

Національна академія наук України  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

БИЧКОВ ДМИТРО МИХАЙЛОВИЧ

УДК 528.88

РАДІОФІЗИЧНІ МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ЗОН  
ПІДТОПЛЕННЯ, ПІДПОВЕРХНЕВОГО САМОРОЗІГРІВУ ГРУНТІВ  
ТА НАФТОВИХ ЗАБРУДНЕНЬ ПОВЕРХНІ МОРЯ

01.04.03 - радіофізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертація на правах рукопису.

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
Національної академії наук України

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

**Іванов Віктор Кузьмич,**

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
Національної академії наук України, м. Харків,  
завідувач відділу дистанційного зондування Землі

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор

**Горобець Микола Миколайович,**

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
завідувач кафедри прикладної електродинаміки

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Павліков Володимир Володимирович,**

Харківський національний аерокосмічний університет  
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,  
декан факультету радіотехнічних систем літальних апаратів

Захист відбудеться «28» грудня 2017 р. о 15<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12.

Автореферат розісланий «27» листопада 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

**Актуальність теми.** Аномальні зміни вологості земних покривів є характерними ознаками таких небезпечних катастрофічних процесів як підтоплення, опустелювання, формування самозаймистих торфовищ. Такі підтоплення, як підйом ґрунтових вод, призводять до деградації та подальших втрат сільськогосподарських земель. Формування самозаймистих торфовищ призводить до масштабних підземних пожеж, що впливає на всю біосферу не лише палаючих, а й прилеглих ділянок внаслідок задимлення.

Забруднення морської поверхні сирою нафтою та нафтопродуктами тягне за собою такі катастрофічні процеси як деградація донної та прибережної біосфери районів опускання нафти на дно та викидів на узбережжі.

Всі ці явища мають масштабні геометричні розміри з великими локальними варіаціями і тому їх реєстрація та спостереження контактними методами є досить трудомісткою, тривалою та витратною задачею, що в той же час, не дозволяє повністю та своєчасно оцінити масштаб того, що відбувається.

Вивчення можливості своєчасного виявлення цих ознак і оцінки динаміки розвитку цих процесів, розробка методик, інструментів, алгоритмів виявлення й оцінки дистанційними радіофізичними методами з використанням аерокосмічних засобів базування вимірювальної апаратури є актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження, результати яких увійшли в дисертацію, виконувалися відповідно до наукових планів Центру Радіофізичного Зондування Землі (ЦРЗЗ) ім. А. І. Калмикова НАН та НКА України та Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України в рамках наступних НДР: НДР «Розроблення нових методик дистанційного зондування Землі радіофізичними методами», шифр «Методика-Р», 2007 р., номер держреєстрації 0102U003695; НДР «Розвиток багаточастотних радіофізичних дистанційних методів досліджень проявів катастрофічних явищ на морській поверхні», шифр «Лотос-3», 2009 р., номер держреєстрації 0102U003697; НДР «Розвиток методів радіолокаційних супутникових досліджень неоднорідностей морської поверхні, що пов'язані з катастрофічними явищами», шифр «Лотос-5», 2012 р., номер держреєстрації 0110U001004; НДР «Розробка і удосконалення радіофізичних методів зондування поверхні і атмосфери Землі та біологічних об'єктів», шифр «Індекс», 2016 р., номер держреєстрації 0111U010477 - учасник. Проводилися спільні дослідження з ЦАКДЗ ІГН НАН України в рамках НДР «Проведення наземних контактних вимірювань та забезпечення проведення інфрачервоної зйомки проявів повеневих процесів та підтоплень», контракт № 2/2004 від 08.04.2004.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у створенні методів і засобів дистанційного виявлення підтоплень земель, саморозігріву та мозаймання торфовищ і моніторингу розливів поверхнево-активних речовин на морській поверхні на основі досліджень впливу фізичних характеристик підстильної поверхні Землі, в тому числі і морської, на параметри відображення радіолокаційних сигналів, а також випромінення в ІЧ діапазоні.

Для досягнення мети дослідження необхідно було розв'язати такі **задачі**:

1) розробити метод виявлення й ідентифікації підповерхневого перезволоження ґрунтів та саморозігріву органічних матеріалів з використанням авіаційних засобів радіофізичного активно-пасивного дистанційного зондування;

2) створити авіаційний комплекс апаратури дистанційного зондування АКДЗ-30, що включає радіолокатор бокового огляду 8 мм діапазону, скануючий радіометр ІЧ діапазону, аерофотоапарат, приймальний пристрій навігаційної системи GPS, систему обробки та реєстрації інформації;

3) розробити алгоритми та методики компенсації викривлень радіолокаційних та ІЧ растрових зображень, викликаних нестабільністю польоту літальних апаратів;

4) створити методику ідентифікації небезпечних явищ перезволоження ґрунтів, підповерхневого саморозігріву органічних речовин з використанням процедури кластеризації даних радіолокаційно-радіотеплової зйомки в багатовимірному просторі ознак;

5) розробити методи радіолокаційного дистанційного зондування Землі, що дозволяють при використанні одночастотного зондування визначати параметри нафтових забруднень морської поверхні.

*Об'єкт дослідження* — процес розсіяння радіохвиль та ІЧ випромінення землею поверхнею, а також морською поверхнею в присутності поверхнево-активних плівок обмеженої товщини.

*Предмет дослідження* — взаємозв'язок параметрів розсіяних радіосигналів та ІЧ випромінення з характеристиками досліджуваних поверхонь.

**Методи дослідження.** Для розв'язання сформульованих задач у дисертаційній роботі були використані методи теоретичної електродинаміки, статистичної радіофізики, методи математичної статистики, гідродинаміки, експериментальні методи.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

– *розроблено* метод компенсації просторових викривлень даних авіаційного комплексу дистанційного зондування (АКДЗ-30) для інтеграції їх в геоінформаційну систему;

– *запропоновано* метод активно-пасивного радіофізичного дистанційного зондування для виявлення й ідентифікації зон підтоплень і підповерхневого саморозігріву ґрунтів, вкритих рослинністю;

– *розроблено* метод ідентифікації зон підтоплень та підповерхневого саморозігріву ґрунтів з використанням тривимірної кластеризації добових даних активно-пасивного зондування поверхні, покритої рослинністю;

– *запропоновано* метод оцінки параметрів нафтових забруднень за багатокутовими даними супутникового одночастотного радіолокаційного зондування з урахуванням результатів моделювання розтікання нафти.

#### **Практичне значення одержаних результатів** полягає в наступному:

– створений авіаційний комплекс апаратури дистанційного зондування природного середовища, що включає радіолокатор бокового огляду 8 мм діапазону, скануючий радіометр ІЧ діапазону, аерофотоапарат, систему обробки та реєстрації інформації, може бути використаний при розробці літакових систем моніторингу стану земель і морської поверхні;

– розроблені алгоритми та методики компенсації викривлень радіолокаційних і ІЧ растрових зображень, обумовлених апаратними особливостями та нестабільністю польоту літальних апаратів можуть бути використані при обробці растрових радіолокаційних та ІЧ знімків;

– запропонований метод активно-пасивного радіофізичного дистанційного зондування для виявлення й ідентифікації зон перезволоження, а також підповерхневого саморозігріву органічних речовин може бути використаний при створенні методів дистанційного зондування земель сільськогосподарського призначення;

– розроблену методику спільної тематичної обробки растрових радіолокаційних, ПЧ та оптичних даних з використанням спеціального програмного забезпечення «ENVI» та програмного забезпечення «STATISTICA» для кластеризації можливо застосувати до обробки багатоканальної інформації дистанційного зондування;

– запропонований супутниковий радіолокаційний багатокутовий метод дозволяє забезпечити оперативну інформацію щодо аварійних розливів нафти в будь-якій точці Світового океану;

– запропонована модель розтікання нафти по морській поверхні може бути використана для уточнення параметрів нафтових забруднень, отриманих іншими методами.

