0 . В цьому випадку графік розмірностей Реньї вироджується в пряму лінію, яка на рис. 2.93 а позначена як штрихова D_{support} .

За винятком розмірності Реньї D_0 , інші розмірності, в термінах яких побудована мультифрактальна модель, не є розмірностями Хаусдорфа. Через це для них використовуються терміни “узагальнені фрактальні розмірності”, “розмірності Реньї”. Для того, щоб привести розмірності Реньї до фрактальних розмірностей мультифрактала, зіставних з роз-

мірностями Хаусдорфа, використовується функція мультифрактального спектру $f(\alpha)$. Значення цієї функції рівні фрактальним (хаусдорфовим) розмірностям окремих фрагментів мультифракталу. Функція мультифрактального спектру $f(\alpha)$ визначається за допомогою перетворення Лежандра по знайденим із співвідношення (2.124) значеннях функції $\tau(q)$. Пара рівнянь задає перетворення Лежандра від незалежних змінних τ і q до незалежних змінних f та α

$$\alpha(q) = -\frac{d}{dq}\tau(q), \quad f(\alpha(q)) = q\alpha(q) + \tau(q), \quad (2.126)$$

де $f(\alpha)$ — розмірності фракталів з показниками Гельдера α .

На рис. 2.92 б приведений графік мультифрактального спектру структури даних спектрограми рослинного покриву з 2-ї ділянки маршруту. Функція мультифрактального спектру $f(\alpha)$ є спектром сингулярностей мультифрактальної структури даних спектрометрування. Отже, структура представлена об'єднанням різних фрагментів, кожний з яких має своє єдине значення фрактальної розмірності зіставне з розмірністю Хаусдорфа. У разі однорідного розподілу квантів по комірках, мультифрактальний спектр виявляється стягнутим у точку. Варіабельність мультифрактального спектру δ визначається співвідношенням

$$\delta = \alpha_{\max} - \alpha_{\min} . \quad (2.127)$$

Перетворення Лежандра є взаємно-однозначними і дозволяють зіставити графіку функцій розмірностей Реньї D_q (див. рис. 2.92 а) графік мульти-

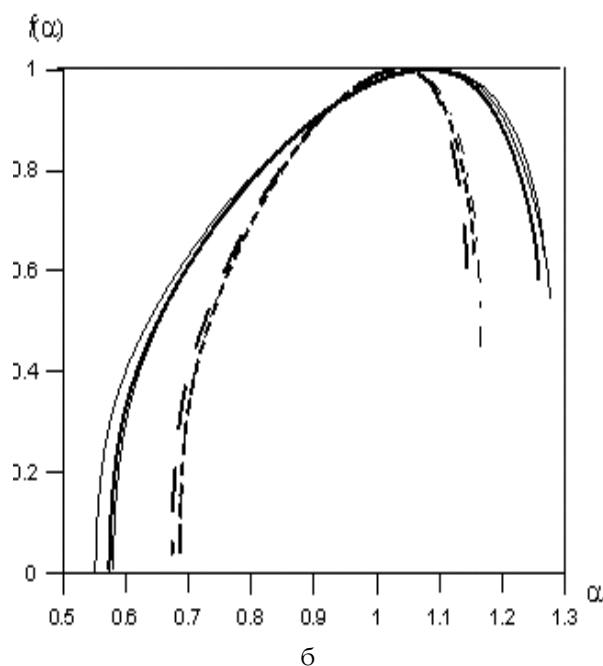
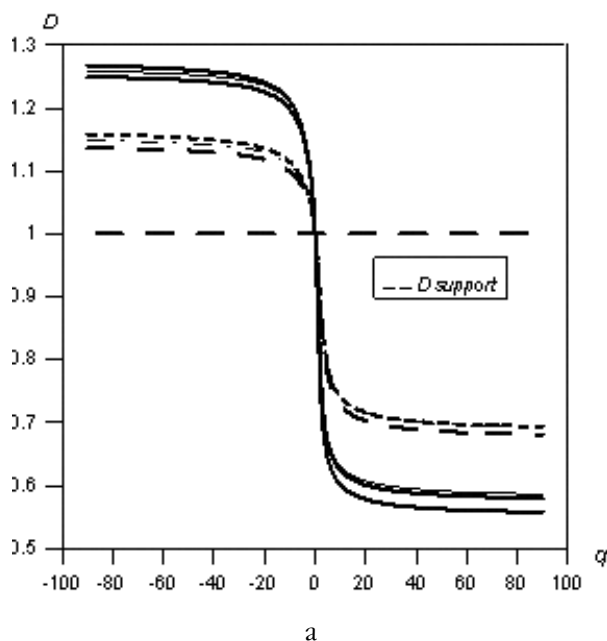


Рис. 2.93. Спектри розмірностей рослинних покривів з 6 ділянок родовища ВВ.

