

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

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БИЧКОВ ДМИТРО МИХАЙЛОВИЧ

УДК 528.88

ДИСЕРТАЦІЯ

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

01.04.03 - радіофізика

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д. М. Бичков

Науковий керівник Іванов Віктор Кузьмич
доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Харків - 2017

АНОТАЦІЯ

Бичков Д. М. Радіофізичні методи дистанційного моніторингу зон підтоплення, підповерхневого саморозігріву ґрунтів та нафтових забруднень поверхні моря. - Кваліфікаційна наукова праця 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.

Об'єктом дослідження є процес розсіяння радіохвиль і ІЧ випромінення земною поверхнею, а також морською поверхнею в присутності поверхнево-активних плівок обмеженої товщини.

Предметом дослідження є взаємозв'язок параметрів розсіяних радіосигналів і ІЧ випромінення з характеристиками досліджуваних поверхонь.

У роботі виконано аналітичний огляд сучасних методів оцінки вологості та термального випромінення поверхні землі, методів оцінки параметрів поверхнево-активних плівок на поверхні моря, та встановлено, що на існуючий момент часу, при наявності значного числа теоретичних і експериментальних досліджень даної проблеми багато питань залишаються невирішеними. Перш за все це пов'язано, з багатопараметричністю вирішуваних задач, для вирішення яких необхідно залучати велику кількість різноманітних даних, що характеризують зазначені процеси. Представлені пропозиції і обґрунтовані вимоги до характеристик апаратури дистанційної діагностики авіаційного комплексу АКДЗ-30, яка об'єднує можливості радіолокаційних, ІЧ і оптичних засобів дистанційного зондування. За результатами аналізу сучасного стану та тенденцій розвитку систем дистанційного зондування Землі встановлено можливість використання існуючих радіолокаційних одностототних систем

космічного базування для оперативного виявлення і діагностики розливів нафтопродуктів на морській поверхні при умові розробки нових і адаптації існуючих методів обробки даних одночастотного радіолокаційного зондування нафтових забруднень поверхні Світового океану.

У роботі представлено створений та використаний для отримання експериментальних даних авіаційний комплекс дистанційного зондування АКДЗ-30 на базі літака-лабораторії АН-30, до складу якого увійшли: радіолокатор бокового огляду 8-мм діапазону, скануючий радіометр ІЧ діапазону, аерофотокамера, система бортової обробки, накопичення та відображення інформації, навігаційний приймач системі GPS. Представлено алгоритми та методики розробленого методу компенсації просторових викривлень растрових радіолокаційних та радіометричних даних комплексу АКДЗ-30, що лягли в основу розробленого та створеного спеціального програмного забезпечення як для візуалізації даних у реальному часі на борту літака, так і для адаптації даних до подальшої тематичної обробки засобами стандартного геоінформаційного програмного пакету «ENVI». Надано опис методик подальшої тематичної сумісної обробки радіолокаційних, радіометричних та оптичних даних стандартними програмними засобами для отримання результатів натурних радіофізичних експериментів.

Розглянуто виявлення та ідентифікацію зон підповерхневого перезволоження і саморозігріву ґрунтів, вкритих рослинністю, запропонованим радіофізичним методом активно-пасивного зондування. Представлені результати проведених експериментів використання запропонованого методу, які показують, що його використання дозволяє усунути вплив неоднозначностей, викликаних рослинністю, в інтерпретації результатів дистанційного зондування, властивих традиційним методам ІЧ зондування. Описано розроблений метод ідентифікації зон підтоплень та підповерхневого саморозігріву ґрунтів з використанням тривимірної кластеризації добових даних активно-пасивного зондування поверхні, покритої рослинністю. Отримані результати процедури тривимірної кластеризації даних комбінованої

добової радіолокаційно - радіотеплового 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) та впевненому співвіднесенні отриманих кластерів з результатами експертних оцінок.

Розглянуто та обґрунтовано вперше запропонований метод оцінки параметрів нафтових забруднень за багатокутовими даними супутникового одночастотного радіолокаційного зондування з урахуванням результатів моделювання розтікання нафти. Детально описано розроблену методику урахування таких процесів як гравітаційне розтікання нафти, адвекція нафти течіями, горизонтальна турбулентність, дисперсія, емульгування, випаровування, зміна густини та в'язкості нафти, при моделюванні загального процесу розтікання нафтової плівки по поверхні моря. Надані результати апробації та валідації запропонованого багатокутового методу визначення параметрів нафтової плівки, які підтверджують вимірювальні можливості радіолокаційного одночастотного багатокутового методу. Отримані результати показують ефективність комплексного застосування радіолокаційних і гідрофізичних методів дослідження нафтових забруднень морської поверхні, що 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.

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, багатокутовий метод.

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 // Радиофизика 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. Yatseвич // 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 технологии» (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.

ANNOTATION

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

Thesis for Candidate Degree of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D) 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.

The object of the study is the process of scattering of radio waves and IR radiation by the earth's surface, and also by the sea surface in the presence of surface-active films of finite thickness.

The subject of the study is the interrelation of the parameters of scattered radio signals and IR radiation with the characteristics of the surfaces under investigation.

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. It was shown that at the present time, despite a significant number of theoretical and experimental studies of this problem, many tasks remain unresolved. First of all, this is due to the multiparametric nature of the problems being solved, for the solution of which it is necessary to involve a large number of diverse data characterizing these processes. Proposals and substantiated requirements to the characteristics of the equipment for the remote diagnostics ACRS-30 aviation complex, which combines the capabilities of radar, IR and optical remote sensing facilities, are presented. Based on the analysis of the current state and trends in the development of Earth remote sensing systems, it is shown that it is possible to use existing radar single-frequency space-based systems for the rapid detection and diagnosis of oil spills on the sea surface. This possibility is

realized under condition of development of new and adaptation of existing methods of data processing of single-frequency radar sensing of oil pollution of the surface of the World Ocean.

The thesis presents the aeronautical complex of remote sensing ACRS-30 based on the airplane-laboratory AN-30, which was created and used for obtaining experimental data. It included: an 8-mm side-scan radar, a scanning IR radiometer, an aerial camera, an onboard processing system, accumulation and displaying information, and GPS navigation receiver. 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. They formed the basis for the developed and created special software for both visualization of real-time data on board the aircraft and for data adaptation to further thematic processing by means of standard geoinformation software package "ENVI". The methods of further thematic joint processing of radar, radiometric and optical data by standard software for obtaining the results of full-scale radiophysical experiments are described.

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. The results of the conducted experiments on the use of the proposed method are presented, which show that its use makes it possible to eliminate the influence of ambiguities caused by vegetation in interpreting the results of remote sensing inherent in traditional methods of IR sensing. 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. The obtained results of the procedure for the three-dimensional clusterization of data from combined daily radar-radiothermal aerial survey indicate a reliable separation of clusters (zones of subsurface waterlogging of different degrees, zones of subsurface low-temperature self-heating of organic substances, as well as zones of increased probability of self-heating and ignition of organic matter) and confident correlation of the clustering results with expert assessments.

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. The developed method of accounting for such processes as gravitational spreading of oil, advection of oil by currents, horizontal turbulence, dispersion, emulsification, evaporation, change in density and viscosity of oil, is described in detail in the modeling of the general spreading process of an oil film on the sea surface. The results of approbation and validation of the proposed multi-angle method for determining oil film parameters are presented, which confirm the measurement capabilities of the radar single-frequency multi-angle method. The obtained results show the effectiveness of the integrated application of radar and hydrophysical methods for studying oil contamination of the sea surface, which will allow in the future more accurate parametrization of the processes affecting the thickness and volume of oil pollution on the sea surface under various radar monitoring and oil spill conditions.

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.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	14
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1 Стан проблеми	26
1.1 Підтоплення територій	26
1.2 Підповерхневий саморозігрів органічних речовин	27
1.3 Дослідження вологості ґрунтових покривів сучасними космічними радіолокаційними системами ДЗЗ	29
1.4 Оцінка вологості ґрунту за даними РСА методом виявлення змін	30
1.5 Оцінка вологості поверхні землі методом об'єднання дистанційного ІЧ і оптичного визначення температурно-вегетатійного індексу	33
1.6 Виявлення лісових і торф'яних пожеж методом космічного інфрачервоного ДЗЗ	45
1.7 Дистанційні методи виявлення, ідентифікації та діагностики нафтових забруднень морської поверхні	46
1.7.1 Багаточастотний радіолокаційний метод	48
1.7.2 Одночастотний радіолокаційний метод	51
Висновки по розділу 1	59
РОЗДІЛ 2 Апаратура та методики експериментальних досліджень	60
2.1 Авіаційний комплекс дистанційного зондування АКДЗ-30	60
2.2 Супутникові системи дистанційного зондування	65
2.3 Методики попередньої обробки даних дистанційного зондування	66
2.3.1 Корекція геометричних викривлень вихідної інформації РБО	69
2.3.2 Корекція геометричних викривлень вихідної інформації інфрачервоного радіометра	80
2.4 Методики тематичної обробки даних дистанційного зондування	86
Висновки до розділу 2	88
РОЗДІЛ 3 Виявлення та ідентифікація підповерхневого перезволоження ґрунтів і осередків саморозігріву органічних матеріалів радіофізичним методом активно-пасивного зондування	89

3.1 Дистанційне зондування підтоплень активно-пасивним радіофізичним методом	89
3.2 Експериментальні результати активно-пасивного радіофізичного дистанційного зондування проявів підтоплень і передвісників самозаймань на осушених ґрунтах	90
3.2.1 Виявлення та ідентифікація проявів підтоплення на ґрунтах покритих рослинністю	91
3.2.2 Врахування впливу рослинного покриву на результати радіотеплового зондування	92
3.3 Особливості дистанційного зондування активно-пасивним методом проявів підповерхневого саморозігріву торфу в переосушених дренажних раніше заболочених ґрунтах	108
3.3.1 Експериментальні результати авіаційного моніторингу проявів підтоплень та підповерхневого саморозігріву на осушених ґрунтах	111
3.4 Використання методики ідентифікації небезпечних явищ перезволоження ґрунтів і саморозігріву органічних речовин, з застосуванням методів багатовимірної кластеризації даних добової радіолокаційно-радіотеплової зйомки авіаційним комплексом АКДЗ-30	115
Висновки до розділу 3	120
РОЗДІЛ 4 Багатокутовий радіолокаційний метод діагностики нафтових забруднень морської поверхні	122
4.1 Опис багатокутового методу	123
4.2 Моделювання процесів розтікання нафти по морській поверхні	125
4.3 Результати апробації та валідації багатокутового методу	133
4.3.1 Апробація багатокутового методу	133
4.3.2 Валідація багатокутового методу	137
Висновки до розділу 4	145
ВИСНОВКИ	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	148
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача	166

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

РБО	Радіолокатор бокового огляду
ІЧ	Інфрачервоний
ТІЧ	Термальний інфрачервоний
ДЗЗ	Дистанційне зондування Землі
РЛ	Радіолокаційний
РЛЗ	Радіолокаційне зображення
РСА	Радіолокатор з синтезованою апертурою
ГІС	Геоінформаційна система
БКМ	Багатокутовий метод
ПАР	Поверхнево-активна речовина
ГІ	Гравітаційно-інерційний
ГВ	Гравітаційно-в'язкістний
ПН	Поверхневий натяг
АКДЗ-30	Авіаційний комплекс дистанційного зондування на базі літака АН-30
ПЕОМ	Персональна електронно-обчислювальна машина
ЕМ	Електро-магнітний
ІЕМ	«Модель Інтегрального Рівняння»
VI	Вегетативний індекс
NDVI	Нормалізований відносний вегетативний індекс
SAVI	Корегований ґрунтовий вегетативний індекс
MSAVI	Модифікований корегований ґрунтовий вегетативний індекс
SVI	Спектральний вегетативний індекс
TVX	Температурно-вегетативний індекс
SR	Вегетативний індекс «Простий коефіцієнт»
VI-LST	Вегетативний індекс - температура поверхні суші
SSiB	Спрощена проста біосферний модель

ASTER	Вдосконалений космічний радіометр теплового випромінення та відображення
AVHRR	Вдосконалений радіометр дуже високої роздільної здатності
VNIR	Видимий та ближній ІЧ діапазон ASTER (0.52 - 0.86 мкм)
NIR	Ближній ІЧ діапазон ASTER (0.76 - 0.86 мкм)
SWIR	Середній ІЧ діапазон ASTER (1.6 - 2.43 мкм)
TIR	Тепловий ІЧ діапазон ASTER (8.125 - 11.65 мкм)
ПЭПР	Питома ефективна площа розсіювання
ІПФ РАН	Інститут прикладної фізики Російської Академії наук

ВСТУП

Наприкінці 20 століття та початку 21-го відзначено істотне зростання кількості природних і техногенних катастроф, що завдають економічної шкоди в сотні мільярдів доларів і істотно впливають на природне середовище Землі та на все людство в цілому [1]. Серед природних і антропогенних катастроф за своєю величезною шкодою і впливом на великі території виділяються розливи нафтопродуктів на морській поверхні при їх видобутку та транспортуванні, процеси підтоплення територій, тобто підйом рівня ґрунтових вод і перезволоження ґрунтів, обумовлені господарсько-техногенної людською діяльністю, підповерхневі пожежі торфовищ і т.п. Так, наприклад, проблема підтоплення територій в Україні за своїми масштабами і динаміці розвитку набула останнім часом ознаки потенційної загрози для місць проживання людини. При цьому практично повсюдно спостерігається підйом рівня ґрунтових вод, обумовлений підвищенням горизонтів води в річках при спорудженні водосховищ, руслових гребель, судноплавних каналів та інших гідротехнічних споруд, насиченням ґрунтів при фільтрації води через дно і береги каналів, втратами з водопровідних і каналізаційних мереж. За різними оцінками підтопленнями в Україні охоплено до 30% населення, 60% промислово-міських агломерацій, практично всі розвинені гірничодобувні райони та проммайданчики діючих АЕС. Значна частина території України покрита заболоченими ґрунтами. На даний час осушено 3273,6 тис. Га, або 49,8% болотно-меліоративного фонду України [2]. Ще 2500 тис. Га можна умовно віднести до земель, прилеглих до осушених масивів і схильних до впливу складних процесів осушувальних меліорацій. Приблизно кожен шостий гектар осушених земель знаходиться в несприятливо меліоративному стані та близько 70 тис. Га земель переосушені. В існуючих в заболочених ґрунтах шарах торфу дуже ймовірно виникнення підземних пожеж, що завдає великих економічних збитків та має негативний вплив на навколишнє середовище [3]. Торф'яні пожежі зазвичай виникають, коли рівень ґрунтових вод знижується, та торф'яні

пласти висихають. Небезпека торф'яної пожежі полягає в тому, що горить торф'яний шар глибоко під землею. Осередок тління може перебувати на глибині від 0,3 до декількох десятків метрів. Торф'яні пласти можуть горіти без доступу повітря з поверхні, що значно ускладнює гасіння торф'яних пожеж. Самозайманню торфу завжди передують більш-менш тривалий процес його низькотемпературного окислення та самонагрівання, під час якого позитивні аномалії температурного поля в приповерхневих шарах та на земній поверхні можуть не перевищувати одиниць градусів.

На даний час у космосі успішно функціонують численні РСА радіолокаційні системи ДЗЗ: RADARSAT -1, -2 (Канада), ENVISAT ASAR, ERS-1, -2 (ЕКА), ALOS PALSAR (Японія), Lacross 2, ... -5 (США), TerraSAR-X1, -X2, Sar-Lupe -1 ... -5 (Німеччина), COSMO SkyMed (Італія), TECSAR (Ізраїль), JianBing -5 (Китай) та багато інших, що відкрило широкі можливості для здійснення дистанційних досліджень вологості ґрунтових покривів в самих різних районах Землі [4]. Однак радіолокаційні системи мають значні обмеження. Так поверхнева шорсткість має істотний вплив на радарне розсіювання; це ускладнює оцінку вологості ґрунту з використанням активного радара. Радарний сигнал також послаблюється та розсіюється рослинністю; що обмежує використання активних радарних методів лише на поверхнях з невеликим або відсутнім покриттям рослинністю. Глибина проникнення радіохвиль змінюється в залежності від діелектричної проникності ґрунту, кута падіння та частоти опромінення, проте РСА відчуває вологість в шарі ґрунту товщиною в кілька сантиметрів, що не дозволяє використовувати їх для спостереження підтоплення глибших шарів ґрунту.

Для дистанційних досліджень температурних аномалій, викликаних перезволоженням підповерхневих шарів ґрунтів і підповерхневих самозаймань широко використовуються космічні та авіаційні ІЧ засоби [5, 6]. Проблеми, з якими стикаються при оцінці умов вологості, породжуються різноманітністю джерел електромагнітного випромінювання, що реєструється ІЧ сенсором (наприклад, ґрунт, листя рослинності та деревний матеріал, сміття, та т.д.),

діапазоном впливу змінних, які можуть визначати потік ІЧ випромінення (наприклад, поверхнева вологість, падаюче випромінення, вітер, альbedo, теплова інерція, та т.д.), та передачею випускаємого випромінення через атмосферу. Взагалі, визначення відносин між поверхневою вологістю і ІЧ випроміненням є недовизначеною проблемою, з багатьма невідомими, що істотно ускладнюють однозначну інтерпретацію отриманих даних.

Ці проблеми та обмеження існуючих методів РЛ і ІЧ моніторингу викликають необхідність створення комплексного методу активно–пасивного (радіолокаційно + термального ІЧ + оптичного) дистанційного виявлення та розпізнавання проявів цих небезпечних катастрофічних явищ в поєднанні з опорними контактними вимірами безпосередньо на поверхні ґрунту.

Прямий негативний вплив розливів нафтопродуктів на екологію флори та фауни моря та прибережних районів, що прирівняно до катастроф, стало причиною активних розробок методів дистанційного виявлення таких розливів. Радіолокаційні методи стали одними з найбільш перспективних. Аналіз робіт [7, 8, 9, 10] показує, що основним результатом проведених досліджень є підтвердження ефекту виявлення плівок нафти та нафтопродуктів на морській поверхні при зондуванні в ММ, СМ і ДМ діапазонах довжин радіохвиль. Однак при цьому спостерігається відсутність кореляції результатів ряду експериментів по радіозондуванню навіть на одних і тих же або близьких за величиною довжинах хвиль (наприклад, [9, 11]). Все це вказує на необхідність проведення додаткових експериментальних досліджень для створення достовірних радіолокаційних методів виявлення і вимірювання параметрів забруднень морської поверхні.

Дана робота є результатом багаторічних досліджень із застосуванням дистанційних радіофізичних методів і засобів по напрямках:

- дослідження катастрофічних процесів пов'язаних з аномальними змінами вологості земних покривів;
- дослідження катастрофічних процесів пов'язаних із забрудненням морської поверхні сирою нафтою.

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 і 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 і 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 і НКА України й Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України в рамках наступних НДР та ДКР:

НДР «Розроблення нових методик дистанційного зондування Землі радіофізичними методами», шифр «Методика-Р», 2007 р., номер держреєстрації 0102V003695;

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

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 - створення методів і засобів дистанційного виявлення підтоплень земель, саморозігріву 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.

Відповідно до цього в роботі 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 і ІЧ растрових зображень, викликаних нестабільністю польоту літальних апаратів.

4. Створити методику ідентифікації небезпечних явищ перезволення 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 і ІЧ випромінювання земною поверхнею, а також морською поверхнею в присутності поверхнево-активних плівок обмеженої товщини.

Предмет дослідження – взаємозв'язок параметрів розсіяних радіосигналів і ІЧ випромінювання з характеристиками досліджуваних поверхонь.

Методи дослідження – методи теоретичної електродинаміки, статистичної радіофізики, методи математичної статистики, гідродинаміки, експериментальні методи.

Наукова новизна.

1. Розроблено метод компенсації просторових викривлень даних авіаційного комплексу дистанційного зондування (АКДЗ-30) для інтеграції їх в геоінформаційну систему.

2. Запропоновано метод активно-пасивного радіофізичного дистанційного зондування для виявлення й ідентифікації зон підтоплень і підповерхневого саморозігріву ґрунтів, вкритих рослинністю.

3. Розроблено метод ідентифікації зон підтоплень та підповерхневого саморозігріву ґрунтів з використанням тривимірної кластеризації добових даних активно-пасивного зондування поверхні, покритої рослинністю.

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

Практичне значення отриманих результатів.

- 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 апаратурними особливостями та нестабільністю польоту літальних апаратів можуть бути використані при обробці растрових радіолокаційних і ІЧ знімків.
- Запропонований метод активно-пасивного радіофізичного дистанційного зондування для виявлення й ідентифікації зон перезволоження, а також підповерхневого саморозігріву органічних речовин і матеріалів може бути використаний при створенні методів дистанційного зондування земель сільськогосподарського призначення.
- Розроблену методику спільної тематичної обробки растрових радіолокаційних, ІЧ 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 [42, 84, 100] 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 [90, 99] 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 [111, 108, 82] 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 [69, 72] автор брав участь в розробці методу багатокутного аналізу даних одночастотного радіолокаційного зондування, що дозволяє виявляти розливи поверхнево-активних речовин на морській поверхні й оцінювати їх параметри.

У роботі [73] автор брав участь в розробці методики застосування модельних розрахунків розтікання поверхнево-активних речовин, що дозволило істотно уточнити оцінки товщини плівки та вдосконалити метод багатокутного аналізу даних одночастотного радіолокаційного зондування.

Апробація матеріалів дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних, національних та місцевих конференціях:

- Науково-практична конференція “Підтоплення-2005”, Лазурне, 20-24 червня 2005 р. [83];
- 8-ма Всеросійська відкрита щорічна конференція «Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 15-19 листопада 2010 р. [101];

- 21-ша Міжнародна Кримська конференція "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо 2011). Севастополь, 12-16 вересня 2011 р. [91];

- 9-та Всеросійська відкрита щорічна конференція «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 14-18 листопада 2011 р. [69, 77];

- 10-та Всеросійська відкрита щорічна конференція «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 12-16 листопада 2012 р. [147];

- The Eighth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkov, Ukraine, June 23-28, 2013 [106];

- 23-тя Міжнародна Кримська конференція "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо 2013), Севастополь, 8-13 вересня, 2013 р. [107, 109];

- 11-та Всеросійська відкрита щорічна конференція «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 11-15 листопада 2013 р. [71];

- 24-та Міжнародна Кримська конференція "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо 2014), Севастополь, 7-13 вересня, 2014 р. [112];

Публікації.

Основні результати роботи представлені в 11 статтях в наукових журналах та збірниках, з них 11 опубліковані в наукових виданнях, які внесені до переліку ВАК України та додатково відображені в матеріалах конференцій.

Структура і обсяг дисертації.

Дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, основної частини, що включає 4 розділи, висновків, списку використаних літературних джерел з 148 найменувань, додатку.

Робота викладена на 169 сторінках машинописного тексту та містить 53 ілюстрації (з яких 43 не займають окремих сторінок) та 4 таблиці. Список використаних джерел на 18 сторінках налічує 148 найменувань.

У першому розділі основної частини дисертації представлений огляд літератури, освітлено стан розглянутих питань на момент написання дисертації та визначено мету і завдання, які вирішуються в рамках даної роботи.

У другому розділі розглянуті апаратура та методики експериментальних досліджень, детально описані авторські методики первинної та тематичної обробки растрової інформації РЛ і ІЧ систем авіаційного комплексу АКДЗ-30.

У третьому розділі розглянуто виявлення та ідентифікація підповерхневого перезволоження ґрунтів та саморозігріву органічних матеріалів радіофізичним методом активно-пасивного зондування з урахуванням впливу рослинного покриву на результати радіотеплового зондування, представлені експериментальні результати авіаційного моніторингу проявів підтоплень та передвісників самозаймань на осушених ґрунтах. Описано використання методики ідентифікації небезпечних явищ підповерхневого перезволоження ґрунтів та саморозігріву органічних речовин, з використанням методів комп'ютерної багатовимірної кластеризації даних комбінованої добової радіолокаційно–радіотеплової авіаційної зйомки авіаційним комплексом АКДЗ-30.

У четвертому розділі описано багатокутний метод радіолокаційної діагностики нафтових забруднень морської поверхні з використанням моделювання процесів розтікання нафти по морській поверхні, представлені результати апробації та валідації даного методу.

У заключному розділі «Висновки» сформульовані основні результати, отримані в дисертації, та дана їх коротка характеристика.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ

1.1 Підтоплення територій

Проблема підтоплення територій в Україні за своїми масштабами і динаміці розвитку набула останнім часом ознаки потенційної загрози для місць проживання людини. Як відомо, підтоплення територій це комплексний процес, що проявляється під дією техногенних і, частково, природних факторів, при якому в результаті порушення водного режиму і балансу території за розрахунковий період часу відбувається підвищення рівня підземних вод, що досягає критичних значень, що вимагають застосування, захисних заходів. [12].

При цьому практично повсюди спостерігається підйом рівня ґрунтових вод, обумовлений підвищенням горизонтів води в річках при спорудженні водосховищ, руслових гребель, судноплавних каналів та інших гідротехнічних споруд, насиченням ґрунтів при фільтрації води через дно і береги каналів, втратами з водопровідних і каналізаційних мереж. При піднятті ґрунтових вод заболочуються і засолюються ґрунти, знижується продуктивність луків, полів і лісів, погіршується санітарний стан місцевості, руйнуються будівлі і т.п.

Через втрати від 25 до 40% і більше води з несправних трубопроводів стався повсюдний підйом рівня ґрунтових вод в містах. Його величина склала в багатьох випадках 5-10 м, а іноді 15-20 м. У Дніпропетровську, на масиві Тополя-1, де сталася широко відома катастрофа 1997 року, коли суфозійно-селевий викид розрідженого пливунного ґрунту за лічені хвилини привів до знищення житлового будинки і загибелі людей, замочування досягало 17 м.

Таким чином, завдання регулярного комплексного моніторингу розвитку процесу деградації ґрунтів в результаті перезволоження через підняття ґрунтових вод і підтоплення територій стає однією з найважливіших.

Значна частина території України вкрита заболоченими ґрунтами. Наприклад, на Чернігівському Поліссі заболоченість досягає 5% і переважають болота низинного типу. До їх складу входять кілька болотних масивів, де

здавна розробляються відкладення торфу з потужністю пластів від 1,5 до 6 м. Система меліоративного водовідведення, яка давала можливість раніше знижувати рівень підповерхневих вод, і, відповідно, істотно зменшувати площу перезволожених земель і площ, зайнятих болотами, в значній мірі занедбана. Частина дренажних каналів захаращена, заросла очеретом, і не виконує завдань, покладених на меліоративну систему. Через порушення розрахункової збалансованості системи водовідведення на деяких ділянках розвиваються такі небезпечні процеси як перезволоження раніше осушених заболочених ґрунтів, а на деяких (переосушення) - самозаймання торфовищ, які мають істотний вплив, як на сільськогосподарську діяльність, так і на стан екології значної частини України, що викликає нагальну потребу розвитку системи оперативного виявлення таких процесів.

1.2 Підповерхневий саморозігрів органічних речовин

Як відомо [3], в існуючих в глибині заболочених ґрунтів шарах органічних речовин, наприклад, торфу дуже ймовірно виникнення підземних пожеж. Торф'яні пожежі зазвичай виникають, коли рівень ґрунтових вод знижується, і торф'яні пласти висихають. Небезпека торф'яної пожежі полягає в тому, що горить торф'яний шар глибоко під землею. Осередок тління може перебувати на глибині від 0,3 до декількох десятків метрів. Торф'яні пласти можуть горіти без доступу повітря з поверхні, що ускладнює гасіння торф'яних пожеж. Самозайманню торфу завжди передують більш-менш тривалий процес низькотемпературного окислення і саморозігріву, швидкість якого визначається хімічною активністю торфу, умовами припливу повітря і можливістю віддачі тепла в навколишнє середовище. Схильність торфу до самозаймання залежить від його ботанічного складу, ступеня розкладання і фізико-хімічних властивостей. За перші 30 - 40 діб температура в шарі торфу підвищується на 3 - 5°C, в наступні 10-30 днів зростання температури прискорюється від 0,5°C до 4,5°C на добу і більше. Саморозігрів скупчень торфу при температурах до 60 - 65°C відбувається переважно в результаті життєдіяльності мікроорганізмів,

а також окислення легко окислюємих продуктів їх життєдіяльності і відновлених речовин, які накопичуються в анаеробних умовах. При температурі, що перевищує 60°C , торф протягом декількох днів перетворюється в напівкокс, здатний енергійно взаємодіяти з киснем повітря. Тому подальше підвищення температури торфу відбувається переважно в результаті його окислення киснем і призводить до самозаймання торфу.

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 в приповерхневих шарах і на земній поверхні можуть досягати значень від одиниць до декількох десятків градусів. За даними [5] вогнища підземних пожеж на земній поверхні відслідковуються на глибинах до 15м. Для дистанційного виявлення підповерхневих теплових аномалій використовується теплова ІЧ зйомка, так, наприклад, за результатами зйомки полігонів із захоронення побутових відходів в [14] робиться висновок: «Теплова ІЧ зйомка - єдиний дистанційний метод, що виявляє вогнища підземного самозаймання на ранній стадії їх зародження».

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 α_{shw} - короткохвильове альбедо; $L_{\Sigma shw}$ - потік сумарної короткохвильової радіації біля земної поверхні; L_{efflw} - ефективне (з урахуванням противипромінення атмосфери) довгохвильове випромінення землі; L_{conv} - конвективний потік тепла в повітря; L_{ev} - потік тепла, що витрачається на випаровування; L_{soil} - потік тепла в ґрунті [15].

Добре видно, що для відкритого ґрунту варіації короткохвильового і довгохвильового альбедо його поверхні, коефіцієнтів теплопоглинання, теплоємності, теплопровідності і тепловипромінення (викликані змінами її вологості, а також підповерхневими процесами) безпосередньо відображаються в інтенсивності реєструемого ІЧ випромінення.

У разі ж ґрунту вкритого рослинністю всі процеси протікають набагато складніше. У такій складній системі, як при інсоляції в денний час, так і під час

нічної генерації довгохвильового інфрачервоного випромінення, відбуваються процеси багаторазового розсіяння і абсорбції. У той же час, 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.

1.3 Дослідження вологості ґрунтових покривів сучасними космічними радіолокаційними системами ДЗЗ

Як було відзначено у вступі, на теперішній час в космосі успішно функціонують численні РСА радіолокаційні системи ДЗЗ, що працюють в різних діапазонах радіохвиль, що дало можливість проведення дистанційних досліджень вологості ґрунтових покривів з використанням різних методів інтерпретації даних. Накопичений на даний час досвід таких досліджень, дозволив зробити певні узагальнення щодо чутливості, обмежень і особливостей оцінки вологості ґрунту з використанням космічних РСА [4]:

- Величина розсіяного радіолокаційного сигналу визначається діелектричними властивостями ґрунту; існує сильна кореляція між вологістю ґрунту і радарним зворотнім розсіянням;
- Поверхнева шорсткість (і випадкова і періодична) має істотний вплив на радарне розсіяння, що ускладнює оцінку вологості ґрунту з використанням активного радара;
- Радарний сигнал також послаблюється і розсіюється рослинністю; що обмежує використання активних радарних методів лише на поверхнях з невеликим або відсутнім покриттям рослинністю;
- Глибина проникнення радіохвиль змінюється в залежності від діелектричної проникності ґрунту, кута падіння і частоти, однак РСА відчуває вологість в шарі ґрунту товщиною в кілька сантиметрів;
- Заморожені ґрунти, незалежно від вмісту води, мають діелектричну константу, подібну висушеному ґрунту;

- Просторова роздільна здатність основних сучасних космічних РСА знаходиться в межах 1 м. - 100 м. - 1000 м.

На даний час, найбільш доступні дані наступних супутникових радіолокаційних систем дистанційного зондування:

- RADARSAT-1 (5,66 см, поляризація ГГ), RADARSAT-2 (5,66 см, повнополяризаційний режим і режим схрещеної поляризації), Envisat ASAR (5,6 см, повнополяризаційний режим);
- ALOS PALSAR (23-см, повнополяризаційний режим і режим схрещеної поляризації);
- TerraSAR-X (3-см, повнополяризаційний режим і режим схрещеної поляризації).

1.4 Оцінка вологості ґрунту за даними РСА методом виявлення змін

При використанні методу виявлення змін передбачається, що зміни шорсткості досліджуваного району протягом довгого часу є невеликими, а в основному зміни в зворотному розсіянні 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.

Для оцінки вологості ґрунту за даними РСА використовуються різні напівемпіричні моделі, в тому числі модель Dubois [16], емпіричний алгоритм якої, є спрощенням оригінальної емпіричної моделі Oh [17]. Вологість ґрунту і шорсткість її поверхні в рамках цієї моделі може бути оцінена на підставі використання синхронних даних розсіяного сигналу, отриманих на двох різних поляризаціях (наприклад, горизонтальної та вертикальної). Ця емпірична модель була побудована на основі даних POLARSCAT [18] і тільки описує узгоджене поляризоване зворотне розсіяння як функцію поверхневої шорсткості, кута падіння та частоти. Однак, діелектрична константа залежить

від об'ємної вологості ґрунту та коефіцієнтів зворотного розсіяння, які дослідним шляхом отримуються як впливає із виразів:

$$\sigma_{hh}^0 = 10^{-2.75} \frac{\cos^{1.5} \theta}{\sin^5 \theta} 10^{0.028\varepsilon \tan \theta} (ks \cdot \sin \theta)^{1.4} \lambda^{0.7}$$

$$\sigma_{vv}^0 = 10^{-2.35} \frac{\cos^3 \theta}{\sin^3 \theta} 10^{0.046\varepsilon \tan \theta} (ks \cdot \sin \theta)^{1.1} \lambda^{0.7}$$

де θ - місцевий кут падіння, ε - реальна частина комплексної діелектричної константи, h - середньоквадратична висота, k - хвильове число, λ - довжина хвилі в см. Ці два відношення дійсні для частотного діапазону 1.5-11 ГГц; в діапазоні кутів падіння між 30° і 65° .

Необхідно враховувати, що рівень зворотного розсіяння визначається параметрами опромінення (частота, кут опромінення, поляризація) і характеристиками цілі (діелектрична проникність і шорсткість). Необхідні коефіцієнти виходять з обширних наземних польових вимірювань (часто використовуються наземні скаттерометричні вимірювання). Передбачається, що параметри опромінення відомі, і два рівняння вирішуються багаторазово або для визначення діелектричної проникності підстильної поверхні, або для її шорсткості, використовуючи мультикутові або радарні мультиполяризаційні дані. Моделі включають тільки одну змінну шорсткості - середньоквадратичне значення (довжина кореляції проігнорована).

Фізична модель розсіяння «Модель Інтегрального рівняння» (ІЕМ) [19] може бути представлена у вигляді двох функцій що залежать тільки від ε_s , θ та ks . Ці функції можуть бути представлені як:

$$\alpha_{hh} = \frac{(\varepsilon_s - 1)}{\left(\cos \theta + \sqrt{\varepsilon_s - \sin^2 \theta}\right)^2}$$

$$\alpha_{vv} = \frac{(\varepsilon_s - 1)(\sin^2 \theta - \varepsilon_s(1 + \sin^2 \theta))}{\left(\cos \theta + \sqrt{\varepsilon_s - \sin^2 \theta}\right)^2}$$

В рамках моделі Shi [20], це об'єднано з числовим регресійний рівнянням отриманим з модельованих даних. Зворотне рівняння для оцінки вологості ґрунту виглядає наступним чином:

$$10\log_{10}\left[\frac{|\alpha_{vv}|^2 + |\alpha_{hh}|^2}{\sigma_{vv}^0 + \sigma_{hh}^0}\right] = a_{vh}(\theta) + b_{vh}(\theta) 10\log_{10}\left[\frac{|\alpha_{vv}| |\alpha_{hh}|}{\sqrt{\sigma_{vv}^0 \sigma_{hh}^0}}\right]$$

$$a_{vh}(\theta) = e^{-12.37 + 37.206\sin(\theta) - 41.187\sin^2(\theta) + 18.898\sin^3(\theta)}$$

$$b_{vh}(\theta) = 0.649 + 0.659\cos(\theta) - 0.306\cos^2(\theta)$$

ІЕМ добре працює з оцінкою параметра σ_{hh}^0 і σ_{vv}^0 для AIRSAR та вимірювань CIR-C, які працюють в 23-см діапазоні. Однак, для інших даних SAR ця модель залишається досить складною.

Прикладом результатів радіолокаційного зондування, отриманих з використанням RADARSAT-1 і Envisat ASAR може бути застосування модифікованої моделі Dubois (мультикутове зондування з поляризацією - ГГ) для району Острови Принца Едуарда, яке дозволило отримати середньоквадратичну помилку визначення вологості ґрунту з помилкою (у% відносно середнього значення) для:

- Гладкої поверхні = 4.3%
- Середньо шорсткої поверхні = 4.4%
- Сильно шорсткої поверхні = 6.0%.

Застосування стандартної моделі Dubois (мультиполяризаційне зондування) для району Східного Онтаріо дозволило отримати середньоквадратичну помилку визначення вологості ґрунту з помилкою (у% відносно середнього значення) для:

- Гладкої поверхні = 8.4%
- Середньо шорсткої поверхні = 11.4%
- Сильно шорсткої поверхні = 9.8%.

Застосування спрощеної ІЕМ моделі, при якій використовується отриманий з зображення індекс шорсткості і рівень зворотного розсіяння для оцінки вологості ґрунту, дозволяє оцінювати вологість шляхом підгонки рівнянь через модельований набір даних. На рисунку 1.1 представлений результат використання спрощеної моделі ІЕМ для оцінки вологості ґрунту.