**Особистий внесок здобувача.** У роботах, написаних у співавторстві, здобувач брав участь у постановці завдань, розробці методів, алгоритмів і програмних засобів обробки вихідних радіофізичних даних, обробці й аналізі отриманих результатів. У роботах [1; 2; 3] автор аналізував вплив різних фізичних процесів при формуванні та реєстрації радіофізичних даних, отриманих за допомогою літальних апаратів, розробив алгоритми та програми для реалізації методу побудови синхронних радіолокаційних, інфрачервоних та оптичних зображень підстильної поверхні при дистанційному зондуванні, що дозволяє компенсувати викривлення цих зображень, обумовлених апаратурними особливостями та нестабільністю польоту літальних апаратів. У роботах [4; 5] автор брав участь в дослідженні та розвитку методу активно-пасивного радіофізичного дистанційного зондування для виявлення й ідентифікації підповерхневих зон перезволоження та саморозігріву органічних речовин на ділянках осушених болот, вкритих рослинністю. У роботах [6; 7; 8] автор брав участь в проведенні й аналізі результатів комп'ютерної обробки добових радіофізичних даних радіолокаційно-радіотеплової авіаційної зйомки та розробці методики ідентифікації небезпечних явищ перезволоження ґрунтів та саморозігріву органічних речовин. У роботах [9; 10] автор брав участь в розробці методу багатокутового аналізу даних одночастотного радіолокаційного зондування, що дозволяє виявляти розливи поверхнево-активних речовин на морській поверхні й оцінювати їх параметри. У роботі [11] автор брав участь в розробці методики застосування модельних розрахунків розтікання поверхнево-активних речовин, що дозволило істотно уточнити оцінки товщини плівки та вдосконалити метод багатокутового аналізу даних одночастотного радіолокаційного зондування.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних, національних та місцевих конференціях:

*Міжнародні конференції.* 21-ша Міжнародна Кримська конференція "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо 2011). Севастополь, 12-16 вересня 2011 р.; The Eighth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkov, Ukraine, June 23-28, 2013; 23-тя Міжнародна Кримська конференція "СВЧ-техника и

телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо 2013), Севастополь, 8-13 вересня, 2013 р.; 24-та Міжнародна Кримська конференція "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо 2014), Севастополь, 7-13 вересня, 2014 р.

*Національні конференції.* Науково-практична конференція "Підтоплення-2005", Лазурне, 20-24 червня 2005 р.; 8-ма Всеросійська відкрита щорічна конференція «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 15-19 листопада 2010 р.; 9-та Всеросійська відкрита щорічна конференція «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 14-18 листопада 2011 р.; 10-та Всеросійська відкрита щорічна конференція «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 12-16 листопада 2012 р.; 11-та Всеросійська відкрита щорічна конференція «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 11-15 листопада 2013 р.

*Регіональні конференції.* Регіональна нарада "Можливості супутникових технологій у сприянні вирішення проблем Харківщини", м. Харків, 20 жовтня 2009 р.

**Публікації.** Основні результати за темою дисертаційної роботи опубліковано в 22 роботах, серед яких: 11 статей у наукових фахових виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus, Scopus, Google Scholar), та 11 тез доповідей в збірниках матеріалів наукових конференцій і симпозіумів.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатка, її повний обсяг становить 169 сторінок. У дисертації наведено 53 рисунки, 4 таблиці, список використаних джерел, що складається з 148 найменувань на 18 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету і задачі досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, взаємозв'язок проведених досліджень з науковими програмами, планами і темами, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також особистий внесок здобувача, дані про апробацію та публікацію результатів дисертаційної роботи.

У **розділі 1** подано аналітичний огляд сучасного стану та тенденцій розвитку вирішення проблем дистанційного виявлення ознак таких небезпечних процесів як підтоплення земель, підповерхневий саморозігрів органічних речовин на ділянках, вкритих рослинністю, та моніторингу нафтових забруднень морської поверхні.

Розглянуто питання дослідження вологості ґрунтових покривів сучасними космічними радіолокаційними системами дистанційного зондування. Розглянуто метод оцінки вологості ґрунту за радіолокаційними даними шляхом виявлення змін, при якому передбачається, що зміни шорсткості досліджуваного району протягом довгого часу є невеликими, а зміни в зворотному розсіянні в основному викликаються зміною вологості ґрунту. Метод ґрунтується на ретельному відносному калібруванні одержуваних даних, при цьому використовуються зображення тих же самих радарів. Метод забезпечує тільки відносну оцінку змін, якщо зміни не калібровані за даними синхронних наземних вимірювань. Розглянуто оцінку вологості поверхні землі методом об'єднання дистанційного ІЧ і оптичного визначення темпера-

турно-вегетативного індексу, який базується на кореляції поверхневої температури та різних вегетативних індексів, як показнику того, як листяний покрив модулює дистанційно виміряне значення поверхневої температури. Біофізика такого методу базується на складній моделі SSiB, яка враховує вплив комплексу факторів, що впливають, включаючи падаюче коротко- і довгохвильове випромінення, повітряну температуру, вологість, і вітер на відповідній висоті, близько 20 параметрів рослинності та ґрунту, які необхідні для визначення стану поверхні шару землі. Аналізуючи результати використання цих методів, зазначається, що розв'язання цілого ряду задач діагностики поверхневої вологості ґрунту за допомогою таких методів, і перш за все проявів процесів перезволоження ґрунту за рахунок підйому рівня ґрунтових вод, що викликають деградацію ґрунту та руйнування будівель і споруд, є дуже проблематичним.

Проведено огляд сучасних засобів глобального моніторингу великомасштабних лісових і торф'яних пожеж. Наведено параметри деяких найбільш широко використовуваних космічних систем. Для дистанційного виявлення підповерхневих теплових аномалій використовується теплова ІЧ зйомка як єдиний достовірний дистанційний метод, що виявляє вогнища підземного самозаймання на ранній стадії їх зародження. Зазначено, що навіть системи радіометрів космічного базування з дуже високою роздільною здатністю мають просторову роздільну здатність не кращу за 60 метрів у термальному ІЧ діапазоні, що заважає виявленню невеликих початкових осередків підповерхневого саморозігріву органічних речовин.

Розглянуто дистанційні методи виявлення, ідентифікації та діагностики нафтових забруднень морської поверхні. Зроблено огляд сучасних діючих та перспективних космічних радіолокаційних систем дистанційного зондування, з якого випливає, що серед працюючих радіолокаційних супутників і тих, що готуються до запуску, залишилися тільки одночастотні. Зазначено, що незважаючи на велику кількість радіолокаційних, радіометричних і оптичних систем і досить давнє їх використання для виявлення нафтових забруднень та їх джерел, питання визначення кількості розлитої на морській поверхні нафти дистанційними методами через багатопараметричність розв'язуваної задачі залишається відкритим.

Розглянуто основні принципи багаточастотного радіолокаційного методу визначення параметрів плівок поверхнево-активних речовин (ПАР). Зазначено, що цей метод базується на основі теорії гасіння морської хвилі плівками ПАР і дає найбільш достовірні радіолокаційні оцінки товщин плівки і об'ємів розлитої нафти. Однак, у зв'язку з появою великої кількості одночастотних радіолокаційних систем і виходом з експлуатації багаточастотних, був запропонований одночастотний метод, який базується на моделі спектра хвиль та є модифікацією коефіцієнта гасіння хвиль відповідно до теорій Левича (для тонких плівок) і Дженкінса-Якобса. Проте зазначено, що недоліком цього методу є те, що на морській поверхні за допомогою одночастотного методу дуже часто важко відрізнити нафтову пляму від вітрового сіліку.

Таким чином, на основі результатів аналізу недоліків існуючих методів сформульовано основні задачі дослідження.

#### Основні висновки до розділу 1:

1. Проведений в розділі аналіз задач дистанційного виявлення й ідентифікації підповерхневого підтоплення ґрунтів і саморозігріву органічних матеріалів

радіофізичними методами показує, що при наявності значного числа теоретичних і експериментальних досліджень даної проблеми багато питань залишаються невирішеними. Перш за все це пов'язано з багатопараметричністю задач, для розв'язання яких необхідно залучати велику кількість різноманітних даних, що характеризують зазначені процеси.

2. У розділі представлені пропозиції і обґрунтовані вимоги до характеристик апаратури дистанційної діагностики авіаційного комплексу АКДЗ-30 що об'єднує можливості радіолокаційних, ІЧ і оптичних засобів ДЗЗ.

3. Для оперативного виявлення та діагностики розливів нафтопродуктів на морській поверхні запропоновано використовувати існуючі радіолокаційні одностотні системи космічного базування, що вимагає розробки нових і адаптації існуючих методів обробки даних одностотного радіолокаційного зондування нафтових забруднень поверхні Світового океану.

У **розділі 2** розглянуті апаратура і методики експериментальних досліджень, детально описані авторські методики первинної та тематичної обробки растрових даних радіолокаційної та ІЧ радіометричної систем авіаційного комплексу АКДЗ-30, представлені використані засоби тематичної обробки.