а — графіки розмірностей Реньї мультифрактальних структур; б — графіки функції мультифрактального спектру $f(\alpha)$

фрактального спектру $f(\alpha)$ (див. рис. 2.92 б). Ненегативна функція спектру сингулярностей $f(\alpha)$ має максимальне значення в точці, і в цій точці перетинає графік $f(\alpha_0) = D_0$ співпадає з розмірністю носія мультифрактальної множини. Права гілка мультифрактального спектру (див. рис. 2.92 а) відповідає негативним значенням q , ліва гілка — позитивним.

2.15.3. Визначення меж покладів вуглеводнів за варіабельністю мультифрактального спектру

За індикаторні ознаки покладу ВВ вибираються показники варіабельності розмірностей Реньї $\delta^{(R)}$ або мультифрактального спектру δ . На рис. 2.93 приведено розмірності спектрів відбиття світлового потоку рослинним покриттям з 6 ділянок лінійного маршруту, який перетинає поклад ВВ.

По умові експерименту, маршрут дослідження проходив по 16 контрольним ділянкам. Ділянки з номерами 1–8 знаходяться зовні зони покладу ВВ, а ділянки 9–16 розташовані над покладом. По графіках, отриманих в результаті мультифрактального аналізу спектрів відбиття рослинних покривів (див. рис. 2.93), з ділянок: 2, 3, 4, 11, 12, 13 виразно видно, що варіабельності розмірностей Реньї і мультифрактальних спектрів менше на ділянках над покладом ВВ.

В табл. 2.14 зведені обчислення значень індикаторних ознак покладу ВВ по маршруту дослідження, який перетинає межу покладу.

Далі виконується порогова сегментація ділянок за показником варіабельності мультифрактального спектру δ . Інтервал можливих значень показника $[0, 1]$ розбивається на n рівних клас-інтервалів, для кожного з яких обчислюється частота ω . Розподіл частот по клас-інтервалах приведений на рис. 2.94а у вигляді ряду частотного розподілу.

Таблиця 2.14.

Значення індикаторних ознак покладу ВВ на ділянках маршруту

№ ділянки	$\delta^{(R)}$	δ	№ ділянки	$\delta^{(R)}$	δ
1	0.62761	0.63914	9	0.4787	0.49165
2	0.67256	0.68585	10	0.47276	0.48751
3	0.70965	0.72379	11	0.45606	0.4690
4	0.6699	0.68363	12	0.46465	0.47971
5	0.65756	0.67151	13	0.45655	0.46954
6	0.65306	0.66747	14	0.44303	0.46226
7	0.62985	0.64382	15	0.47274	0.48524
8	0.6137	0.62895	16	0.47426	0.48986

Бімодальний вид розподілу дозволяє обчислити розділяюче значення $\delta_c = 0.563$. На рис. 2.94 б приведений графік сегментації K ділянок маршруту по значенням індикаторної ознаки δ . Ділянки з номерами 1–8 знаходяться зовні покладу ВВ, ділянки 9–16 розташовані над покладом.

Аналогічний результат дає сегментація ділянок по значенням варіабельності розмірностей Реньї $\delta^{(R)}$. Отже, область покладу ВВ характеризується як відкрита область, що складається з точок, в яких значення індикаторної ознаки задовольняють нерівності

відлік проводився в значеннях відстані x від першої ділянки маршруту. Як індикаторна ознака застосовувався показник δ . В цьому одновимірному випадку межа покладу визначається шляхом інтерполяції значень показника δ на маршруті, і зводиться до побудови функції однієї змінної $\delta = u(x)$ значення x , при якому $\delta = \delta_c$, приймається за координату точки що знаходиться на межі покладу $x = x_g$.

Якщо матеріал готуватися для візуального сприйняття, розподіл індикаторної ознаки по маршруту може бути представлений у вигляді зображень (рис. 2.95). Для цього яскравостям пікселів екрану дисплея привласнюються пропорційні δ чисельні значення, а сегментація виконується збільшенням контрастності зображення. Приклад такого представлення межі покладу для Глібовському родовище наведений на рис. 2.95а. Межа покладу проходить на відстані приблизно 1.05 км від першої точки маршруту. Довжина всього маршруту складала 2.1 км.