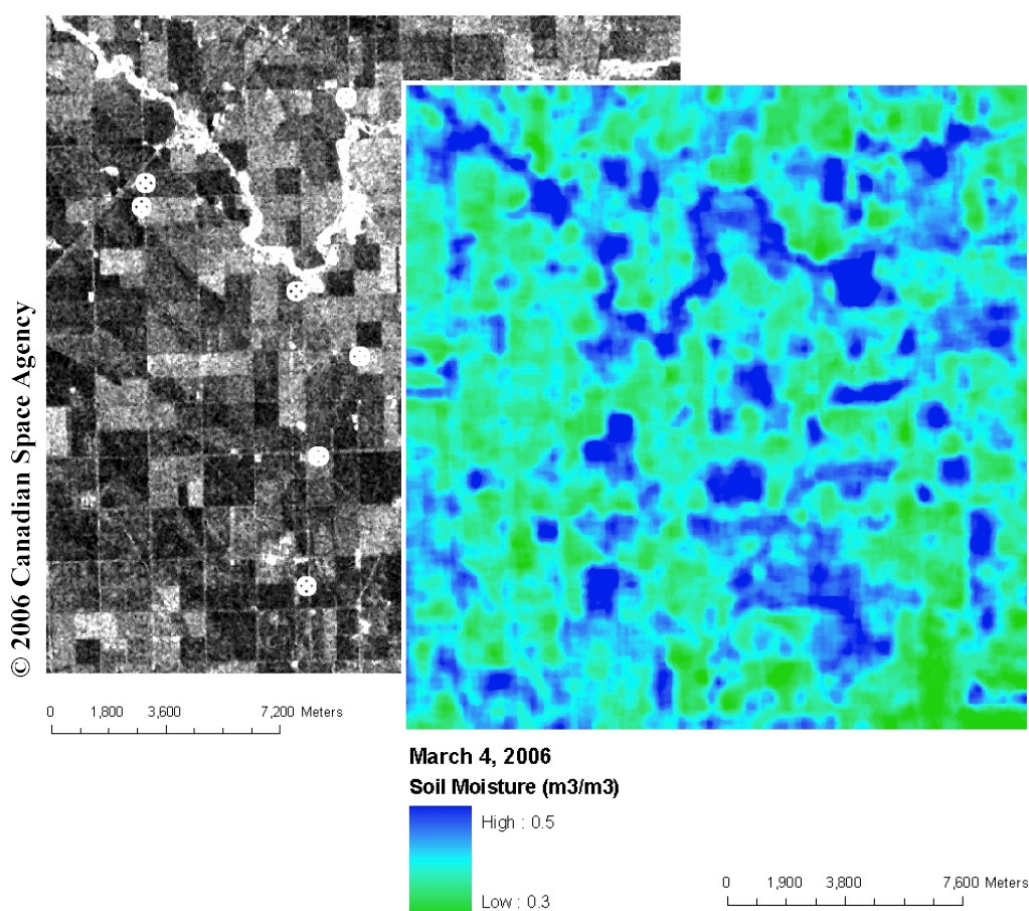


Рисунок 1.1 - Приклад оцінки вологості ґрунту за даними RADARSAT-1 SAR, з використанням спрощеної моделі IEM

У цьому випадку індекс шорсткості було отримано з 2-х зображень RADARSAT-1 при різних кутах і інваріантних умовах вологості ґрунту. Среднеквадратическая помилка $RMSE < 6.0\%$, однак, при цьому потрібно подальша валідація для можливості застосування в більшому діапазоні вологості.

1.5 Оцінка вологості поверхні землі методом об'єднання дистанційного ІЧ і оптичного визначення температурно-вегетаційного індексу

Значні зусилля по використанню можливостей ІЧ і оптичних засобів дистанційного зондування в кількісному визначенні параметрів вологості ґрунту до сих пір не дали однозначного рішення і все ще в стадії реалізації. Серед безлічі методів велике число дослідників аналізували комбінацію

визначення поверхневої температури та спектрального вегетативного індексу рослинності (SVI) і метод визначення температурно-вегетативного індексу (TVX), як засіб враховувати сильний і змінний вплив рослинного покриву на оцінку вологості ґрунту. При цьому «Спрощена модель простої біосфери» (SSiB) використовується для аналізу факторів, що викликають спостережувані відношення TVX. Для діапазону типових, середньовисотних сільськогосподарських умов, модель SSiB призводить до очікуваних відношень TVX, поверхневі температури зменшуються зі збільшенням величини SVI. Найбільш важливими факторами, що змушують відношення TVX змінюватися, є поверхнева вологість ґрунту (в шарі порядку 2 см), падаюче випромінення (ІЧ), та, до меншої міри, швидкість вітру. Необхідно зазначити, що численні експериментальні дослідження вказують на те, що температури ґрунту і шару рослинності визначаються в основному станом вологості ґрунту і, в меншій мірі, впливом сонячної інсоляції і швидкості вітру. Результати також показують, що метрики TVX в змозі забезпечити оцінку щоденних змін вологості ґрунту до 2 см глибини, та сезонної тенденції для шару в 10 см. Використовуючи отримані з супутника поверхневі температури та рішення SSiB-рівняння, вдалося відновлювати вологість ґрунту з показниками близькими до умов, зареєстрованим на землі [6].

Проблеми, з якими стикаються при оцінці поверхневих умов вологості, породжуються різноманітністю джерел електромагнітного випромінення (ЕМ), реєстрованого ІЧ сенсором в єдиному вимірі (наприклад, ґрунт, листя рослинності та деревний матеріал, сміття, та т.д.), діапазоном впливу змінних, які можуть визначати потік ЕМ випромінення (наприклад, поверхнева вологість, падаюче випромінення, вітер, альbedo, теплова інерція, та т.д.), і передачею випускаємого випромінення через атмосферу. Взагалі, визначення відношення між поверхневою вологістю і ЕМ випроміненням є недовизначеною проблемою, з багатьма невідомими, що істотно ускладнюють однозначну інтерпретацію отриманих даних.

Розглянемо біофізику т.зв. "Об'єднаного" методу, визначення температурно-вегетативного індексу (підхід TVX), який аналізує просторову або контекстну множину дистанційних вимірювань спектру відбитого сонячного світла і дані радіотеплового вимірювання для оцінки поверхневих умов вологості ґрунту [21, 22].

Кореляція поверхневої температури (T_s) і спектрального вегетативного індексу (SVI), є показником того як листяний покрив модулює дистанційно виміряне значення T_s . SVI, такий як нормалізований диференційний вегетативний індекс (NDVI) або «Простий коефіцієнт» (SR), різним чином пов'язані з відсотком зеленого рослинного проективного покриття та зеленої біомаси [23, 24, 25]. На рисунку 1.2 представлений приклад графіка TVX побудованого за даними AVHRR, на якому явно спостерігається зворотне відношення між поверхневою температурою та NDVI. Контекстна структура даних типово спостерігається в цих полуденних спостереженнях.

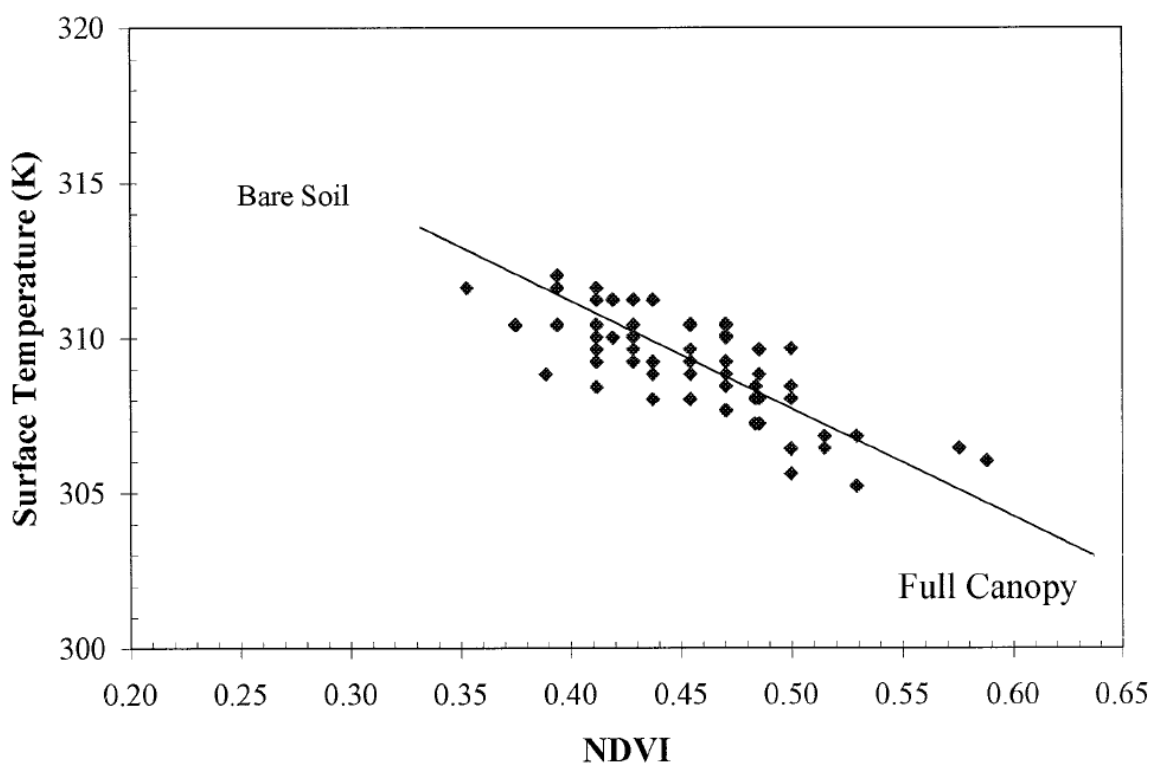


Рисунок 1.2 - Приклад графіка TVX побудованого за даними AVHRR

Як голий ґрунт, так і рослинність, непрозорі в тепловій інфрачервоній частини спектру. Таким чином, дистанційні ТІЧ вимірювання визначають

радіометричну температуру компонентів поверхні землі, що знаходяться безпосередньо в поле зору датчика (наприклад, немає ніякого розсіювання або передачі випромінювання ТІЧ від компонентів розташованих під ними) [26, 27, 28]. Виміряне значення SVI збільшується з ростом спостережуваного обсягу зеленого листа, при цьому і радіометрична температура, зареєстрована ІЧ датчиком, наближається до істинного значення температури зеленого листа.

У період спектрального максимуму рослинності (наприклад, при оптично нескінченно товстому шарі рослинності) або повному покритті рослинним покривом, вимір T_s дозволяє вимірювати температуру рослинного покриву (T_c). В протилежному випадку відсутності рослинності вимір T_s збігається з радіометричною температурою освітленої сонцем безрослинної поверхні, такою як голий ґрунт (T_g). Спрощено кінці кореляційного графіка TVX відповідають температурі безрослинної голою ґрунту (T_g) і температурі рослинного шару (T_c).

Зміни T_g і T_c протягом денного часу так само як і відмінності між цими двома температурами - комплексна функція, що залежить від поточних і попередніх метеорологічних умов, а також від поточних фізичних умов поверхні землі. Фактично, пояснення спостережуваних змін TVX - фундаментальна проблема в метеорології поверхневої кордону суші, тому що необхідно повне розуміння причин змін T_g і T_c та відмінності їх один від одного. Біофізичні умови поверхні землі, такі як покриття рослинністю, устьичне функціонування, альbedo, вологість ґрунту, і теплова інерція, взаємодія з падаючим ІЧ випромінюванням, повітряним потоком, і іншими атмосферними змінними, що викликають енерго- і масо-обмін в пограничному шарі, який в свою чергу визначає температуру ґрунту і рослинного шару так само як температура приповерхневого повітря. Метеорологічні спостереження в цьому поверхневому граничному шарі показали, що температура листа рослинності (T_c) врівноважується близько до температури повітря (T_a), тоді як T_s безрослинної (наприклад, освітлений сонцем, голий ґрунт) поверхні (T_g)

типово тепліша ніж T_c і змінюється істотно з умовами навколишнього середовища, такими як поверхнева вологість і падаюче ІЧ випромінення [29].

В ізолюваному варіанті (тобто, без прив'язки до атмосферних моделей), вплив комплексу факторів, що впливають, включаючи падаюче коротко - і довгохвильове випромінення, повітряну температуру, вологість, і вітер на відповідній висоті, об'єднані в моделі SSiB (рис.1.3) [30] .

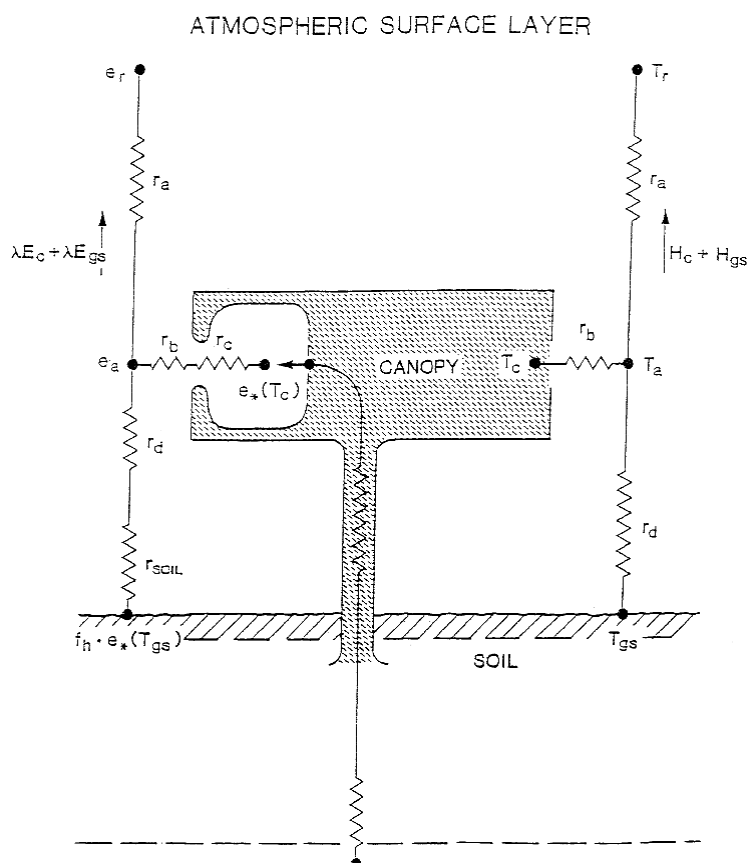


Рисунок 1.3 - Схематична діаграма структури моделі SSiB

Близько 20 параметрів рослинності та ґрунту необхідні для визначення стану поверхні шару землі. У моделі SSiB враховуються три шари ґрунту, один шар рослинного покриву і вісім прогностичних змінних, включаючи вологість для трьох шарів ґрунту (0.02, 0.48, і 1.1 м), водний вміст, збережений рослинним покривом, снігом на землі, та температура покриву. Використовуються дві температури ґрунту: температура поверхні ґрунту і температура на глибині ґрунту, яка отримується методом відновлення. Модель використовує устичний опір (r_c), опір ґрунту (r_{soil}), опір граничного шару

рослинного покриву (r_b), і два аеродинамічних опори, які управляють обміном імпульсами, тепла, і вологи між атмосферою і поверхнею землі.

Рівняння для температури покриву T_c засноване на рівнянні збереження

енергії.
$$C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = R_{nc} - H_c - \lambda E_c$$
, де C_c , R_{nc} , H_c , λE_c – теплопровідність покриву, чисте випромінювання, потік явного тепла, і потік прихованого тепла на рівні покриву, відповідно. Метод відновлення використовується для передбачення часових варіацій температури землі T_g :

$$C_{gs} \frac{\partial T_{gs}}{\partial t} = R_{ngs} - H_{gs} - \lambda E_{gs} - \frac{2\pi C_{gs}}{\tau} (T_{gs} - T_d)$$
, де τ - тривалість дня,

C_{gs} - ефективна теплопровідність ґрунту, T_d - температура в глибині ґрунту, та R_{ngs} , H_{gs} , и λE_{gs} - чиста радіація, потік явного тепла, і потік прихованого тепла в землі, відповідно. Зміни кожного компонента цих двох рівнянь зачіпає і T_c і T_g . У трьох шарах ґрунту водний рух описано в кінцево-різницевого наближенні рівнянь розповсюдження. Рівняння вологості ґрунту для першого шару ґрунту

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = \frac{1}{D_1} [P + Q_{12} - E_{gs} - b_1 E_c]$$
, де P - опади, що досягають землі, θ_1 , та

D_1 - об'ємний вміст води в ґрунті і товщина верхніх шарів ґрунту, відповідно, b_1 - фактор фракції (залежить від розподілу коренів у верхньому шарі ґрунту), Q_{12} - передача води між першими і другими шарами, та E_c - випаровування в покриві.

Вищенаведені рівняння показують зв'язок між T_c , T_g , и θ_1 , який є фізичною основою для відношення TVX.

Автономна версія SSiB була завірена та калібрована з використанням даних вимірювань різноманітної рослинності в різних районах світу. Дані, використані для завірення, включають дані тропічних лісів Амазонки [30], російські дані по вологості ґрунту [31,32], дані по сільхозрайонам у Франції [33] та багато інших. Приклад практичних досліджень вологості підстильної поверхні з використанням TVX-метрики в модифікованому варіанті

представлений в [34]. Дослідження були спрямовані на оцінку потенціалу зображень ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), по картографуванню змін вологості рослинного шару в межах даної області в певний час. У дослідженні використовувалися два підходи, а потім порівнювалися результати.

Підхід 1: Об'єднання теплових та відбивних зображень в «Методі VI-LST Трикутного Простору» для нанесення на карту відносних змін вологості рослинного покриву. Модифікований коректований ґрунтовий вегетаційний індекс (MSAVI), отриманий із зображень видимого та ближнього ІЧ діапазону (VNIR), і кінетична температура поверхні землі з зображень ТІЧ діапазону використовувалися як «Веgetативний Індекс» (VI) та як «Поверхнева Температура Землі» (LST) відповідно. MSAVI використовувався замість NDVI для усунення ефектів другорядних ґрунтів в обчисленнях VI. При цьому відношення сигналу до шуму вище в інших індексах рослинності, таких як, NDVI і SAVI (коректований ґрунтовий вегетаційний індекс). Це не тільки збільшило вимірюваний динамічний діапазон відгуків рослинності, але також і зменшило вплив зміни фону ґрунту [35].

Підхід 2: Створення зображень відповідного індексу, з використанням зображень у відбитому світлі і короткохвильові зображення, для нанесення на карту відносних змін вологості рослинного покриву. В цьому випадку, нормалізований відносний індекс вмісту води (NDWI) був розрахований з використанням зображення 2-го каналу діапазону VNIR і зображення 1-го каналу діапазону SWIR.

Для проведення досліджень використовувалися отримані від НАСА зображення ASTER - «ASTER продукт L1b» і «рівень ASTER 2» - «Кінематична Температура поверхні Землі» (AST_08). Зображення були отримані, георектіфіковані і спроектовані в «WGS 84» проекцію.

Області рослинного покриву були відібрані на підставі однорідності рослинного покриву в межах району дослідження. Обрані райони рослинного

покриву були згруповані в чотири зони. Рисунок 1.4 показує отримані зображення ASTER VNIR з місцем розташування відібраних зон врожаю.

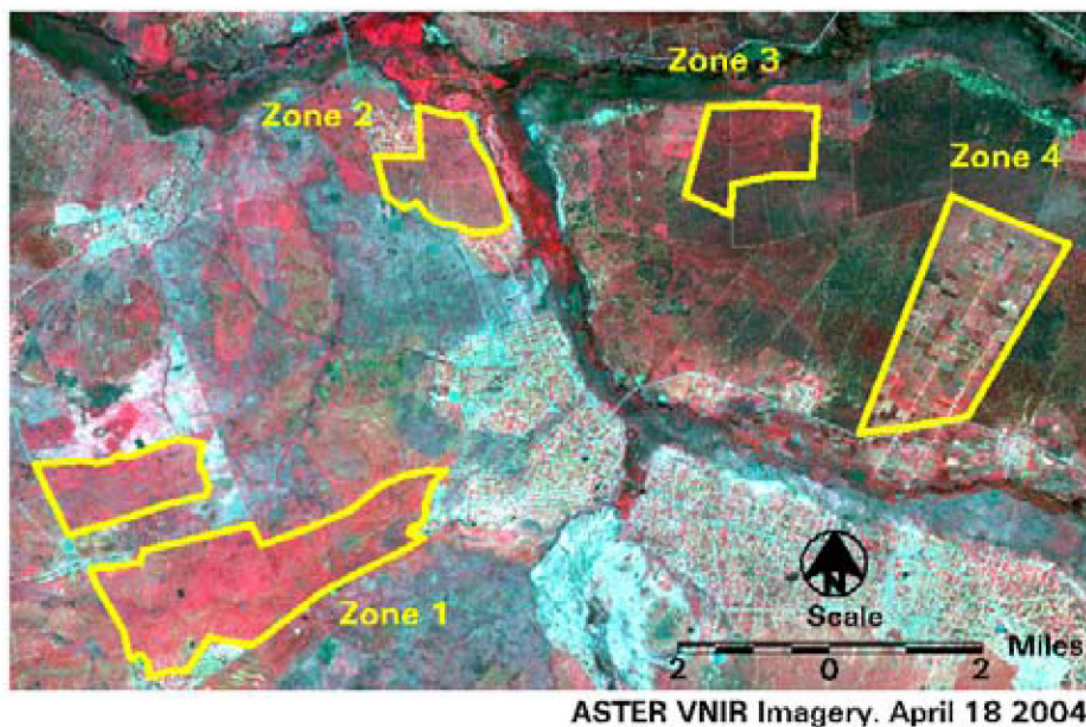


Рисунок 1.4 - Обрані райони дослідження

MSAVI, запропонований в [36], отримувався з використанням ASTER зображення VNIR діапазону, шляхом обчислення індексу:

$$MSAVI = \rho_n + 0.5 - \sqrt{(\rho_n + 0.5)^2 - 2(\rho_n - \rho_r)}$$
, де, ρ_n - коефіцієнт відображення в ближньому ІЧ діапазоні (канал ASTER 3n) і ρ_r - коефіцієнт відображення в червоному діапазоні (канал ASTER 2).

«Метод VI-LST Трикутного Простору» (метод VI-LST) [37] використовувався для нанесення на карту відносних змін вологості рослинного покриву в межах досліджуваних ділянок. MSAVI отриманий з використанням ASTER зображень VNIR діапазону (використовувалося як VI) і кінетична температура поверхні землі (за стоградусной шкалою) за ASTER зображенням TIR діапазону (використовувалося як LST).

MSAVI і LST зображення було трансформовано у двошарове зображення, яке було потім було класифіковано у 50 класів, з використанням неконтрольованого методу класифікації. Зображення простору ознак було

створено з використанням двошарового зображення. Шар зображення MSAVI використовувався уздовж X осі і LST шар зображення використовувався уздовж осі Y. Зображення простору ознак (Рис.1.5) використовувалося для ідентифікації сигнатури класифікованого зображення на основі інтерпретації [37].

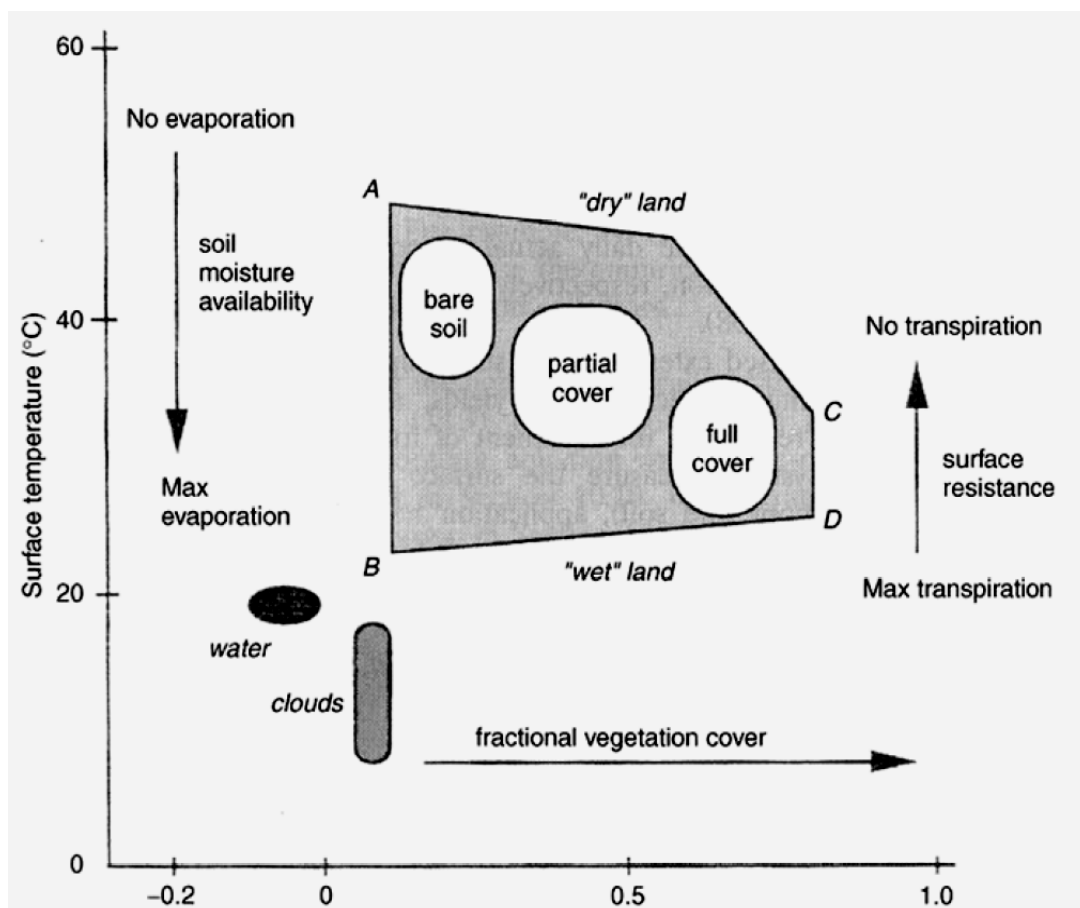


Рисунок 1.5 - Інтерпретація простору ознак за методом VI-LST

Рисунок 1.6 показує зображення простору ознак створеного з використанням зображень ASTER і результати порівняння з VI-LST інтерпретацією. Він ілюструє процедуру ідентифікації особливостей з використанням створеного зображення простору ознак. Класифіковане початкове зображення було перетворено у три класи: рослинність нормальної вологості, рослинність низько - середньої вологості і низькій вологості. Точки розташовані навколо ліній BD і AC позначені класами «нормальна вологість» і «низька вологість» відповідно. Точки розташовані між BD лініями і AC були позначені класом «низько-середня вологість».

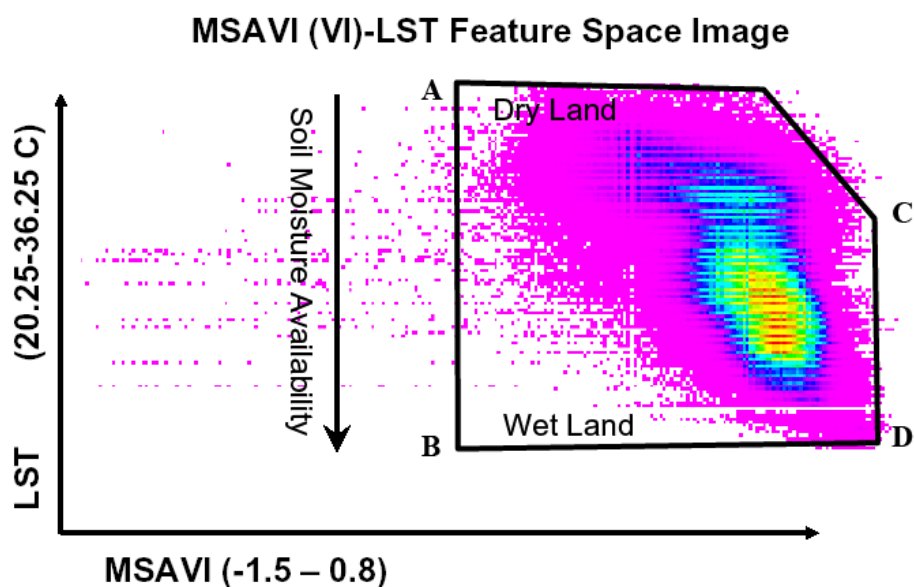


Рисунок 1.6 - Зображення простору ознак, створене на підставі зображень ASTER, і порівняння з VI-LST інтерпретацією

Рисунок 1.7 представляє класифіковане зображення вологості рослинного покриву для всіх чотирьох зон, а на малюнку 1.8 представлено класифіковане MSAVI-LST зображення вологості рослинного покриву.

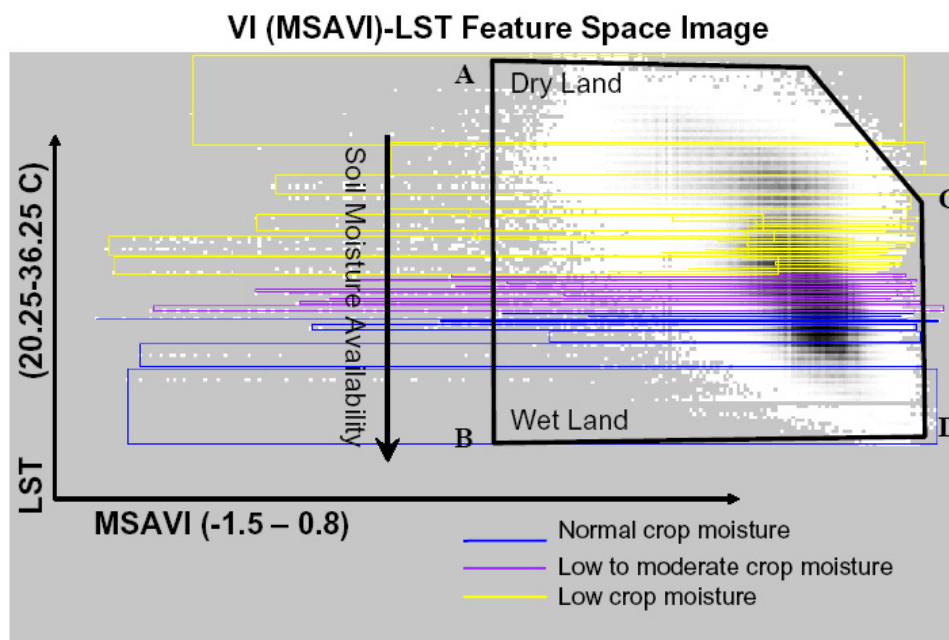


Рисунок 1.7 - Процедура ідентифікації ознак на основі зображення простору ознак

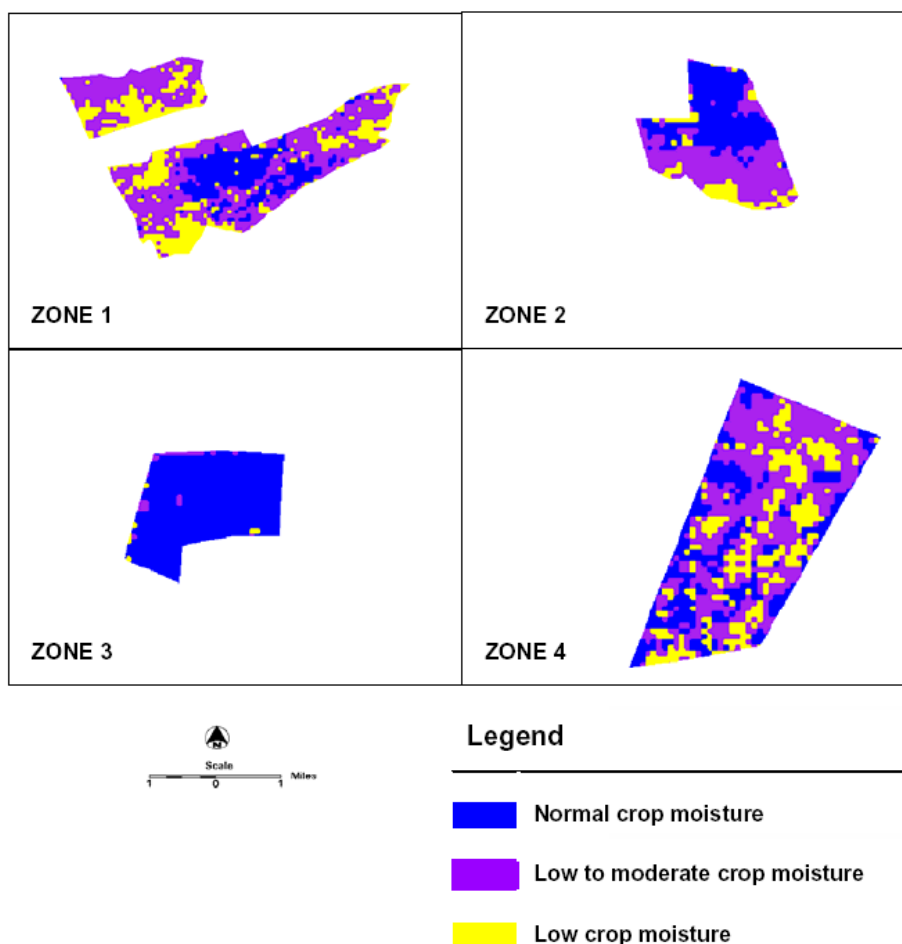


Рисунок 1.8 - Класифіковане MSAVI-LST зображення вологості рослинного покриву

Нормалізований різницевий водний індекс (NDWI), запропонований [38], був розрахований на основі зображення ASTER VNIR і SWIR діапазонів. Рівняння для визначення NDWI наступне:

$$NDWI = \frac{P_{SW} - P_R}{P_{SW} + P_R}$$

, де, P_{SW} - коефіцієнт відображення у короткохвильової частини ІЧ діапазону (канал ASTER 4) і P_R - коефіцієнт відображення у червоному діапазоні (канал ASTER 2). Зображення індексу NDWI було нормалізовано до 8-бітовому і класифіковано у ті ж самі три класи вологості рослинного покриву - нормальна, низько-середня і низька вологість. Пороги були визначені на підставі загальних спектральних кривих для вологих і сухих областей і візуальним аналізом VNIR зображення. На рисунку 1.9 показані класифіковані NDWI зображення вологості рослинних покривів.

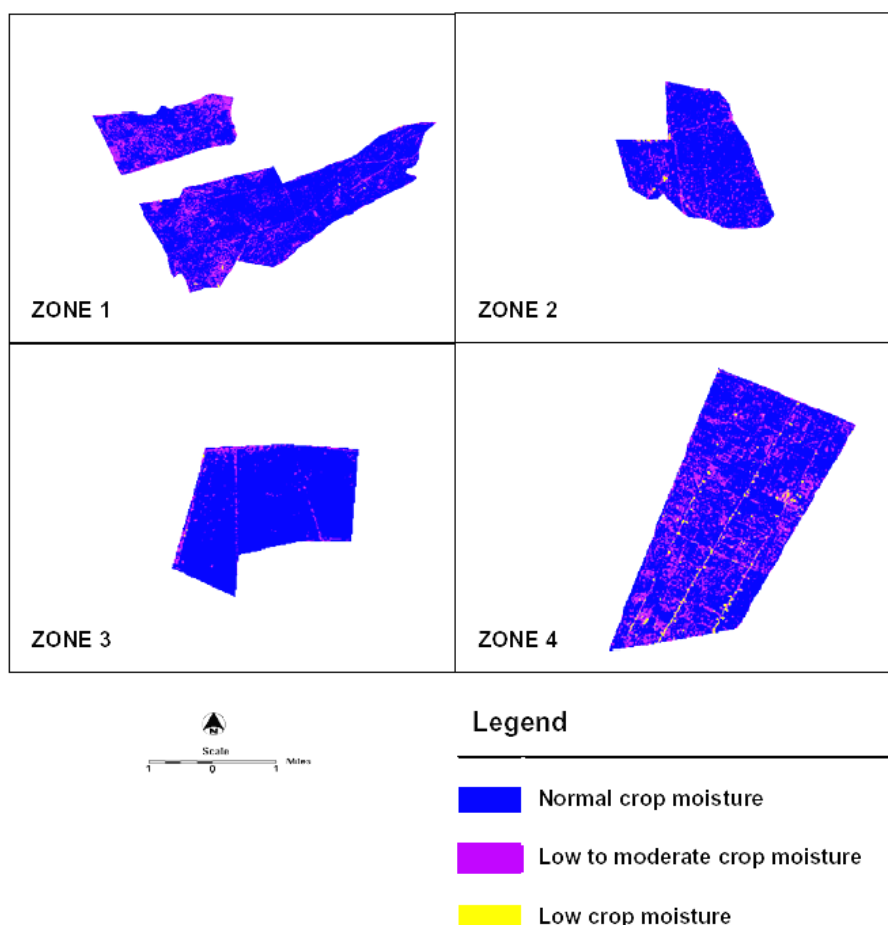


Рисунок 1.9 - Класифіковані NDWI зображення вологості рослинних покривів

Результати досліджень вказують, що вологість підстильної поверхні може бути оцінена з використанням ASTER зображень. Зіставлення цих результатів показує, що оцінка вологості підстильної поверхні з використанням методу NDWI загалом узгоджується з картою здоров'я врожаю, виробленої MSAVI, але не з опадами і картою забезпечення необхідної для рослинності вологи. Оцінка вологості рослинності з використанням MSAVI-LST методу слабо корелює з картою здоров'я рослинності, виробленої MSAVI, але добре корелює з опадами і картою забезпечення необхідної для рослинності вологи. Тому, можна зробити висновок, що MSAVI-LST метод (використання VNIR і TIR діапазонів ASTER), має потенціал більш точної оцінки зміни вологості рослинності, ніж NDWI метод (який використовує VNIR і SWIR діапазони ASTER). Однак, розгляд вищенаведених результатів використання даних TIR діапазонів системи ASTER показує, що рішення за допомогою таких систем цілого ряду завдань

діагностики поверхневої вологості ґрунту, і перш за все проявів процесів перезволоження ґрунту за рахунок підйому рівня ґрунтових вод, що викликають деградацію ґрунту і руйнування будівель і споруд, досить важко. Це викликано як недостатнім просторовою роздільною здатністю (близько 90 м), так і занадто великим періодом між можливими повторними спостереженнями одного й того ж району (не менше 6 днів), за який з великою ймовірністю можливо істотна зміна хмарності, випадання опадів і багато інш.

1.6 Виявлення лісових і торф'яних пожеж методом космічного інфрачервоного ДЗЗ

На даний час для глобального моніторингу великомасштабних лісових і торф'яних пожеж широко використовуються різні багатозональні ІЧ сканери космічного базування У таблиці 1.1 наведені параметри деяких найбільш широко використовуваних космічних систем.