Авіаційний багатоцільовий комплекс дистанційного зондування природного середовища АКДЗ-30 був розроблений і створений фахівцями ЦРЗЗ ім. А. І. Калмикова НАНУ і НКАУ в співпраці з фахівцями ЦАКДЗ ІГН НАНУ і АНТК ім. О. К. Антонова. До складу АКДЗ-30 входять: радіолокаційна система боківого огляду (РБО) 8-мм діапазону, скануючий радіометр ІЧ-діапазону, трасовий багатоканальний спектрометр оптичного діапазону, аерофотокамери та відеокамера, система бортової обробки, накопичення, інтерпретації та відображення інформації, а також навігаційний приймач системи GPS. Оцифрована інформація радіолокаторів обробляється безпосередньо на борту літака в реальному часі. На борту проводиться накопичення та візуалізація отриманих зображень, що особливо необхідно при моніторингу швидко протікаючих катастрофічних процесів.

Інформація РБО та ІЧ радіометру, що реєструється системою накопичення даних комплексу АКДЗ-30, представляється у вигляді бінарних файлів растрового зображення, на відміну від растрових зображень оптичних систем, що мають мінімальні геометричні викривлення щодо картографічних растрових зображень, має набагато більш значні геометричні викривлення, обумовлені фізичними процесами, що супроводжують отримання інформації, та специфікою роботи апаратури прийому та реєстрації інформації, що в значній мірі ускладнює інтерпретацію отриманої інформації. Було розроблено алгоритми попередньої обробки РБО та ІЧ даних, які коригують основні викривлення растрових зображень даних та адаптують файли даних комплексу АКДЗ-30 до форматів, що допускають подальше використання відомих програмних комплексів обробки даних дистанційного зондування. На основі цих алгоритмів було розроблено прикладні програми попередньої обробки даних авіаційного комплексу АКДЗ-30 - «CORRGeo.EXE» (виконує корекцію геометричних викривлень зображень РБО), «MLHT.EXE» (виконує нормалізацію растру ІЧ даних), «CORRGeoIR.EXE» (виконує корекцію геометричних викривлень ІЧ зображень). Загальний алгоритм обробки даних комплексу АКДЗ-30 представлено на рисунку 1.



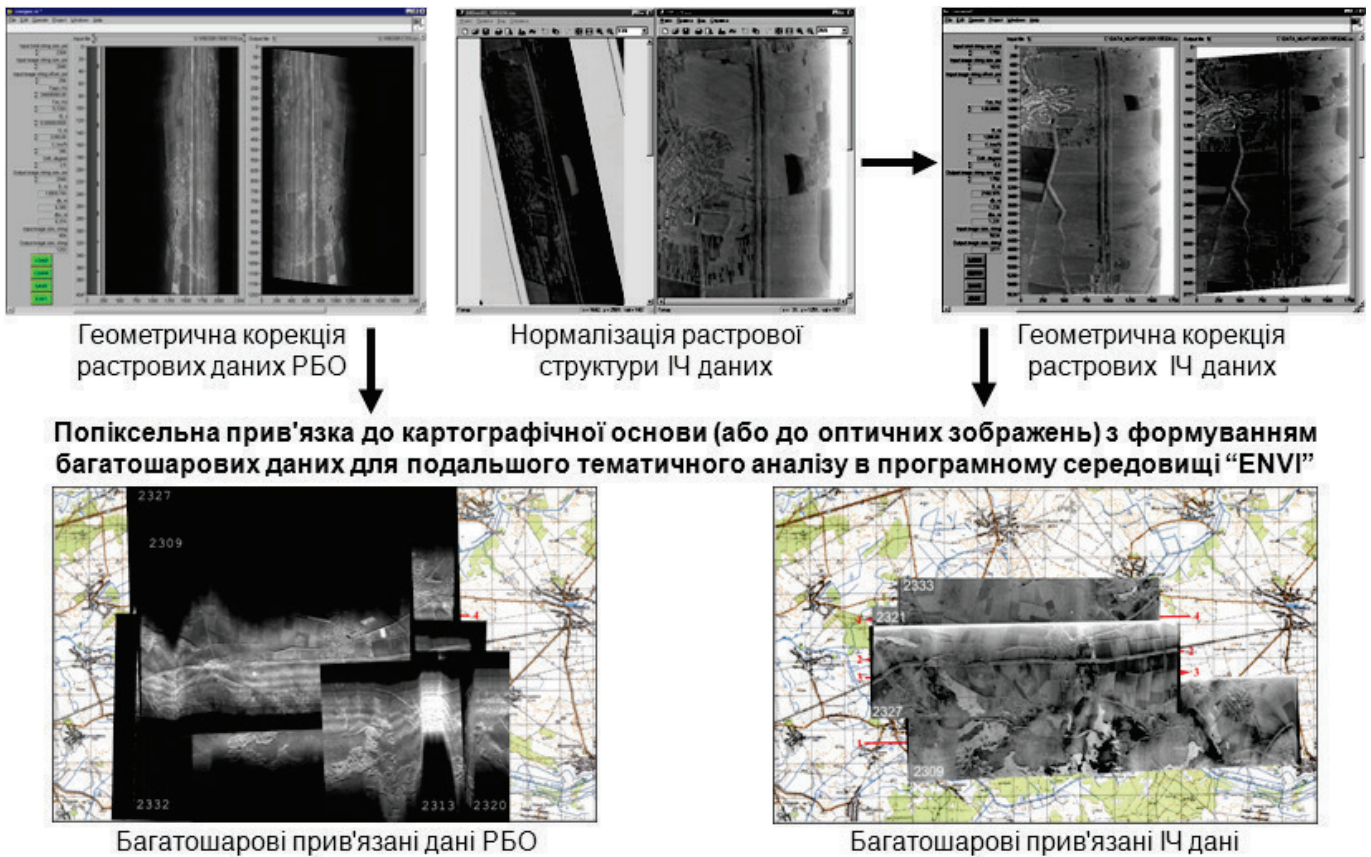


Рисунок 1 – Алгоритм реалізації попередньої обробки даних і побудови синхронних радіолокаційних, інфрачервоних зображень підстильної поверхні при дистанційному зондуванні, що дозволяє компенсувати викривлення растрових зображень, викликаних апаратними особливостями комплексу АКДЗ-30

Основна частина тематичної обробки даних дистанційного зондування проводилася засобами геоінформаційної системи (ГІС) «ENVI 4.7», призначеної для візуалізації і обробки даних дистанційного зондування Землі, який включає в себе набір інструментів для проведення повного циклу обробки даних від ортотрансформування і просторової попіксельної взаємної прив'язки зображень до отримання необхідної інформації та її інтеграції з іншими даними ГІС. Для виконання процедур кластерного аналізу був використаний програмний пакет статистичного аналізу «STATISTICA 8.0», що містить широкий спектр функціональних алгоритмів статистичної обробки багатовимірних наборів даних.

#### Основні висновки до розділу 2:

1. Створено, виготовлено та використовувався для отримання експериментальних даних авіаційний комплекс апаратури дистанційного зондування АКДЗ-30 на базі літака-лабораторії АН-30.

2. Розроблені і виготовлені спеціалізовані вузли для зв'язку аналогових виходів приймачів РБО і ІЧ з системами комп'ютерної обробки на базі персональних електронно-обчислювальних машин (ПЕОМ), а також вузли інтерфейсу управління передавачем і приймачем РБО. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення бортових ПЕОМ.

3. Створено алгоритми та методики компенсації викривлень радіолокаційних, ІЧ растрових зображень, викликаних нестабільністю польоту літальних апаратів, а та-

кож обумовлених апаратними особливостями використовуваних радіолокаційних систем.

4. Для проведення літакових натурних досліджень розроблено спеціалізоване програмне забезпечення візуалізації та первинної обробки радіолокаційних і ГЧ даних в реальному масштабі часу.

5. Запропоновано методику спільної тематичної обробки растрових радіолокаційних, ГЧ і оптичних даних з використанням спеціального програмного забезпечення «ENVI» і програмного пакету «STATISTICA».

6. Проведено апробацію запропонованих алгоритмів, методів і засобів при проведенні експериментальних досліджень з борту літака.

У **розділі 3** розглянуто виявлення й ідентифікація зон підповерхневого перезволоження ґрунтів і саморозігріву органічних матеріалів радіофізичним методом активно-пасивного зондування. Представлені результати проведених експериментів з використання запропонованого методу. Описано використання методики проведення багатовимірної кластеризації даних комбінованої добової радіолокаційно-радіотеплової авіаційної зйомки для реалізації запропонованого методу.