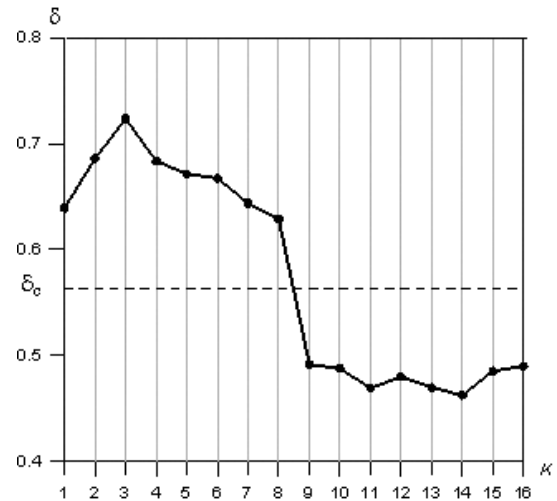
Якщо дані спектрометрування проводяться у вузлах сітки, накладеної на площу родовища, стає можливим визначити область, зайняту покладом по виконанню однієї з умов (2.128), а також побудувати зображення області (рис. 2.95 б). По значенням індикаторної ознаки δ у вузлах сітки виконується інтерполяція значень δ на всі точки області $\delta = u(x, y)$. Модельний приклад, що ілюструє розподіли індикаторної ознаки покладу ВВ, побудований на сітці розміром 6×6 (див. рис. 2.95б).

Якщо у вузлах сітки задані значення індикаторної ознаки δ , то межа області покладу ВВ визначається значенням рівня порогу сегментації δ_c , який обчислюється по частотному розподілу δ у вузлах інтерполяції. Контурний 3-вимірний графік з виділеною лінією рівня δ_c ілюструє модельний приклад побудова межі покладу ВВ (рис. 2.96).

Подальший розвиток розробленого методу полягає в розширенні його можливості на автоматизоване оброблення і інтерпретацію гіперспектральних аерокосмічних даних при розв'язанні природо-ресурсних завдань.

ω	δ
0	0.063
0	0.188
0	0.313
8	0.438
0	0.563
8	0.688
0	0.813
0	0.938

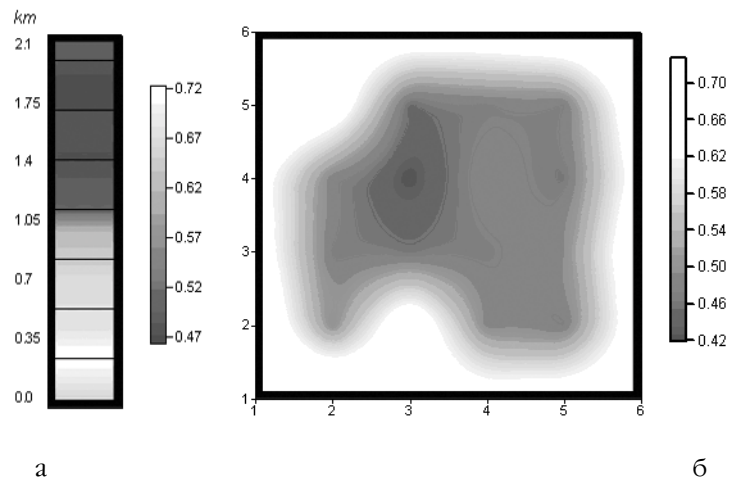
а



б

Рис. 2.94. Сегментація ділянок з номерами K по показнику варіабельності δ мультифрактального спектру.

а — бімодальний ряд розподілу частоти δ по інтервалах δ ; б — сегментація ділянок маршруту по значенням δ , рівень сегментації $\delta_c = 0.563$



а

б

Рис. 2.95. Зображення розподілу індикаторної ознаки варіабельності мультифрактального спектру (районів покладу ВВ. Поклад затемнений.

а — по лінійному маршруту дослідження Глібовського родовища ВВ; б — модельний приклад зображення покладу ВВ

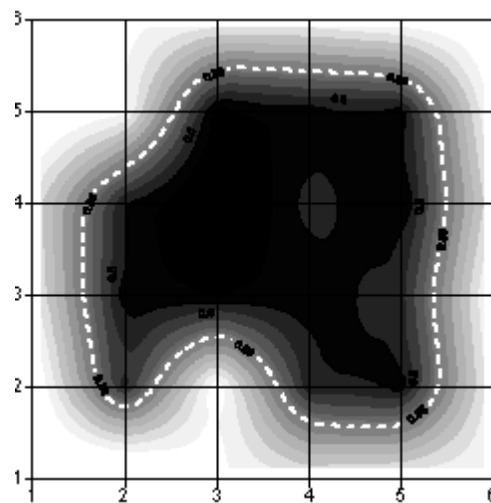


Рис. 2.96. Контурний графік покладу ВВ з виділеною межею