Таблиця 1.1 - Параметри сучасних космічних систем ІЧ ДЗЗ

Камера/ Характеристика	AVHRR	MODIS	TM/ ETM	ASTER
Оглядовість, кілометрів	3000	2330	184	60
Радіометрична роздільна здатність, біт	10	12	8	NIR – 8 SWIR – 8 TIR - 12
Просторова роздільна здатність, метрів	1100	NIR - 250-1000 SWIR – 500 TIR - 1000	NIR,SWIR – 30 TIR - 60	NIR – 15 SWIR – 30 TIR - 90
Кількість спектральних каналів у ІЧ діапазоні	NIR – 1 SWIR – 1 TIR - 2	NIR – 6 SWIR – 3 TIR - 16	NIR – 1 SWIR – 2 TIR - 1	NIR – 1 SWIR – 6 TIR - 5

Максимальна точність вимірювання температури:

- MODIS - 0.3-0.5 °C (вода) и 1 °C (суша);
- ASTER - 0.02 °C.

Наприклад, система Landsat 7 ETM +, за рахунок синтезу каналів ближнього ІЧ спектру, дозволяє виявляти та ідентифікувати великомасштабні пожежі під хмарами диму, а використання теплових ІЧ каналів - отримувати

контури підземних торф'яних пожеж. Супутники Terra та Aqua програми EOS, що мають у своєму складі спектрорадіометр MODIS забезпечують автоматичне виявлення пожеж за рахунок значної різниці температур земної поверхні (зазвичай не вище 10 - 250°C) і вогнища пожежі (300 - 9000°C) [39].

1.7 Дистанційні методи виявлення, ідентифікації та діагностики нафтових забруднень морської поверхні

Основними вимогами до систем і застосовуваним для обробки їх даних методів моніторингу аварійних розливів нафти і нафтопродуктів є оперативність та інформативність. Бурхливий розвиток техніки у останні десятиліття дозволило створити цілий ряд аерокосмічних комплексів, які відповідають цим вимогам [40]. Серед оперативних систем необхідно виділити системи авіаційного і космічного (таблиця 1.2) базування.

Таблиця 1.2 - Сучасні діючі і перспективні космічні радіолокаційні системи

Працюючі:				
Назва КА	Дата запуску	Оператор	Робочий діапазон	Роздільна здатність
TerraSAR-X (TSX)	15.06.2007	Astrium (Германія)	X	0,25 - 40 м
TanDEM-X	21.06.2010	Astrium (Германія)	X	0,25 - 40 м
COSMO-SKYMED-1, 2, 3, 4	08.06.2007 08.12.2007 24.10.2008 06.11.2010	e-GEOS (Італія)	X	1 – 20 м
RADARSAT-2	14.12.2007	MDA (Канада)	C	1,6 – 9 м
KOMPSAT-5	22.08.2013	KARI (Корея)	C	1 – 20 м
Sentinel-1 A	04.04.2014	ESA (Європа)	C	5 – 20 м
RISAT-1	26.04.2012	ISRO (Індія)	C	2 – 50 м
ALOS-2	24.05.2014	JAXA (Японія)	L	3 – 15 м
SMAP	31.01.2015	NASA (США)	L	1 км
Кондор-Э1	19.12.2014	Роскосмос (РФ)	S	5 – 30 м
Перспективні:				
PAZ	2015-2016	HISDESAT (Іспанія)	X	1 – 16 м
Sentinel-1 B	2016	ESA (Європа)	C	5 – 20 м
SAOCOM-1 A/B	2016 2017	CONAE (Аргентина), ASI (Італія)	L	7 – 100 м

Як правило, такі системи для підвищення інформативності комплектуються декількома сенсорами (найчастіше це телевізійні, теплові (радіотеплового) і радіолокаційні). При цьому літакові системи вирішують завдання виявлення і діагностики нафтових забруднень у конкретних акваторіях, а космічні, маючи великі смуги огляду, - проводять моніторинг всього Світового Океану.

Як видно з таблиці 1.2, серед працюючих радіолокаційних супутників і тих що готуються до запуску є тільки одночастотні. Необхідно підкреслити, що для створення таких супутників необхідна попередня розробка методів зондування забрудненої морської поверхні, методик зйомки, методик обробки та передачі даних, методик представлення даних у вигляді, зручному для споживача, організація мережі оперативного прийому даних і багато іншого [41]. Зазвичай для перевірки та відпрацювання на землі основних технічних рішень нових радіолокаційних супутників створюються їх літакові аналоги. Прикладом таких систем можуть служити серія літакових комплексів «Аналог» [66], «Аналог-1», MAPC [42], NASA DC-8 Airborne Laboratory [43], Convair 580 SAR [44], Dornier DO 228-212 [45]. Після створення супутникових комплексів літакові часто використовувалися як для проведення підсупутникових вимірювань, так і для виконання самостійних робіт.

Незважаючи на велику кількість радіолокаційних, РМ і оптичних систем і досить давнє їх використання для виявлення нафтових забруднень і їх джерел [8, 40, 42, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54], питання визначення кількості розливої на морській поверхні нафти дистанційними методами через багатопараметричність розв'язуваної задачі залишається відкритим. Достовірні радіолокаційні оцінки товщин плівки і об'ємів розливої нафти стали можливими тільки після створення на основі теорії гасіння морської хвилі плівками ПАР [55, 56, 57] багаточастотного радіолокаційного методу діагностики нафтових забруднень [49, 58, 59, 60, 61]. Однак, у зв'язку з появою великої кількості одночастотних радіолокаційних систем, і виходом з

експлуатації багаточастотних, був запропонований одночастотний метод [62, 63, 64]. Розглянемо докладно теорії цих методів нижче.

1.7.1 Багаточастотний радіолокаційний метод

Одним з напрямків досліджень, розпочатих українськими радіофізиками в ІРЕ АН УРСР в 1975-77 р.р., було експериментальне дослідження неоднорідностей на морській поверхні, викликаних плівками ПАР на основі раніше проведених ([65]) теоретичних досліджень і оцінок параметрів розсіювання морською поверхнею, покритої плівкою ПАР. Ці дослідження проводилися за допомогою 4-х частотного радіолокаційного комплексу (робочі діапазони довжин хвиль - 8 мм, 3 см, 10 см, 50 см), встановленого на березі Чорного моря. Перші дані були отримані при гасінні вітрового хвилювання морської поверхні різними маслами і їх сумішами [9]. Спостереження плівок в початковій стадії розтікання нафтопродуктів на різних довжинах хвиль показало значні варіації (1-10 дБ) вимірюваних контрастів, що послужило підставою для подальших досліджень за допомогою авіаційного радіолокаційного комплексу "Аналог" [66], що складається з радіолокатора бокового огляду РБО ($\lambda \approx 3$ см) і скануючого НВЧ-радіометра ($\lambda \approx 8$ мм). За допомогою цього комплексу відпрацьовувалися методики виявлення розливів ПАР, які в подальшому були використані при експлуатації аналогічного по складу космічного комплексу радіофізичної апаратури, встановленого на борту ШСЗ "Космос-1500" [67]. На основі аналізу результатів експериментальних і теоретичних досліджень, в 1994-му році була опублікована перша теоретична робота, присвячена теорії радіолокаційного контрасту розвиненого морського хвилювання при наявності плівки ПАР з урахуванням резонансного характеру розсіювання радіохвиль морською поверхнею, яка добре описувала отримані результати [68]. Дана теорія була взята за основу подальших досліджень.

Суть методу полягає в порівнянні теоретичних та експериментальних радіолокаційних контрастів забрудненої нафтою морської поверхні, отриманих за результатами синхронних вимірювань на двох різних довжинах хвиль.

Величина експериментального радіолокаційного контрасту $D_E(k_E)$ (в подальшому контрасту) визначалася як:

$$D_E(k_E) = \sigma_{oil}^0 [dB] - \sigma_{sea}^0 [dB] = 10 \lg \left\{ \frac{V_{oil}^2 - V_N^2}{V_{sea}^2 - V_N^2} \right\}, \quad [dB] \quad (1.1)$$

де: k_E - хвильове число радіохвилі; σ_{oil}^0 и σ_{sea}^0 - питомі ефективні поверхні розсіяння (ПЕПР) забрудненої і чистої морської поверхні; $V_{oil} = \sqrt{U_{oil}^2 + U_n^2}$ - середньоквадратичне значення амплітуди сигналу, прийнятого від забрудненої ділянки морської поверхні; $V_{sea} = \sqrt{U_{sea}^2 + U_n^2}$ - середньоквадратичне значення амплітуди сигналу, прийнятого від чистої морської поверхні; $V_N = \overline{U_n^2}$ - середньоквадратичне значення амплітуди шумів приймача; U_r, U_{sea}, U_n - амплітуди відповідних сигналів на виході блоку обробки сигналів (БОС). Відзначимо, що використання величини радіолокаційного контрасту $D_E(k_E)$ в якості порівняльної характеристики розсіяння морської поверхні на різних частотах дозволяє виключити з розгляду ряд важливих змінних параметрів (вітрову залежність інтенсивності розсіяння радіохвиль морською поверхнею, стабільність параметрів апаратури, відмінності в обробці інформації РСА і РБО та інших).

Теоретичні радіолокаційні контрасти $D_h(k, h)$ розраховувалися в рамках теорії взаємодії поверхневих хвиль з плівкою обмеженої товщини [56, 57]. контраст $D_h(k, h)$ морського хвилювання під плівкою ПАР обмеженої товщини h записується у вигляді:

$$D_h(k, h) = -10 \lg \frac{\omega_0(k)^2 \gamma_0(k)^2}{\omega_+(k)^2 \gamma(k)^2}, \quad (1.2)$$

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

$\omega_0 = \sqrt{gk + \alpha k^3 / \rho}$, $\omega_+ = \sqrt{gk + (\alpha + \alpha_1) k^3 / \rho}$ - відповідно, частоти поверхневих хвиль на чистій та вкритій плівкою морській поверхні,

k - хвильове число морської хвилі, $g = 981$ см/сек², α і α_1 - коефіцієнти поверхневого натягу на межі вода-плівка та плівка-повітря, ρ - густина води; θ - кут падіння радіохвилі на морську поверхню. У формулах (1.2) вираз

$$\gamma_L = \gamma_0 \left[\frac{1 - \frac{\gamma_g}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} + \frac{\gamma_S^2}{\omega_+^2} \left(\frac{\omega_+}{\gamma_0} \right) + \frac{1}{2} \frac{\gamma_S^2}{\omega_+^2} \left(\frac{\omega_+}{\gamma_0} \right)^{3/2}}{1 - 2 \frac{\gamma_S}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} + \frac{\gamma_S^2}{\omega_+^2} \left(\frac{\omega_+}{\gamma_0} \right)} \right] \quad (1.3)$$

- коефіцієнт загасання Левича [69], де $\gamma_0 = 2\nu k^2$ - коефіцієнт в'язкого загасання поверхневої хвилі, ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості води, $\omega_{C1} = \sqrt{\alpha_1 k^3 / \rho}$ - частота капілярних поверхневих хвиль, $\gamma_S = \rho \omega_{C1}^2 / \omega_0$ - силовий параметр, що характеризує вплив розтягування плівки на хвилю, $p = (c_0 / \alpha_1)(d\alpha_1/dc)$ - безрозмірна поверхнева активність (пружність) плівки (в подальшому активність), c_0 - незбурена концентрація плівки ПАР.

Величини S_1 , S_2 , S_3 у формулі (1.2) визначаються виразами:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{\gamma_g}{\omega_+} \left(1 - \frac{\gamma_g}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \right) \frac{\frac{\rho_1}{\rho} \left[\sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \left(\frac{\omega_1^2}{\omega_+^2} - 2 \frac{\gamma_S}{\omega_+} \right) - 2 \frac{\omega_1^2}{\omega_+^2} \frac{\gamma_g}{\gamma_0} \left(1 - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} \right) \right] - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}}}{\left(1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left(\frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \right)} - \frac{\rho_1}{\rho} \frac{\gamma_{01}}{\omega_+} \\ S_2 &= \left(\frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\left[1 - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} + 2 \frac{\gamma_S}{\omega_+} \frac{\omega_1^2}{\omega_+^2} \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} - \frac{\rho_1}{\rho} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\omega_1^2}{\omega_+^2} - 2 \frac{\gamma_S}{\omega_+} \right]}{\left(1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left(\frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \right)} \\ S_3 &= \sqrt{\frac{\nu}{\nu_1}} \left(\frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \frac{\left(1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right) \left[-1 + 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} \right]}{\left(1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 + 4 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left(\frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \left(1 - \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)} \end{aligned} \quad (1.4)$$

де $\gamma_g = (\rho_1 / \rho) \gamma_S$, $\gamma_{01} = 2\nu_1 k^2$ - коефіцієнт в'язкого загасання поверхневої хвилі в нафті. У формулах (1.1) - (1.3) міститься п'ять параметрів, що характеризують плівку: активність p , товщина h , поверхневий натяг α , в'язкість нафти ν та її

щільність ρ . При наявності досить великого масиву експериментальних даних принципово можливо скласти п'ять незалежних рівнянь, і розв'язати їх щодо всіх цих параметрів. Відзначимо, що в разі зондування акваторії, забрудненої нафтою з заздалегідь відомими в'язкістю, поверхневим натягом та щільністю, для визначення інших двох невідомих параметрів (активності p і товщини h) досить скласти і розв'язати два рівняння з використанням даних зондування, наприклад, на сантиметрових (СМ) і дециметрових (ДМ) радіохвилях:

$$D_E(k_c) = D_0(k_c) + 20 \lg \left[1 + \frac{\gamma_0}{2\gamma_L} k_c h Q(k_c) \right], \quad (1.5)$$

$$D_E(k_d) = D_0(k_d) + 20 \lg \left[1 + \frac{\gamma_0}{2\gamma_L} k_d h Q(k_d) \right], \quad (1.6)$$

де, k_c и k_d - хвильові числа, відповідно, сантиметрових і дециметрових поверхневих хвиль, які визначаються для одного і того ж кута падіння радіохвиль θ ; $D_E(k_c), D_E(k_d)$ - відповідні їм експериментальні значення радіолокаційних контрастів.

1.7.2 Одночастотний радіолокаційний метод

Одночастотний метод був розроблений на базі моделі спектра хвиль «Radar Image Model» (RIM), запропонованої в роботах [62, 63, 64]. Спочатку ця модель була створена не для моделювання плівок, а для інших застосувань, пов'язаних з проблемами радіолокаційного зондування морської поверхні. Застосування цього спектра до проблеми сліків пов'язано з модифікацією коефіцієнта гасіння хвиль відповідно до теорій Левича [70, 71] (для тонких плівок) і Дженкінса-Якобса [72]. Використовуваний тут спектр враховує механізм нелінійної передачі енергії від довгих хвиль до коротких, що має принципове значення для моделювання спектральних контрастів сліків. В цьому випадку нелінійне «накачування» енергії від довгих хвиль (не "відчувають" плівки) в область коротких хвиль (схильних до гасячи впливу плівок) забезпечує кінцевий рівень енергії хвиль в сліках, що спостерігається експериментально. На рисунку 1.10

представлена схема радіофізичної моделі морської поверхні, де входними параметрами, зокрема, є швидкість вітру і параметри плівки.

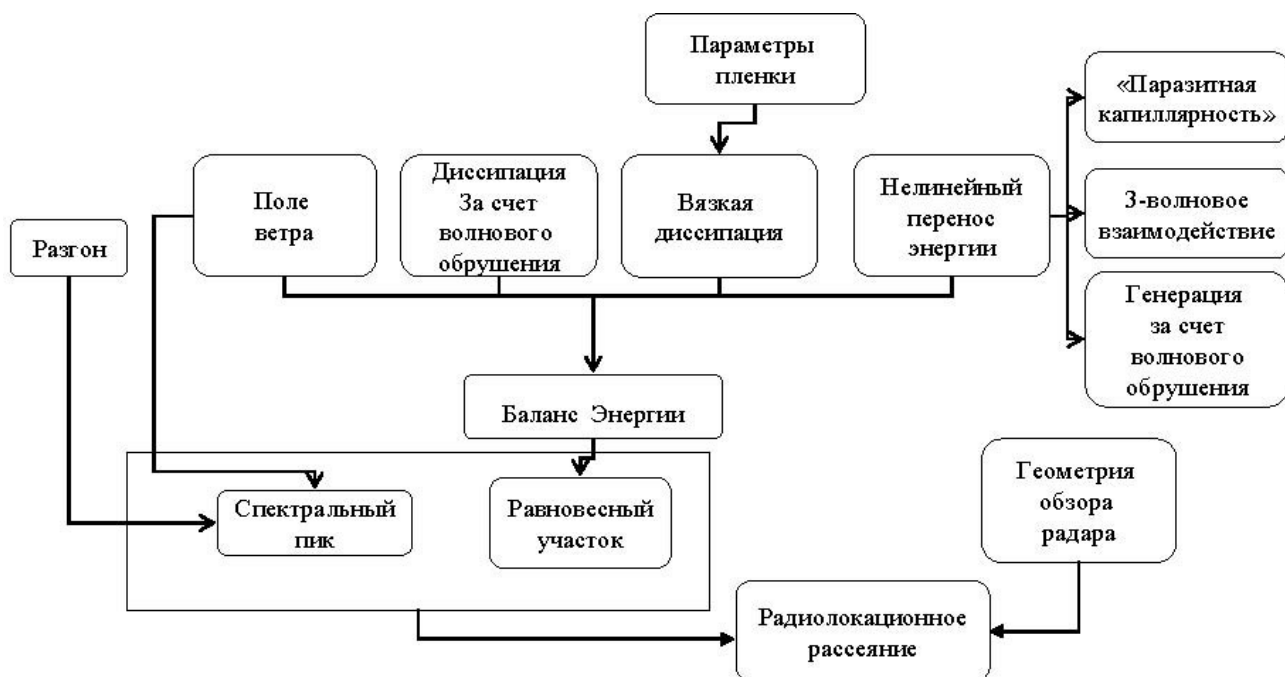


Рисунок 1.10 - Схема радіофізичної моделі хвилювання морської поверхні

При відомих статистичних характеристиках морської поверхні, розсіяння радіохвиль (ПЕПР, σ_0^p) розраховується в рамках композитної моделі, яка поєднує розсіяння радіохвиль на «регулярній» поверхні (2-х масштабне бреггівське розсіяння σ_{0br}^p і дзеркальні відбиття σ_0^{sp}) і дзеркальні відбиття від нелінійних особливостей поверхні (обрушень хвиль) σ_0^{wb} :

$$\sigma_0^p = \sigma_{0br}^p + \sigma_0^{sp} + \sigma_0^{wb} q \quad , \quad (1.7)$$

де q - частка поверхні, покрита зонами обрушень.

Вплив плівки на вітрові хвилі (і, отже, на РЛ сигнал) враховується шляхом заміни молекулярного коефіцієнта в'язкості на ефективний коефіцієнт гасіння хвиль по моделі Левича (тонкі біогенні плівки) або моделі Дженкінса-Якобса (нафтові плівки обмеженої товщини). Параметри вихідної моделі Дженкінса-Якобса (міжфазні пружності, поверхневі натяги, в'язкість нафти) були модифіковані на підставі експериментів і рекомендацій групи вчених ІФ РАН під керівництвом С. Єрмакова [73]. Тестування моделі коефіцієнта гасіння

хвиль за даними лабораторного експерименту з плівками нафтопродуктів різної товщини показало хорошу відповідність (рисунок 1.11). На рисунку символами показані лабораторні вимірювання [73] при різних значеннях температури води, суцільні лінії - розрахунок за моделлю Дженкінса-Якобса.

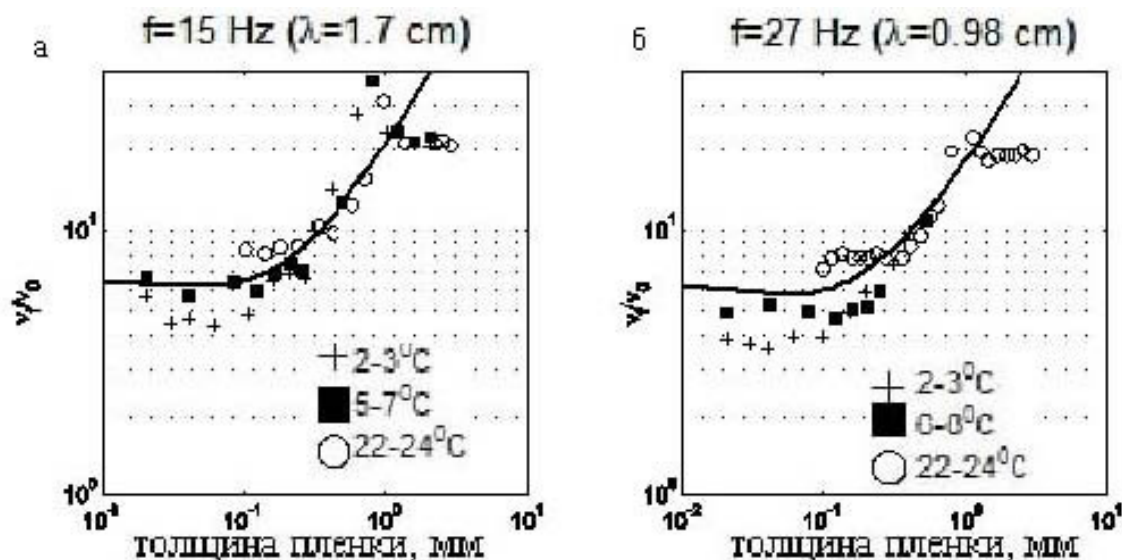


Рисунок 1.11 - Відношення коефіцієнта гасіння поверхневих хвиль (ν_f) з частотою 15 Гц (а) і 27 Гц (б) нафтовою плівкою різної товщини до коефіцієнта гасіння хвиль на чистій воді (ν_0).

На рисунку 1.12 представлені спектральні контрасти зликов для плівок трьох типів речовин, отриманих в ході експериментів ПФ РАН (символи) і розрахунку по моделі (криві). Пружність природних біологічних плівок лежить в діапазоні $E = 12\text{-}30 \text{ мН/м}$, тому ці дані, зокрема, ілюструють можливу відмінність спектральних контрастів вітрових хвиль, викликаних природними і штучними забрудненнями. Спектральна поведінка контрасту для досліджуваних речовин в СМ і ДМ діапазонах довжин хвиль сильно розрізняється, що, в першу чергу, обумовлено спектральним ходом ефективних коефіцієнтів гасіння. Вимірювання показують, що, на відміну від «природних» плівок, тонкі нафтові плівки не можуть бути ідентифіковані радіолокаторами L- і С- діапазону, за винятком, мабуть, умов дуже слабких вітрів. Модельні розрахунки, представлені на рисунку 1.12 цілком задовільно відтворюють вимірювання, як за величиною контрасту, так і по його формі. Криві на

рисунку 1.12 - розрахунки за моделлю для плівок з пружностями 25 мН/м (квазібіогенна речовина - суцільна лінія), 12 мН/м (рослинна олія - штрих) і 4 мН/м (тонка плівка сирової нафти - штрих-пунктир) при швидкості вітру 6,5 м/с [73].

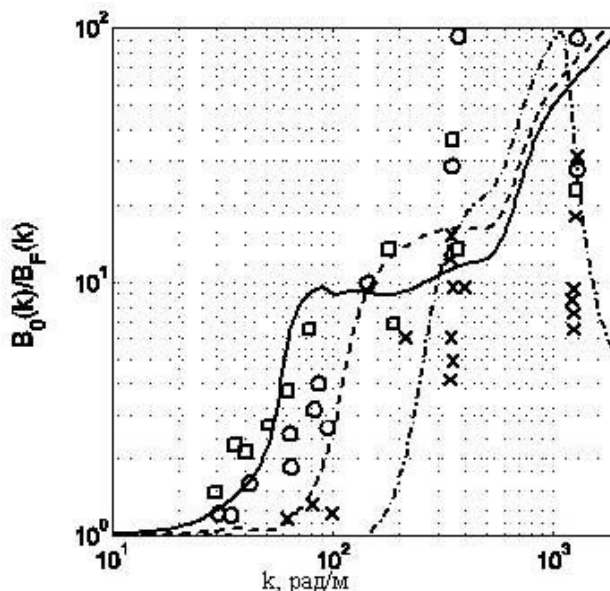


Рисунок 1.12 - Експериментальні оцінки спектрального контрасту для сліку квазібіогенного речовини (квадрати), рослинного масла (кола) і сирової нафти (хрестики) при швидкостях вітру 6-7 м / с

Розкид експериментальних даних типовий для оцінок контрастів сліку. В межах сліку величина контрасту досить неоднорідна і варіюється в межах порядку своєї величини.

Так як модель здатна якісно відтворювати дані спостережень, то доцільно використання її для оцінки можливих контрастів спектра вітрових хвиль (і в подальшому - для оцінки РЛ контрастів), що викликаються плівками нафти різної товщини (рисунок 1.13).

Коефіцієнт гасіння хвиль плівками нафти з $d < 0,1$ мм не залежить від її товщини. Примітним результатом розрахунків є те, що навіть тонкі нафтові плівки забезпечують значні контрасти спектру капілярних хвиль, які не зникають при сильному вітрі (10 м/с). При $d > 0,1$ мм спектральні контрасти наростають і зміщуються в довгохвильову область. Однак, значення контрасту понад 100 навряд чи мають практичний інтерес, тому що при цьому відбиті

сигнали неминуче будуть перебувати на рівні шумів апаратури. У той же час зміщення контрасту в довгохвильову область по мірі збільшення товщини плівки показує, наприклад, що РСА С-діапазону «відчують» плівки з $d > 0,1$ мм, і можуть бути використані для оцінки їх товщини.

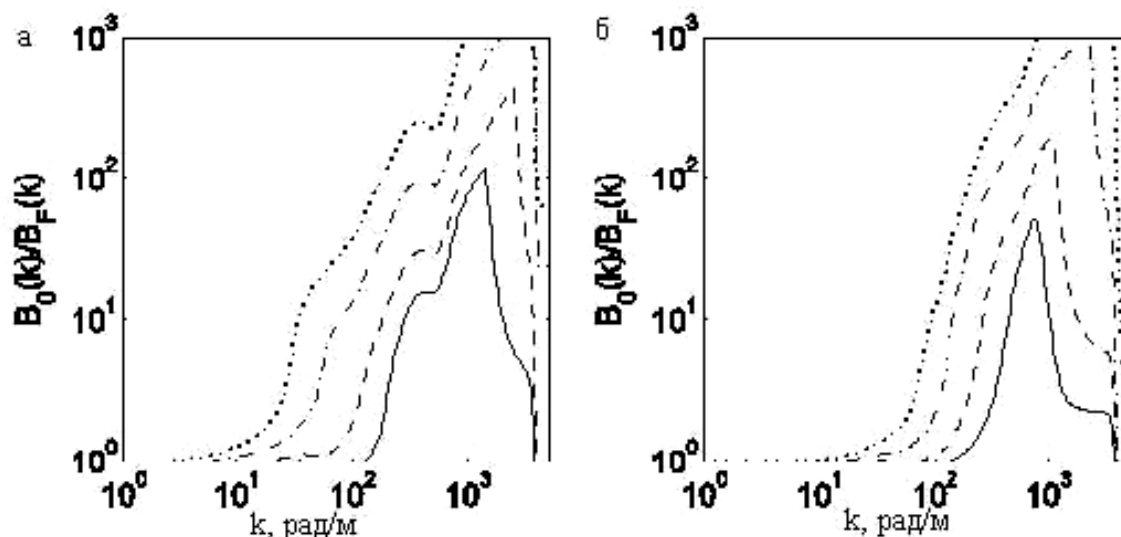


Рисунок 1.13 - Контрасти спектру вітрових хвиль. Нафтова плівка товщиною 0,01 мм (суцільні), 0,5 мм (штрих), 2 мм (штрих-пунктир) і 5 мм (пунктир). Швидкість вітру: 5 м/с (а) і 10 м/с (б)

На рисунку 1.14 наведено порівняння модельного РЛ контрасту з експериментальними даними. Символами «о» позначені вимірювання РСА в L-S-C-X-діапазонах довжин радіохвиль (за даними [74]), а символами «х» - РЛ вимірювання в L-S-C-X-Ku діапазонах, проведені з борту гвинтокрила одночасно з РСА [75]. Модельні розрахунки показані суцільними (опромінення «на вітер») і штриховими (опромінення «перпендикулярно вітру») лініями. Товсті лінії одного стилю - розрахунки по повній моделі, а тонкі лінії - розрахунок за моделлю, коли вплив обвалень хвиль на ПЕПР в зоні сліку не враховується («феноменологічна модель»). Дані вимірювань демонструють очікуваний тренд, коли величина РЛ контрасту сліку збільшується зі зменшенням довжини хвилі і зменшенням швидкості вітру. Діапазон контрастів, що передбачається моделлю для напрямків по- і перпендикулярно напрямку вітру, в цілому узгоджується з даними спостережень в L- і С-

діапазонах ($k_{br} < 10^2$ рад/м). У Х- і Ку- діапазонах модельні оцінки помітно менше спостережуваних контрастів.

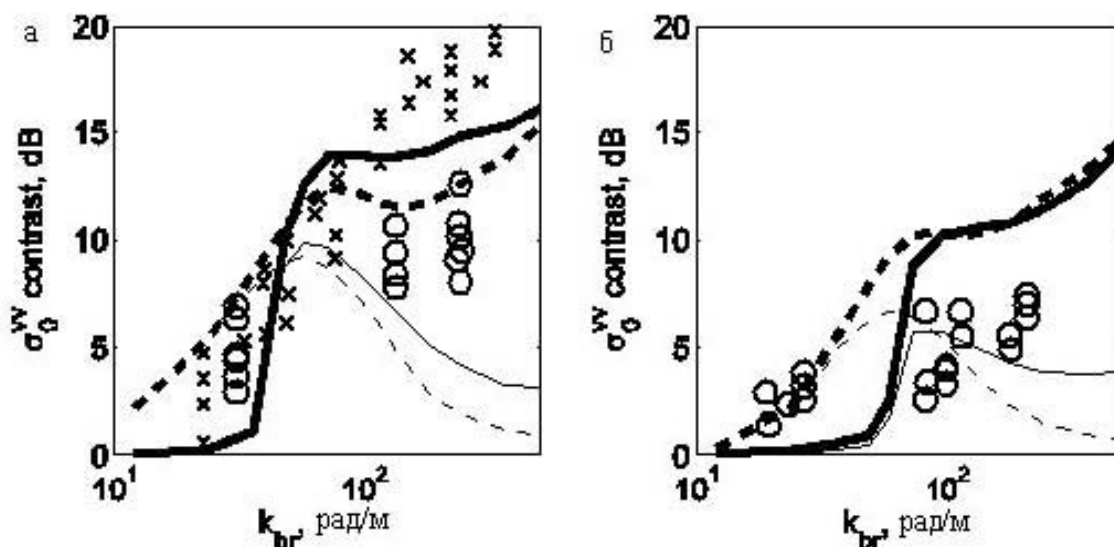


Рисунок 1.14 - РЛ контрасти морської поверхні, викликані плівкою квазібіогенної речовини ($E=25$ мН/м) за умов: (а) швидкість вітру 5 м/с і $\theta = 35^\circ$, (б) швидкість вітру 7 м/с і $\theta = 31^\circ$

Заниження оцінок РЛ контрастів для коротких радіохвиль обумовлено припущенням, що обрушення хвиль не схильні до впливу плівок забруднень. В цьому випадку, при майже повному придушенні брегговських хвиль, значна частина РЛ сигналу забезпечується відображеннями від обрушень хвиль. Однак останнім часом з'явилися експериментальні докази того, що поверхневі плівки гасять не тільки короткі хвилі, але і обрушення дециметрових хвиль [76]. За даними цих вимірів, інтенсивність обрушень хвиль в області сліку зменшувалася в 2-3 рази в порівнянні з чистою поверхнею. Одним з можливих пояснень цього експериментального факту може бути те, що поверхневі плівки перешкоджають зростанню супер-гармонік несучої хвилі, що породжують її нестійкість і подальше обрушення. Для того щоб врахувати цей експериментальний факт, в роботі [63] запропонована «феноменологічна» РЛ модель, в якій передбачається, що поверхневі плівки пригнічують обрушення коротких хвиль і, тим самим, виключають їх внесок в РЛ сигнал (останній член

в правій частині (1.7) зникає). В цьому випадку РЛ контраст сліку визначається виразом (1.8).

$$C_{\sigma} = (\sigma_{0br}^P + \sigma_0^{SP}) / (\sigma_{0br}^P + \sigma_0^{SP})_F, \quad (1.8)$$

де характеристики чистої поверхні і в області сліку (F) розраховуються на основі спектру хвиль. Розрахунки РЛ контрастів по «феноменологічній» моделі представлені на рисунку 1.14 товстими лініями, які дають істотно кращу відповідність даним вимірювань. На рисунку 1.15 представлений приклад модельного розрахунку РЛ контрасту нафтових плівок різної товщини в С-діапазоні ($\lambda \approx 5.6$ см) довжин радіохвиль для двох значень швидкості вітру.

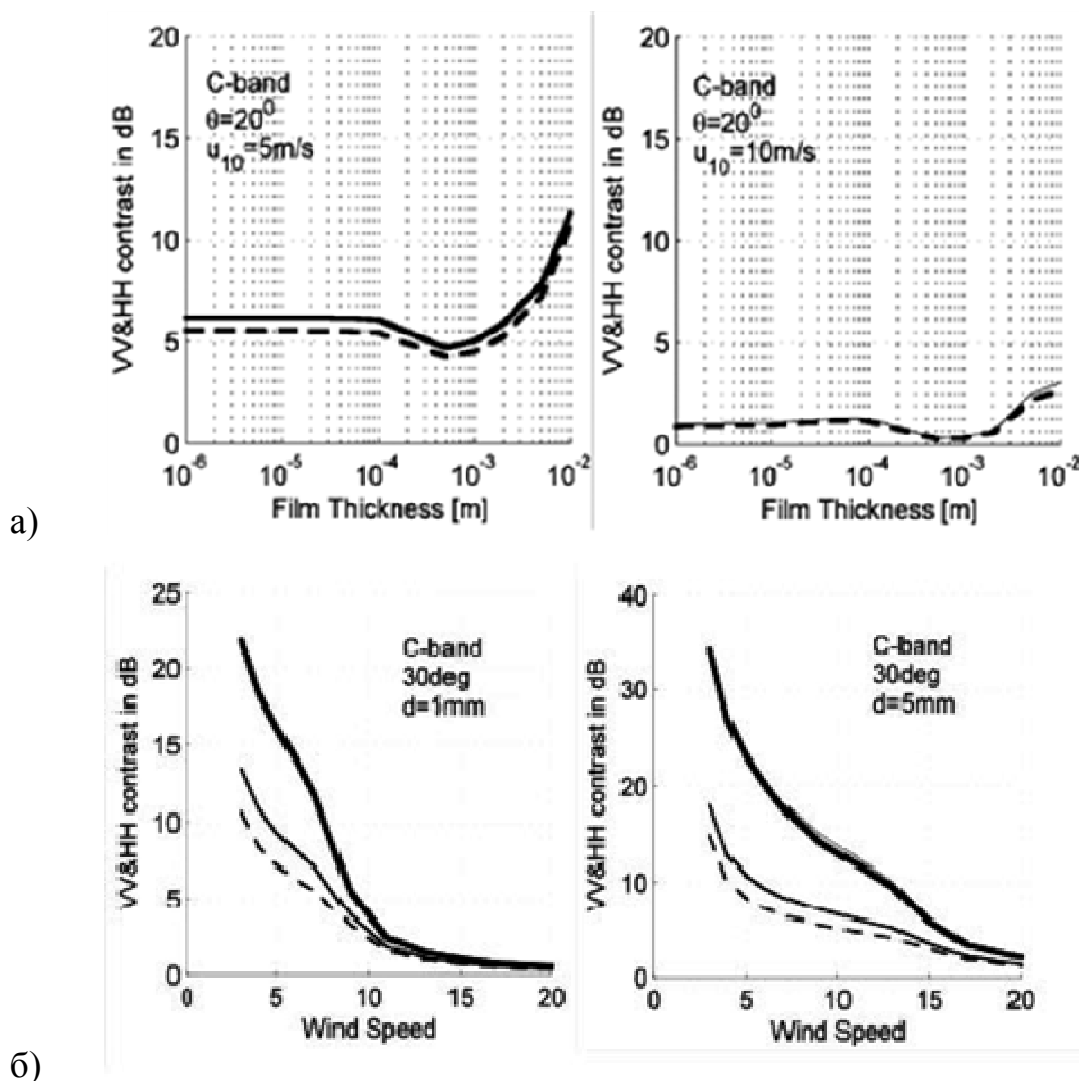


Рисунок 1.15 - Залежності теоретичного радіоконтраста від товщини нафтової плівки і швидкості вітру при кутах зондування $\theta = 20^\circ$ (а) і $\theta = 30^\circ$ (б).

Експерименти по апробації одночастотного методу проводилися на Чорному, Каспійському, Баренцевому і Карському морях з використанням радіолокаторів різних діапазонів довжин хвиль, включаючи космічні (наприклад, Envisat-1, $\lambda \approx 5.6$ см) [77]. На рисунку 1.16 представлені результати порівняння експериментальних і теоретичних значень контрастів.