Пропонується комплексний аналіз дистанційно отриманих радіофізичних даних з метою отримання максимально повної інформації щодо

- фізичного процесу перекачування вдень короткохвильової енергії сонячного випромінювання в довгохвильове термальне інфрачервоне (ГЧ) випромінювання, що випромінюється шаром травостою;
- фізичного процесу власного ГЧ випромінювання шару травостою;
- фізичного процесу впливу шару травостою на нічне ГЧ випромінювання поверхні ґрунту;
- фізичних характеристик шару травостою.

Тепловий потік від досліджуваної поверхні, що реєструється ГЧ сенсором, може бути представлений як:  $L = \tau[\varepsilon\sigma(T_s)^4 + (1-\varepsilon)L_{background}] + L_{atm}$ , де  $\tau$  - коефіцієнт ослаблення довгохвильового випромінювання в атмосфері,  $\varepsilon$  - коефіцієнт довгохвильового випромінювання досліджуваної поверхні,  $\sigma$  - стала Больцмана,  $T_s$  - температура поверхні,  $L_{background}$  - противипромінювання атмосфери, спрямоване до Землі,  $L_{atm}$  - тепловий потік, що емітується шаром атмосфери між поверхнею і ГЧ сенсором (рис. 2). Енергетичний баланс відкритої (не покритої рослинністю) поверхні Землі може бути представлений у вигляді:  $(1-\alpha_{shw})L_{\Sigma shw} = L_{efflw} + L_{conv} + L_{ev} + L_{soil}$ , де  $L_{\Sigma shw}$  - потік сумарної короткохвильової радіації у земної поверхні,  $\alpha_{shw}$  - короткохвильове альbedo,  $L_{efflw}$  - ефективне довгохвильове випромінювання Землі (з урахуванням противипромінювання атмосфери),  $L_{conv}$  - конвективний потік тепла в повітря,  $L_{ev}$  - потік тепла, що витрачається на випаровування,  $L_{soil}$  - потік тепла в ґрунт. Для загального випадку ґрунту, вкритого рослинністю з випадково орієнтованими листям (рис. 2в), при інсоляції в денний час спостерігається одноразове (А), дво- і багаторазове (В, С) відбиття з частковим поглинанням короткохвильового сонячного випромінювання, а також часткове проникнення його до ґрунту (D). Подібні процеси багаторазового розсіяння і абсорбції відбуваються в такій складній системі та при нічній генерації довгохвильового ГЧ випромінювання, що робить вельми складним розрахункове визначення реальних коефіцієнтів випромінювання.

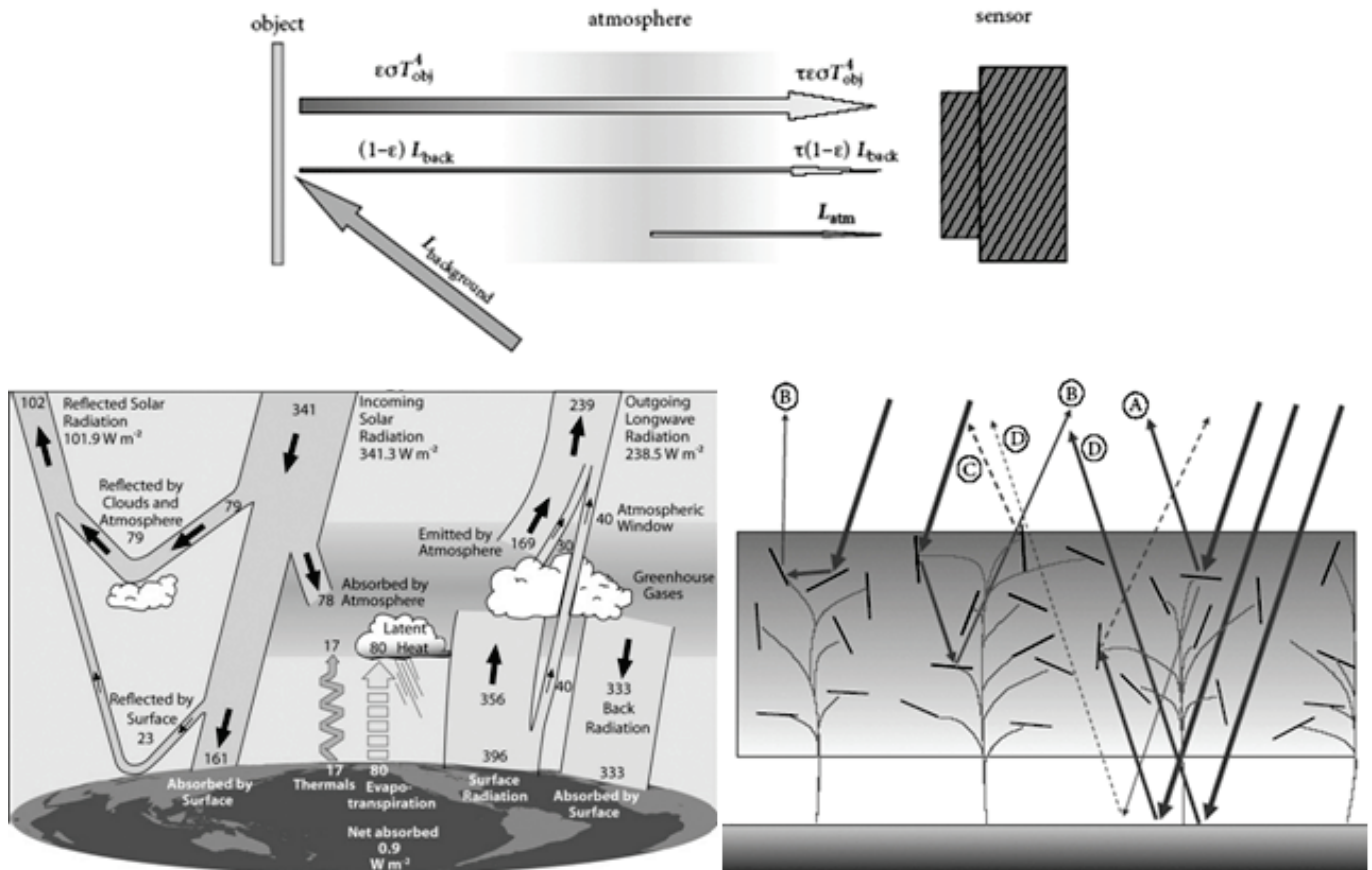


Рисунок 2 – Фактори, що впливають на формування ТІЧ зображень.

а - формування теплового потоку реєструемого ІЧ сенсором;

б - основні потоки випромінення, що формують тепловий баланс Землі; в - розсіяння та поглинання сонячного випромінення в системі «грунт - рослинність» з випадковою орієнтацією листя

Для перевірки можливості виявлення й оцінки теплових аномалій ґрунту, вкритого рослинністю, була проведена тематична обробка та подальший аналіз даних натурного експерименту, отриманих 8–9 жовтня і 4 грудня 2004 року авіаційним комплексом АКДЗ-30 на тестовому полігоні в районі селища Хороше Озеро (Ніжинський район Чернігівської області України) [4]. Район проведення натурних експериментів характеризується наявністю сільгоспугідь, лісових масивів, болот, річок і розгалуженої меліоративної системи, яка давала можливість раніше знизити рівень підповерхневих вод, а зараз в значній мірі занедбана, внаслідок чого район має значну кількість проявів типових процесів підтоплення, заболочування, виходів ґрунтових вод на поверхню, що дозволяє ефективно відпрацьовувати методи оперативного кризового моніторингу повеней та підтоплень і проводити їх натурне моделювання з використанням даних як супутникових ДЗЗ, так і радіолокаційних, інфрачервоних і оптичних засобів авіаційного базування.

Результати натурного експерименту дають підстави вважати, що в сухий осінній період, коли вегетація в рослинності в основному припинена, аномальне зменшення короткохвильового альбедо верхнього шару лугового травостою не істотно впливає на достовірність відображення термальних аномалій самого ґрунту (в тому

числі і викликаних перезволоженням ґрунту) на нічних ТІЧ зображеннях, на відміну, наприклад, від лісопосадок, які практично повністю ці аномалії екранують.