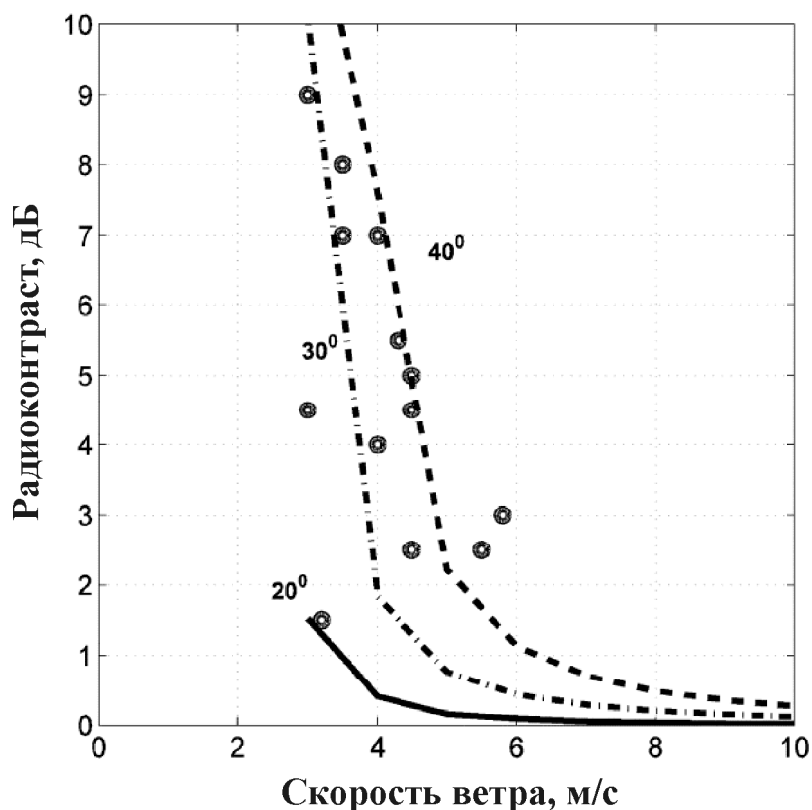


Рисунок 1.16 - Залежність радіолокаційного контрасту забрудненої нафтою морської поверхні від швидкості вітру для різних кутів зондування на довжині радіохвилі $\lambda \approx 5.6$ см.

Наведені дані підтверджують можливість використання одночастотного радіолокаційного методу для вимірювання товщини нафтової плівки більш 0.5 мм при швидкостях приводного вітру 1-10 м / с, а також для перевірки нових методів радіолокаційної діагностики нафтових забруднень морської поверхні. Незважаючи на те, що на морській поверхні за допомогою одночастотного методу часто важко відрізнити нафтову пляму від вітрового сліку, цей недолік можна усунути вибором для дослідження акваторії, в якій постійно присутня розлита нафта.

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 одночастотні системи космічного базування, що вимагає розробки нових і адаптації існуючих методів обробки даних одночастотного радіолокаційного зондування нафтових забруднень поверхні Світового океану.

РОЗДІЛ 2

АПАРАТУРА ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

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.

2.1 Авіаційний комплекс дистанційного зондування АКДЗ-30

Авіаційний багатоцільовий комплекс дистанційного зондування природного середовища АКДЗ-30 був розроблений і створений фахівцями ЦРЗЗ ім. А. І. Калмикова НАНУ і НКАУ в співдружності з фахівцями ЦАКДЗ ІГН НАНУ і АНТК ім. О. К. Антонова [78].

До складу АКДЗ-30 входять: двохчастотна радіолокаційна система, яка складається з РБО 8-мм діапазону і скануючого радіометра ІЧ-діапазону, трасовий багатоканальний спектрометр оптичного діапазону, аерофотокамери та відеокамера, система бортової обробки, накопичення, інтерпретації та відображення інформації, а також навігаційний приймач системи GPS. Комплекс АКДЗ-30 орієнтований на вирішення широкого кола наукових і практичних завдань в інтересах регіонів України. Перш за все - це оперативне виявлення передвісників і моніторинг проявів різноманітних природних і техногенних катастроф, критичних ситуацій (таких як повені, розлив на водній поверхні нафтопродуктів, льодові затори на річках, великомасштабні пожежі і багато ін.), а також пошук проявів корисних копалин, виявлення суден-порушників кордонів морської економічної зони і багато інших. Комплекс розміщений на борту літака АН-30, який належить МНС України, має відносно невисокі експлуатаційні витрати і при цьому досить хороші льотні характеристики. Основні параметри систем дистанційного зондування комплексу АКДЗ-30 наведені в таблицях 2.1-2.3.

Таблиця 2.1 – Основні параметри радіолокаційної системи авіаційного комплексу дистанційного зондування АКДЗ-30

Робочий діапазон радіохвиль	8 мм
Тип радіолокатора	РБО
Поляризація сигналів	ВВ
Імпульсна випромінювана потужність	16 кВт
Тривалість зонduючого імпульсу	43 нсек
Діапазон робочих висот	500м – 7000 м
Робоча смуга огляду	15 км
Середня просторова роздільна здатність	7м –10 м
Гранично виявляєма ЕПР	0.03 м ²
Обробка інформації	цифрова, на борту
Відображення інформації	на моніторах IBM PC
Загальна маса	85 кг
Загальна споживана потужність	1 кВт
Обслуговуючий персонал	1 оператор

Таблиця 2.2 – Основні характеристики аерофотоапаратів, які використовуються в складі комплексу АКДЗ-30

Параметри	АФА-41/7,5	АФА-41/10	АФА-41/20
Тип об'єктива	Ортогон-1	МРО-2	Оріон-20
Фокусна відстань	75 мм	100 мм	200 мм
Відносний отвір	1:6,8	1:8	1:6,3 – 1:22
Кут поля зору	119 ⁰	104 ⁰	65 ⁰
Ширина захоплення (Н = 6000 м)	14,4 км	10,8 км	5,4 км
Протяжність маршруту (перекриття 60%, Н = 6000 м)	1612 км	1210 км	605 км

Таблиця 2.3 – Основні характеристики сканера інфрачервоного діапазону
"Малахіт-1"

Найменування параметру	Значення
Тангенціальна швидкість W/H, с ⁻¹	0.05 – 0.36
Огляд місцевості	3.4Н
Миттєве поле огляду, рад	$1.75 \cdot 10^{-3}$
Спектральний діапазон, мкм	8 – 14
Енергетична роздільну здатність на рівні 20°C, при співвідношенні сигнал/шум рівному 1, °C	0.1 – 0.15
Швидкість обертання скануючої призми, об/хв	2250
Частота рядків, Гц	150
Смуга пропускання електронного тракту	1Гц – 150.0 кГц
Фотоплівка	Тип 42Л
Швидкість протягання плівки, мм/с	0.8 – 7.2

Для системи АКДЗ-30 були розроблені і виготовлені спеціалізовані вузли аналого-цифрового перетворення для зв'язку аналогових виходів приймачів РБО і ІЧ з системами комп'ютерної обробки на базі ПЕОМ, а також вузли інтерфейсу управління передавачем і приймачем РБО. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення бортових ПЕОМ.

Оцифрована інформація радіолокаторів обробляється безпосередньо на борту літака в реальному часі. На борту проводиться накопичення і візуалізація отриманих зображень, що особливо необхідно при моніторингу швидко протікаючих катастрофічних процесів. На рис.2.1 наведена структурна схема комплексу АКДЗ-30.

Загальний вигляд АКДЗ-30 і розміщення основних приладів комплексу в салоні літака АН-30 показано на рис. 2.2, 2.3.

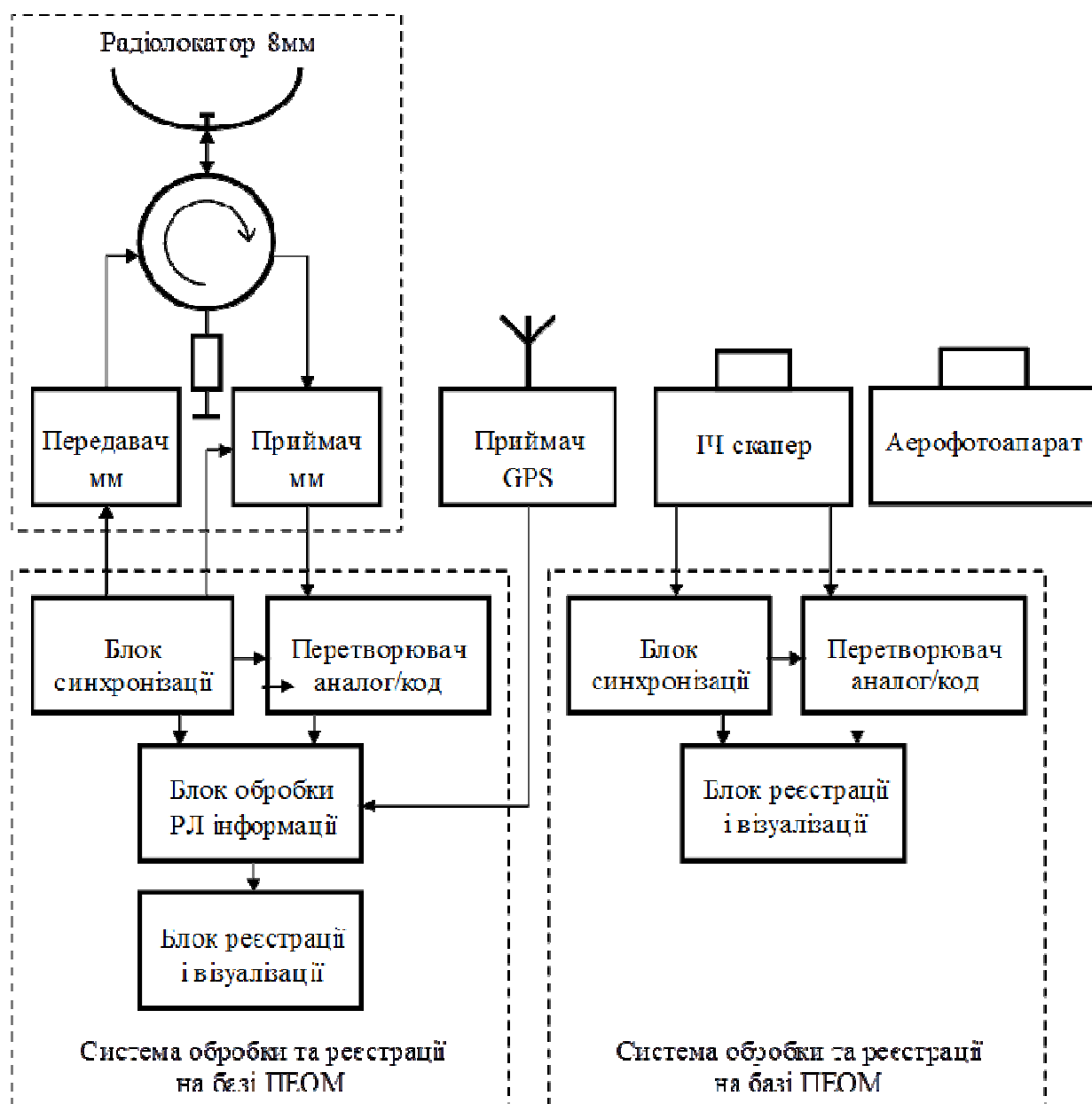


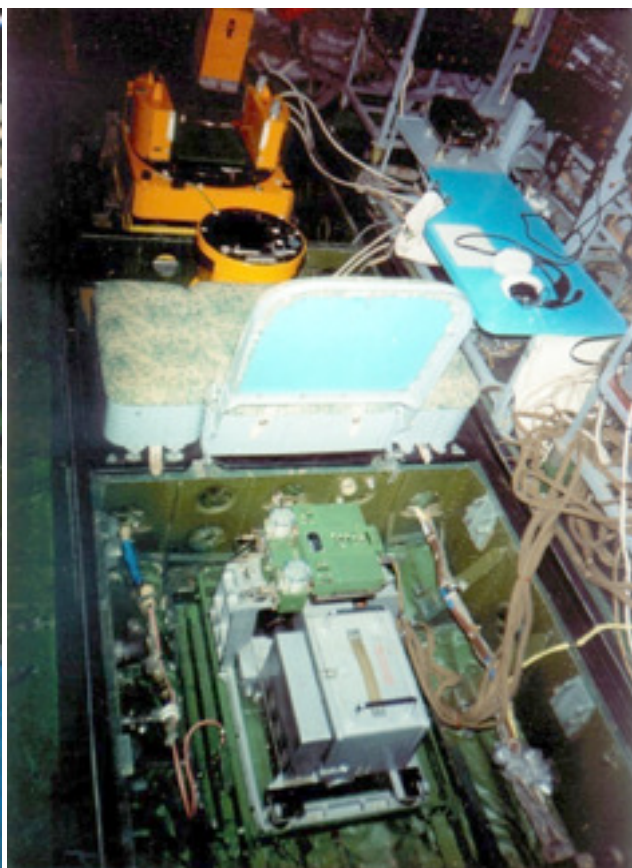
Рисунок 2.1 – Структурна схема комплексу АКДЗ-30



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд авіаційного комплексу АКДЗ-30



а



б



в

Рисунок 2.3 – Розміщення приладів комплексу АКДЗ-30 в салоні літака АН-30; а - приймально-передавальний блок РБО, б - аерофотоапарат і ІЧ сканер, в - робочі місця керування радіолокаційною частиною комплексу, первинної обробки радіолокаційної інформації (зліва), оперативної бортовий інтерпретації ІЧ інформації (праворуч)

2.2 Супутникові системи дистанційного зондування

Характеристики супутникових систем дистанційного зондування, дані яких були використані при вивченні і дослідженні питань можливості застосування радіолокаційних методів діагностики нафтових забруднень морської поверхні, наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні характеристики супутникових радіолокаційних систем, дані яких були використані для аналізу і обробки

Космічний апарат	ENVISAT-1	ERS-1/2	RADARSAT-1/2	TerraSAR-X
Робочий діапазон радіохвиль, см	5.6	5.6	5.6	3.1
Тип радіолокатора	PCA	PCA	PCA	PCA
Поляризація сигналів	ГГ, ВВ, ГВ, ВГ	ВВ	ГГ, ВВ, ГВ, ВГ	ГГ, ВВ, ГВ, ВГ
Робоча смуга обзору, км	5, 100, 400	100	50-500	10-100
Середня просторова роздільна здатність, м	28, 30, 150	30	8-100	1-16
Період повторного перегляду, діб	1-35	-	2-6	2-11

Радіометрична, сенсорна і геометрична корекції, а також приведення даних до картографічної проекції супутникових даних виконувалися засобами постачальника. Основний обсяг даних було надано Європейським космічним агентством (ЄКА) через сервер-каталог EOLI SA [79], в тому числі і за укладеним договором «Project C1P11140». Обробка даних велася засобами спеціалізованого програмного пакету «NEST 4B 1.0» [80]. Модельні та налагоджувальні розрахунки проводилися засобами стандартного математичного пакета «Mathcad 14.0».

2.3 Методики попередньої обробки даних дистанційного зондування

Інформація, отримана радіолокатором бокового огляду діапазону 8 мм комплексу АКДЗ-30 представляється у вигляді файлів растрового зображення відбитого радіосигналу від поверхні землі, але 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 радіолокатора бокового огляду, в значній мірі ускладнюють інтерпретацію отриманої інформації.

Кількість факторів що зумовлюють появу геометричних спотворень растрової інформації досить багато - це короточасні відхилення траєкторії руху аероносія від прямолінійного напрямку руху (рискання, тангаж), короточасні зміни швидкості польоту, короточасні і статичні зміни орієнтації аероносителя щодо напрямку руху (кут компенсації вітрового зносу), специфіка роботи приймально-передавальної і реєструючої апаратури конкретної реалізації радіолокатора бокового огляду. Кожен з факторів робить різний внесок в результат викривлень, але основними є викривлення обумовлені специфікою роботи апаратури і статичними змінами орієнтації аероносія щодо напрямку руху (надалі званим знесенням) і саме їх необхідно усунути на етапі попередньої обробки для підготовки матеріалів для подальшої тематичної обробки растрової інформації.

До викривлень обумовлених специфікою роботи апаратури РБО відноситься додавання в структуру растрового зображення телеметричної і навігаційної цифрової інформації, дзеркальна розгортка при реєстрації інформації, спотворення пропорційності растрового зображення через відмінності в горизонтальній і вертикальній міжпіксельній відстані, нерівномірність міжпіксельних відстаней в напрямку перпендикулярному напрямку руху аероносія, наявність в растровому зображенні ділянки відбитих сигналів до першого відбитого від поверхні землі.

Специфіка роботи приймальної і реєструючої апаратури конкретної реалізації ІЧ радіометра значно відрізняється від радіолокатора бокового огляду. Вихідна інформація ІЧ радіометра не має чіткої растрової структури як в разі РБО. Це обумовлено тим, що апаратура реєстрації працює незалежно приймального обладнання та квантування аналогової інформації (оцифровування) відбувається абсолютно асинхронно, з частотою власного тактового генератора, ніяк не пов'язаного з приймальною апаратурою. У свою чергу, приймальна апаратура має свої власні частоти формування розгортки, що синхронізуються механічними датчиками антенної системи радіометра, що мають люфти, ефект детонації і залежність від механічної вібрації апаратури. Тому, вихідна інформація перетворена в растрове зображення спеціально розробленої програми попереднього перегляду «IZOVIEW.EXE» має вигляд, представлений на рисунках 2.4 і 2.5. Як видно на рисунках, довжина рядка вихідного зображення не кратна цілому числу. Крім того, якщо детально розглянути положення початку і кінця рядків (рисунок 2.6), добре видно нестабільність положення початку рядка і несинхронність положення кінця рядків щодо їх початку, тобто локальна нестабільність довжини рядків при досить стабільних середніх значеннях цих параметрів.

Завданням попередньої обробки растрової радіолокаційної інформації є корекція наявних геометричних викривлень і формування растрових інформаційних зображень, придатних для інтеграції в геоінформаційні системи і подальшої тематичної обробки з використанням інтерактивних та автоматичних методів.

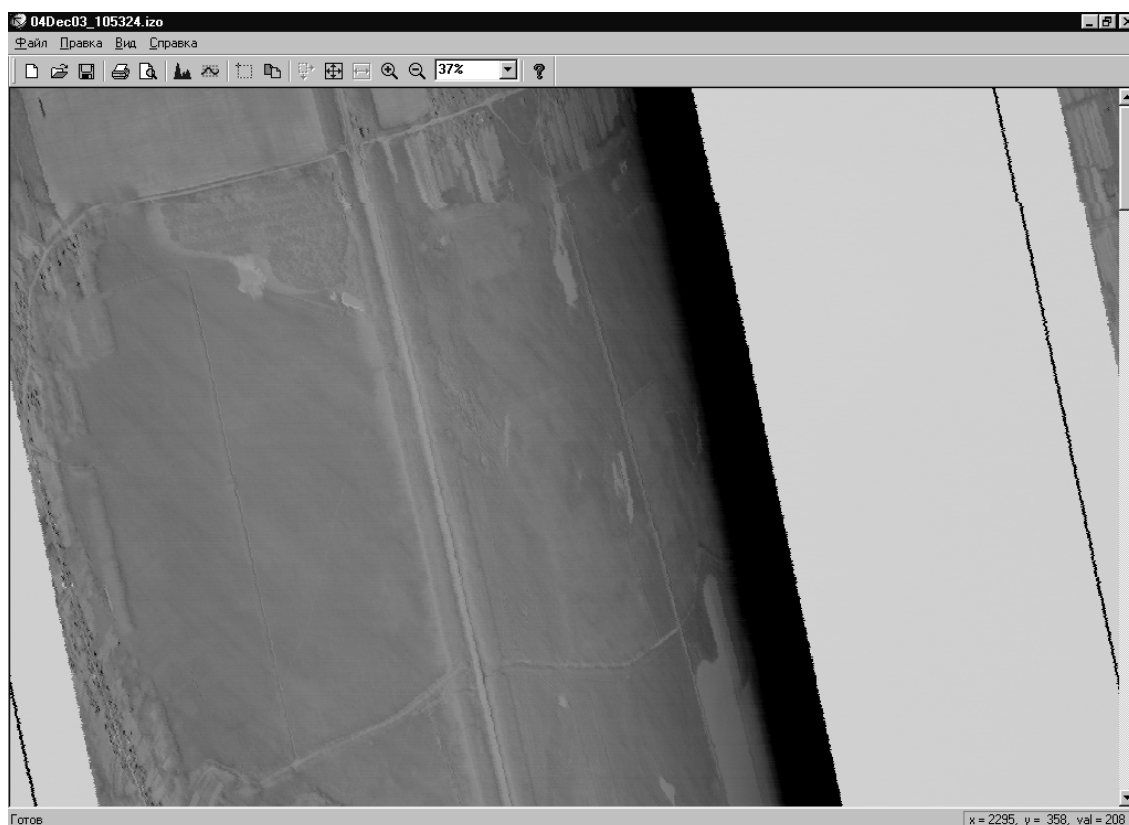


Рисунок 2.4 – Робоче вікно програми перегляду вихідної ІЧ інформації при завданні числа елементів в рядку - 2668

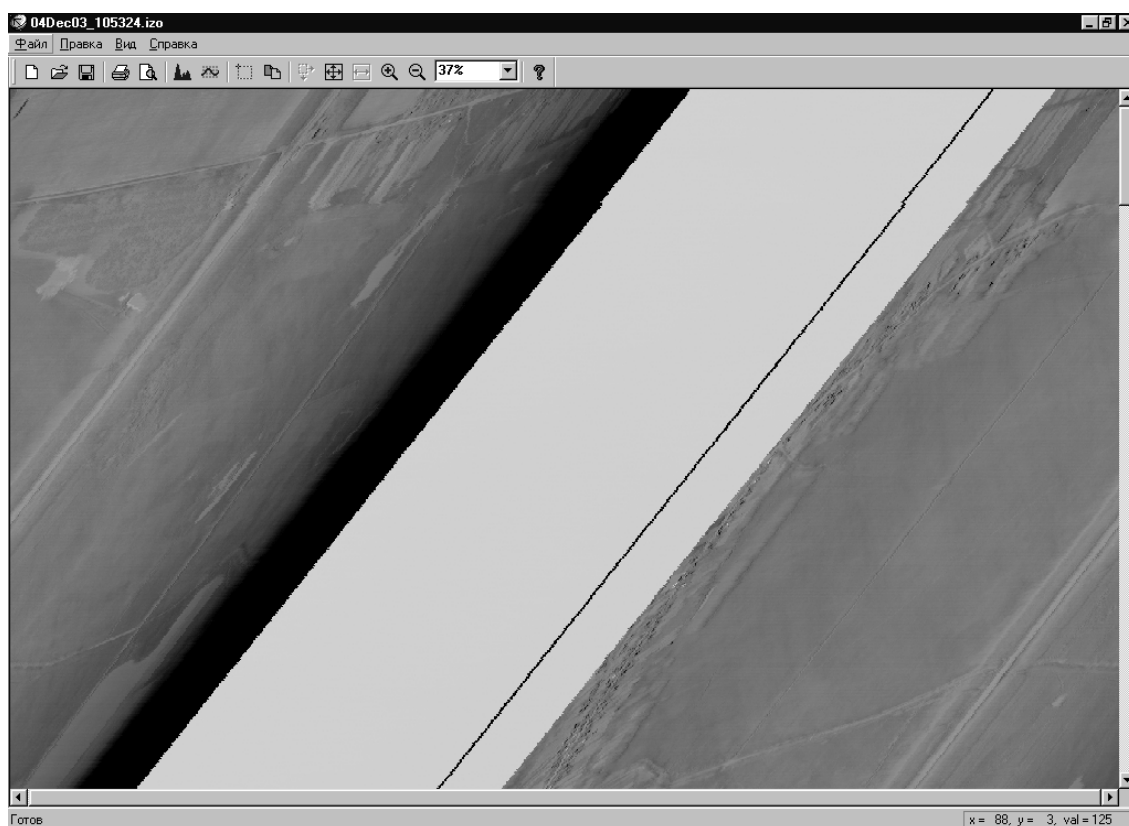


Рисунок 2.5 – Робоче вікно програми перегляду вихідної ІЧ інформації при завданні числа елементів в рядку - 2667

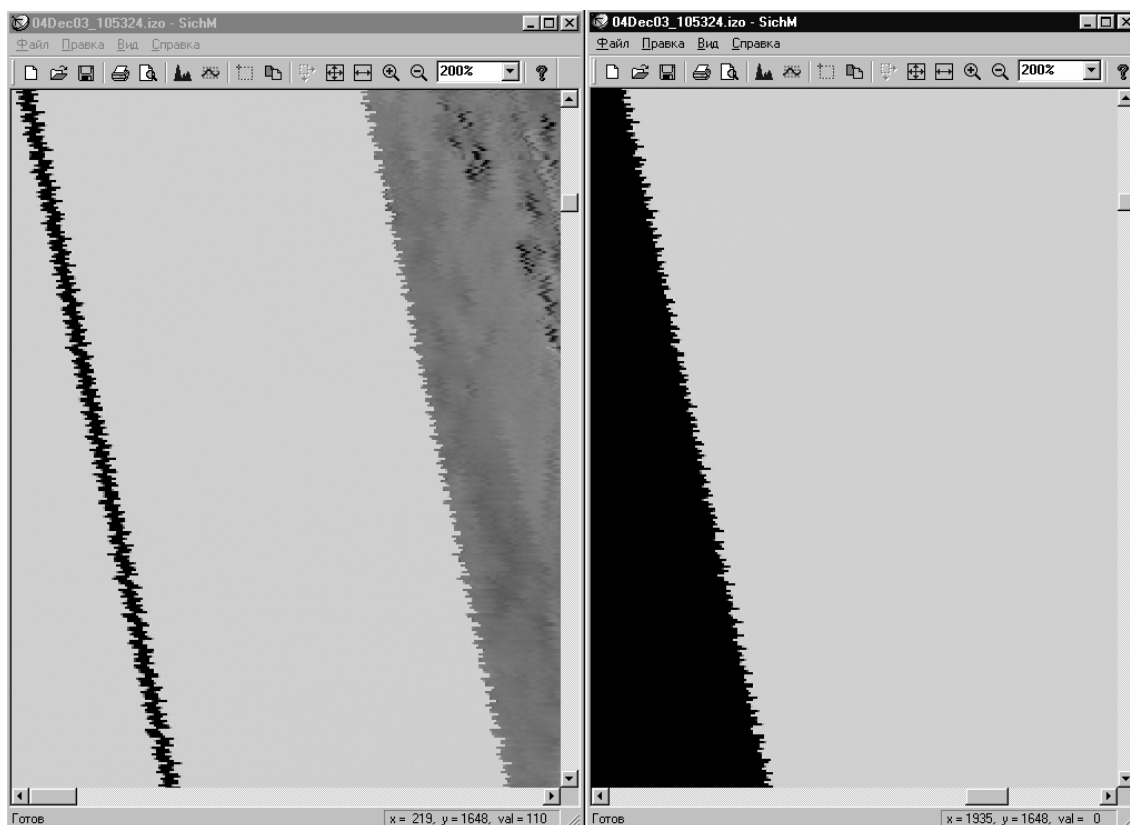


Рисунок 2.6 – Робочі вікна програми перегляду вихідної ІЧ інформації при завданні масштабу перегляду 200%

2.3.1 Корекція геометричних викривлень вихідної інформації РБО

На першому етапі корекції необхідно відокремити область радіолокаційного зображення від області службової цифрової інформації навігації і телеметрії і зробити дзеркальний переворот елементів рядка зображення. Для виконання даної процедури представляємо вхідне растрове інформаційне зображення у вигляді двовимірного масиву значень даних $A_{(x,y)}^{(input)}$ (где x – адреса елемента всередині вхідного інформаційного рядка, y – адреса рядка) розміром $Nx \times Ny$ (де Nx – число елементів в рядку вхідного растрового зображення, а Ny – число рядків вхідного растрового зображення). З даного масиву необхідно сформувати вихідний масив значень даних $A_{(k,y)}^{(output)}$ (де k – адреса елемента всередині вихідного інформаційного рядка, y – адреса рядка) розміром $Nk \times Ny$ (де Nk – число елементів в рядку вихідного растрового зображення, а Ny – число рядків вихідного растрового зображення).

Перші 256 байт кожного рядка вхідного зображення містять службову навігаційну і телеметричну інформацію, і, отже, число елементів в рядку вихідного растрового зображення має становити $Nk = Nx - 256$. Враховуючи необхідність дзеркального перевороту адреси елементів рядка зображення, елемент $A_{(k=0,y)}^{(output)}$ повинен відповідати елементу $A_{(x=(Nx-1),y)}^{(input)}$, тобто адреси елементів радіолокаційного зображення у вхідному і вихідному масивах пов'язані виразом

$$x = Nx - 1 - k. \quad (2.1)$$

У підсумку, процедура виділення області радіолокаційного зображення і дзеркального перевороту рядка зображення зводиться до виконання операції:

$$A_{(k,y)}^{(output)} = A_{((Nx-1-k),y)}^{(input)} \quad \text{для} \quad \begin{cases} k = 0 \dots (Nk - 1); \\ y = 0 \dots (Ny - 1); \end{cases} \quad (2.2)$$

На другому етапі корекції геометричних викривлень необхідно лінеаризувати просторово-часову розгортку зображення всередині інформаційного рядка. Для виконання даної процедури представляємо вхідне (після виконання виділення радіолокаційного зображення) растрове інформаційне зображення у вигляді двовимірної масиви значень даних $A_{(k,y)}^{(input)}$ (где k – адреса елемента всередині вхідного інформаційного рядка, y – адреса рядка) розміром $Nk \times Ny$ (де Nk – число елементів в рядку вхідного растрового зображення, а Ny – число рядків вхідного растрового зображення). З даного масиву необхідно сформувати вихідний масив значень даних $A_{(j,y)}^{(output)}$ (де j – адреса елемента всередині вихідного інформаційного рядка, y – адреса рядка) розміром $Nj \times Ny$ (де Nj – число елементів в рядку вихідного растрового зображення, а Ny – число рядків вихідного растрового зображення).

Особливістю реалізації бортової системи цифрової обробки радіолокатора, є формування керованої затримки реєстрації оцифрованої інформації t_0 , для виключення з процесу реєстрації неінформативної початкової ділянки до першого відбитого сигналу. Ця затримка встановлюється оператором перед початком роботи і може бути встановлена як в мінімальне положення, при якому для початкового елемента рядка значення $t_0 \leq (2 \cdot H / c)$ (див. рис. 2.7.), так

і в положення, при якому для початкового елемента рядка значення $t_0 > (2 \cdot H / c)$ (див. рис.2.8).

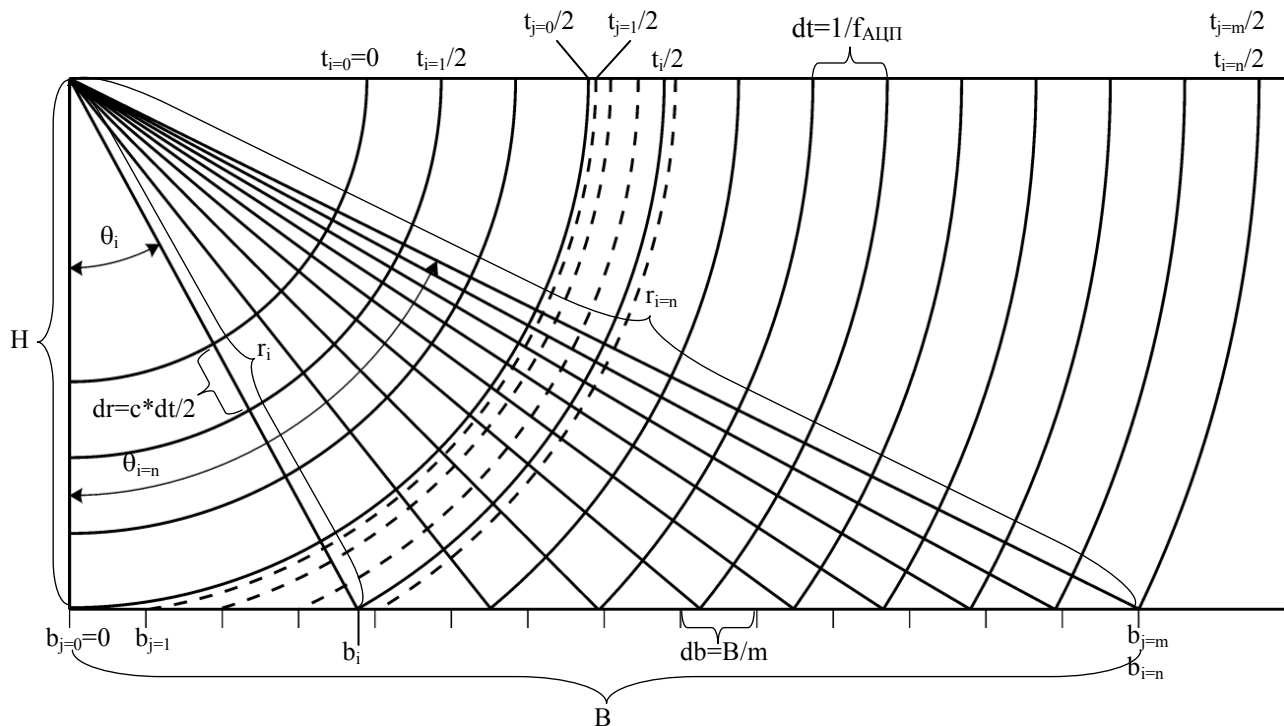


Рисунок 2.7 – Просторово-часова геометрія процесу дистанційного зондування в кутомістній площині для $t_0 \leq (2 \cdot H / c)$

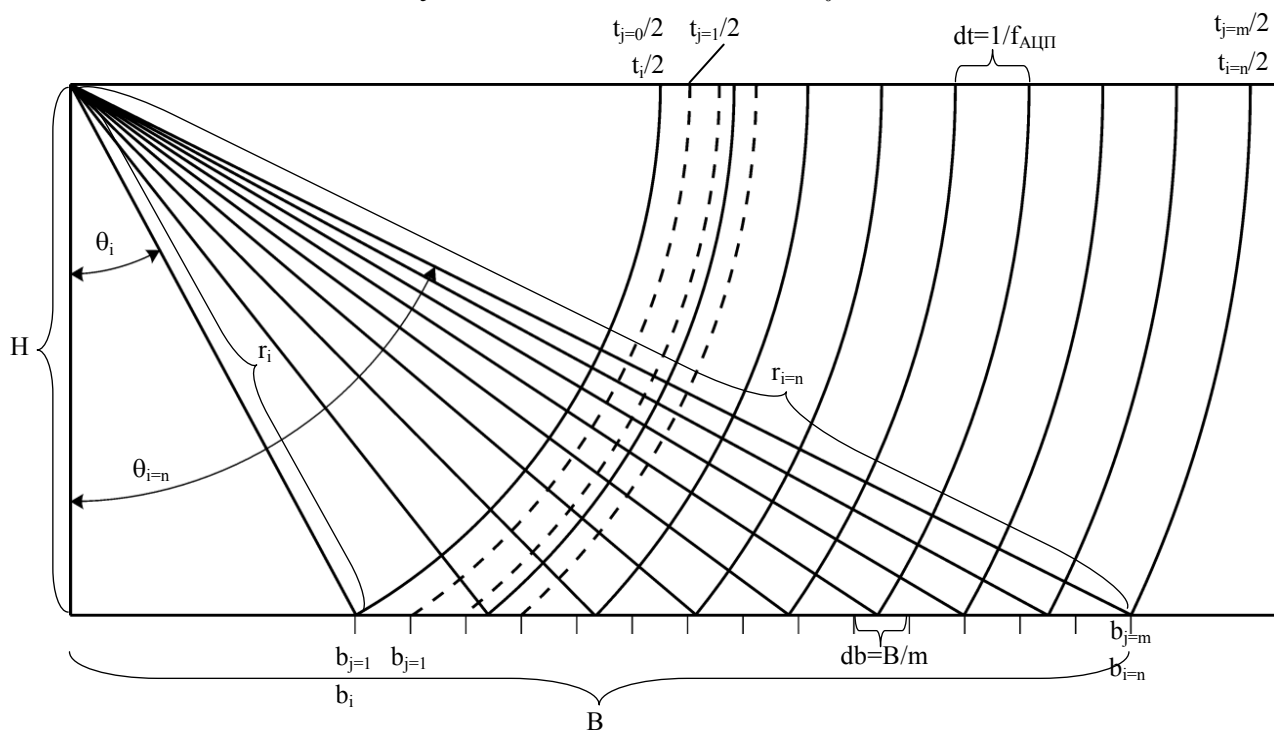


Рисунок 2.8 – Просторово-часова геометрія процесу дистанційного зондування в кутомістній площині для $t_0 > (2 \cdot H / c)$

Апаратно це виражається в зміщенні значення індексу часового відліку на величину:

$$i_0 = \lceil t_0 / dt \rceil = \lceil t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rceil \quad (2.3)$$

Тоді можна пов'язати адресу елементів всередині рядка k вхідного масиву $A_{(k,y)}^{(\text{input})}$ та індекс часового відліку i :

$$i = \lceil t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rceil + k \quad (2.4)$$

З рисунків 2.7 и 2.8 видно, що міжпиксельна відстань db в лінеаризованному інформаційному рядку залежить від числа елементів в рядку m і розміру інформаційного рядка по поверхні землі B :

$$db = B / m \quad (2.5)$$

А використовуючи тригонометричних функцій можна записати

$$B = b_{i=n} = H \cdot \text{tg}(\arccos(2 \cdot H / (c \cdot t_{i=n}))) \quad \text{для} \quad t_0 \leq (2 \cdot H / c) \quad (2.6)$$

та

$$B = b_{i=n} - b_{i_0} = H \cdot (\text{tg}(\arccos(2 \cdot H / (c \cdot t_{i=n}))) - \text{tg}(\arccos(2 \cdot H / (c \cdot t_0)))) \quad \text{для} \quad t_0 > (2 \cdot H / c) \quad (2.7)$$

Враховуючи що i є індексом часового відліку, t_i можна виразити як:

$$t_i = i \cdot dt = i / f_{\text{АЦП}} \quad (2.8)$$

Так як $A_{i=n}$ (рис. 2.7, 2.8) є останнім оцифрованим значенням, значення n визначається з значень Nk та i_0 з урахуванням (2.3, 2.4):

$$n = i_0 + (Nk - 1) = \lceil t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rceil + (Nk - 1) \quad (2.9)$$

Тоді з урахуванням (2.8, 2.9) вирази (2.6, 2.7) приймають вигляд:

$$B = H \cdot \text{tg}(\arccos(2 \cdot H / (c \cdot (\lceil t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rceil + (Nk - 1)) / f_{\text{АЦП}}))) \quad \text{для} \quad t_0 \leq (2 \cdot H / c) \quad (2.10)$$

та

$$B = H \cdot (\text{tg}(\arccos(2 \cdot H / (c \cdot (\lceil t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rceil + (Nk - 1)) / f_{\text{АЦП}})))) - \text{tg}(\arccos(2 \cdot H / (c \cdot \lceil t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rceil / f_{\text{АЦП}})))) \quad \text{для} \quad t_0 > (2 \cdot H / c) \quad (2.11)$$

Вирази (2.10, 2.11) містять всі визначені змінні і використовуються для обчислення значення B .