У зв'язку з тим, що процеси низькотемпературного окислення та саморозігріву відбуваються, в основному, в приповерхневих шарах в умовах надлишку кисню, позитивні аномалії температурного поля на земній поверхні можуть досягати значень від одиниць до декількох десятків градусів. Для оцінки температурних аномалій земної поверхні, що виникають внаслідок процесів низькотемпературного окислення та саморозігріву в приповерхневих шарах ґрунту органічних речовин на глибинах 0-15 м, зважаючи, що горизонтальні розміри зон окислення на два-три порядки перевищують їх потужність, розв'язана одновимірною задачею теплопровідності, але для поверхні, вкритої рослинністю, як при інсоляції в денний час, так і під час нічної генерації довгохвильового ІЧ-випромінення, відбуваються процеси багаторазового розсіяння й абсорбції. Це дає можливість дистанційного виявлення та ідентифікації проявів підповерхневих теплових аномалій в ґрунті в залежності від співвідношення реальних коефіцієнтів випромінення і поглинання компонентів системи ґрунт–рослинний покрив–атмосфера.

Для перевірки можливості виявлення зон підповерхневого саморозігріву було проведено натурний експеримент на ділянці раніше осушеного заболоченого ґрунту. Густота мережі дренажних каналів на цій ділянці свідчить, що раніше тут розташовувалося болото низинного типу (було відзначено ще на картах 1843 року), яке було піддано процедурам осушувальної меліорації.

За результатами тематичної обробки було знайдено декілька зон підвищеної, відносно навколишнього фону, інтенсивності ТІЧ випромінення як у денний, так і у нічний час, які не корелюють, а отже, не пов'язані з будь-якими аномаліями поверхневого шару рослинності на РЛЗ РБО. Максимальні температурні контрасти щодо навколишнього фону, що визначаються дистанційно, склали: для зон тепловиділення  $\approx 9$  °С вночі та  $\approx 7$  °С вдень, для зони підвищеного ТІЧ випромінення в денний час  $\approx 1-2$  °С. У районі проведення експериментів не існує підземних родовищ вугілля або інших глибоко залягаючих копалин, здатних займатися. Візуально, над зоною тепловиділення не спостерігалось задимленості, тому причиною тепловиділення, з найбільшою ймовірністю, є процеси низькотемпературного окислення і самонагрівання в приповерхневих шарах органічних речовин.

Для автоматизації виявлення небезпечних явищ була запропонована методика їх ідентифікації, а саме, перезволоження ґрунтів, саморозігріву та займання органічних речовин з використанням комп'ютерної процедури кластеризації даних радіолокаційно-радіотеплової зйомки в тривимірному просторі ознак з координатами - інтенсивність прийнятого сигналу нічного ТІЧ випромінення, денного ТІЧ випромінення і інтенсивність прийнятого розсіяного підстильною поверхнею радіолокаційного сигналу. Алгоритм методики передбачає виконання наступних етапів:

1. Виконання процедур виділення експериментальних даних денного ІЧ, нічного ІЧ, РБО зйомки, геометричної корекції растра та багатшарового поєднання, та накладення даних на картографічну основу в програмному середовищі "ENVI".

2. Вагове поєднання динамічних діапазонів інтенсивностей денних і нічних ТІЧ зображень відносно навколишнього фону з використанням значень опорних калібрувальних ділянок.

3. Нормування даних всіх трьох зображень до єдиного діапазону значень шляхом виразу через відношення  $Z=(I-\bar{I})/(I_{\max}-I_{\min})$ , де  $I_{\max}$  та  $I_{\min}$  – максимальне та мінімальне значення інтенсивності сигналу на кожному зображенні, відповідно.

4. Узгодження просторової роздільної здатності всіх трьох зображень шляхом фільтрації даних більш високої просторової роздільної здатності.

5. Перетворення растрових бінарних даних в текстовий формат для імпорту в програмний засіб "STATISTICA".

6. Виконання процедури «K-Means Clustering» з автоматичним пошуком центрів 6-ти кластерів в тривимірному просторі ознак в програмному засобі "STATISTICA".

7. Зворотне перетворення файлу текстових даних результату кластеризації в бінарний растровий формат для імпорту в програмний засіб "ENVI" для представлення результату кластеризації у вигляді растрової інтерпретаційної карти.

Отримані результати процедури тривимірної кластеризації даних комбінованої добової радіолокаційно–радіотеплової авіаційної зйомки свідчать про надійне розділення кластерів і впевнене співвіднесення для вибраної ділянки отриманих кластерів з результатами експертних оцінок вихідних даних.

Проведення натурних авіаційних експериментів супроводжувалося наземними контактними вимірюваннями вологості ґрунту (що забезпечувалися фахівцями ЦАКДЗ ІГН НАНУ і АНТК ім. О. К. Антонова ), при цьому отримувались також метеовідомості по температурі ґрунту, води і повітря в нічних і денних умовах.

#### Основні висновки до розділу 3:

1. Проведені експерименти з активно–пасивного добового (послідовно протягом дня і ночі) дистанційного зондування ряду ділянок раніше осушених боліт в Ніжинському районі Чернігівської області підтвердили високі інформаційні можливості запропонованого методу активно–пасивного радіофізичного дистанційного зондування з виявлення й ідентифікації на покритих болотною рослинністю ділянках осушених боліт підповерхневих зон перезволоження, а також саморозігріву органічних матеріалів.

2. Використання запропонованого методу дозволяє усунути вплив неоднозначностей в інтерпретації результатів дистанційного зондування (властивих традиційним методам ГЧ-зондування), викликаних рослинністю.

3. Запропоновані і випробувані методика й алгоритми програмної ідентифікації таких небезпечних явищ як підповерхневе перезволоження ґрунту різного ступеня, а також процесів підповерхневого низькотемпературного саморозігріву органічних речовин (торфу, сіна, соломи тощо) на раніше осушених заболочених ґрунтах на основі комплексних даних термальної ГЧ і радіолокаційної зйомки.

4. Отримані результати процедури тривимірної кластеризації даних комбінованої добової радіолокаційно–радіотеплової авіаційної зйомки свідчать про надійне розділення кластерів (зон підповерхневого перезволоження різного ступеня, зон підповерхневого низькотемпературного саморозігріву органічних речовин, а також зон підвищеної ймовірності виникнення осередків саморозігріву та займання органічних речовин) і впевненому співвіднесенні отриманих кластерів з результатами експертних оцінок.



У **розділі 4** представлено опис багатокутного методу одночастотної радіолокаційної діагностики нафтових забруднень морської поверхні з використанням моделювання процесів розтікання нафти, представлені результати апробації та валідації даного методу.

Основою багатокутного методу (БКМ) є теорія розсіяння радіохвиль морською поверхнею в присутності плівок поверхнево-активних речовин обмеженої товщини. При цьому в якості вимірюваної величини при оцінці товщини поверхневих нафтових плівок використовується значення радіолокаційного контрасту забрудненої поверхні, що визначається як відношення потужностей сигналів, що приймаються радіолокатором від забруднених нафтою та чистих ділянок морської поверхні, що виключає з розгляду куту залежність форми діаграми спрямованості приймально-передавальної антени РСА та відбитого від моря сигналу, оскільки інтенсивність сигналу, що приймається від чистої та забрудненої морської поверхні, визначається при однаковому куті зондування.

У використовуваній теорії розсіяння радіохвиль морською поверхнею теоретичний радіолокаційний контраст  $D_{теор}$  в загальному випадку при відомій частоті зондування є функцією п'яти параметрів, що характеризують плівку: активності (пружності)  $p$ , товщини  $h$ , поверхневого натягу  $\alpha$ , в'язкості  $\nu$  і густини  $\rho$ :

$$D_{теор}(k(\theta), h, p, \alpha, \nu, \rho) = -10 \lg \frac{\omega_0(k(\theta))^2 \gamma_0(k(\theta))^2}{\omega_+(k(\theta))^2 \gamma(k(\theta))^2}, \quad (1)$$

$$\gamma = \gamma_L + \frac{k(\theta)h}{2} Q(k(\theta)), \quad Q(k(\theta)) = S_1 + S_2 - S_3, \quad k(\theta) = 2k_E \sin \theta,$$

де  $k(\theta)$  – довжина поверхневої хвилі,  $k_E$  – довжина зондуючої радіохвилі.