Значення індексу m (рис. 2.7, 2.8) визначає кількість елементів в рядку вихідного растрового зображення:

$$m = Nj - 1 \quad (2.12)$$

Так як міжпиксельна відстань в рядку вихідного растрового зображення db є величиною постійною, що розраховується по (2.5), відстань по поверхні до кожного елемента дальності може бути розраховане як:

$$b_j = j \cdot db \quad \text{для} \quad t_0 \leq (2 \cdot H / c) \quad (2.13)$$

та

$$b_j = b_0 + j \cdot db = (H \cdot \operatorname{tg}(\arccos(2 \cdot H / (c \cdot \lceil t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rceil f_{\text{АЦП}})))) + j \cdot db \quad \text{для} \quad t_0 > (2 \cdot H / c) \quad (2.14)$$

На рисунках 2.7, 2.8 видно, що кожен з елементів вихідного рядка $A_{(j,y)}^{(\text{output})}$ розташований в просторі і часі між двома значеннями (попереднім і наступним) вхідного рядка $A_{(k,y)}^{(\text{input})}$ що дозволяє визначити його значення як суму цих двох значень з вагами, обернено пропорційними відстаням в просторі і часі від положення цього елемента до положень попередніх і наступних елементів дальності у вхідному рядку.

Місцезнаходження елементів вихідного рядка в просторі визначається за формулами (2.13, 2.14), а місце розташування в часі можна визначити виходячи з тригонометричного співвідношення:

$$t_j = (2 \cdot H / c) / (\cos(\arctg(b_j / H))). \quad (2.15)$$

Використовуючи вираз (2.8) можна перейти до значення індексу елемента в початковому потоці оцифровування:

$$i_j = f_{\text{АЦП}} \cdot (2 \cdot H / c) / (\cos(\arctg(b_j / H))). \quad (2.16)$$

Використовуючи вираз (2.4) можна перейти до значення індексу елемента в заданому рядку масиву $A_{(k,y)}^{(\text{input})}$:

$$k_j = f_{\text{АЦП}} \cdot (2 \cdot H / c) / (\cos(\arctg(b_j / H))) - \lceil t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rceil. \quad (2.17)$$

У загальному випадку значення k_j є дійсним значенням з дробовою частиною, що визначає місце розташування цього значення між двома цілими значеннями індексів k і $k+1$ елементів вхідного рядка масиву $A_{(k,y)}^{(\text{input})}$. Значення ваг при цьому визначаються як:

$$\begin{cases} a_{k+1} = (k_j - \lfloor k_j \rfloor) \\ a_k = 1 - a_{k+1} \end{cases} \quad (2.18)$$

Враховуючи (2.5-2.18) процедура лінеаризації просторово-часової розгортки зображення всередині інформаційного рядка зводиться до виконання операцій:

$$\begin{cases} db = (H \cdot \text{tg}(\arccos(2 \cdot H/(c \cdot (\lfloor t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rfloor + (Nk - 1)) / f_{\text{АЦП}})))) / (Nj - 1) \\ k_j = f_{\text{АЦП}} \cdot (2 \cdot H/c) / (\cos(\arctg(((H \cdot \text{tg}(\arccos(2 \cdot H/(c \cdot \lfloor t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rfloor / f_{\text{АЦП}})))) + j \cdot db) / H))) - \lfloor t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rfloor \\ A_{(j,y)}^{(\text{output})} = (1 - (k_j - \lfloor k_j \rfloor)) \cdot A_{(\lfloor k_j \rfloor, y)}^{(\text{input})} + (k_j - \lfloor k_j \rfloor) \cdot A_{((\lfloor k_j \rfloor + 1), y)}^{(\text{input})} \end{cases}, \quad (2.19)$$

$$\text{для} \quad \begin{cases} t_0 \leq (2 \cdot H/c); \\ j = 0 \dots (Nj - 1); \\ y = 0 \dots (Ny - 1); \end{cases}$$

та

$$\begin{cases} db = (H \cdot (\text{tg}(\arccos(2 \cdot H/(c \cdot (\lfloor t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rfloor + (Nk - 1)) / f_{\text{АЦП}})))) - \\ - \text{tg}(\arccos(2 \cdot H/(c \cdot \lfloor t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rfloor / f_{\text{АЦП}})))) / (Nj - 1) \\ b_j = (H \cdot \text{tg}(\arccos(2 \cdot H/(c \cdot \lfloor t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rfloor / f_{\text{АЦП}})))) + j \cdot db \\ k_j = f_{\text{АЦП}} \cdot (2 \cdot H/c) / (\cos(\arctg(b_j / H))) - \lfloor t_0 \cdot f_{\text{АЦП}} \rfloor \\ A_{(j,y)}^{(\text{output})} = (1 - (k_j - \lfloor k_j \rfloor)) \cdot A_{(\lfloor k_j \rfloor, y)}^{(\text{input})} + (k_j - \lfloor k_j \rfloor) \cdot A_{((\lfloor k_j \rfloor + 1), y)}^{(\text{input})} \end{cases}, \quad (2.20)$$

$$\text{для} \quad \begin{cases} t_0 > (2 \cdot H/c); \\ j = 0 \dots (Nj - 1); \\ y = 0 \dots (Ny - 1); \end{cases}$$

На третьому етапі корекції геометричних викривлень необхідно привести значення міжрядкової відстані до значення скоригованої на попередньому етапі міжпиксельної відстані всередині інформаційного рядка з урахуванням просторово-часової геометрії поширення випроміненого і відбитого сигналу в азимутальній площині при зондуванні землі з аероносія (рисунки 2.9).

Для виконання даної процедури представляємо вхідне (після виконання лінеаризації) растрове інформаційне зображення у вигляді двовимірної масиви значень даних $A_{(j,y)}^{(\text{input})}$ (где j – адреса елемента всередині вхідного інформаційного рядка, y – адреса рядка) розміром $Nj \times Ny$ (где Nj – число елементів в рядку

вихідного растрового зображення, а N_y – число рядків вхідного растрового зображення). З даного масиву необхідно сформувати вихідний масив значень даних $A_{(j,s)}^{(output)}$ (где j – адреса елемента всередині вихідного інформаційного рядка, s – адреса рядка) розміром $N_j \times N_s$ (где N_j – число елементів в рядку вихідного растрового зображення, а N_s – число рядків вихідного растрового зображення).

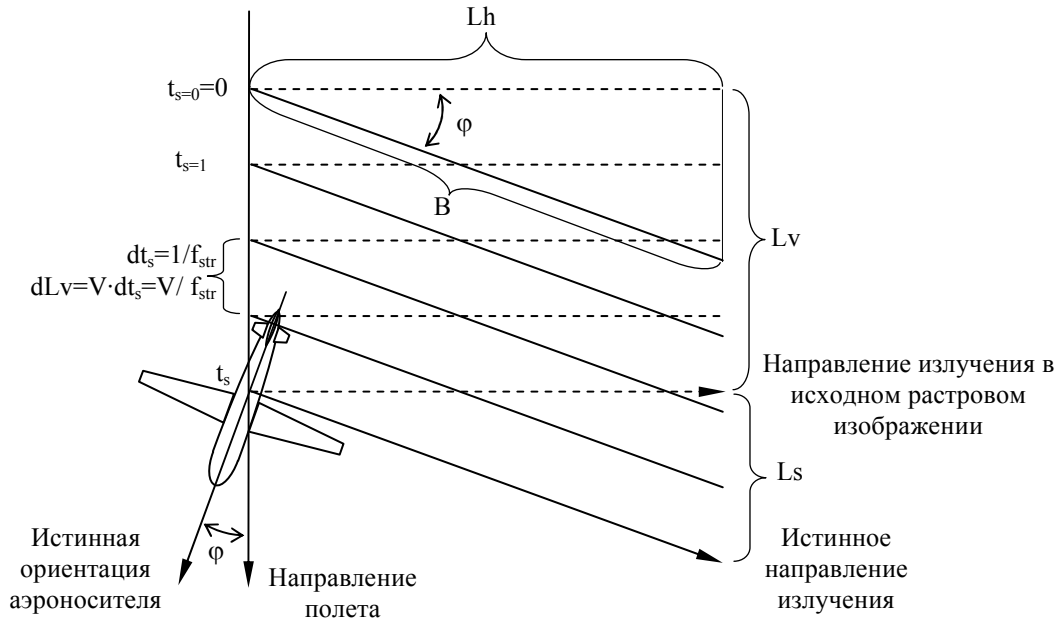


Рисунок 2.9 – Просторово-часова геометрія процесу дистанційного зондування в азимутальній площині

У загальному випадку, при наявності кута зносу φ (рис. 2.9) остаточне (після корекції знесення) значення міжпиксельної відстані буде менше ніж розраховане на попередньому етапі значення db і складе:

$$dbs = db \cdot \cos(\varphi) \quad (2.21)$$

Враховуючи співвідношення між частотою видачі рядків f_{str} , інтервалом видачі рядків dt_s , міжрядковою відстанню по поверхні землі dLv і швидкістю руху аероносія V (рис. 2.9), вертикальна довжина вхідного растрового зображення становить:

$$Lv = dLv \cdot (Ny-1) = (V/f_{str}) \cdot (Ny-1) \quad (2.22)$$

Кількість рядків вихідного растрового зображення в такому випадку:

$$Ns = (Lv/dbs) + 1 = ((V/f_{str}) \cdot (Ny-1)/dbs) + 1 \quad (2.23)$$

Індекс рядка елемента вхідного зображення визначає його місце розташування в просторі lv_y :

$$lv_y = dLv \cdot y \quad (2.24)$$

Індекс рядка елемента вихідного зображення також визначає його місце розташування в просторі lv_s :

$$lv_s = dbs \cdot s \quad (2.25)$$

Для кожного значення індексу s можна розрахувати місце розташування елемента в просторі, а потім через положення в просторі обчислити значення індексу y :

$$y_s = lv_s / dLv = (dbs \cdot s) / (V / f_{str}) \quad (2.26)$$

У загальному випадку значення y_s є дійсним значенням з дробовою частиною, що визначає місце розташування цього значення між двома цілими значеннями індексів y та $y+1$ елементів вхідного рядку масиву $A_{(j,y)}^{(input)}$. Значення ваг при цьому визначаються як:

$$\begin{cases} a_{y+1} = (y_s - \lfloor y_s \rfloor) \\ a_y = 1 - a_{y+1} \end{cases} \quad (2.27)$$

Враховуючи (2.21 - 2.27) процедура вирівнювання міжрядкової і міжпиксельної відстані зводиться до виконання операцій:

$$\begin{cases} y_s = db \cdot \cos(\varphi) \cdot s \cdot f_{str} / V \\ A_{(j,s)}^{(output)} = (1 - (y_s - \lfloor y_s \rfloor)) \cdot A_{(j, \lfloor y_s \rfloor)}^{(input)} + (y_s - \lfloor y_s \rfloor) \cdot A_{(j, \lfloor y_s \rfloor + 1)}^{(input)} \end{cases}, \quad \text{для } \begin{cases} j = 0 \dots (Nj - 1); \\ s = 0 \dots (Ns - 1); \end{cases} \quad (2.28)$$

На четвертому етапі корекції геометричних викривлень необхідно провести корекцію зносу. Для виконання даної процедури представляємо вхідне (після виконання лінеаризації і корекції міжрядкової відстані) растрове інформаційне зображення у вигляді двовимірного масиву значень даних $A_{(j,s)}^{(input)}$ (де j – адреса елемента всередині вхідного інформаційної рядку, s – адреса рядку) розміром $Nj \times Ns$ (де Nj – число елементів в рядку вхідного растрового зображення, а Ns – число рядків вхідного растрового зображення). З даного масиву необхідно сформувати вихідний масив значень даних $A_{(j,p)}^{(output)}$ (де

j - адреса елемента всередині вихідного інформаційного рядка, p – адреса рядку) розміром $Nj \times Np$ (де Nj – число елементів в рядку вихідного растрового зображення, а Np – число рядків вихідного растрового зображення).

Як видно з рисунку 2.9 для корекції даного викривлення необхідно виконати вертикальний зсув вихідних растрових стовпців на величину, пропорційну номеру елемента рядку так, що б для останнього при $\varphi \geq 0$ (першого при $\varphi < 0$) стовпця растрового зображення зсув склав:

$$Ls = B \cdot \sin(\varphi) \quad (2.29)$$

При цьому вертикальний розмір вихідного файлу збільшується і число рядків Np становитиме:

$$Np = Ns + \lceil (B \cdot \sin(\varphi)) / dbs \rceil \quad (2.30)$$

Величина зсуву для кожного елемента стовпця вхідного зображення становитиме:

$$ds_j = j \cdot B \cdot \sin(\varphi) / (Nj - 1), \quad \text{для } \varphi \geq 0 \quad (2.31)$$

та

$$ds_j = (Nj - 1 - j) \cdot B \cdot \sin(\varphi) / (Nj - 1), \quad \text{для } \varphi < 0 \quad (2.32)$$

Тоді можна пов'язати адресу рядку p вихідного масиву $A_{(j,p)}^{(output)}$ с адресою рядка s вхідного масиву $A_{(j,s)}^{(input)}$:

$$s_p = p - ds_j = p - j \cdot B \cdot \sin(\varphi) / (Nj - 1), \quad \text{для } \varphi \geq 0 \quad (2.33)$$

та

$$s_p = p - ds_j = p - (Nj - 1 - j) \cdot B \cdot \sin(\varphi) / (Nj - 1), \quad \text{для } \varphi < 0 \quad (2.34)$$

У загальному випадку значення s_p є дійсним значенням з дробової частиною, що визначає місце розташування цього значення між двома цілими значеннями індексів s та $s+1$ елементів вхідного рядку масиву $A_{(j,s)}^{(input)}$. Значення елемента вихідного масиву $A_{(j,p)}^{(output)}$ при цьому визначається як сума значень вхідного масиву $A_{(j,s)}^{(input)}$ та $A_{(j,s+1)}^{(input)}$ з вагами:

$$\begin{cases} a_{s+1} = (s_p - \lfloor s_p \rfloor) \\ a_s = 1 - a_{s+1} \end{cases} \quad (2.35)$$

Враховуючи (3.29 - 3.35) процедура корекції зносу зводиться до виконання операцій:

$$\begin{cases} s_p = p - j \cdot B \cdot \sin(\varphi) / (Nj - 1) \\ \begin{cases} A_{(j,p)}^{(output)} = (1 - (s_p - \lfloor s_p \rfloor)) \cdot A_{(j, \lfloor s_p \rfloor)}^{(input)} + (s_p - \lfloor s_p \rfloor) \cdot A_{(j, \lfloor s_p \rfloor + 1)}^{(input)} & \text{для } 0 \leq \lfloor s_p \rfloor < (Ns - 1) \\ A_{(j,p)}^{(output)} = 255 & \text{для } 0 > \lfloor s_p \rfloor \geq (Ns - 1) \end{cases} \end{cases}, \quad (2.36)$$

$$\text{для } \begin{cases} \varphi \geq 0 \\ j = 0 \dots (Nj - 1); \\ p = 0 \dots (Np - 1); \end{cases}$$

Та

$$\begin{cases} s_p = p - (Nj - 1 - j) \cdot B \cdot \sin(\varphi) / (Nj - 1) \\ \begin{cases} A_{(j,p)}^{(output)} = (1 - (s_p - \lfloor s_p \rfloor)) \cdot A_{(j, \lfloor s_p \rfloor)}^{(input)} + (s_p - \lfloor s_p \rfloor) \cdot A_{(j, \lfloor s_p \rfloor + 1)}^{(input)} & \text{для } 0 \leq \lfloor s_p \rfloor < (Ns - 1) \\ A_{(j,p)}^{(output)} = 255 & \text{для } 0 > \lfloor s_p \rfloor \geq (Ns - 1) \end{cases} \end{cases} \quad (2.37)$$

$$\text{для } \begin{cases} \varphi < 0 \\ j = 0 \dots (Nj - 1); \\ p = 0 \dots (Np - 1); \end{cases}$$

На основі вище наведених алгоритмів було розроблено програму CORRGEO.EXE, яка виконує корекцію геометричних викривлень. Робоче вікно програми наведено на рисунку 2.10.

Програма дозволяє завантажувати вхідний файл даних, який відразу після завантаження відображається в лівому графічному вікні, встановлювати значення розміру рядку даних вхідного файлу (**Input total string size, pix**), значення розміру рядку зображення в рядку даних вхідного файлу (**Input image string size, pix**), значення зсуву початкового елемента зображення в рядку даних вхідного файлу (**Input image string offset, pix**), значення частоти квантування аналого-цифрового перетворювача (**Faцп, Hz**), значення частоти видачі рядків системи реєстрації (**Fstr, Hz**), значення початкової затримки реєстрації (**t0, s**), значення висоти польоту (**H, m**), значення швидкості польоту (**V, km/h**), значення кута зносу (**Drift, degree**), значення розміру рядку вихідного зображення (**Output image string size, pix**).

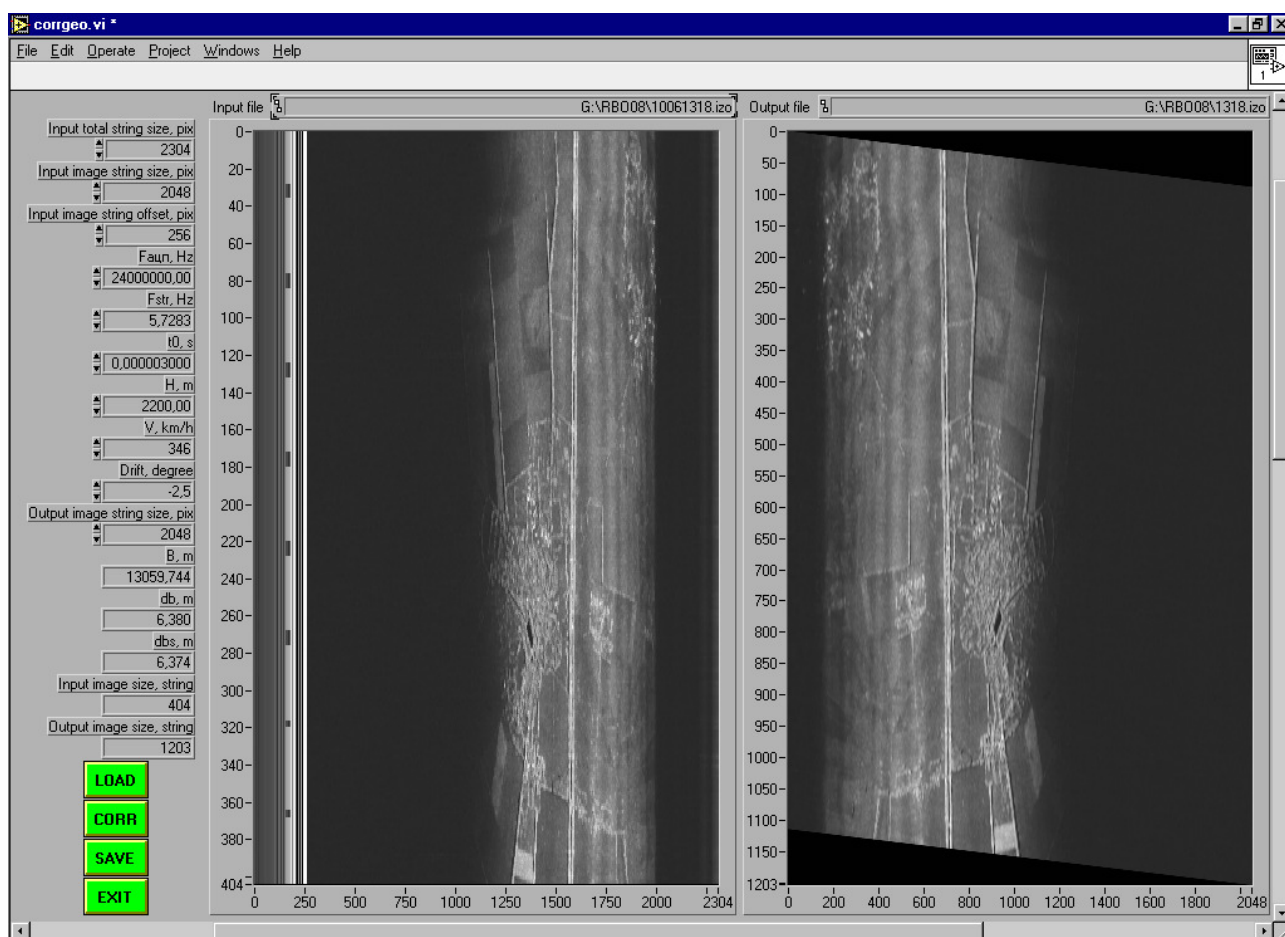


Рисунок 2.10 – Робоче вікно програми CORRGeo.EXE з виконаною геометричною корекцією

У процесі підготовки даних для проведення корекції програма розраховує і видає в інформаційні вікна значення смуги огляду по поверхні в угломістній площині (**B, m**), значення міжпиксельної відстані для заданого розміру рядку вихідного зображення (**db, m**), значення міжпиксельної відстані для заданого розміру рядку вихідного зображення з урахуванням кута зносу (**dbs, m**), значення кількості рядків вхідного зображення (**Input image size, string**) і значення кількості рядків вихідного зображення з урахуванням кута зносу (**Output image size, string**). Після візуального контролю розрахованих параметрів програма дозволяє виконати корекцію геометричних викривлень (кнопка "**CORR**") і відобразити результат в правому графічному вікні, як показано на рисунку 2.10.

2.3.2 Корекція геометричних викривлень вихідної інформації інфрачервоного радіометра

Просторово-часова геометрія процесу сканування поверхні землі ІЧ радіометром приведена на рисунку 2.11.

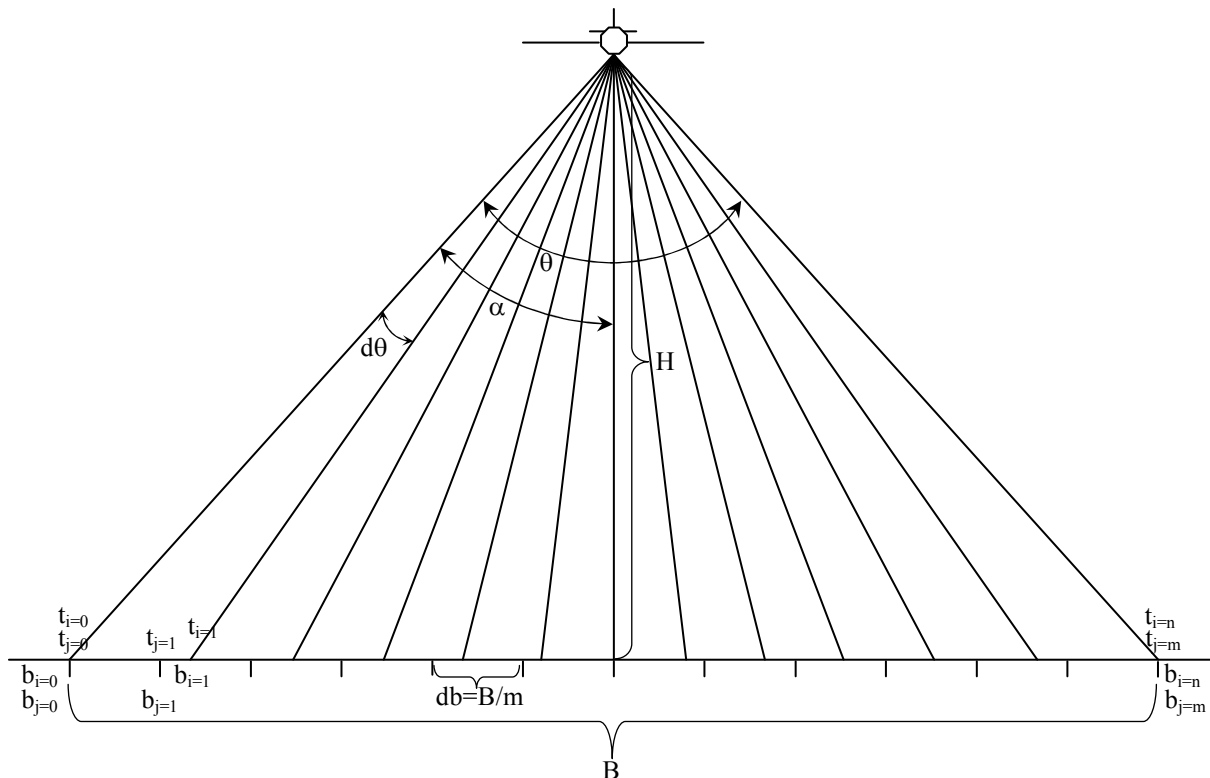


Рисунок 2.11 – Просторово-часова геометрія процесу ІЧ сканування в угломістній площині

Тут моменти часу t_i відповідають моментам часу квантування (оцифровування) аналогового сигналу з виходу ІЧ радіометра, починаючи з моменту початку розгортки сканера.

Приймальна апаратура ІЧ радіометра проводить сканування поверхні землі вузьконаправленою діаграмою по рівнокутному часовому закону, тобто зміна кута візування антеною системи прямо пропорційно часу і при незмінній частоті квантування вихідного аналогового сигналу прямо пропорційна часу моменту квантування (оцифровування). У той же час відстань від надир до точки візування визначається як:

$$b = H \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (2.38)$$

де b – відстань по поверхні землі від надира до точки опромінення, H – висота положення антени над поверхнею землі, α – кут між надиром і напрямком на точку опромінення.

Тоді для кожного моменту квантування можна визначити дальність по поверхні від надира до точки візування:

$$b_i = H \cdot \operatorname{tg}(\alpha_i) \quad (2.39)$$

Враховуючи, що кут візування α змінюється лінійно в часі, починаючи зі значення $-\theta/2$ до значення $+\theta/2$, з кроком $d\theta$ значення якого визначається як:

$$d\theta = \theta / n \quad (2.40)$$

де θ – кут смуги сканування, n – зменшене на одиницю значення кількості оцифрованих сканів, а значення кута α_i визначається як:

$$\alpha_i = i \cdot d\theta - \theta/2 = (i \cdot \theta / n) - \theta/2, \quad \text{для } i = 0 \dots n; \quad (2.41)$$

Тоді вираз (2.39) можна записати як:

$$b_i = H \cdot \operatorname{tg}((i \cdot \theta / n) - \theta/2), \quad \text{для } i = 0 \dots n; \quad (2.42)$$

З формули (2.42) видно, що при лінійній зміні значень t_i значення b_i змінюються нелінійно, а відповідно і нелінійно змінюються значення межпідселекційних відстаней в напрямку перпендикулярному напрямку руху аероносія, що визначаються як $b_{i+1} - b_i$, що і є причиною появи геометричних викривлень растрових інформаційних зображень що виражаються в нерівномірності міжпідселекційних відстаней в напрямку перпендикулярному напрямку руху аероносія.

Викривлення растрового зображення ІЧ радіометра в азимутальній площині обумовлені кутами зносу аероносія і залежністю міжрядкових відстаней від швидкості польоту мають ту ж природу і закони що й для растрових зображень РБО, наведені на рисунку 2.9.

На першому етапі корекції необхідно нормалізувати растрову структуру інформаційного зображення. Для цього необхідно провести пошук початку інформаційного рядка по задньому фронту бланкуючого імпульсу, який має максимальну амплітуду сигналу та фіксовану тривалість від короткого

стробуючого імпульсу нульової амплітуди до інформаційних відліків (ліва частина рисунку 2.6). Потім необхідно провести пошук кінця інформаційного рядка по перепаду від низького рівня ділянки нульового сигналу в кінці інформаційної смуги до високого рівня бланкіруючого імпульсу (права частина рисунку 2.6). Далі необхідно нормалізувати довжину інформаційного рядка та зробити міжрядкову фільтрацію з подальшим стисненням (кількість вихідних рядків зменшується в 2 рази) для мінімізації викривлень пов'язаних зі зміною місця розташування інформації при нормалізації розміру рядку та перейти до аналізу та нормалізації наступного інформаційного рядку. Після цього, необхідно виконати інверсію амплітуди сигналу та записати нормалізовану растрову структуру інформаційного зображення в вихідного файл.

Для виконання описаних вище процедур була розроблена програма MLHT.EXE, що працює в консольному режимі. Для коректної роботи програми MLHT.EXE необхідно мати заповнений інформаційний файл MLHT.DAN, вміст якого наведено на рисунку 2.12.

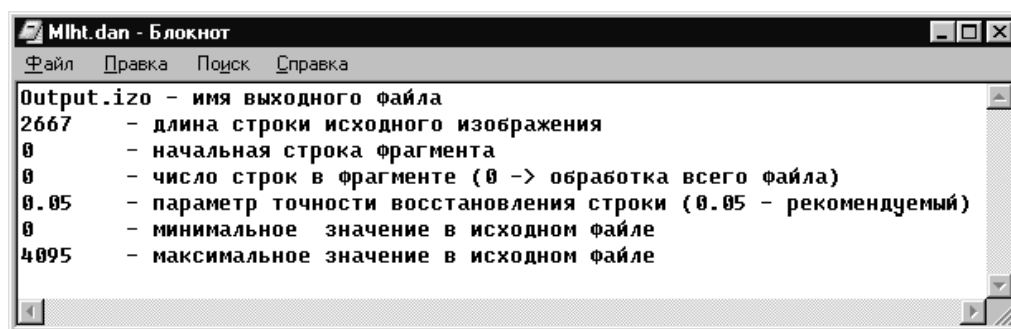


Рисунок 2.12 – Зміст інформаційного файлу MLHT.DAN

Як видно з рисунку 2.12, програма MLHT.EXE допускає обробку не тільки всього вхідного файлу, але й його фрагмента, а так само виконує амплитудну корекцію, приводячи 16-ти розрядні дані (12 діючих розрядів для ІЧ радіометра) до 8-ми розрядного подання, придатного для подальшої обробки додатками, які оперують 8-ми розрядними даними. Приклад обробки вхідного зображення програмою MLHT.EXE наведено на рисунку 2.13.

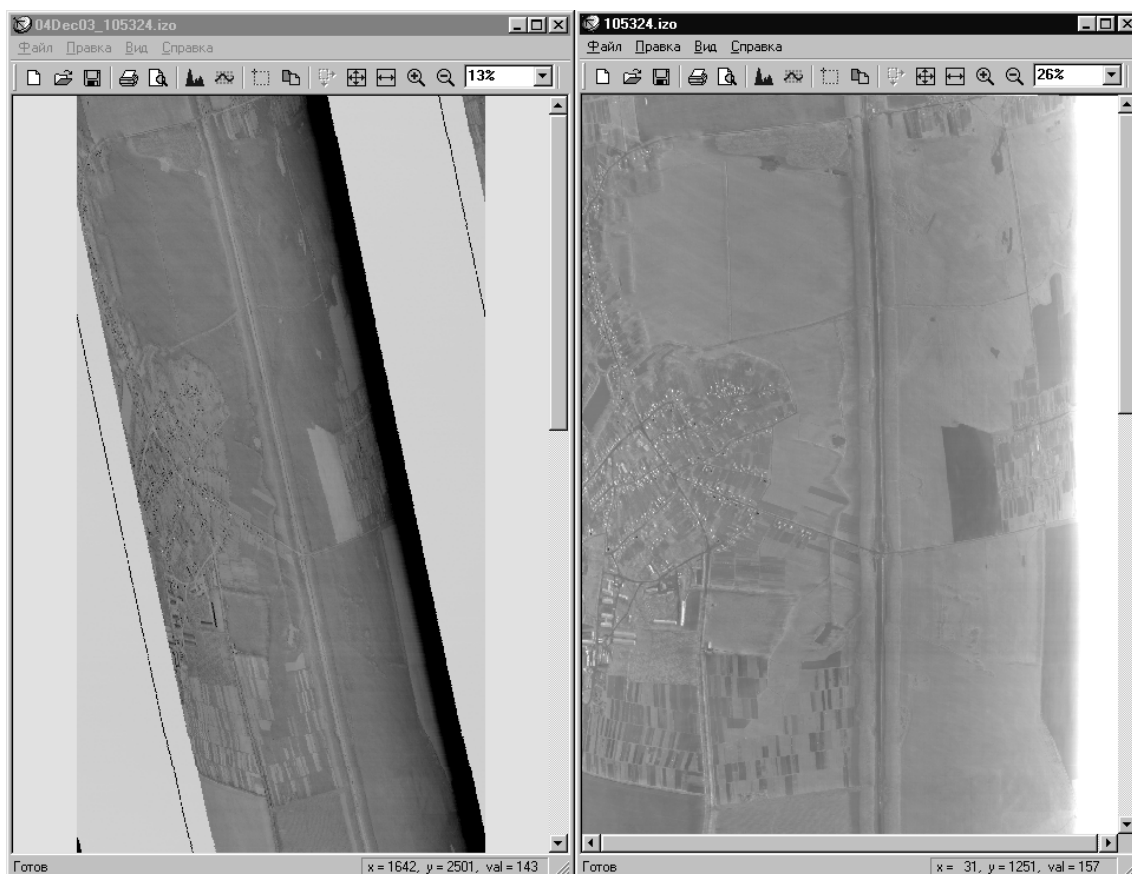


Рисунок 2.13 – Приклад обробки вхідного інформаційного файлу програмою MLHT.EXE

На другому етапі корекції геометричних викривлень необхідно лінеаризувати просторово-часову розгортку зображення всередині інформаційного рядка. Для виконання даної процедури представляємо вхідне (після виконання процедури нормалізації растра зображення) растрове інформаційне зображення у вигляді двовимірного масиву значень даних $A_{(i,y)}^{(input)}$ (де i – адреса елемента всередині вхідного інформаційного рядка, y – адреса рядку) розміром $N_i \times N_y$ (де N_i – число елементів в рядку вхідного растрового зображення, а N_y – число рядків вхідного растрового зображення). З даного масиву необхідно сформувати вихідний масив значень даних $A_{(j,y)}^{(output)}$ (де j – адреса елемента всередині вихідного інформаційного рядка, y – адреса рядку) розміром $N_j \times N_y$ (где N_j – число елементів в рядку вихідного растрового зображення, а N_y – число рядків вихідного растрового зображення).

Ще однією особливістю конкретної реалізації приймальної апаратури радіометра є те, що кількість елементів вхідного зображення відповідних куту смуги сканування $\theta = 84^\circ$ менше довжини інформаційного рядка Ni (на правій частині рисунку 2.13 біла смуга в кінці рядків зображення не несе корисної інформації, проте є елементом інформаційного рядка) і має значення Nn . Тому вираз для розрахунку діяльностей по поверхні (2.42) для елементів вхідного зображення приймає вигляд:

$$b_i = H \cdot \operatorname{tg}((i \cdot \theta / (Nn - 1)) - \theta / 2), \quad \text{для } i = 0 \dots (Nn - 1) \quad (2.43)$$

Смуга сканування по поверхні B визначається як:

$$B = 2 \cdot H \cdot \operatorname{tg}(\theta / 2) \quad (2.44)$$

У загальному випадку значення b_i , обчислені за формулою (2.42) мають від'ємні значення для $i < (Nn / 2)$, причому початкове абсолютне значення дорівнює половині смуги сканування по поверхні:

$$b_{i=0} = -(B / 2) = -(H \cdot \operatorname{tg}(\theta / 2)) \quad (2.45)$$

Зміщуючи початок відліку дальностей по поверхні в точку $t_{i=0}$ ($b_{i=0}$) отримуємо:

$$b_i = H \cdot (\operatorname{tg}((i \cdot \theta / (Nn - 1)) - \theta / 2) + \operatorname{tg}(\theta / 2)), \quad \text{для } i = 0 \dots (Nn - 1) \quad (2.46)$$

На рисунку 2.11 видно, що кожен з елементів вихідного рядку $A_{(j,y)}^{(output)}$ розташований в просторі і часі між двома значеннями (попереднім і наступним) вхідного рядка $A_{(i,y)}^{(input)}$ що дозволяє визначити його значення як суму цих двох значень з вагами, обернено пропорційними відстаням в просторі і часі від положення цього елемента до положень попередніх і наступних елементів дальності в заданому рядку.

Місцезнаходження елементів вихідного рядку в просторі визначається за формулою:

$$b_j = j \cdot db \quad \text{для } j = 0 \dots (Nj - 1), \quad (2.47)$$

де :

$$db = B / (Nj - 1) = 2 \cdot H \cdot \operatorname{tg}(\theta / 2) / (Nj - 1) \quad (2.48)$$

Місцезнаходження елементів вихідного рядку в часі можна визначити за формулою, зворотної формулі (2.46):

$$i_j = ((\theta/2) + \arctg((j \cdot db/H) - \tg(\theta/2))) \cdot (Nn-1)/\theta, \quad \text{для } j = 0 \dots (Nj-1) \quad (2.49)$$

У загальному випадку значення i_j є дійсним значенням з дробовою частиною, що визначає місце розташування цього значення між двома цілими значеннями індексів i та $i+1$ елементів вхідного рядку масиву $A_{(i,y)}^{(input)}$. Значення ваг при цьому визначаються як:

$$\begin{cases} a_{i+1} = (i_j - \lfloor i_j \rfloor) \\ a_i = 1 - a_{i+1} \end{cases} \quad (2.50)$$

Враховуючи (2.47-2.50) процедура лінеаризації просторово-часової розгортки зображення всередині інформаційного рядка зводиться до виконання операцій:

$$\begin{cases} db = 2 \cdot H \cdot \tg(\theta/2)/(Nj-1) \\ i_j = ((\theta/2) + \arctg((j \cdot db/H) - \tg(\theta/2))) \cdot (Nn-1)/\theta \\ A_{(j,y)}^{(output)} = (1 - (i_j - \lfloor i_j \rfloor)) \cdot A_{(\lfloor i_j \rfloor, y)}^{(input)} + (i_j - \lfloor i_j \rfloor) \cdot A_{((\lfloor i_j \rfloor + 1), y)}^{(input)} \end{cases}, \quad \text{для } \begin{cases} j = 0 \dots (Nj-1); \\ y = 0 \dots (Ny-1); \end{cases} \quad (2.51)$$

На третьому етапі корекції геометричних викривлень необхідно привести значення міжрядкової відстані до значення скоригованої на попередньому етапі міжпиксельної відстані всередині інформаційного рядка. А на четвертому етапі корекції геометричних викривлень необхідно провести корекцію зносу. Алгоритми цих етапів повністю відповідають алгоритмам аналогічних етапів корекції растрових зображень РБО.