Для визначення всіх невідомих в (1), необхідно скласти і розв'язати систему з 5-ти незалежних рівнянь:  $D_{теор}(k(\theta), h, p, \alpha, \nu, \rho) = D_{експ}(k(\theta), h, p, \alpha, \nu, \rho)$

Як і для багаточастотного випадку з метою зменшення кількості вимірюваних параметрів і, відповідно, числа розв'язуваних рівнянь, було залучено дані радіолокаційного зондування акваторії із заздалегідь відомими параметрами розливої нафти  $\alpha, \nu, \rho$ . У цьому випадку для визначення інших двох невідомих параметрів (активності  $p$  і товщини  $h$ ) досить скласти два рівняння. При цьому, якщо для оцінок за багаточастотним методом використовуються експериментальні дані зондування на СМ і ДМ радіохвилях, отримані під одним кутом зондування  $\theta$ , то в БКМ використовуються експериментальні дані зондування в СМ діапазоні при зондуванні під різними кутами  $\theta_1$  и  $\theta_2$ :

$$\begin{cases} D_{теор}(k(\theta_1), p, h_1) = D_{експ}(k(\theta_1), p, h_1) \\ D_{теор}(k(\theta_2), p, h_2) = D_{експ}(k(\theta_2), p, h_2) \end{cases}, \quad \text{де} \quad k(\theta) = 2k_E \sin \theta, \quad (2)$$

Товщина нафтової плівки  $h_2$  в (2) може змінюватися під впливом внутрішніх і зовнішніх фізичних процесів за час між радіолокаційними зйомками як:

$$h_2 = m \cdot h_1, \quad \text{для} \quad 0 < m \leq 1.$$

Для визначення обмеженої товщини плівки необхідно провести моделювання динаміки розвитку нафтової плями. У методі БКМ використана модифікована мо-

дель FOTS (Floating Object Tracking System), яка базується тільки на наявних даних супутникових вимірювань і атмосферного реаналіза та може бути використана також і для будь-якої іншої акваторії Світового океану. В цій моделі нафтова пляма розбивається на  $k$  частинок, що мають форму циліндра висотою  $h$ , відповідної початкової товщини плями, об'єм  $V_k = V/k$  і радіус  $r_k = \sqrt{V_k/(\pi h)}$ . Оскільки під впливом різних процесів з часом висота циліндрів буде зменшуватися, радіуси збільшуватися, а положення змінюватися, то сумарна площа плями буде рости і буде змінюватися його форма. Алгоритм роботи моделі враховує наступні процеси: розтікання нафти, адвекція течіями, горизонтальна турбулентність, випаровування, диспергування та емульгування.

При цьому, розрахунок процесу розтікання нафти було значно вдосконалено, враховуючи три фази режиму розтікання в залежності від часу: гравітаційно-інерційний (ГІ), гравітаційно-в'язкий (ГВ) і режим поверхневого натягу (ПН).

На кожному кроці обробки  $\Delta t$  розраховується час існування нафтової плями  $t = \Delta t(n+1) - \Delta t n$  (де  $n$  – номер кроку) і співвідноситься з часом переходу  $t_{12}$  – з ГІ режиму розтікання нафти в ГВ режим і  $t_{23}$  – з гравітаційно-в'язкого режиму в режим ПН, які визначаються з умови рівності площ плями нафти  $A_{ГІ} = A_{ГВ}$  та  $A_{ГВ} = A_{ПН}$

при зміні режиму :  $t_{12} = 2,61 \sqrt[3]{\frac{V}{\Delta g \nu_B}}$ ,  $t_{23} = 0,8077 \frac{\rho_B \sqrt[3]{V^2 \Delta g \nu_B}}{\alpha}$ , де  $V$  – об'єм роз-

ливої нафти;  $\Delta = (\rho_B - \rho_H) / \rho_B$  ( $\rho_B, \rho_H$  – густина води і нафти відповідно;  $\alpha = \alpha_{B-BX} - \alpha_{H-BX} - \alpha_{H-B}$  – коефіцієнти поверхневого натягу (сумарний, вода–повітря, нафта–повітря і нафта–вода, відповідно);  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\nu_B$  – кінематична в'язкість води. Потім, в залежності від режиму розтікання плями, з внутрішнім кроком  $dt = 1$  с розраховується площа плями  $A$  і її зміна  $dA$ :

– для режиму ГІ:  $A_{ГІ} = K_1 t \sqrt{V}$ ,  $dA_{ГІ} = K_1 \sqrt{V} dt$ ,  $K_1 = 1,3\pi \sqrt{\Delta g}$ ;

– для режиму ГВ:  $A_{ГВ} = K_2 \sqrt{t} V^{2/3}$ ,  $dA_{ГВ} = (K_2 V^{2/3} / 2\sqrt{t}) dt$ ,  $K_2 = 2,1\pi \sqrt[3]{g\Delta / \sqrt{\nu}}$ ;

– для режиму ПН:  $A_{ПН} = K_3 t^{3/2}$ ,  $dA_{ПН} = (3K_3 t^{1/2} / 2) dt$ ,  $K_3 = 2,6\pi \sqrt{\alpha^2 / (\rho^2 \nu)}$ .

Після цього розраховується зміна товщини плівки:  $dh = \frac{V}{A} - \frac{V}{A+dA}$ .

Залежно від типу розливу задається різний проміжок часу існування плями  $t_0$  і визначається різна початкова товщина нафтової плівки  $h_0$ . Далі для кожної частки розтікання розраховується ця товщина залежно від прожитого часткою часу.

Роботи з перевірки достовірності оцінки товщини нафтової плівки на морській поверхні за допомогою методу БКМ проводилися у два етапи: апробація та валідація методу. На першому етапі для перевірки БКМ були використані значення експериментальних радіоконтрастів, отримані за допомогою одночастотного методу для однієї товщини нафтової плівки при різних кутах падіння та пройшли апробацію у експериментах на Чорному, Каспійському, Баренцевому і Карському морях.

Акваторією для проведення апробації БКМ був обраний район видобутку нафти Нафтові Каміні у Каспійському морі, у якому, як правило, видобуток нафти часто супроводжується технологічними витокami. Найбільш придатними для багатокото-

вої діагностики нафтових забруднень виявилися РЛЗ, отримані за допомогою РСА супутника Envisat-1.

При підстановці в (2) значень параметрів нафтової плівки, використаних в розрахунках товщини плівки за одночастотним методом, значення товщини нафтової плівки склали  $h=0,6-0,8$  мм. Отримані оцінки товщини нафтової плівки за порядком значень збігаються з даними, отриманими за допомогою одночастотного методу, і підтверджують вимірювальні можливості радіолокаційного БКМ.

На другому етапі, для повної перевірки можливостей багатокутного методу, в 2012 році був укладений договір (Project ID: C1P11140) з ESA, в рамках якого за допомогою on-line каталогу EOLISA були замовлені й отримані серії з 4–5 послідовно знятих в районі родовища Нафтові Камені в Каспійському морі РЛЗ РСА Envisat-1 різних років з розрізненням 150 м. Обробка зображень (калібрування, поворот, переріз по рядах, суміщення контрольних точок для вимірювання радіоконтрастів) проводилася за допомогою стандартної програми NEST 4B-1.0. Отримані величини радіоконтрастів використовувалися для розрахунку товщини плівки за формулою (2). Для оцінки об'ємів розливої нафти була визначена площа нафтових плям за допомогою програми NEST 4B-1.0.

Моделюванню динаміки забруднення передував аналіз форми плями та маси розливої нафти, а також сейсмічних і погодних умов в досліджуваному районі до радіолокаційних зйомок і в інтервалі між ними. Згідно з даними Національного інформаційного центру із землетрусів (NEIC) геологічної служби США (USGS) в акваторії Каспійського моря перед першою радіолокаційною зйомкою були зареєстровані три землетруси. Тому було зроблено припущення, що такі послідовні поштовхи спільно з перерахованими вище процесами поширення нафти по поверхні цілком могли сформувати до моменту першої радіолокаційної зйомки пляму з виміряними параметрами. Найбільш ймовірними місцями розливу є області буріння нафтових свердловин, об'єднаних в естакаду нафтовидобувного комплексу. Спираючись на це, було проведено моделювання динаміки розтікання нафтової плями, початок якого прив'язано до початку сейсмічної активності. При цьому був обраний "середній тип нафти", характеристики якого відповідають типовим характеристикам нафти в цьому районі Каспійського моря. Радіолокаційні вимірювання, підтверджені моделюванням, показали, що вже через 32 години після розливу нафти об'ємом  $V \approx 610 \text{ м}^3$  товщина плівки не перевищує 100 мкм, а ще через добу – близько 40 мкм.