На основі вище наведених алгоритмів було розроблено програму CORRGEOIR.EXE, що є функціональним аналогом програми CORRGEO.EXE, описаної раніше, але призначеної для обробки виключно даних ІЧ сканера "Малахит". Приклад з результатом обробки одного з вихідних інформаційних файлів ІЧ радіометра наведено на рисунку 2.14.

Файли, що містять скориговані растрові інформаційні зображення передаються для подальшої тематичної обробки.

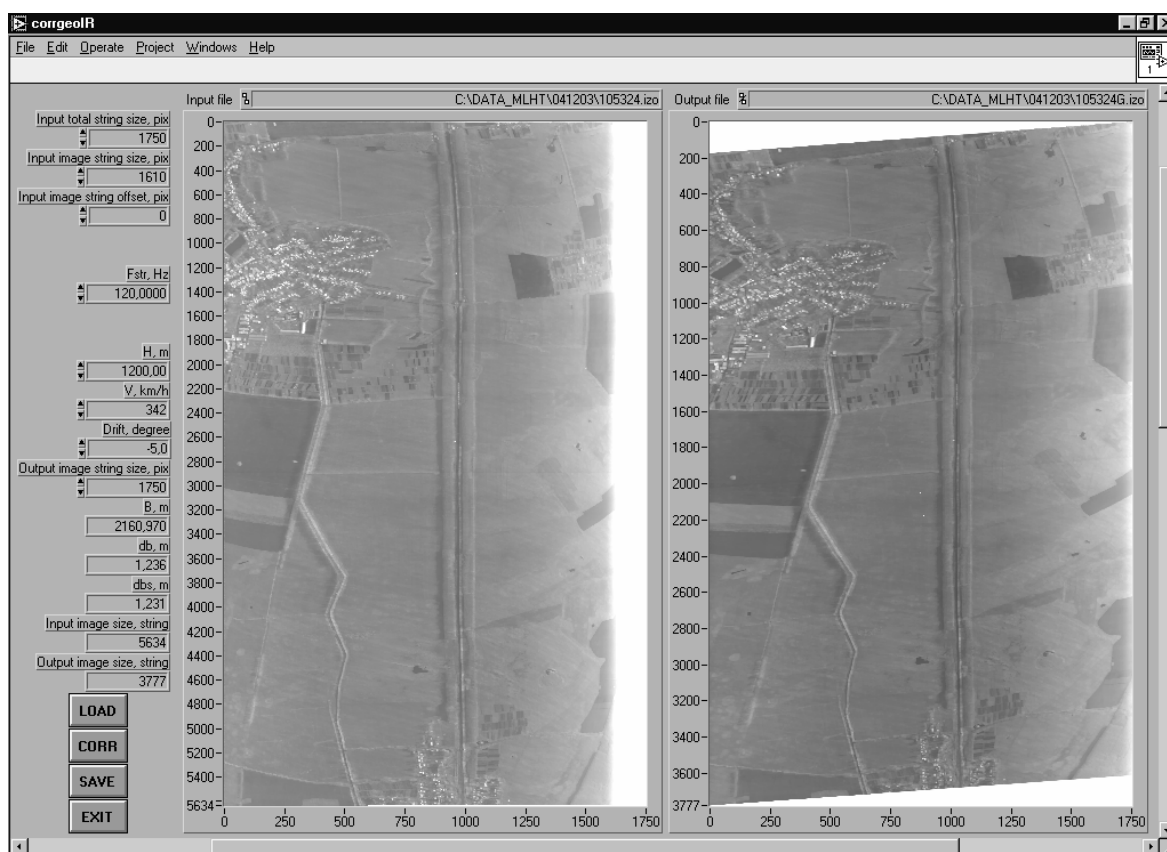


Рисунок 2.14 – Приклад результату обробки інформаційного файлу програмою CORRGEOIR.EXE

2.4 Методики тематичної обробки даних дистанційного зондування

Основна частина тематичної обробки даних дистанційного зондування проводилася засобами геоінформаційної системи (ГІС) «ENVI 4.7», призначеної для візуалізації і обробки даних дистанційного зондування Землі. Даний програмний пакет включає в себе набір інструментів для проведення повного циклу обробки даних від ортотрансформування і просторової прив'язки зображення до отримання необхідної інформації і її інтеграції з іншими даними ГІС. Растрові зображення РБО, ІЧ і оптики не мають абсолютної географічної прив'язки а спільна тематична обробка даних передбачає їх точне попиксельне просторове суміщення. Функціонал математичного апарату ортотрансформування і просторової прив'язки растрових зображень пакету «ENVI» дозволив виконати точну попиксельно взаємну прив'язку РБО, ІЧ, оптичних і картографічних зображень з використанням інтерактивного методу

завдання опорних точок. В якості опорного зображення використовувалися оцифровані географічні карти місцевості, на які накладалися шари прив'язуємих зображень. Візуальне уявлення результату поєднання і взаємопривязки растрових зображень засобами програмного пакету «ENVI» наведено на рисунку 2.15.

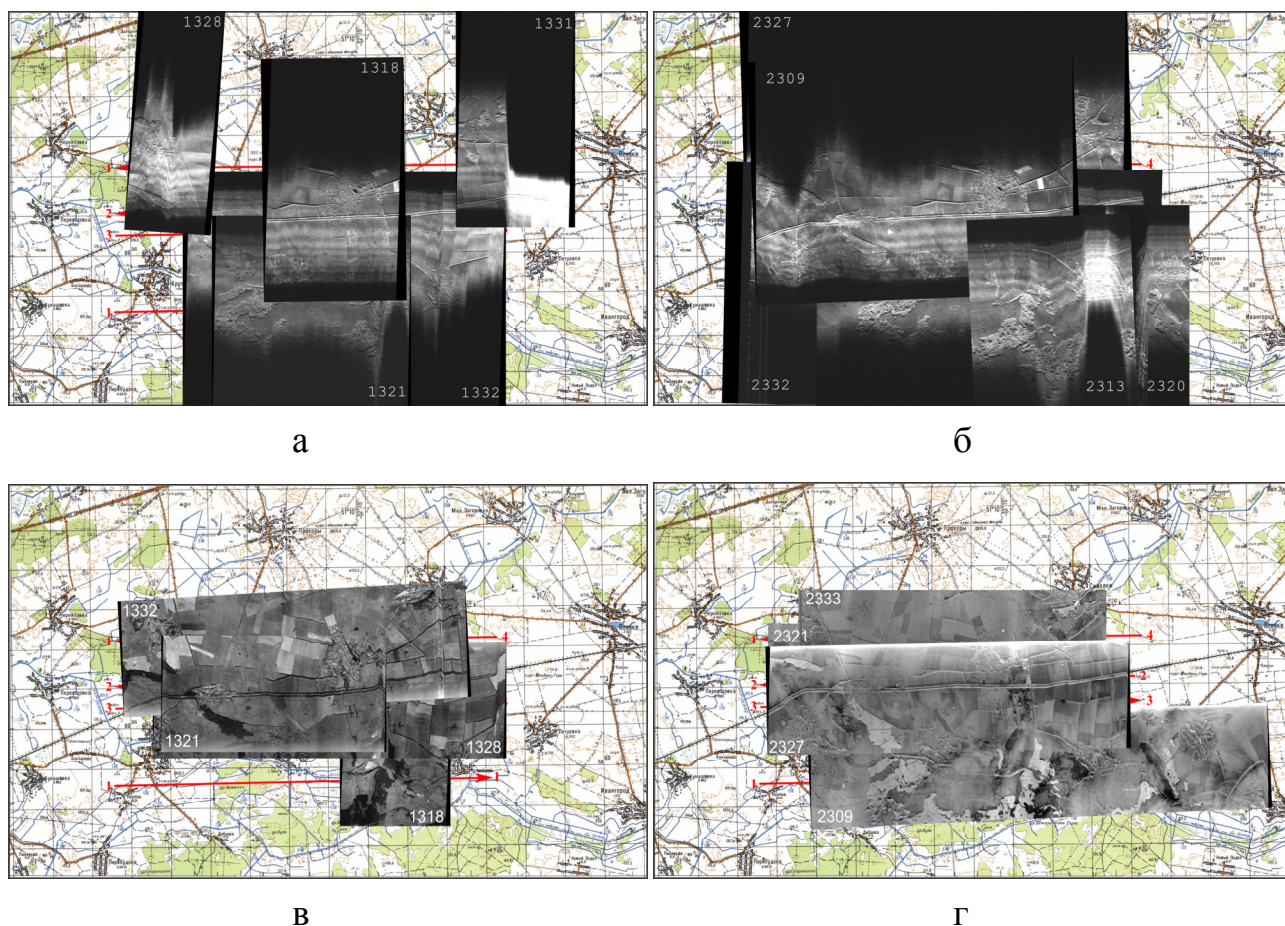


Рисунок 2.15 – Приклад результатів прив'язки та суміщення РБО (а, б) і ІЧ (в, г) растрових даних методом опорних точок програмними засобами пакету «ENVI»

Результуючі багат шарові структури даних потім використовувалися для подальшого аналізу, оцінки і статистичної обробки.

Для виконання процедур кластерного аналізу був використаний спеціалізований програмний пакет статистичного аналізу «STATISTICA 8.0», що містить широкий спектр функціональних алгоритмів статистичної обробки багатовимірних наборів даних, в тому числі і велика різноманітність методів кластерної обробки.

Крім того, для операцій проміжних перетворень даних, налагодження алгоритмів обробки і візуалізації результатів обробки активно використовувався стандартний програмний пакет «MathCAD 15.0».

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 також обумовлених апаратними особливостями використовуваних радіолокаційних систем.

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

5. Запропоновано методику спільної тематичної обробки растрових радіолокаційних, ІЧ 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.

РОЗДІЛ 3

ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПІДПОВЕРХНЕВОГО ПЕРЕЗВОЛОЖЕННЯ ҐРУНТІВ І ОСЕРЕДКІВ САМОРОЗІГРІВУ ОРГАНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ РАДІОФІЗИЧНИМ МЕТОДОМ АКТИВНО- ПАСИВНОГО ЗОНДУВАННЯ

Розглянуто виявлення та ідентифікація зон підповерхневого перезволоження ґрунтів і саморозігріву органічних матеріалів радіофізичним методом активно-пасивного зондування. Представлені результати проведених експериментів по використанню запропонованого методу. Описано використання методики проведення багатовимірної кластеризації даних комбінованої добової радіолокаційно-радіотеплової авіаційної зйомки для реалізації запропонованого методу ідентифікації зон підтоплень та підповерхневого саморозігріву ґрунтів.

3.1 Дистанційне зондування підтоплень активно-пасивним радіофізичним методом

Для кількісного опису процесів підтоплення часто використовуються такі характеристики як вологість ґрунту і рівень ґрунтових вод. Капілярний підйом ґрунтових вод в ґрунтову або ґрунтове середовище визначає зміну вологості в шарі ґрунту, що знаходиться над рівнем ґрунтових вод [81].

Фізичною основою активно-пасивного радіолокаційно - радіометричного дистанційного визначення підняття рівня ґрунтових вод є вплив режимів зволоження поверхневого скін-шару (що вносить основний вклад до відбитого радіолокаційного сигналу) на радіаційно-вологісну залежність ґрунтового покриву в зонах фільтрації і підтоплення.

Радіаційно-вологісні властивості поверхневого скін-шару ґрунту залежать від режимів зволоження зони аерації ґрунтовими водами [82]. Наявність ґрунтових шарів з різним зволоженням, що виникають за рахунок капілярного підняття над рівнем ґрунтових вод, сприяє виникненню величезного розмаїття

діелектричних властивостей сухого та вологого ґрунтів, що призводить до можливої їх класифікації по градаціях. Виникає при цьому контраст тим значніший, чим ближче до поверхні знаходиться зволожений горизонт.

Для отримання корисної інформації в процесі дистанційного зондування використовуються як особливості відображення електромагнітних хвиль різної довжини від об'єктів дослідження, так і особливості власного випромінення цими об'єктами електромагнітних хвиль.

Досить інтенсивно використовуються дані оптичного та інфрачервоного діапазонів. Вони дозволяють виділити інформацію про стан рослинного покриву і земної поверхні (оптичний діапазон), щодо її температури (інфрачервоний діапазон).

Радіолокаційні і радіометричні методи дистанційного зондування, засновані на зв'язках геометричних і електрофізичних характеристик поверхневих і підповерхневих утворень з параметрами відбитих або випромінених поверхнею сигналів, які не залежать від освітленості, погодних умов. Вони відрізняються високою проникаючою здатністю, а застосування оригінальних методів обробки дає нове уявлення про досліджувані поверхні.. Дослідження показали, що випромінення міліметрового діапазону взаємодіє з відкритими ґрунтами і, особливо, з верхнім шаром рослинного покриву, сантиметрове випромінення проникає всередину шару рослинності, досягаючи ґрунту, дециметрове і метрове випромінення практично не зазнає впливу рослинності і проникає в ґрунт на глибину, яка залежить від діелектричних властивостей ґрунту. Синхронне зондування у всіх цих діапазонах забезпечує пошарове спостереження ґрунтів і рослинного покриву, що дозволяє по-новому вирішувати завдання дистанційного зондування аграрних територій [83].

3.2 Експериментальні результати активно–пасивного радіофізичного дистанційного зондування проявів підтоплень і передвісників самозаймань на осушених ґрунтах

3.2.1 Виявлення та ідентифікація проявів підтоплення на ґрунтах покритих рослинністю

Для проведення натурних експериментів з відпрацювання методик моніторингу прояви підповерхневого перезволоження ґрунтів був обраний ряд тестових полігонів в зоні Ніжинського району Чернігівської області, в районі населених пунктів Крути - Пам'ятне, Хороше Озеро, Омбиш. (Рисунок 3.1) [84]. Район проведення натурних експериментів характеризується наявністю залізниці і автомобільних доріг різної категорії, сільгоспугідь, лісових масивів, болот, річок і розгалуженої меліоративної системи. Регіон характеризується значною заболоченністю. Рівень ґрунтових вод знаходиться досить близько до поверхні. Існуюча система меліоративного водовідведення, яка давала можливість раніше знизити рівень підповерхневих вод, і, відповідно, істотно зменшити площу перезволожений внаслідок цього земель і площ, зайнятих болотами, в даний час в значній мірі занедбана. Значна частина дренажних каналів захаращена, заросла очеретом, і не вирішує завдань, покладених на меліоративну систему.

Таким чином, обраний район має значну кількість проявів типових процесів підтоплення, заболочування полів і лісів, 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.

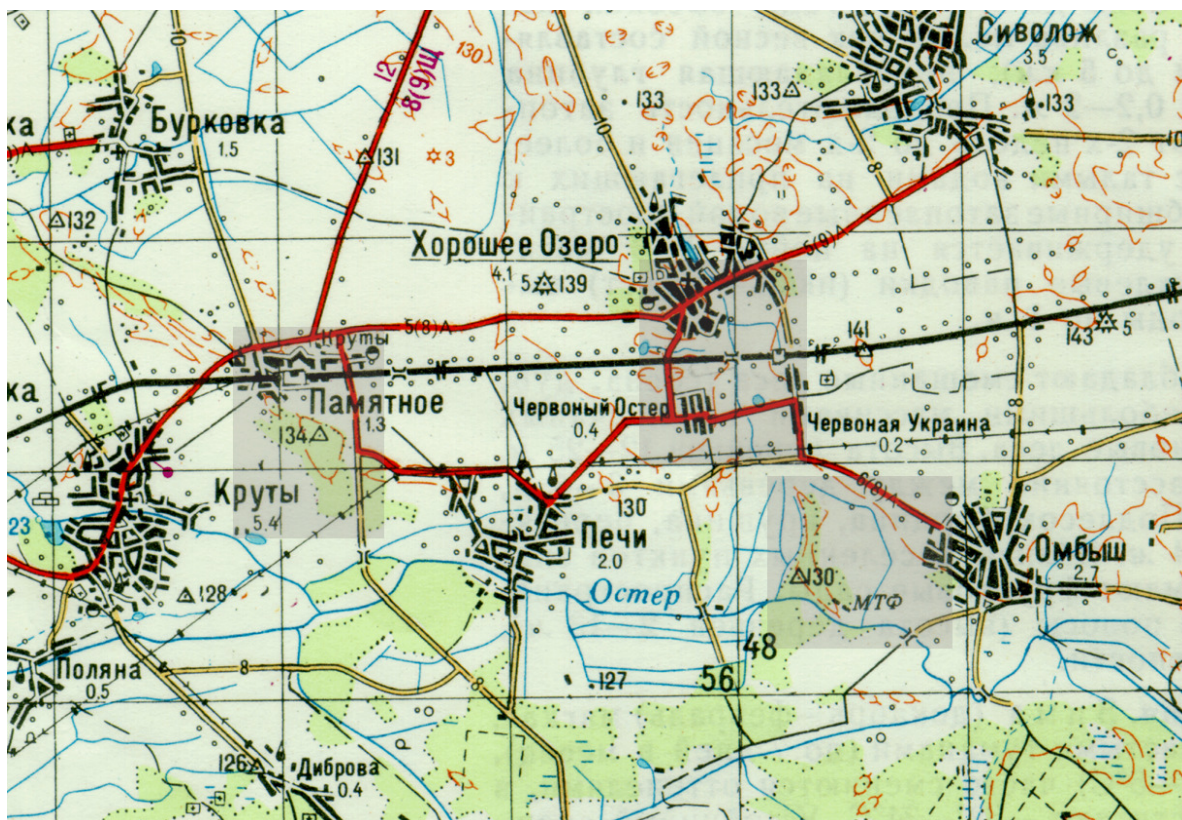


Рисунок 3.1 – Район проведення натурного експерименту в зоні Ніжинського району Чернігівської області, вказані тестові полігони в районі населених пунктів Крути - Пам'ятне, Хороше Озеро, Омбиш

3.2.2 Врахування впливу рослинного покриву на результати радіотеплового зондування

Для оцінки впливу рослинного покриву на результати добового радіотеплового зондування необхідно коректно враховувати основні фактори, що впливають на формування термальних ІЧ (ТІЧ) зображень підстильної поверхні при дистанційному зондуванні (рис. 3.2).

На рисунку 3.2б представлені основні (в значеннях, усереднених за рік) потоки випромінення, що формують тепловий баланс Землі [85], розгляд яких, дозволяє провести їх оцінку. Радіотеплові (ТІЧ) зображення, одержувані при дистанційному зондуванні ІЧ сенсорами (сканерами або тепловізорами), в основному формуються під впливом теплового випромінення (довгохвильова радіація, з довжиною хвиль від 4 до 45 мкм), що генерується системою «грунт-рослинність» (кількісно залежить від температури і коефіцієнта

довгохвильового випромінення системи), а також під впливом відбиваного цією системою довгохвильового «противипромінення атмосфери» ([86]) спрямованого до землі (кількісно залежить від довгохвильового альбедо елементів системи) [87].

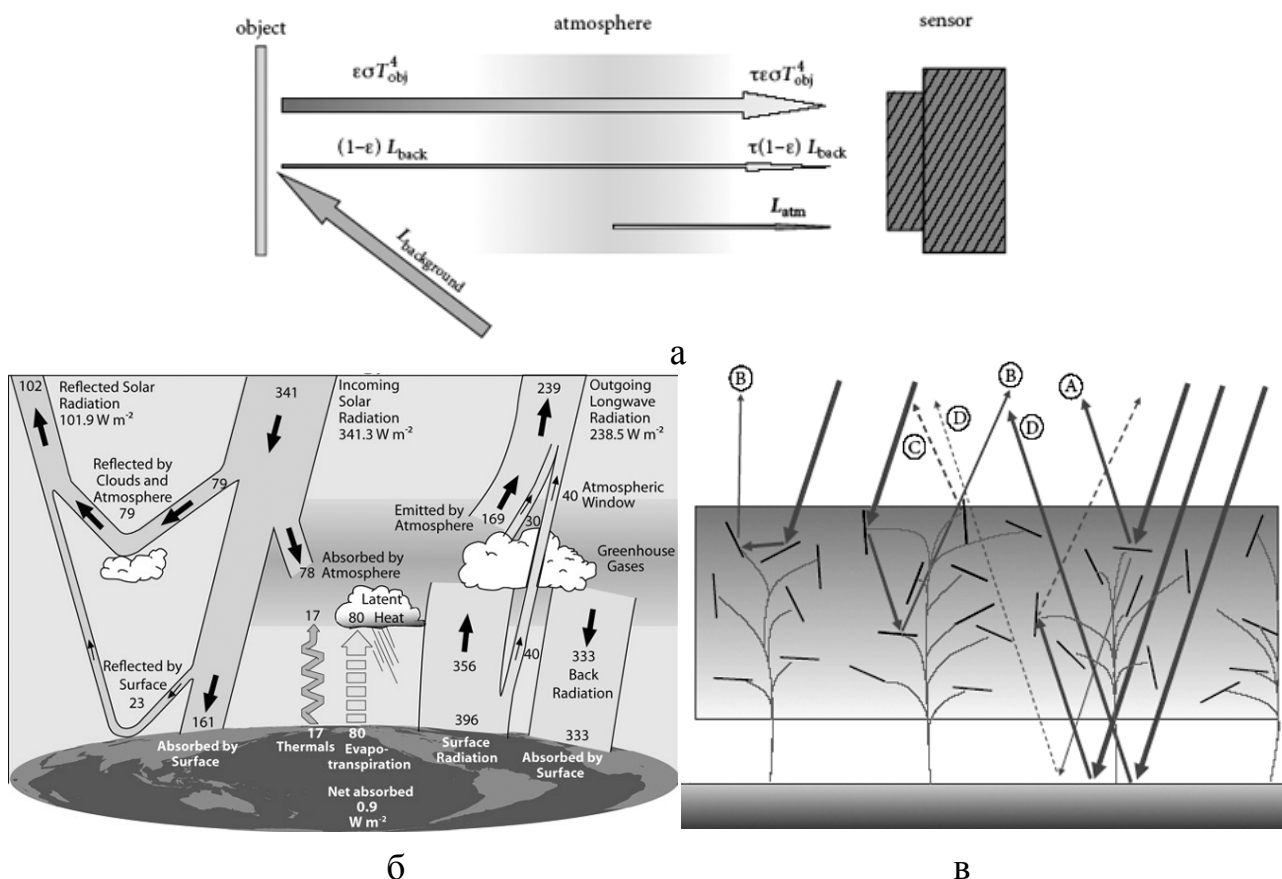


Рисунок 3.2 – Фактори, що впливають на формування ТІЧ зображень.

- а - формування теплового потоку реєструемого ІЧ сенсором;
- б - основні потоки випромінення, що формують тепловий баланс Землі;
- в - розсіяння і поглинання сонячного випромінення в системі «грунт - рослинність» з випадковою орієнтацією листя

При цьому, основний нагрів елементів системи «грунт - рослинність», а також частковий нагрів утворень атмосфери (хмари, пил і атмосферні гази, які генерують «противипромінення атмосфери» нагріваючись при інсоляції, а також відбиваючи назад теплове випромінення землі), відбувається в денний час за рахунок короткохвильового сонячного випромінення (прямого і розсіяного в атмосфері) в спектральному діапазоні від 0,1 до 4 мкм і кількісно

залежить від короткохвильового альбедо цих утворень, стану атмосфери, покриття хмарами і тому подібне. У нічний же час основним джерелом нагрівання елементів системи є залишкове тепло, накопичене поверхнею ґрунту в денний час, теплові властивості ґрунту і теплові потоки в глибині землі, а також в меншій мірі нічне «противипромінення атмосфери».

Тепловий потік від досліджуваної поверхні, що реєструється ТІЧ сенсором, згідно [88] може бути представлений як:

$$L = \tau[\varepsilon\sigma(T_s)^4 + (1-\varepsilon)L_{background}] + L_{atm}, \quad (3.1)$$

де τ - коефіцієнт ослаблення довгохвильового випромінення в атмосфері, ε - коефіцієнт довгохвильового випромінення досліджуваної поверхні, σ - постійна Больцмана, T_s - температура поверхні, $L_{background}$ - противипромінення атмосфери, спрямоване до Землі, L_{atm} - тепловий потік, що емітується шаром атмосфери між поверхнею і ТІЧ сенсором (рис.3.2).

Енергетичний баланс відкритої (не покритої рослинністю) поверхні Землі може бути представлений у вигляді [15]:

$$(1-\alpha_{shw})L_{\Sigma shw} = L_{efflw} + L_{conv} + L_{ev} + L_{soil}, \quad (3.2)$$

де $L_{\Sigma shw}$ - потік сумарної короткохвильової радіації у земної поверхні, α_{shw} - короткохвильове альбедо, L_{efflw} - ефективне довгохвильове випромінення Землі (з урахуванням противипромінення атмосфери), L_{conv} - конвективний потік тепла в повітря, L_{ev} - потік тепла, що витрачається на випаровування, L_{soil} - потік тепла в ґрунт.

З (3.2) добре видно, що для відкритого ґрунту варіації короткохвильового і довгохвильового альбедо його поверхні, коефіцієнтів теплопоглинання, теплоємності, теплопровідності і тепловипромінення (викликані, в тому числі, змінами її вологості) безпосередньо відображаються на інтенсивності реєструемого ТІЧ випромінення.

У разі ж ґрунту вкритого рослинністю все набагато складніше. Для загального випадку ґрунту, вкритого рослинністю з випадково орієнтованим листям (рис. 3.2в), при інсоляції в денний час спостерігається одноразове (А), дво- і багаторазове (В, С) відбиття з частковим поглинанням

короткохвильового сонячного випромінення, а також часткове проникнення його до ґрунту (D) [88]. Подібні процеси багаторазового розсіювання і абсорбції відбуваються в такій складній системі та при нічній генерації довгохвильового ІЧ випромінення, що робить вельми складним розрахункове визначення реальних коефіцієнтів випромінення.

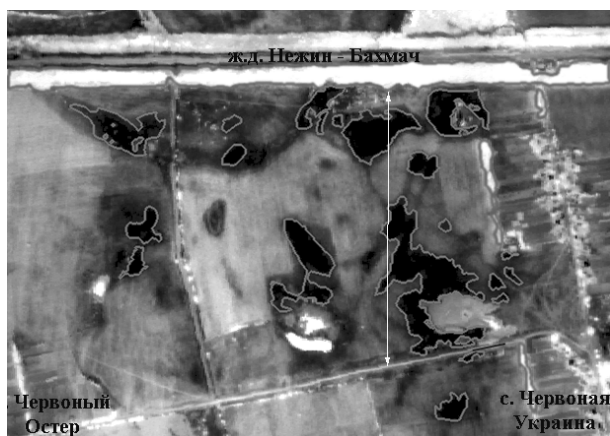
У [89] розглянуто результати експериментів по визначенню розподілу температур «типу інсоляція» (вдень) і «типу випромінення» (вночі) для ґрунту, вкритого рослинністю з переважно горизонтальною орієнтацією листя і переважно вертикальної, в залежності від висоти рослинності. Показано, що в режимі інсоляції шар рослинності з переважно горизонтальною орієнтацією листя висотою більше 30-40 см вже прогрівається значно сильніше ґрунту, допускаючи до нього все менше сонячного випромінення. Для рослинності з переважно вертикальною орієнтацією листя подібний ефект починає проявлятися при висоті рослинності більше 100-120 см. Але максимумами температури тут не такі великі, що можна пояснити проникненням вітру, що перемішує нижні шари повітря.

У режимі випромінення картина зовсім інша - для рослинності з переважно горизонтальною орієнтацією листя зберігаються більш-менш характерні криві розподілу температури по висоті «типу випромінення», при цьому ґрунт вихолоджується (тобто віддає тепло) істотно менше ніж відкритий ґрунт. Для рослинності з переважно вертикальною орієнтацією листя випромінення відбувається і з поверхні ґрунту, і з поверхні травостою, і з його глибини.

Ці результати, принципово не виключають можливість дистанційного спостереження теплових аномалій вкритого рослинністю ґрунту, викликаних його перезволоженням. Необхідно також взяти до уваги, що ці вимірювання проводилися для рослинності що розвивається в режимі вегетації, при якому на розподіл температур в системі «ґрунт - рослинність» активно впливають потоки як явного, так і прихованого тепла.

Для перевірки можливості виявлення і оцінки теплових аномалій ґрунту, вкритого рослинністю, була проведена тематична обробка і 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 [90, 91]. На рисунку 3.3 представлена ілюстрація результатів тематичної обробки.

На рисунку 3.3а представлено нічне (9.10.2004, близько 23 год., в умовах сухої осені) радіотеплове (ТІЧ) зображення ділянки полігону біля п. Хороше Озеро, обмеженого залізницею Ніжин - Бахмач, селами Червоний Остер і Червона Україна. Зображення отримане при проведенні експериментів в умовах сухої осені, на ньому спостерігається ряд ділянок значно зниженого (щодо оточення) значення інтенсивності нічного ТІЧ випромінення (на зображенні оконтурені ділянки найбільш інтенсивного зниження). Ці ділянки відповідають зонам 1, 2 і 6 на рисунку 3.3д, де зображена інтерпретаційні карта ділянки полігону. Причиною таких значних негативних контрастів нічного ТІЧ випромінення в межах цих ділянок, скоріш за все, служить істотно підвищена в результаті підтоплення вологість ґрунту, тому що викликає її підвищену теплоємність і теплопровідність, в порівнянні з тими ділянками, що оточують. Однак, подібний ефект (судячи з результатів експериментів [89]) може бути викликаний низкою інших причин, наприклад, і більш щільним покриттям цих зон рослинністю (що веде до зменшення ефективного коефіцієнта довгохвильового випромінення системи ґрунт - рослинність, а також її залишкової температури в нічне час за рахунок меншого нагріву ґрунту в режимі інсоляції короткохвильовим сонячним випроміненням вдень). Така неоднозначність викликає необхідність виявлення на отриманих добових і сезонних зображеннях ділянок, вкритих рослинністю, і оцінки ступеня спотворення нею корисної інформації щодо перезволоження ґрунту.



а



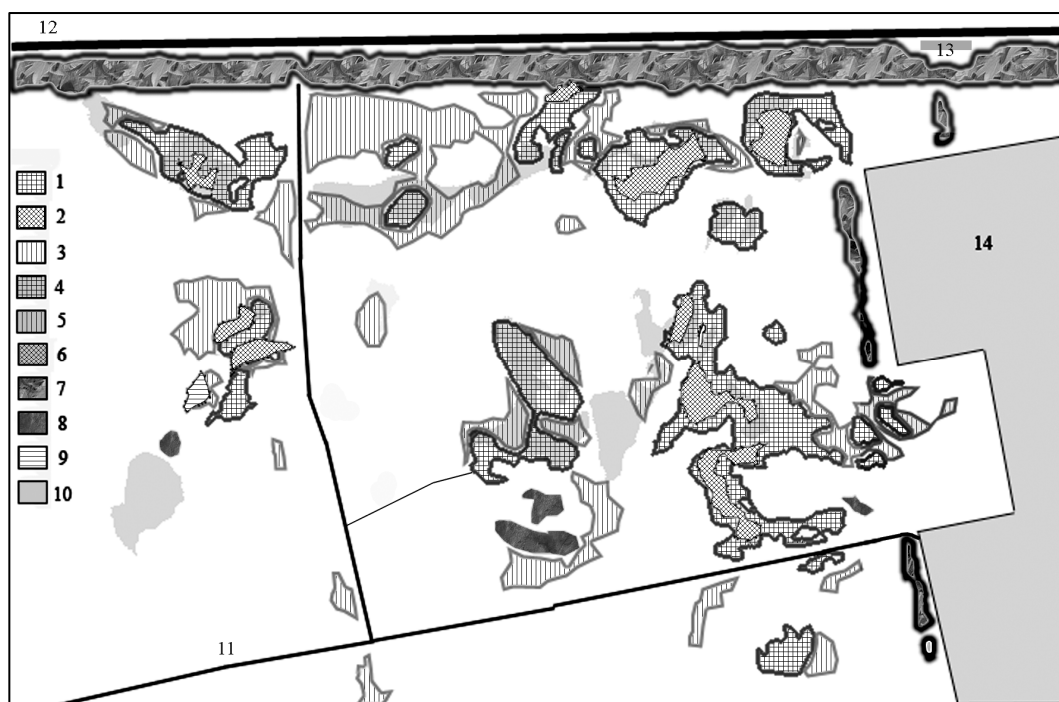
б



в



г



д

Рисунок 3.3 – Результаты тематичної обробки даних отриманих в районі п. Хороше Озеро в 2004-му році

На наведеному на рис.3.3б денному (8.10.2004, близько 10 год. дня, що передував нічній зйомці) радіотепловому зображенні цієї ж ділянки явно спостерігаються прояви підвищеного значення інтенсивності ТІЧ випромінення (оконтурені ділянки найбільш інтенсивного прояву, відповідають зонам 2, 6 і 8 на рисунку 3.3д). А на представленому на рис.3.3в денному (4.12.2004, близько 11 год., отримане в умовах безсніжної зими з незначними від'ємними температурами повітря) зображенні цієї ж ділянки розрізняються елементи поверхневої рослинності (оконтурені ділянки, візуально ідентифіковані як покриті більш високим луговим травостоем, зони 4, 5, 6 і 10 на рисунку 3.3д). Наявність високого лугового травостою також підтверджується присутністю зон суттєвої анізотропії (за рахунок вилягання в напрямку переважаючих вітрів) на радіолокаційних зображеннях (рис. 3.3г), при опроміненні з південного боку (зверху) і з північної (внизу) під час проведення зимової зйомки. На радіолокаційних зображеннях (рис. 3.3г) оконтурені ділянки, інтенсивність розсіяння радіохвиль на яких істотно відрізняється при різних напрямках опромінення.

На рисунку 3.3д представлена інтерпретаційна карта ділянки полігону біля п. Хороше Озеро на якій позначені: 1- ділянки інтенсивних проявів підтоплення на нічних ТІЧ зображеннях; 2- ділянки інтенсивних проявів підтоплення на нічних ТІЧ зображеннях що збігаються по положенню з ділянками підвищених значень ІЧ випромінення на денних (добових) зображеннях; 3- ділянки менш інтенсивних проявів підтоплення на нічних ТІЧ зображеннях; 4- ділянки інтенсивних проявів підтоплення на нічних ТІЧ зображеннях що збігаються по положенню з ділянками, візуально ідентифікованими на зимових ТІЧ зображеннях як покриті інтенсивним травостоем; 5- ділянки менш інтенсивних проявів підтоплення на нічних ТІЧ зображеннях що збігаються по положенню з ділянками, візуально ідентифікованими на зимових ТІЧ зображеннях як покриті інтенсивним травостоем; 6- ділянки інтенсивних проявів підтоплення на нічних ТІЧ зображеннях що збігаються по положенню з ділянками підвищених значень

ТІЧ випромінення на денних (добових) зображеннях і з ділянками, візуально ідентифікованими на зимових ТІЧ зображеннях як покриті інтенсивним травостоем; 7- лісопосадки; 8- відкриті водойми; 9- ділянки менш інтенсивних проявів підтоплення на нічних ТІЧ зображеннях що збігаються по положенню з ділянками підвищених значень ТІЧ випромінення на денних (добових) зображеннях; 10- ділянки, візуально ідентифіковані на зимових ТІЧ зображеннях як покриті інтенсивним травостоем; 11- канали меліоративної системи; 12- зал. Ніжин - Бахмач; 13- зал. станція Хороше Озеро; 14- територія селища Червона Україна. Як видно на інтерпретаційній карті, зони підвищеного значення інтенсивності денного ТІЧ випромінення добової осінньої зйомки і зони на зимових зображеннях, візуально ідентифіковані як покриті високим луговим травостоем, в значній мірі перекриваються.

Значне підвищення інтенсивності денного ТІЧ випромінення може бути пов'язано з меншим (щодо фону) короткохвильовим альбедо, що викликає «перегрів» цих зон при інсоляції, або з великим коефіцієнтом довгохвильового випромінення або наявністю в цих зонах прихованих джерел тепла. Останні два припущення спростовуються тим фактом, що на нічних радіотеплових зображеннях (рис. 3.3а) в цих зонах відсутні будь-які ознаки зростання інтенсивності ТІЧ випромінення. При цьому аномальне зменшення короткохвильового альбедо системи травостій-грунт, цілком ймовірно, відбулося за рахунок зміни стану верхнього шару рослинного покриву в цих зонах.

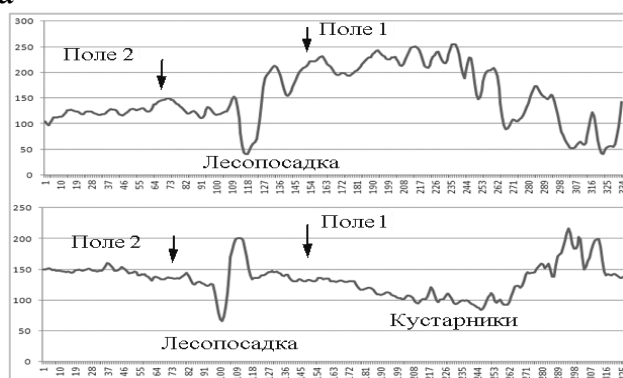
Для експериментального визначення ступеня впливу локального «перегріву» верхнього шару травостою при інсоляції на достовірність визначення зон перезволоження ґрунту по нічним радіотепловим зображенням був проведений аналіз отриманих добових зображень для інших полігонів (рисунок 3.4).



а



б



в

Рисунок 3.4 – Результаты тематичної обробки даних отриманих на полігоні між п. Печі і п. Омбиш в 2004-му році

При цьому виділялися зони ґрунту вкритого травостоєм з аномально підвищеною інтенсивністю ТЧ випромінення в режимі інсоляції. На рис. 3.4а [90] в якості прикладу наведені ТЧ зображення двох покритих травостоєм суміжних полів біля р. Остер, розташованих на полігоні між селищами Печі і Омбиш.

Дані отримані 8.10.2004 в денний час (рис. 3.4а зверху) і 9.10.2004 в нічний (рис. 3.4а в середині). Крім того, аналізувалося оптичне зображення ШСЗ SPOT цієї ж ділянки (рис. 3.4а внизу). На денному зображенні яскраво виділяється (на полі 1) зона зі значно підвищеною (щодо вкритого подібним луговим травостоєм поля 2) інтенсивністю ТЧ випромінення в режимі інсоляції. У той же час, на нічному ТЧ зображенні практично не спостерігається залишкового впливу термального «перегріву» в режимі інсоляції. Це добре помітно і на рядковому записі перерізу (рис. 3.4в) уздовж стрілки на ТЧ зображеннях (рис. 3.4а). При цьому, на нічному зображенні, в нижній частині зони з підвищеною інтенсивністю ТЧ випромінення в режимі інсоляції, яка покрита чагарниками, добре спостерігаються ефект зменшення прогрівання ґрунту за рахунок його часткового екранування. Рядкові зображення (рис.3.4б) перерізів нічного (зверху) і денного (знизу) ТЧ зображень полігону у п. Хороше Озеро (рис 3.3а і 3.3б), зазначених стрілками, також демонструють відсутність залишкового впливу підвищеного значення інтенсивності денного ТЧ випромінення верхнього шару рослинності в режимі інсоляції на відображення зон перезволоженого ґрунту в нічний час [90].

Таким чином, 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 ТЧ зображеннях, на відміну, наприклад, від лісопосадок, які практично повністю такі аномалії екранують. Ці результати не суперечать даним [89].

На відміну від лугового травостою, яким в основному вкриті перезволожені через підтоплення ділянки ґрунту, смуги скошеної трави і соломи, що залишилися на ґрунті після транспортування (волочіння) володіють не тільки підвищеною (щодо ґрунту вкритого стернею) інтенсивністю термального ІЧ випромінювання в режимі інсоляції, але і зниженою в режимі випромінювання вночі (рис. 3.5б). При цьому, значне зниження інтенсивності ТІЧ випромінювання в режимі інсоляції цих утворень, що знаходяться в зоні тіні від невеликого хмари, свідчить про те, що основним чинником, що викликає відмінності в радіотепловому випромінюванні, є пряме короткохвильове сонячне випромінювання і властивості покриття ґрунту в них (альbedo, щільність, теплоємність, теплопровідність і тому подібне). Хмара частково екранує лише пряме сонячне випромінювання, а розсіяне короткохвильове сонячне випромінювання і довгохвильове противипромінювання атмосфери, що мають розсіяний характер, - ні.

Для визначення температурних контрастів відкритих ділянок підстильної поверхні можуть бути використані т.зв. калібрувальні зони, тобто ділянки з відомими ϵ - коефіцієнтами довгохвильового випромінювання. Для полігону, на якому проводилися дослідження, такими калібрувальними зонами можуть слугувати ділянки відкритої води, бетонного покриття польового аеродрому (1 на рис.3.5) і відкритої ділянки шосе, вкритого асфальтом (2 на рис.3.5). Переважними є дані нічної ТІЧ зйомки, тому що в нічний час противипромінювання атмосфери ($L_{background}$) значно слабше ніж в денний [86]. До того ж, противипромінювання атмосфери в діапазонах «прозорості атмосфери» (наприклад 8-12 мкм, в якому працює ІЧ сканер «Малахіт-1») залежить, в основному, від хмарного покриття атмосфери на різних висотах [92].

Використовуючи вираз (3.1), локальні метеовідомості про температуру води у відкритих водоймищах ($+8^{\circ}\text{C}$ в нічний час) і дані про коефіцієнти довгохвильового випромінювання [93, 94] води, бетону і асфальту, можна оцінити значення термальних контрастів, а також температуру поверхні бетонного покриття як $T_n \approx 2,5^{\circ}\text{C}$, а асфальтового покриття автошляху - $T_n \approx 3,6^{\circ}\text{C}$, що

узгоджується з даними локальних метеовимірів для поверхні ґрунту 2°C - 3°C в нічний час. При цьому виміряні температурні від'ємні контрасти (щодо оточуючих) ділянок ґрунту, вкритих солом'яною плівкою, що залишилася на полях після транспортування (волочіння), досягають в нічний час $\Delta T_n \approx 1^{\circ}\text{C}$, а ділянок з термальними аномаліями ґрунту, викликаними перезволоженням ґрунту в результаті підтоплення досягають - $\Delta T_n \approx 5-6^{\circ}\text{C}$.

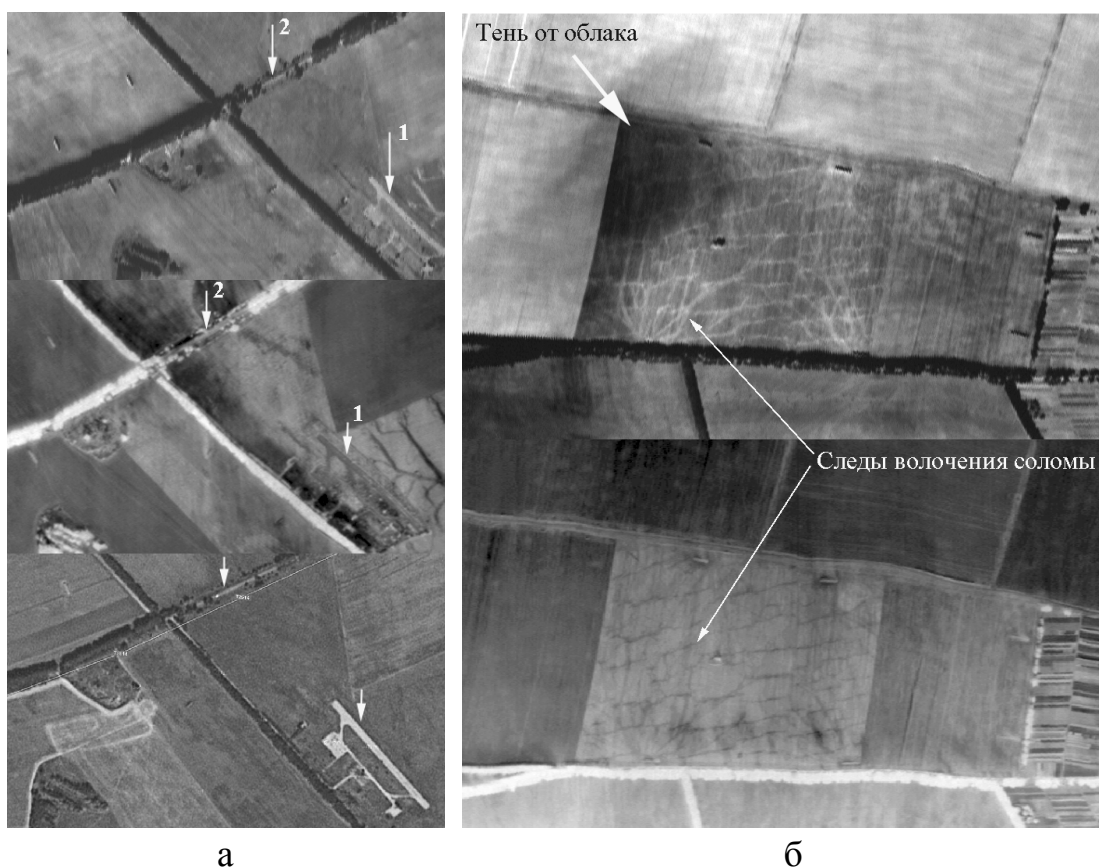


Рисунок 3.5 – Використання калібрувальних зон для оцінки температурних контрастів ТПЧ зображень

Таким чином, в результаті обробки і аналізу (з урахуванням особливостей теплового обміну в системі ґрунт-рослинність) експериментальних даних добової і сезонної радіолокаційно - радіотеплової зйомки засобами авіаційного комплексу АКДЗ-30 ділянок підтоплення ґрунтів вкритих рослинністю показано, що в умовах сухого осіннього сезону, коли вегетація в рослинності в основному припинена, реєструється різний вплив рослинного покриву на результати дистанційного зондування. При цьому, спостерігається

аномальна зміна короткохвильового альбедо верхнього шару лугового травостою яким в основному вкриті перезволожені через підтоплення ділянки ґрунту, не робить істотного впливу на достовірність ідентифікації термальних аномалій самого ґрунту викликаних перезволоженням ґрунту в результаті підтоплення. У той же час, ділянки скошеної трави і соломи, що залишилися на полях після транспортування (волочіння) викликають термальні аномалії подібні за знаком з термальними аномаліями ґрунту, викликаними перезволоженням ґрунту в результаті підтоплення, але значно відрізняються за значеннями, що дозволяє їх надійно ідентифікувати. Таким чином, сухий осінній сезон є тим періодом, коли можливе ефективне проведення робіт з дистанційного аерокосмічному радіолокаційно - радіотеплового (ТІЧ) моніторингу проявів підтоплення територій.

На рисунку 3.6 наведені зображення (а - ТІЧ денний, б - ТІЧ нічний і в - РБО) тестового полігону в районі сел. Хороше Озеро, на яких стрілками відзначений ряд стовпців, що проходять відповідно через одні й ті ж ділянки полів на різних зображеннях. Рядкові зображення перерізів цих стовпців представлені на рисунку 3.7. Лівий стовпець пари 1 (а - ТІЧ денний, б - ТІЧ нічний) проходить (послідовно знизу вгору) через лісопосадки біля залізної дороги, поле зі стернею від прибраної пшениці, лісопосадку, городи з різними культурами; правий стовпець пари 1 (в - ТІЧ денний, г - ТІЧ нічний) проходить через лісопосадки біля залізниці, поле зі стернею від прибраної пшениці, лісопосадку, поле сходів озимої пшениці. Стовпець 2 (д - ТІЧ денний, е - ТІЧ нічний) проходить через відкрите водоймище, заболочений ділянку, занедбане поле з ознаками підтоплення і лісопосадки біля залізниці; стовпець 3 (ж - ТІЧ денний, з - ТІЧ нічний) проходить через прибране поле зі слідами транспортування (волочіння) соломи, частково поросле бур'яном; лівий стовпець 1 (і - РБО) і правий стовпець 1 (к - РБО).

Випадання опадів у районі досліджень за час авіаційної зйомки і протягом попередніх двох тижнів не спостерігалось.

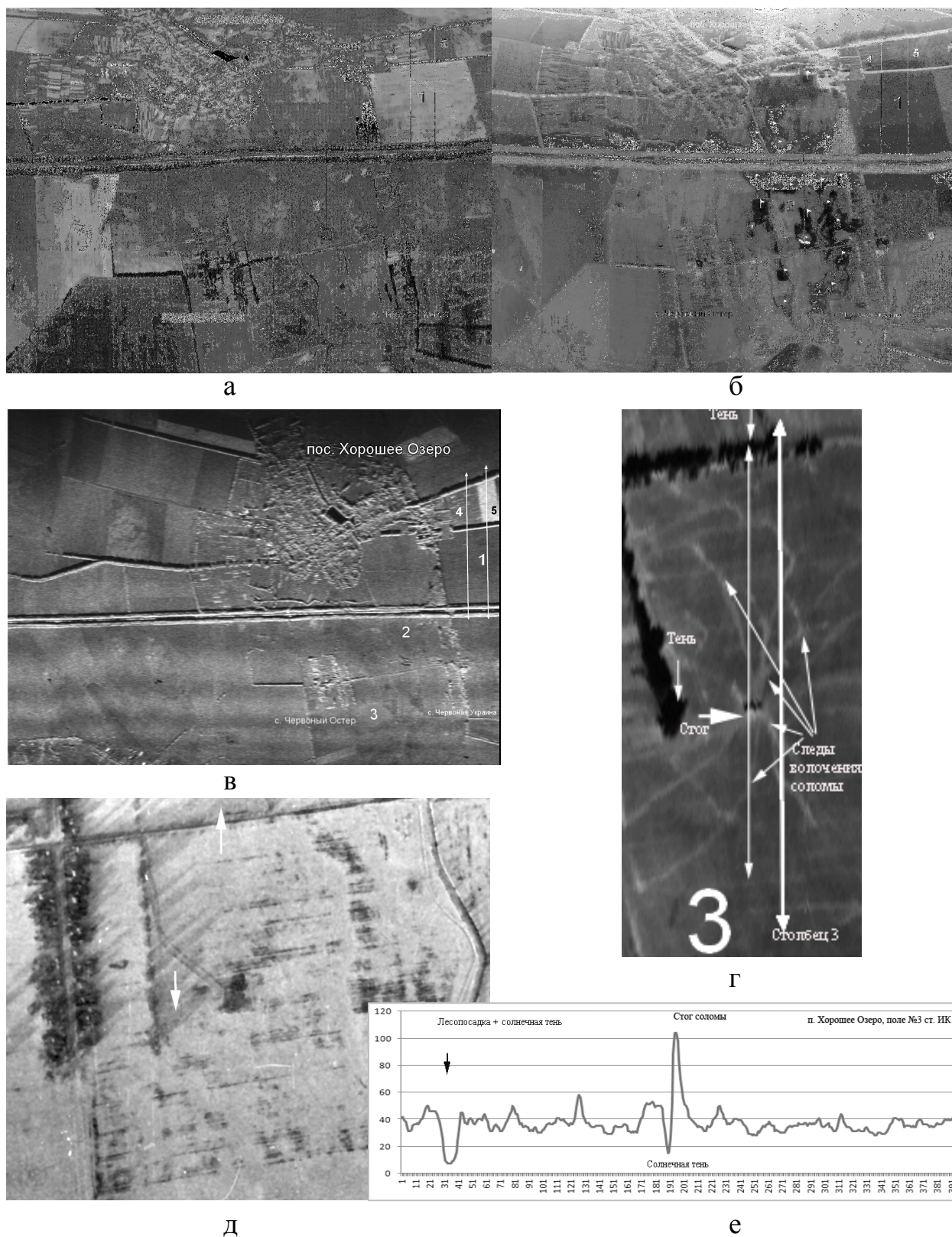


Рисунок 3.6 – Ілюстрація ділянок аналізу перерізів інтенсивності на зображеннях тестового полігону в районі сел. Хороше Озеро

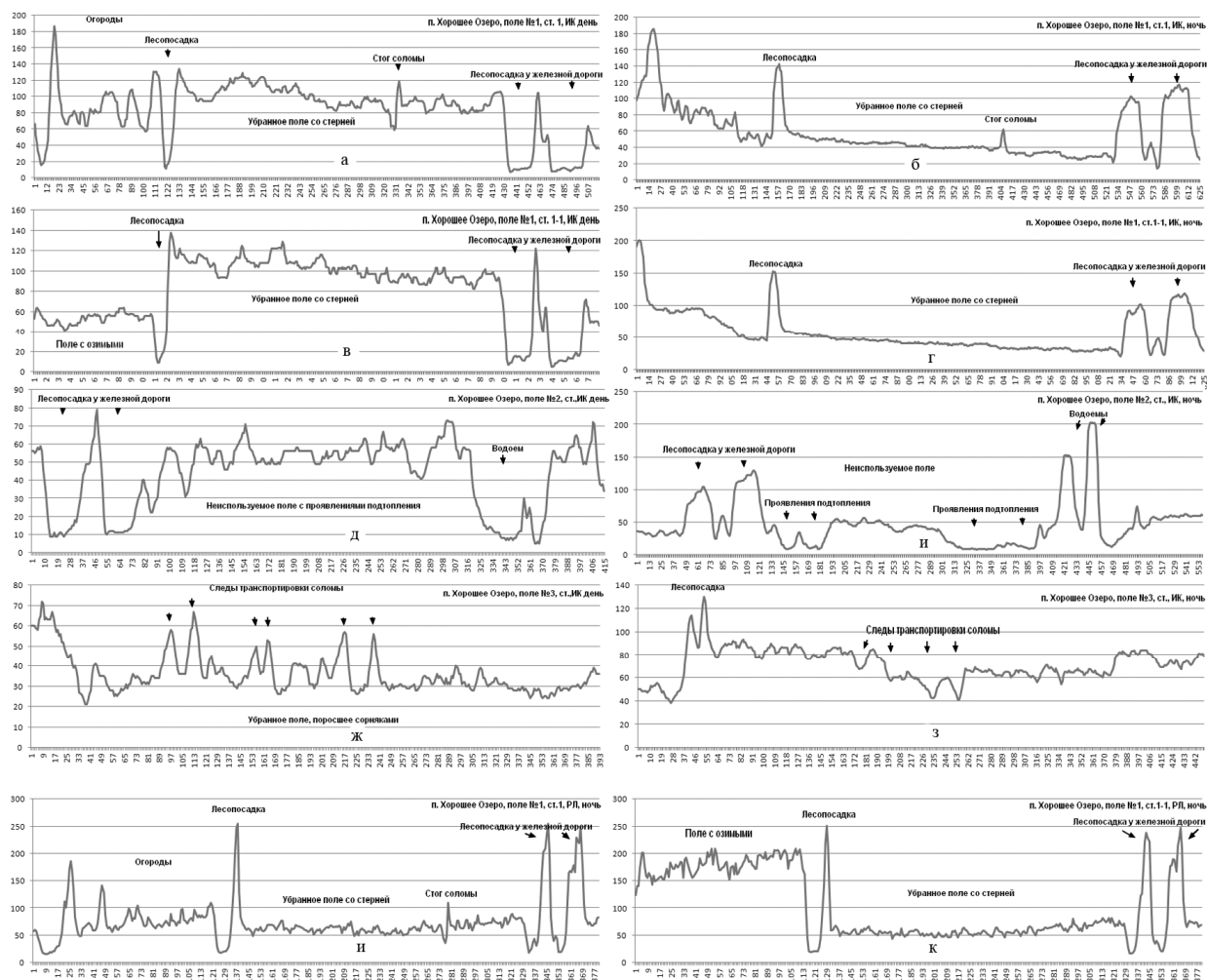


Рисунок 3.7 – Рядкові зображення перерізів стовпців ТІЧ і РБО зображень, зазначених на рис.3.6

Зіставлення ТІЧ (денних і нічних) і РБО зображень, а також перерізів стовпців цих зображень, що проходять через одні й ті ж ділянки полів, дозволяє прийти до висновку, що:

– денні радіотеплові ТІЧ зображення (рис.3.6) в значній мірі формуються під впливом розсіяного земною поверхнею сонячного випромінювання і обумовлені відмінностями в альbedo полів і об'єктів. Наприклад, реєстроване ТІЧ випромінювання від поля №1, вкритого стернею злакової культури світло-жовтого кольору (рис.3.7, 3.7В), значно перевищує середнє випромінювання поля №3, яке після збирання злакової культури поросло бур'янами і має зелений відтінок (рис.3.7ж), на ньому чітко проявляються сліди волочіння соломи, які мають жовтий колір і значно більшу інтенсивність ТІЧ

випромінення. Про рівень розсіяного сонячного випромінення можна судити зіставляючи рівень ТІЧ випромінення від поля №3 і від зони сонячної тіні, розташованої за лісопосадками на його кордонах (рис.3.6г, 3.6д, 3.6е);

– нічні радіотеплові ТІЧ зображення (рис.3.7б) також демонструють значний залишковий вплив денного впливу сонячного випромінення на їх тепловий стан - наприклад, середнє теплове випромінення поля №1 (рис.3.7б, 3.7г) (яке в денний час найбільш інтенсивно розсіювало сонячне випромінення) значно нижче ніж у поля №3 (рис.3.7з), на якому також добре виділяються сліди волочіння соломки (як більш холодні);

– сухий осінній сезон є сприятливим періодом для проведення радіолокаційно - радіотеплового моніторингу проявів підтоплення територій, тому що вони чітко (рис.3.7) проявляються на нічних ТІЧ зображеннях (відзначені прапорцями, в основному на полях що не використовуються, наприклад на полі №2). При цьому РБО зображення (рис.3.6в) свідчить, що вегетація польової бур'янистої рослинності, що покриває поля які не використовуються, наприклад поле №2, практично припинилася, РБО тут його практично «не бачить». А варіації рослинності, де вегетація ще не припинилася (на городах з різними пізніми культурами поля №4, і поля №5 з порослю озимої пшениці) спостерігаються на зображеннях РБО досить добре (рис.3.7, 3.7к). Судячи по нічному ТІЧ зображенню городів на полі №4 і з протилежного боку селища Хороше Озеро рослинність, вегетація якої триває, могла б істотно замаскувати прояви підтоплень.

Проведення натурних авіаційних експериментів супроводжувалося наземними контактними вимірюваннями вологості ґрунту (що підтвердили наявність підтоплень в дистанційно виявлених ділянках [95]), при цьому отримувались також метеовідомості по температурі ґрунту, води і повітря в нічних і денних умовах. Враховуючи той факт, що найбільш стабільним опорним значенням є температура води в водоймах ($+9^{\circ}\text{C}$ вдень і $+8^{\circ}\text{C}$ вночі), а температура поверхні ґрунту змінювалася від $+13^{\circ}\text{C}$ вдень до $+3^{\circ}\text{C}$ вночі, і вважаючи, що ґрунт поля №1 (має найбільше альбедо) в найменшій мірі

накопичив тепла вдень за рахунок сонячного випромінення і тому температура його поверхні вночі найбільш близька до вимірної на метеостанції, були проведені оцінки температурних контрастів (щодо середніх по відповідному полю на нічних ІЧ зображеннях) зон прояву підтоплення - ($3,5^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}$) і зон які відрізняються альбедо, наприклад, слідів волочіння соломи - ($2^{\circ}\text{C} - 3^{\circ}\text{C}$).

Співставлення цих результатів дозволяє зробити висновок, що від'ємні температурні контрасти самі по собі не можуть служити надійною ознакою визначення проявів підтоплень по інтенсивності нічного ІЧ випромінення, тому що вони можуть бути викликані різними факторами. Надійне визначення можливо лише на підставі системи ознак, що враховують вплив накопичення тепла в ґрунті за рахунок сонячного випромінення, варіацій теплового потоку в глибину ґрунту (викликаних змінами підповерхневої вологості) і шару рослинності над ґрунтом.

3.3 Особливості дистанційного зондування активно-пасивним методом проявів підповерхневого саморозігріву торфуги в переосушених дренажних раніше заболочених ґрунтах

Як відомо [3], в шарах торфуги що перебувають в заболочених ґрунтах дуже ймовірно виникнення підземних пожеж. Торф'яні пожежі зазвичай виникають, коли рівень ґрунтових вод знижується, і торф'яні пласти висихають. Небезпека торф'яної пожежі полягає в тому, що горить торф'яний шар глибоко під землею. Осередок тління може перебувати на глибині від 0,3 до декількох десятків метрів. Торф'яні пласти можуть горіти без доступу повітря з поверхні, що ускладнює гасіння торф'яних пожеж. Самозаймання торфуги завжди передують більш-менш тривалий процес низькотемпературного окислення та саморозігріву, швидкість якого визначається хімічною активністю торфуги, умовами притоку повітря і можливістю віддачі тепла в навколишнє середовище. Схильність торфуги до самозаймання залежить від його ботанічного складу, ступеня розкладання і фізико-хімічних властивостей. За перші 30-40 діб температура в шарі торфуги підвищується на $3-5^{\circ}\text{C}$, в наступні 10-30 днів

зростання температури прискорюється від $0,5^{\circ}\text{C}$ до $4,5^{\circ}\text{C}$ на добу і більше. Самонагрівання скупчень торфу при температурах до 60°C - 65°C відбувається переважно в результаті життєдіяльності мікроорганізмів, а також окислення легко окислюємих продуктів їх життєдіяльності і відновлених речовин, які накопичуються в анаеробних умовах. При температурі, що перевищує 60°C , торф протягом декількох днів перетворюється в напівкокс, здатний енергійно взаємодіяти з киснем повітря. Тому подальше підвищення температури торфу відбувається переважно в результаті його окислення киснем і призводить до самозаймання торфу.

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 в приповерхневих шарах і 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, в [96] розглянута одновимірна задача теплопровідності. При цьому зроблено такі припущення: інтенсивність тепловиділення B_0 , обумовлена життєдіяльністю мікроорганізмів, що окислюють органічні речовини в центральній частині родовища, постійна в інтервалі глибин $z_1 - z_2$ і відсутня поза цією областю. Впливом вертикального конвективного переносу тепла можна знехтувати. Теплофізичні характеристики ґрунту, не залежать від глибини і постійні в часі. Нижня межа розглянутої області розташована глибше зони поширення сезонних коливань температури ґрунту. Тепловий потік над зоною низькотемпературного окислення та саморозігріву $-\lambda_a \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=1} = q_r + q_{ga}$, де q_{ga} - складова, обумовлена генерацією і перерозподілом теплового потоку в зоні низькотемпературного окислення та саморозігріву; q_r - регіональний тепловий

потік, що не порушений процесами низькотемпературного окислення та саморозігріву. Тепловий потік над фоном $-\lambda_b \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=1} = q_r$. Враховуючи, що при проведенні дистанційній ГЧ - зйомки радіометр дозволяє фіксувати радіаційну температуру поверхні, пов'язану з його термодинамічною температурою, співвідношенням $T_{rad} = \sqrt[4]{\varepsilon \frac{q_{ga}}{N}}$, де ε - коефіцієнт випромінюючої здатності підстильної поверхні, різниця миттєвих радіаційних температур поверхні над центром зони низькотемпературного окислення та саморозігріву і на навколишньому фоні дорівнює:

$$T_{rad}^a - T_{rad}^b = \sqrt[4]{\varepsilon^a} \left(T_e^a + \frac{q'_{ga} + q_r + q_m^a}{N^a} \right) - \sqrt[4]{\varepsilon^b} \left(T_e^b + \frac{q_r + q_m^b}{N^b} \right),$$

де $q_m = N(\Omega(t) - \Omega_r(t))$, $q'_{ga} = q_{ga} + B_0(z_2 - z_1)$, N - коефіцієнт теплообміну.

При еквівалентних умовах теплообміну і рівності випромінюючих здібностей підстильної поверхні на фоні і над аномальною зоною різниця $T_{rad}^a - T_{rad}^b$ представлятиме аномалію радіаційної температури, зумовлену складовою теплового потоку q'_{ga} , нерозривно пов'язаною з аномальною зоною низькотемпературного окислення та саморозігріву: $\Delta T_{rad} = T_{rad}^a - T_{rad}^b = \sqrt[4]{\varepsilon} \frac{q_{ga}}{N}$.

У разі ж ґрунту вкритого рослинністю все набагато складніше. У такій складній системі, як при інсоляції в денний час, так і під час нічної генерації довгохвильового ГЧ-випромінювання, відбуваються процеси багаторазового розсіювання й абсорбції. Це дає можливість дистанційного виявлення та ідентифікації проявів підповерхневих теплових аномалій в ґрунті в залежності від співвідношення реальних коефіцієнтів випромінювання і поглинання компонентів системи ґрунт–рослинний покрив–атмосфера.

Для визначення інтенсивності розсіювання радіолокаційних сигналів поверхнею суші вкритої рослинністю найбільш поширеною є модель покривної хмари [97], розроблена як для одношарового покриття, так і для багатшарових типів покривів різною рослинністю. Модель відпрацьовувалася для діапазону радіолокаційного зондування 8-18 ГГц і 35 ГГц.

У рамках даної моделі сигнал, відбитий від ґрунту, відчуває дворазове ослаблення через проходження крізь шар рослинності. Крім того, шар рослинності вносить свою компоненту в розсіяний сигнал через об'ємне розсіяння в ньому. Компоненти розсіяного ґрунтом і рослинністю сигналу можна вважати некогерентними і, якщо знехтувати внеском за рахунок багаторазового перевідбиття в шарі рослинності, то сумарна ПЕПР покриву $\sigma_{покp}^0(\theta) = \sigma_{расп}^0(\theta) + \sigma_{поч}^0(\theta)/L^2(\theta)$, де $\sigma_{расп}^0(\theta)$ - ПЭПР рослинності, $\sigma_{поч}^0(\theta)$ - ПЭПР границі рослинність-ґрунт, $L(\theta)$ - коефіцієнт ослаблення поля в шарі рослинності: $L(\theta) = 1/\chi(\theta) = 1/\exp(-k_z h \sec \theta)$, де $\chi(\theta)$ - коефіцієнт передачі енергії в шарі, k_z - погонне затухання в шарі, h - висота рослинного покриву, θ - кут падіння хвилі.

На частотах понад 8 ГГц при $\theta \geq 30^\circ$ питомий внесок рослинності виявляється переважаючим, в той час як на більш низьких частотах і при $\theta = 10 \dots 30^\circ$ більш помітним є внесок розсіяння ґрунтом, інтенсивність якого є функцією шорсткості і комплексної діелектричної проникності ґрунту ε , яка пов'язана з об'ємним змістом води ґрунту емпіричної моделлю Халлікайнена [98].

3.3.1 Експериментальні результати авіаційного моніторингу проявів підтоплень та підповерхневого саморозігріву на осушених ґрунтах

На рисунку 3.8а представлено нічне ТПЧ зображення ділянки раніше осушеного заболоченого ґрунту (розташованого в Ніжинському районі Чернігівської області України, ділянка обмежена з півночі селами Червоний Остер і Червона Україна, двома лісовими масивами і з півдня річкою Остер), отримане ТПЧ сканером «Малахит-1» комплексу АКДЗ-30 в нічний час сухого осіннього сезону 9.10.2004 [99, 100, 101].

Густота мережі дренажних каналів на цій ділянці свідчить, що раніше тут розташовувалося болото низинного типу (було відзначено ще на картах 1843 року [102]), яке було піддано процедурам осушувальної меліорації.

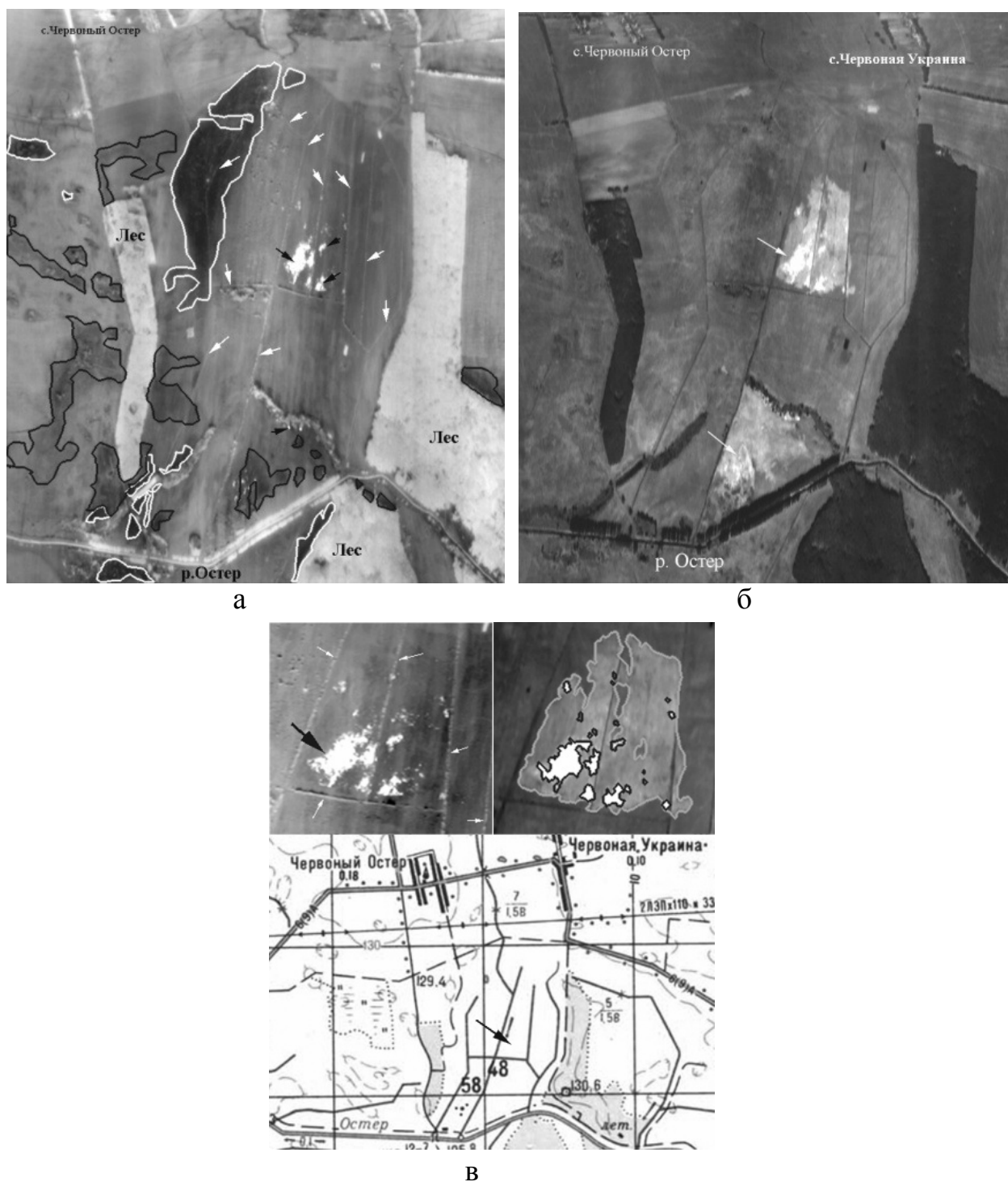


Рисунок 3.8 – Радіотеплове зображення ділянки заболоченого ґрунту

Інтенсивність ТІЧ випромінювання в цих зонах істотно перевищує випромінювання всіх інших утворень на зображенні, що свідчить про те, що тут розвиваються процеси пов'язані з виділенням тепла.

На рисунку 3.8б представлено радіотеплове зображення цієї ж ділянки заболоченого ґрунту, отримане ТІЧ сканером Малахіт-1 комплексу АКДЗ-30 в

денний час (близько 11 годин) під час проведення добового (послідовно вдень і вночі) моніторингу, на якому також чітко спостерігаються зони тепловиділення, відзначені стрілками білого кольору.

Крім того, на ньому спостерігаються відсутні на нічному зображенні зони підвищеного ТІЧ випромінення щодо навколишнього фону. На рисунку 3.8в наведені збільшені радіотеплові зображення зон тепловиділення і підвищеного ТІЧ випромінення в денний час (угорі ліворуч), в нічний час (вгорі праворуч) і карта досліджуваної ділянки (внизу). Максимальні температурні контрасти щодо навколишнього фону, що визначаються дистанційно, складають: для зон тепловиділення $\approx 9^{\circ}\text{C}$ вночі та $\approx 7^{\circ}\text{C}$ вдень, для зони підвищеного ТІЧ випромінення в денний час $\approx 1-2^{\circ}\text{C}$.

Зона тепловиділення не проявлюється у вигляді варіацій рослинного покриву ні на аерофотознімку (рисунок 3.9а), ні на ТІЧ зображенні, отриманому в зимових умовах без снігу (рисунок 3.9б), ні на радіолокаційному зображенні, отриманому РБО 8-мм діапазону комплексу АКДЗ -30 (рисунок 3.9в) в сухий осінній сезон одночасно з рисунком 3.8б.

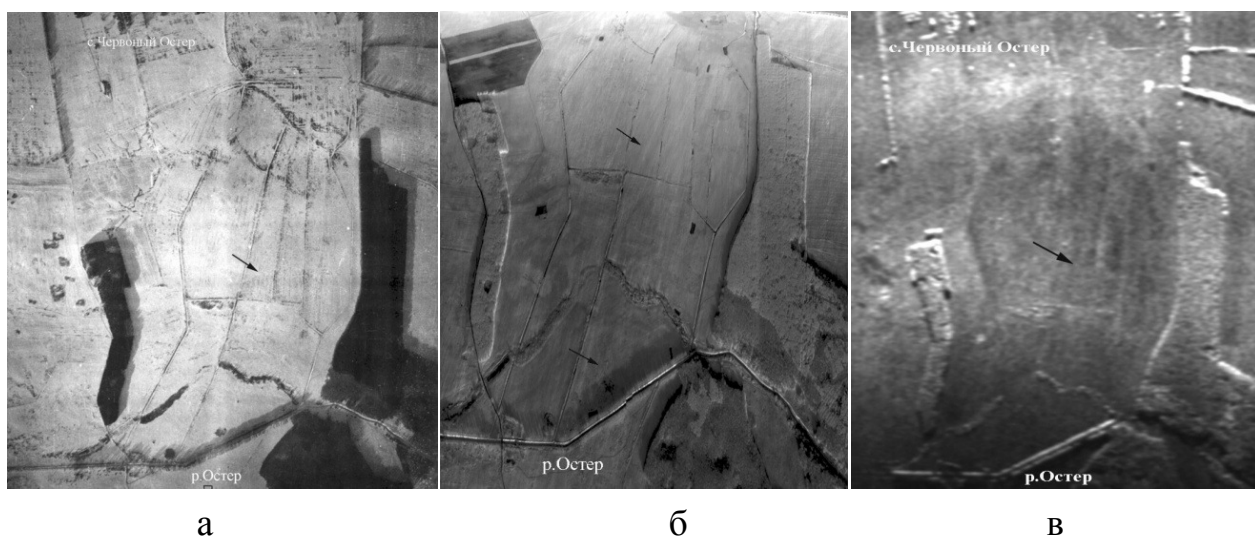


Рисунок 3.9 – Аерофотознімок ділянки заболоченого ґрунту, отриманий в зимових умовах 4.12.2004 (а), ТІЧ зображення цієї ж ділянки, отримане 4.12.2004 при відсутності сніжного покриву (б) і радіолокаційне зображення РБО 0.8, отримане одночасно з ТІЧ зображенням 9.10.2004 (в)

Типовий рослинний покрив для цієї області представлений на фото (малюнок 3.10 [13]) - це високий травостій з рідкими чагарниками і окремими низькорослими деревами. У даній області 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. Такі процеси характерні для торфу, і виникають в цьому районі в шарах глибиною не більше 15 м. Для таких ділянок характерні контрасти спостережуваних поверхневих температур від одиниць градусів до перших десятків градусів. Спостережувані ж контрасти поверхневої температури для палаючих під землею торфовищ, як правило, досягають 150°C [103] а палаючих вугільних пластів - змінюються від $20 - 30^{\circ}\text{C}$ до $200-250^{\circ}\text{C}$ в залежності від глибини залягання, структури покриваючих порід і їх теплопровідності [104].