#### Основні висновки до розділу 4:

1. Запропоновано метод багатокутного радіолокаційного зондування поверхні моря, що дозволяє виявляти розливи нафти на морській поверхні та визначати їх параметри.

2. Розроблений метод уточнення оцінки товщини плівки і об'єму нафтопродуктів полягає в порівнянні оцінок товщини поверхневих плівок, отриманих методом багатокутного радіолокаційного зондування, з урахуванням результатів модельних розрахунків розтікання нафтопродуктів.

3. Модельний аналіз динаміки розтікання нафти також показав, що товщина нафтової плівки істотно залежить від часу затримки між початком розливу та часом її вимірювання. Навіть затримка у 2–3 доби при сильному вітрі може привести до



розтікання нафти по поверхні до дуже тонких плівок, що призводить до сильного заниження об'ємів розливої нафти, яка визначаються радіолокаційним методом.

4. Отримані результати показали ефективність комплексного застосування радіолокаційних і гідрофізичних методів дослідження нафтових забруднень морської поверхні. Таке комбінування дозволить в подальшому більш точно параметризувати процеси, що впливають на зміни товщини і об'єму нафтових забруднень на морській поверхні при різних умовах радіолокаційного моніторингу та розливу нафти.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі сформульовано та розв'язано декілька актуальних науково-практичних задач, пов'язаних з розробкою й удосконаленням радіофізичних методів дистанційного виявлення підтоплень земель, підповерхневого саморозігріву органічних речовин та моніторингу розливів поверхнево-активних речовин на морській поверхні з використанням аерокосмічних засобів дистанційного зондування.

Новизна підходу розв'язання задач виявлення підтоплень земель і підповерхневого саморозігріву органічних речовин полягає у використанні даних комбінованого радіолокаційного, радіотеплового й оптичного дистанційного зондування для аналізу та врахування впливу рослинності й її залишків на характеристики випромінювання поверхні ґрунту в термальному інфрачервоному діапазоні в різні години доби.

Новизна підходу розв'язання задач моніторингу розливів поверхнево-активних речовин на морській поверхні полягає у використанні даних діючих одночастотних радіолокаційних супутникових систем ДЗЗ та результатів моделювання розтікання поверхнево-активних речовин для оцінки параметрів розливів нафти багатокутним методом.

В ході проведених досліджень отримані такі основні результати:

1. Розроблено, створено та було використано для отримання експериментальних радіофізичних даних авіаційний комплекс дистанційного зондування АКДЗ-30 на базі літака-лабораторії АН-30.

2. Розроблено методики та алгоритми попередньої обробки радіолокаційних і ГЧ–растрових зображень. Методики і алгоритми забезпечують компенсацію викривлень растрових зображень, викликаних нестабільністю польоту літального апарату й апаратними особливостями використовуваних засобів дистанційного зондування. Запропоновані методики, алгоритми та розроблене програмне забезпечення дозволяють конвертувати отримані РЛ, ГЧ і оптичні зображення у формати, що допускають подальше використання відомих програмних комплексів обробки даних дистанційного зондування ENVI і ERDAS IMAGIN для побудови синхронних зображень підстильної поверхні, отриманих літаковим комплексом АКДЗ-30.

3. Розроблено комплексний активно-пасивний (радіолокаційний + термальний ГЧ + оптичний) метод дистанційного моніторингу прояву небезпечних явищ підповерхневого перезволоження ґрунту, підповерхневого саморозігріву органічних речовин. Запропонований метод дозволяє усунути вплив рослинного покриву при інтерпретації даних дистанційного зондування. Запропоновано та випробувано методику й алгоритм програмної ідентифікації прояву підповерхневих процесів саморозігріву та займання органічних речовин.

4. Результати процедури тривимірної кластеризації даних комбінованої добової радіолокаційно-радіотеплової авіаційної зйомки підтверджують можливість надійного розділення зон підповерхневого перезволоження різного ступеня, зон підповерхневого низькотемпературного саморозігріву органічних речовин, а також зон підвищеної ймовірності виникнення осередків низькотемпературного саморозігріву та займання органічних речовин.

5. Проведено апробацію запропонованих алгоритмів, методів і засобів при проведенні експериментальних досліджень з борту літака.

6. Запропоновано й апробовано метод багатокутного одночастотного радіолокаційного зондування поверхні Землі, що дозволяє виявляти розливи нафтопродуктів на морській поверхні та визначати їх параметри.

7. Запропоновано метод уточнення оцінки товщини плівки й об'єму нафтопродуктів отриманих методом багатокутного радіолокаційного зондування, що полягає у врахуванні результатів модельних розрахунків розтікання нафтопродуктів.

### **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей / А. Г. Боев, В. Б. Ефимов, В. Н. Цымбал и др. ; под ред. : С. Н. Конюхова, В. И. Драновского, В. Н. Цымбала. - К. : НАН Украины, 2007. - 439 с.

2. Комплексный мониторинг проявлений подтопления земель авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30 / В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич, Д. М. Бычков, А. Я. Матвеев, А. В. Кабанов // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2011. - Т. 16, № 1. - С. 15–26.

3. Мониторинг подтопления земель авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30 / В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич, А. Я. Матвеев, А. С. Гавриленко, Д. М. Бычков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2011. - Т. 8, № 3. - С. 199–207.

4. Экспериментальные исследования подтопления почв, покрытых растительностью, в ИК и СВЧ диапазонах / Д. М. Бычков, В. К. Иванов, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // Физические основы приборостроения. - 2013. - Т. 2, № 3. - С. 104–113.

5. Изучение проявлений подтоплений и предвестников самовозгораний на осушенных почвах активными и пассивными методами / Д. М. Бычков, В. К. Иванов, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2013. - Т. 10, № 2. - С. 105–114.

6. Многомерная классификация данных активно-пассивного дистанционного зондирования для мониторинга опасных явлений на осушенных почвах / Д. М. Бычков, В. К. Иванов, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // Радиоп физика и электроника. - 2014. - Т. 5, № 2. - С. 42–48.

7. Идентификация опасных явлений на осушенных почвах по данным активно-пассивного дистанционного зондирования / Д. М. Бычков, В. К. Иванов, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2014. - Т. 11, № 2. - С. 208–216.

8. Определение путей миграции грунтовых вод в зонах подтопления и заболачивания при активно-пассивном авиационном дистанционном зондировании / Д. М. Бычков, В. К. Иванов, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // Физические основы приборостроения. - 2014. - Т. 3, № 2. - С. 58–65.

9. Спутниковая радиолокационная многоугловая диагностика нефтяных загрязнений морской поверхности / А. Г. Боев, Д. М. Бычков, А. Я. Матвеев, В. Н. Цымбал // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2013. - Т. 10, № 2. - С. 166–172.

10. Валидация метода спутниковой радиолокационной многоугловой диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности / А. Я. Матвеев, А. А. Кубряков, А. Г. Боев, Д. М. Бычков, С. А. Величко, В. К. Иванов, С. В. Станичный, В. Н. Цымбал // Радиофизика и электроника. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 20–31.

11. Моделирование растекания нефти в задаче радиолокационной многоугловой диагностики загрязнений морской поверхности / А. Я. Матвеев, А. А. Кубряков, А. Г. Боев, Д. М. Бычков, В. К. Иванов, С. В. Станичный, В. Н. Цымбал // Исследование Земли из космоса. - 2016. - № 1–2. - С. 1–12.

12. Оперативний моніторинг підтоплень авіаційним комплексом дистанційного зондування АКДЗ-30 / В. М. Цимбал, Д. М. Бичков, А. С. Гавриленко, О. Я. Матвеев, В. І. Лялько, Г. П. Рожок, В. С. Оголенко // Тези 3-ї науково-практичної конференції “Підтоплення-2005” 20–24 червня. – Лазурне, 2005. - С. 28.

13. Мониторинг подтопления земель авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30 / В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич, Д. М. Бычков, А. Я. Матвеев, А. В. Кабанов // Восьмая Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 15–19 ноября 2010. - тезисы докл. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=2045>

14. Исследования подтопления земель авиационным комплексом ДЗЗ АКДЗ-30 / В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич, А. Я. Матвеев, А. С. Гавриленко, Д. М. Бычков // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011). Севастополь, 12–16 сентября 2011 г. : материалы конф. – Севастополь : Вебер, 2011. - С. 1055–1056.

15. Diagnosing of hazardous processes on drained-out wetlands by radar, thermal ir and optic airborne remote sensing methods / D. M. Bychkov, V. K. Ivanov, V. N. Tsymbal, S. Ye. Yatsevich // The Eighth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2013). Proceedings MSMW13 Kharkov, Ukraine, June 23–28, 2013. - P. 318–320.

16. Диагностика подтоплений и предвестников самовозгораний на осушенных почвах активными и пассивными методами / Д. М. Бычков, В. В. Пустовойтенко, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2013), 8–13 сентября, 2013 г. Севастополь, Крым, Украина : материалы конф. - Севастополь, 2013. - С. 1190–1191.

17. Объединение многочастотных данных систем Дистанционного зондирования земли / О. В. Сытник, В. Б. Ефимов, Д. М. Бычков, В. В. Пустовойтенко // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные

технології» (КрыМиКо 2013), 8–13 сентября, 2013 г. Севастополь, Крым, Украина : материалы конф. - Севастополь, 2013. - С. 1192–1193.

18. Определение проявлений подтопления почв по данным радиолокационно-радиотепловой авиационной съемки / Д. М. Бычков, В. В. Пустовойтенко, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7-13 сентября 2014 г. – Севастополь : Вебер, 2014. - С. 1157–1158.

19. Спутниковая радиолокационная многоугловая диагностика нефтяных загрязнений морской поверхности / А. Г. Боев, А. Я. Матвеев, Д. М. Бычков, В. Н. Цымбал // Труды 9-й Всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 14–18 ноября 2011. Москва, ИКИ РАН : тезисы докл. - М., 2011. - С. 244.

20. Оперативная радиолокационная диагностика аварийных разливов нефти на морской поверхности с аэрокосмических носителей / А. Г. Боев, Д. М. Бычков, А. Я. Матвеев, В. Н. Цымбал // Труды 9-й Всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 14–18 ноября 2011. Москва, ИКИ РАН: тезисы докл. - М., 2011. - С. 245.

21. Моделирование распространения нефтяных загрязнений в задаче радиолокационной многоугловой диагностики состояния морской поверхности / А. Г. Боев, А. Я. Матвеев, Д. М. Бычков, В. Н. Цымбал // Труды 10-й Всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 12–16 ноября 2012. Москва, ИКИ РАН : тезисы докл. - М., 2012. - С. 243.

22. Апробация модели растекания нефти в задаче радиолокационной многоугловой диагностики загрязнений морской поверхности / А. Я. Матвеев, А. Г. Боев, Д. М. Бычков, А. А. Кубряков, С. В. Станичный, В. Н. Цымбал, С. В. Шелиховский // Одиннадцатая Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2013 г. : тезисы докл. - М., 2013. - С. 251.

## АНОТАЦІЯ

Бычков Д. М. Радіофізичні методи дистанційного моніторингу зон підтоплення, підповерхневого саморозігріву ґрунтів та нафтових забруднень поверхні моря. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розробці та удосконаленню радіофізичних методів дистанційного виявлення підтоплень земель, підповерхневого саморозігріву органічних речовин та моніторингу розливів поверхнево-активних речовин на морській поверхні з використанням аерокосмічних засобів дистанційного зондування.

У роботі виконано аналітичний огляд сучасних методів оцінки вологості та термального випромінення поверхні Землі, методів оцінки параметрів поверхнево-

активних плівок на поверхні моря. Представлено створений та використаний для отримання експериментальних даних авіаційний комплекс дистанційного зондування АКДЗ-30 на базі літака-лабораторії АН-30. Описано алгоритми та методики розробленого методу компенсації просторових викривлень растрових радіолокаційних та радіометричних даних комплексу АКДЗ-30. Розглянуто виявлення та ідентифікацію зон підповерхневого перезволоження і саморозігріву ґрунтів, вкритих рослинністю, запропонованим радіофізичним методом активно-пасивного зондування. Описано розроблений метод ідентифікації зон підтоплень та підповерхневого саморозігріву ґрунтів з використанням тривимірної кластеризації добових даних активно-пасивного зондування поверхні, покритої рослинністю. Розглянуто та обґрунтовано вперше запропонований метод оцінки параметрів нафтових забруднень за багатокутковими даними супутникового одночастотного радіолокаційного зондування з урахуванням результатів моделювання розтікання нафти.

**Ключові слова:** дистанційне зондування, авіаційний комплекс АКДЗ-30, активно-пасивний метод, підповерхневий, підтоплення, саморозігрів органічних речовин, кластерна обробка даних, супутникова одночастотна радіолокаційна система, нафтова плівка, морська поверхня, моделювання розтікання, багатокутковий метод.

## АННОТАЦИЯ

Бычков Д. М. Радиофизические методы дистанционного мониторинга зон подтопленных, подповерхностного саморазогрева почв и нефтяных загрязнений поверхности моря. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика. Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2017.

Диссертационная работа посвящена разработке и усовершенствованию радиофизических методов дистанционного обнаружения подтопленных земель, подповерхностного саморазогрева органических веществ и мониторинга разливов поверхностно-активных веществ на морской поверхности с использованием аэрокосмических средств дистанционного зондирования.

В работе выполнен аналитический обзор современных методов оценки влажности и термального излучения поверхности Земли, методов оценки параметров поверхностно-активных пленок на поверхности моря. Представлен созданный и использованный для получения экспериментальных данных авиационный комплекс дистанционного зондирования АКДЗ-30 на базе самолета-лаборатории АН-30. Описаны алгоритмы и методики разработанного метода компенсации пространственных искажений растровых радиолокационных и радиометрических данных комплекса АКДЗ-30. Рассмотрены обнаружение и идентификация зон подповерхностного переувлажнения и саморазогрева почв, покрытых растительностью, предложенным радиофизическим методом активно-пасивного зондирования. Описан разработанный метод идентификации зон подтопленных и подповерхностного саморазогрева почв с использованием трехмерной кластеризации суточных данных активно-пасивного зондирования поверхности, покрытой растительностью. Рассмотрен и обоснован впервые предложенный метод оценки параметров нефтяных загрязнений

по многоугловым данным спутникового одночастотного радиолокационного зондирования с учетом результатов моделирования растекания нефти.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, авиационный комплекс АКДЗ-30, активно-пассивный метод, подповерхностный, подтопление, саморазогрев органических веществ, кластерная обработка данных, спутниковая одночастотная радиолокационная система, нефтяная пленка, морская поверхность, моделирование растекания, многоугловой метод.

## ANNOTATION

Bychkov D. M. Radiophysical methods of remote monitoring of flood zones, subsurface self-heating of soils and oil pollution of the sea surface. – The Manuscript.

Thesis for Candidate Degree of Physical and Mathematical Sciences in speciality 01.04.03 - radiophysics. O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The thesis is devoted to the development and improvement of the radiophysical methods of remote detection underflooding lands, subsurface self-heating of organic substances and monitoring surfactants spills on the sea surface using aerospace remote sensing.

An analytical review of modern methods for estimating the moisture and thermal radiation of the earth's surface and methods for estimating the parameters of surface-active films at the sea surface is performed. The thesis presents the aeronautical complex of remote sensing ACRS-30 based on the airplane-laboratory AN-30. The algorithms and techniques of the developed method for compensation of spatial distortions of the raster radar and radiometric data of the ACRS -30 complex are presented. The detection and identification of zones of subsurface waterlogging and self-heating of soils covered with vegetation by using the proposed radiophysical method of active-passive sensing, are considered. A method for identifying zones of underflooding and subsurface self-heating of soils, developed with using the three-dimensional clustering of diurnal data of the active-passive sensing the surface covered by vegetation, is described. A newly proposed method for estimating parameters of oil pollution by the single-frequency multi-angle data satellite radar sensing, which accounts for the results of oil flow simulation, is considered and justified.

**Keywords:** remote sensing, aviation complex ACRS-30, active-passive method, subsurface, underflooding, self-heating of organic substances, cluster data processing, satellite single-frequency radar system, oil film, sea surface, flow simulation, multi-angle method.

Підписано до друку 09.10.2017 р. Формат 60x84/16. Папір ксероксний  
Обл.-вид. арк. 0,9. Наклад 100 пр. Гарнітура Times New Roman.  
Ум. друк. арк. 1,2. Замовлення № 1009/11-17.

---

Надруковано з готового оригінал-макета у друкарні ФОП В. В. Петров  
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.  
Запис № 2480000000106167 від 08.01.2009 р.  
61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. (057) 78-17-137.  
e-mail:bookfabrik@mail.ua