Рисунок 3.10 – Фотознімок рослинного покриву, типового для ділянок заболоченого ґрунту в досліджуваному районі

Періодична ТІЧ зйомка зон тепловиділення може дозволити уточнити стадію і характер розвитку процесу самонагрівання по динаміці зміни поверхневої температури і площі аномальних зон [104].

Причиною виникнення зон підвищеного щодо навколишнього фону

денного ТІЧ випромінення, очевидно, є аномалії в альбедо поверхневого шару сухого травостою в осінній період, яке, як відомо, в залежності від стану і вилягання може змінюватися в межах 11-24% [105]. Ні на нічному добовому ТІЧ зображенні ні на зимових аерофотознімках і ТІЧ зображеннях ні на РБО зображенні не відзначаються будь-які температурні аномалії або зміни рослинного покриву що збігаються з цими зонами. Так як всі зони аномального тепловиділення розташовуються усередині зон підвищеного денного ТІЧ випромінення, можна припустити, що негативні аномалії короткохвильового альбедо поверхневого шару сухого травостою в осінній період є індикаторами процесів формування в поверхневому шарі ґрунту умов, що сприяють розвитку низькотемпературного окислення і самонагрівання органічних речовин (торфу, сіна, соломи тощо), а в подальшому, їх загоряння [99, 106, 107].

3.4 Використання методики ідентифікації небезпечних явищ перезволоження ґрунтів і саморозігріву органічних речовин, з застосуванням методів багатовимірної кластеризації даних комбінованої добової радіолокаційно–радіотеплової зйомки авіаційним комплексом АКДЗ-30

Для автоматизації виявлення небезпечних явищ була запропонована методика ідентифікації небезпечних явищ 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 СВЧ радіолокаційного сигналу [108, 109].

Вихідні файли ТІЧ і РБО зображень (після попередньої геометричній корекції), отримані в ході проведення літакових експериментів 8-9 жовтня 2004 року, представлені на рисунку 3.11.

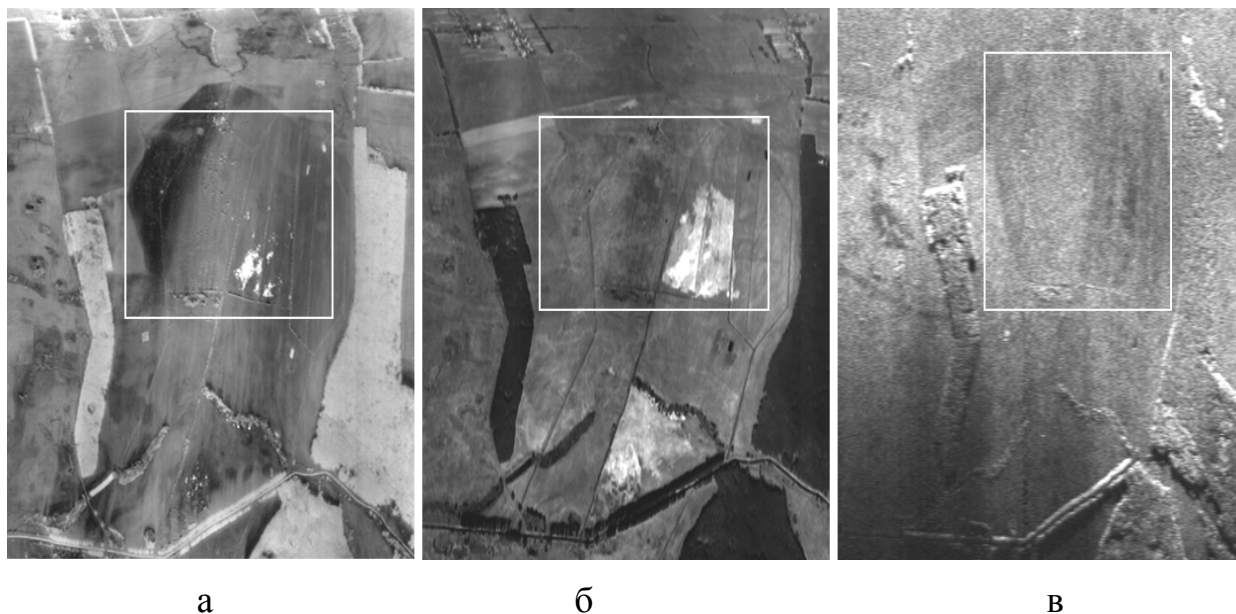


Рисунок 3.11 – Вихідні зображення тестового полігону (виділена ділянка в якому проводилась багатовимірна кластеризація даних).

На рисунку 3.11 видно, що нестабільності параметрів польоту по-різному позначалися на просторових викривлення зображень нічного (рис.3.11а), денного (рис.3.11б) ТІЧ зображень і РБО зображення (рис.3.11в), що вимагало проведення процедури попередньої обробки і суміщення цих зображень. Процедура суміщення була виконана засобами геоінформаційної системи «Envi». Кожне з отриманих зображень були прив'язане до однієї і тієї ж топографічній карті масштабу 1 : 100000 (точність нанесення об'єктів на яких порядку 10-20м) з використанням системи опорних реперних точок (перехрестя доріг і каналів, кути лісових масивів і полів, точки повороту річкового русла і тому подібне).

З урахуванням того, що просторова роздільна здатність ТІЧ сканера в режимі зйомки становила 3-5м, просторова роздільна здатність радіолокатора бокового огляду в режимі зйомки становила 10-15м, а при поєднанні зображень з різною просторовою роздільною здатністю визначальним є найгірша роздільна здатність, використання для поєднання топооснови карти такого масштабу (особливо для моніторингу об'єктів з нечіткими, погано вираженими

межами, наприклад болот) видається обґрунтованим і не вносить суттєвих похибок.

Для побудови простору ознак були використані суміщені дані найбільш інформативної ділянки осушеного болота, на якому присутні ознаки як істотного підповерхневого перезволоження ґрунту, так і процесів саморозігріву органічних речовин [99], позначеної на вихідних зображеннях (рисунок 3.11) прямокутниками білого кольору.

На суміщених ТІЧ (день, ніч) і РБО зображеннях була проведена процедура виділення і формування досліджуваного фрагмента за допомогою системи математичного моделювання MathCAD. Для цього в імпортованих в програму зображеннях задавалося значення початкового положення формованого фрагмента по осях X і Y і значення розміру фрагмента по осях. Виділені в результаті обробки фрагменти представлені на рисунку 3.12. В результаті були отримані суміщені зображення: денний ТІЧ (ТІЧД), нічний ТІЧ (ТІЧН) і радіолокаційної (РБО) зйомки експериментального польоту. Розміри зображень всіх файлів однакові (1835x2652 байт).

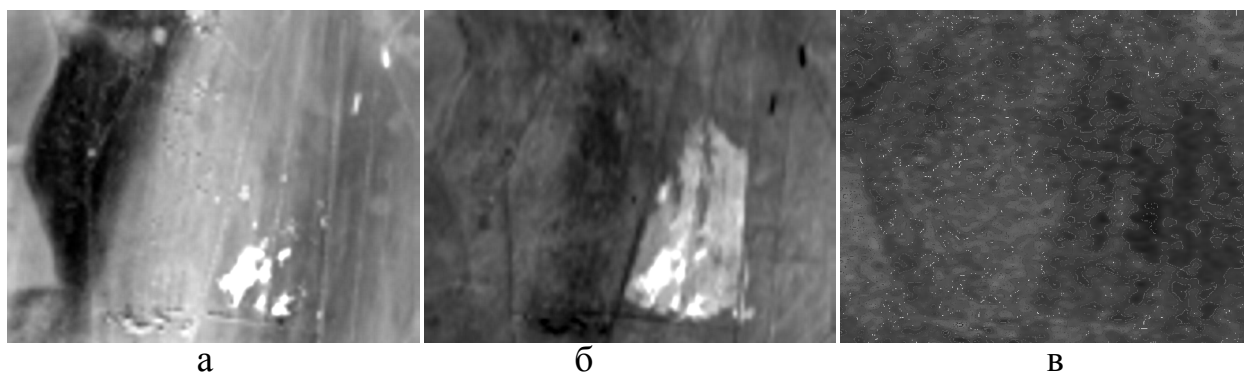


Рисунок 3.12 – Суміщені зображення досліджуваної ділянки (а - денний ТІЧ, б - нічний ТІЧ, в - РБО)

Для узгодження просторової роздільної здатності ТІЧ і радіолокаційного зображень, суміщені фрагменти, були піддані процедурі просторової фільтрації (фільтром з вікном 10x10 пікселів).

Для коректного зіставлення однотипних інформаційних ознак було проведено суміщення динамічних діапазонів інтенсивностей [110] денних

($I_{max \text{ д.}} \sim T=293\text{K}^{\circ} \div I_{min \text{ д.}} \sim T=282\text{K}^{\circ}$) і нічних ($I_{max \text{ н.}} \sim T=286\text{K}^{\circ} \div I_{min \text{ н.}} \sim T=271\text{K}^{\circ}$) ТІЧ зображень таким чином, що б вага однакових вимірюваних температурних контрастів була для цих зображень однаковою. Після цього було здійснено нормування всіх трьох змінних 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 (по всьому полю зображення).

Дані проміжних зображень (зі зміненим просторовою роздільною здатністю) були конвертовані в текстовий файл даних, в якому кожен відлік являв собою точку в тривимірному просторі з координатами - інтенсивність нічного ТІЧ сигналу / інтенсивність денного ТІЧ сигналу / інтенсивність РБО сигналу.

Для виконання самої процедури кластерного аналізу текстові дані були імпортовані в програмний пакет «STATISTICA», де була обрана функція «K-Means Clustering» з автоматичним пошуком центрів 6-ти кластерів в тривимірному просторі ознак.

Результат був збережений у вигляді файлу внутрішнього формату пакета «STATISTICA» (Spreadsheet30.por), який був перейменований в текстовий, конвертовано в бінарний вигляд, при цьому виділені та сформовані в масив значення номерів певних кластерів з прив'язкою до координат вихідних точок суміщених зображень.

Масив значень певних кластерів був перетворений в масив зображення з градаціями сірого засобами «MathCAD» (рисунок 3.13).

Для отримання результату в зручному для візуального аналізу вигляді, була застосована процедура формування поля певних кластерів у вигляді растрового зображення, поєднаного з вихідними зображеннями («MathCAD»). Додатково, для ідентифікації кластера був побудований допоміжний масив умовних позначень з прив'язкою до номеру кластера (рисунок 3.13).

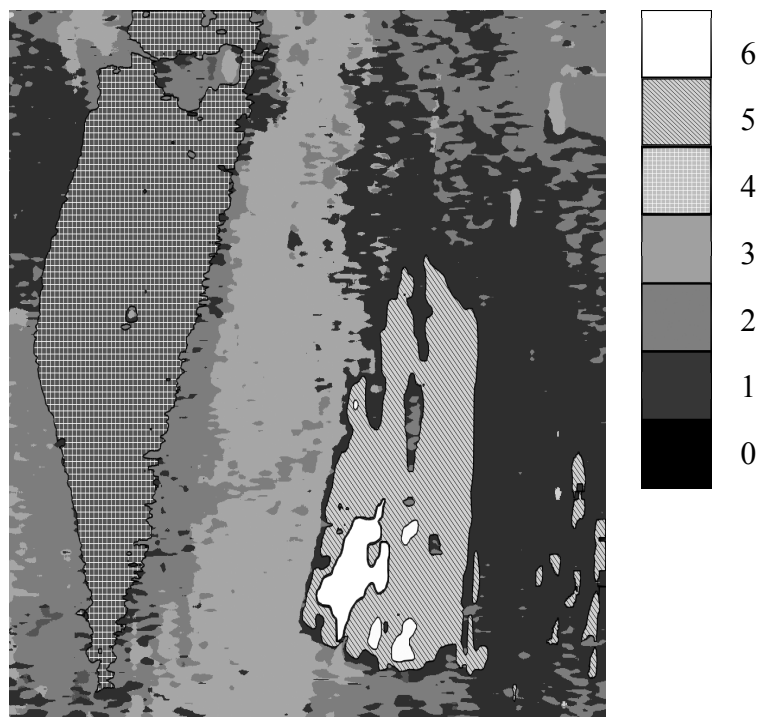


Рисунок 3.13 – Візуальне представлення результатів тривимірної кластеризації даних (вибраної ділянки) комбінованої добової радіолокаційно–радіотеплової (РТЧ) авіаційної зйомки авіаційним комплексом АКДЗ-30

У таблиці 3.1 наведені числові результати (в машинних рівнях), що характеризують проведену тривимірну кластеризацію результатів комбінованої добової радіолокаційно–радіотеплової (РБО-РТЧ) авіаційної зйомки.

Слід зазначити, що найбільш небезпечні явища підповерхневого перезволоження ґрунту та розвитку процесів низькотемпературного саморозігріву органічних речовин під поверхнею ґрунту надійно виділені в кластери 6 та 4.

Крім того, кластеру 5 відповідають дуже цікаві зони підвищеного на $1-2^{\circ}\text{C}$ відносно навколишнього фону денного РТЧ випромінення. Причиною виникнення яких, очевидно, є специфічні аномалії в альбедо поверхневого шару сухого травостою. Проведений додатковий аналіз показав, що ні на нічному добовому РТЧ зображенні ні на зимових аерофотознімках та РТЧ зображеннях, ні на РБО зображенні не відзначаються будь-які температурні аномалії або видимі зміни рослинного покриву, що збігаються з цими зонами.

Таблиця 3.1 - Результати тривимірної кластеризації даних зйомки

Номер клас-теру	Найближча евклідова відстань до іншого кластера	Середнє значення середньо-квадратичного відхилення інтенсивності змінних			Ідентифікація явища, утворення відповідного кластеру (за оцінкою експертів)
		ТІЧД в кластері	ТІЧН в кластері	РБО в кластері	
6	65,6	198,1/24,6	186/32,9	80,9/11	Зони підповерхневого саморозігріву органічних речовин
5	45,5	136/13,9	92/15	70,1/15	Зона змін травостою, індикаторів що вказують на високу ймовірність розвитку процесів саморозігріву (імовірно)
4	26,1	81/7	47,5/11,7	90,8/13,2	Зона прояву значного підповерхневого перезволоження ґрунту
3	16,1	64,4/9,5	112/8,2	97/15,2	Зони незначної зміни вологості ґрунту та стану травостою
2	16,1	81/9,6	92,6/11	108/13,4	
1	22	92,1/11	87/10,2	72,4/11,1	

Отримані результати процедури тривимірної кластеризації даних комбінованої добової радіолокаційно–радіотеплової авіаційної зйомки [111, 112] свідчать про надійне розділення кластерів і впевнене співвіднесення для вибраної ділянки отриманих кластерів з результатами експертних оцінок вихідних даних [113]. Для поширення цієї методики на інші території, визначення її точностних характеристик, уточнення припущень про можливі передвісники розвитку процесів саморозігріву та займання органічних речовин та градацій зволоження ґрунту необхідно проведення цілеспрямованого широкомасштабного відпрацювання з використанням як дистанційних, так та широкомасштабних синхронних наземних контактних даних.

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 підповерхнєве 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.

РОЗДІЛ 4

БАГАТОКУТОВИЙ РАДІОЛОКАЦІЙНИЙ МЕТОД ДІАГНОСТИКИ НАФТОВИХ ЗАБРУДНЕНЬ МОРСЬКОЇ ПОВЕРХНІ

Описано багатокутовий метод радіолокаційної діагностики нафтових забруднень морської поверхні з використанням моделювання процесів розтікання нафти, представлені результати апробації та валідації даного методу.

Необхідність отримання оперативної та достовірної інформації про безперервні аварійні розливи нафти на поверхні морів та океанів є потужним стимулом розробки нових, більш ефективних методів дистанційного зондування, серед яких супутникові радіолокаційні є найбільш перспективними. Оскільки в даний час доступні дані лише одночастотних супутникових радіолокаційних систем, а на найближчі роки планується запуск їх модифікованих аналогів (наприклад, супутників ESA серії Sentinel), то особливої важливості набуває розробка методів, які використовують дані подібних систем.

Основним недоліком одночастотних методів є неможливість відрізнити нафтові сліки від вигладжувань морської поверхні, викликаних неоднорідностями вітрового поля, проявом внутрішніх хвиль, зон апвеллінга та інших. Тому одночастотні методи використовуються або спільно з оптичними, радіометричними або іншими даними, що дозволяють судити про природу сліку [62, 114, 115], або використовуються дані послідовних одночастотних зйомок однієї ділянки забрудненої поверхні під різними кутами - багатокутовий метод (БКМ) [69, 70, 71, 72, 73, 74, 75]. Так як зйомка ділянки супутниковим РСА може проводитися тільки на наступних витках, то інтервал між зйомками в залежності від напрямку польоту супутника (на висхідному або низхідному витках) та попереднього замовлення на зйомку може змінюватися від 1 до 4 діб та більше. Тому необхідним елементом БКМ є точний прогноз (модель) зміни параметрів нафтової плями (об'єму, його форми та напрямку поширення) в проміжку між супутниковими зйомками. При цьому оцінки, отримані

радіолокаційним методом, та модельні розрахунки можуть доповнювати один одного, збільшуючи взаємну достовірність.

4.1 Опис багатокутового методу

Основою методу БКМ є теорія розсіювання радіохвиль морською поверхнею в присутності плівок ПАР обмеженої товщини [55, 56, 57]. Підвищення достовірності радіофізичних оцінок методом БКМ досягається шляхом оптимізації числа параметрів, що впливають на кінцевий результат. Для цього в якості вимірюваної величини при оцінці товщини поверхневих нафтових плівок використовується значення радіолокаційного контрасту (далі - радіоконтраста) забрудненої поверхні, що визначається як відношення потужностей сигналів, що приймаються радіолокатором від забруднених нафтою та чистих ділянок морської поверхні. Це дозволяє при малому часі супутникової зйомки (10 ... 20 с) вважати стабільними як параметри апаратури та характер руху супутника-носія, так й стан морської поверхні та атмосфери в межах досліджуваної акваторії. При цьому вимір радіоконтрастів виключає з розгляду кутову 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 θ .

У використовуваній теорії розсіювання 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 α , в'язкості ν і густини ρ [56, 57]:

$$D_{теор}(k(\theta), h, p, \alpha, \nu, \rho) = -10 \lg \frac{\omega_0(k(\theta))^2 \gamma_0(k(\theta))^2}{\omega_+(k(\theta))^2 \gamma(k(\theta))^2}, \quad (4.1)$$

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

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

Для визначення всіх невідомих в (4.1), 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 скористаємося експериментальними даними радіолокаційного зондування акваторії із заздалегідь відомими параметрами розливої нафти α, ν, ρ (наприклад, для нафтовидобувного району Нафтові Камені в Каспійському морі). У цьому випадку для визначення інших двох невідомих параметрів (активності p і товщини h) досить скласти два рівняння. При цьому, для оцінок за багаточастотним методом використовуються експериментальні дані зондування на сантиметрових і дециметрових радіохвилях, отримані під одним кутом зондування θ , а в БКМ використовуються експериментальні дані зондування в сантиметровому діапазоні при зондуванні під кутами θ_1 і θ_2 :

$$\begin{cases} D_{теор}(k_C, p, h) = D_{експ}(k_C, p, h) \\ D_{теор}(k_d, p, h) = D_{експ}(k_d, p, h) \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} D_{теор}(k_C(\theta_1), p, h_1) = D_{експ}(k_C(\theta_1), p, h_1) \\ D_{теор}(k_C(\theta_2), p, h_2) = D_{експ}(k_C(\theta_2), p, h_2) \end{cases}, \quad \text{де} \quad k(\theta) = 2k_E \sin \theta \quad (4.2)$$

де k_C та k_d – хвильові числа, відповідно, сантиметрових та дециметрових поверхневих хвиль, $k(\theta)$ та k_E – хвильові числа морської та радіохвиль.

З (4.2) видно, що обидва методи для оцінок товщини та активності нафтової плівки використовують значення радіоконтрастів, отриманих на одній і тій же ділянці морської поверхні для двох різних довжин поверхневих хвиль.

Товщина нафтової плівки h_2 в (4.2) може змінюватися під впливом внутрішніх і зовнішніх фізичних процесів за час між радіолокаційними зйомками як:

$$h_2 = m \cdot h_1, \quad \text{для } 0 < m \leq 1. \quad (4.3)$$

Для визначення обмеженої товщини плівки необхідно провести моделювання динаміки розвитку нафтової плями. Для мінімізації помилок моделювання, необхідно оцінити вплив цих процесів на властивості розливої нафти і вибрати оптимальний для радіолокаційного аналізу період часу.

4.2 Моделювання процесів розтікання нафти по морській поверхні

До теперішнього часу вже розроблений ряд моделей (наприклад, [116, 117, 118, 119, 120, 121]), що враховують найбільш важливі процеси, що впливають на динаміку розтікання нафти по морській поверхні (переміщення під дією течій і вітру, гравітаційне розтікання, адвекційний перенос, диспергування, випаровування, турбулентне перемішування та інші). Більшість моделей використовує в своїй основі тривимірні гідродинамічні моделі різної складності, в рамках яких результати розрахунків багато в чому залежать від точності розрахунків атмосферних моделей (потоків тепла, вологи і так далі) і великої кількості використовуваних параметризацій. У методі БКМ використана модифікована модель 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. Спочатку модель використовувалася для розрахунку траєкторій плаваючих об'єктів [122] Потім модель була модифікована під задачу моделювання розтікання нафти [71, 72, 73, 74, 75].

Розроблена модель FOTS відноситься до класу моделей „*oil spill particle-tracking*” [120, 123, 124], в яких 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.

Вихідними даними для моделювання зміни форми і товщини нафтової плями є: маса розливої нафти M , тип нафти, початковий стан нафти (свіжа або вивітрена, що зазнала дії метеоумов), режим розливу нафти (імпульсний, безперервний); дати і час (UTC) початку і кінця обробки; координати джерела (джерел) розливу. У процесі розрахунків з відкритих архівів в реальному часі викачуються регіональні або глобальні (в залежності від заданих параметрів регіону) карти аномалій рівня моря або карти абсолютної динамічної топографії, отримані за даними супутникової альтиметрії [125], карти температури поверхні моря [126] і карти швидкостей вітрів за даними глобальної моделі NCEP [127], і на основі цих даних проводиться моделювання.

Всього в моделі використовується три типи нафти: легка, середня і важка. Від типу нафти залежать її початкові параметри: ν_n – кінематична в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_n – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$; $e_{\max}$ – відсоток летючої фракції; $emul_{\max}$ – максимально можливий відсоток емульгованої нафти; константи C_1 , C_2 , що використовуються при розрахунку випаровування нафти (див. табл. 4.1). Константи були взяті з аналізу даних, представлених в [128].

При запуску моделі на кожному кроці обробки враховувалися наступні процеси: розтікання нафти, адвекція течіями, горизонтальна турбулентність, випаровування, диспергування та емульгування.

Таблиця 4.1 - Параметри нафти

Тип	$\nu_n \cdot 10^4$	ρ_n	$e_{\max}$	$emul_{\max}$	C_1	C_2
Легка	0,05	850	0,35	0,001	2,4	0,045
Середня	0,2	900	0,25	0,05	1,5	0,045
Важка	5	950	0,05	0,25	0,12	0,002

Гравітаційне розтікання нафти. Залежно від взаємодії гравітаційних, інерційних, в'язких сил і сил поверхневого натягу процес розтікання нафтової

плями по морській поверхні ділиться на три фази (режиму): гравітаційно-інерційний, гравітаційно-в'язкий і режим поверхневого натягу [129, 130, 131].

На кожному кроці обробки Δt розраховується час існування нафтової плями $t = \Delta t(n+1) - \Delta tn$ (де $n=0...N$, N – число кроків) і співвідноситься з часом переходу t_{12} – з гравітаційно-інерційного (ГІ) режиму розтікання нафти в гравітаційно-в'язкостний (ГВ) режим і t_{23} з гравітаційно-в'язкого режиму в режим поверхневого натягу (ПН), які визначаються з умови рівності площ плями нафти $A_{ГІ} = A_{ГВ}$ та $A_{ГВ} = A_{ПН}$ при зміні режиму:

$$\begin{aligned} t_{12} &= 2,613 \sqrt[3]{\frac{V}{\Delta g \nu_B}}, \\ t_{23} &= 0,8077 \frac{\rho_B^3 \sqrt[3]{V^2 \Delta g \nu_B}}{\alpha}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

де V – об'єм розлитої нафти, м^3 ; $\Delta = (\rho_B - \rho_H) / \rho_B$ (ρ_B, ρ_H – густина води і нафти відповідно, кг/м^3); g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; ν_B – кінематична в'язкість води, $\text{м}^2/\text{с}$; $\alpha = \alpha_{\text{В-ВХ}} - \alpha_{\text{Н-ВХ}} - \alpha_{\text{Н-В}}$ – коефіцієнти поверхневого натягу (сумарний, вода–повітря, нафта–повітря і нафта–вода, відповідно), кг/с^2 .

Потім, в залежності від режиму розтікання плями, з внутрішнім кроком $dt = 1$ с розраховується площа плями A і її зміна dA :

– для режиму ГІ:

$$A_{ГІ} = K_1 t \sqrt{V}, \quad dA_{ГІ} = K_1 \sqrt{V} dt, \quad K_1 = 1,3\pi \sqrt{\Delta g}; \quad (4.5)$$

– для режиму ГВ:

$$A_{ГВ} = K_2 \sqrt{t} V^{2/3}, \quad dA_{ГВ} = (K_2 V^{2/3} / 2\sqrt{t}) dt, \quad K_2 = 2,1\pi^3 \sqrt{g \Delta / \sqrt{\nu}}; \quad (4.6)$$

– для режиму ПН:

$$A_{ПН} = K_3 t^{3/2}, \quad dA_{ПН} = (3K_3 t^{1/2} / 2) dt, \quad K_3 = 2,6\pi \sqrt{\alpha^2 / (\rho^2 \nu)} \quad (4.7)$$

Після цього розраховується зміна товщини плівки:

$$dh = \frac{V}{A} - \frac{V}{A + dA}. \quad (4.8)$$

Залежно від типу розливу задається різний проміжок часу існування плями t_0 і визначається різна початкова товщина нафтової плівки h_0 :

– при миттєвому розливі свіжої нафти початковий час існування плями t_0 задається рівним t_{12} . При цьому початкова площа плями A_0 розраховується на час t_{12} за формулою (4.4), а початкова товщина h_0 визначається з (4.4) при $A_0 = V/h_0$ як:

$$h_0 = \sqrt{V} / (K_1 t_{12}); \quad (4.9)$$

– при миттєвому розливі вивітреної нафти початковий час t_0 задається рівним t_{23} , початкова площа A_0 розраховується на час t_{23} за формулою (4.4), а товщина h_0 визначається з (4.4) при $A_0 = V/h_0$ як:

$$h_0 = \sqrt[3]{V} / (K_2 \sqrt{t_{23}}). \quad (4.10)$$

Для режиму вивітреної нафти випаровування задається рівним нулю.

– при постійному розливі проміжок часу для кожної нової випущеної частки дорівнює $t_0 = 0$ с. Далі для кожної частки розтікання розраховується залежно від прожитого часткою часу.

Адвекція нафти течіями. Рух нафтової плями під дією течій залежить від повної швидкості течій, яке визначається як сума геострофічних і дрейфовий швидкостей течій:

$$V = V_g + V_e. \quad (4.11)$$

Для розрахунку геострофічних швидкостей V_g за даними супутникової альтиметрії використовувалися регулярні дані про аномалії рівня моря (SLA), отримані за вдольтрековими даними сучасних супутникових альтиметричних місій (Jason-1, Jason-2, Envisat, Topex / Poseidon, GFO). При створенні масивів вихідні альтиметричні дані були введені поправки на помилки вимірювання орбіти супутника, корекції на інструментальні помилки, на збурення за рахунок вологої тропосфери, сухої тропосфери, іоносферних ефектів [132]. Для переходу від аномалій рівня до повної динамічної топографії необхідно було до полів SLA додати поле середньої динамічної топографії (MDT), визначене як кліматичне поле рівня для Каспійського моря, яке отримано на основі результатів моделювання з засвоєнням гідрологічних даних [133]:

$$h = MDT + SLA.$$

За градієнтам динамічної топографії були розраховані карти швидкостей геострофічних течій:

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_g = \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (4.12)$$

де h – рівень моря; u_g, v_g – геострофічні швидкості; g – прискорення вільного падіння; f – параметр Коріоліса.

Дрейфова компонента течій V_e була параметризована за даними вимірів дрейфтерів, альтиметрів і вітру в роботі [134]. Дрейфова компонента течій визначалася як $V_e = 0,028 V_w e^{i\pi/36}$, де V_w – швидкість вітру; тобто швидкість дрейфовий течій на поверхні становила 2,8 % від швидкості вітру, а кут повороту поверхневих течій склав 13° вправо. Переміщення кожної частинки під дією течій розраховувалося стандартним методом за схемою Рунге-Кутта. Приклади побудови карт швидкості приповерхневого вітру і повної поверхневої швидкості течії наведені на рисунку 4.1.

Горизонтальна турбулентність. Для врахування турбулентних рухів на кожному кроці часу частці задається додаткове переміщення dl , пропорційне швидкості частинки:

$$dl = PK_T dL, \quad (4.13)$$

де P – випадкова величина (від 0 до 1); значення $K_T = 0,1$ є аналогом коефіцієнту турбулентної горизонтальної дифузії; dL – переміщення частинки на даному етапі.

Емульгування. Емульгування це процес захоплення води нафтою з утворенням нафтової емульсії. Утворення емульсії значно впливає на властивості нафти - в'язкість і густина. Для кожного типу нафти існує максимально можливий відсоток вмісту води в нафті $emul_{\max}$. Для розрахунку кількості води в нафті використовується формула з роботи [140]:

$$\frac{dY}{dt} = k_{em} \times W^2 \left(1 - \frac{Y}{emul_{\max}}\right), \quad (4.15)$$

де Y – процент води в нафті; $k_{em}=1,5\times10^{-6}$. Кількість води в нафті дорівнює $M_W = YM$.

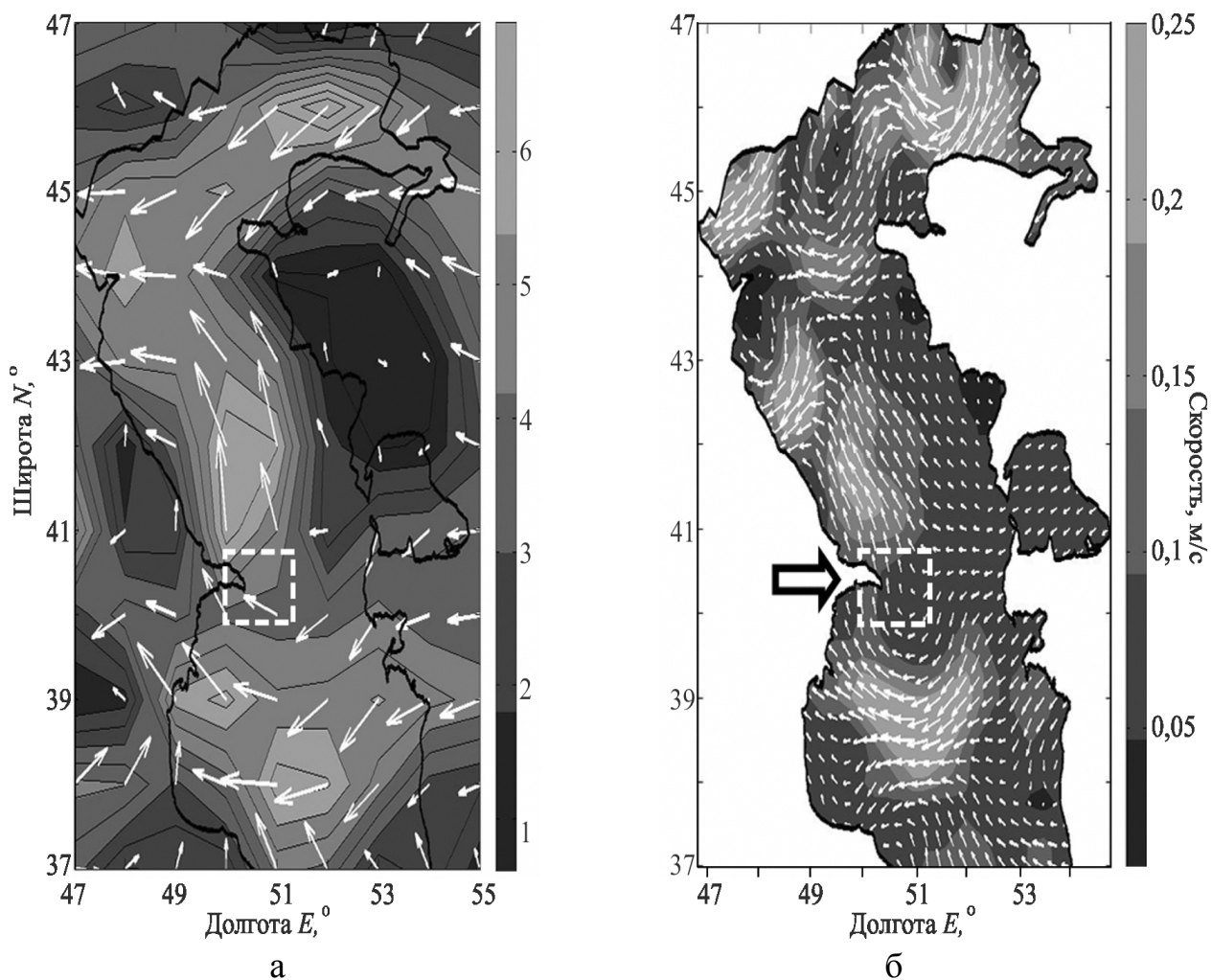


Рисунок 4.1 - Приклади побудованих карт швидкості вітру (а) і повної швидкості течії (б) в Каспійському морі на 09.09.2004 18-00 UTC. Квадратом вказано район родовища Нафтові Камені. Відтінками сірого кольору вказана швидкість в м/с, а стрілками її напрямок

Дисперсія. В процесі дисперсії нафта турбулентним перемішуванням або обваленням вітрових хвиль розбивається на краплі різного розміру (від 1 до 500 мкм), частина з яких переноситься в глибину рідини. Краплі, опущені на глибину, можуть повернутися в плівку. Оскільки швидкість крапель на поверхні вище, ніж на деякій глибині, то диспергована частина нафти буде відставати, а деяка частина безповоротно губитися. Для розрахунку дисперсії нафті використовується параметризація, запропонована в роботі [135].

Вважається, що дисперсія відбувається в основному через обвалення хвиль. Маса диспергуючої нафти для кожного розміру крапель визначається таким чином:

$$Q_d = r_{ice} \Delta t C^* E_b^{0,57} F_b A_n f_{disp} \quad , \quad (4.14)$$

де r_{ice} – поправочний коефіцієнт на лід ($r_{ice}=1$, якщо лід відсутній [136]; C^* – емпірична константа залучення, яка визначається як [137, 138]:

$$C^* = \exp(-0,1023 \ln(\nu_n) + 7,575), \text{ для } \nu_n < 0,132 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$C^* = \exp(-1,8927 \ln(\nu_n) + 16,313), \text{ для } \nu_n \geq 0,132 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с};$$

E_b – енергія дисипації хвиль на одиницю об'єму - $E_b = 0,0034 \rho_g H_b^2$; (де H_b – висота хвиль що обвалюються - $H_b = 1,5 \times H_s$, $H_s = 0,0248 \times W^2$ – значуща висота хвиль; W – швидкість вітру на висоті 10 м, м/с); F_b – відсоток поверхні, вкритої хвилями що обвалюються - $F_b = 3 \times 10^{-6} W^{3,5}$; A_n – відсоток поверхні, вкритої нафтою; f_{disp} – розподіл крапель нафти за розмірами.

Згідно [135], f_{disp} може бути апроксимовано як $f_{disp} = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} d^{0,7} \Delta d$. Для

розрахунку розподіл крапель за розміром розбивався на інтервали $\Delta d = (d_{\max} - d_{\min})/10$. Максимальний $d_{\max}$ та мінімальний $d_{\min}$ розмір крапель визначався як

$$d_{\max} = 3400 E^{-0,4} (\nu_n \times 10^6)^{0,34},$$

$$d_{\min} = 500 E^{-0,4} (\nu_n \times 10^6)^{0,34},$$

де E – енергія дисипації хвиль на одиницю об'єму, Дж/м³с; $E = 5,0 \times 10^3$ [139].

Інтегруючи Q_d по всіх класах розмірів крапель, отримуємо сумарну кількість диспергуючої нафти Q_d^Σ . Далі, вважалось, що деяка частина диспергуючої нафти $Q_{\text{возвр}} = P_{\text{возвр}} Q_d^\Sigma$ повертається в плівку ($P_{\text{возвр}} = 0,9$) і дорівнює сумарному відсотку крапель з розміром більше 10 мкм [120]. Інша частина безповоротно губилася. Кількість диспергуючого об'єму кожної частки задавалася

випадковим чином так, щоб сумарний для всіх диспергуючих частинок об'єм дорівнював Q_d^Z . Саме тому товщина плівки на картах нафтових плям неоднорідна. При цьому швидкість частинок зменшувалася пропорційно кількості диспергуючих частинок що повернулися в плівку, так як вони побували на глибині, де швидкість течій менше.

Випаровування. На кількість нафти на поверхні води значно впливає процес її випаровування. Існує максимально можлива кількість випарованої нафти, що дорівнює відсотку летючої фракції $e_{\max}$. Випаровування розраховувалося за відомою формулою з роботи [140]

$$f_e = (C_1 + C_2 T) \ln\left(\frac{t}{60}\right), \quad (4.16)$$

де f_e – кількість випарованої нафти; C_1, C_2 – константи; T – температура.

Температура поверхні визначалася на основі масиву даних, отриманих з комбінованих супутникових вимірювань температури в мікрохвильовому і інфрачервоному діапазонах. Просторова роздільна здатність даних становить $0,25^\circ$, часова – 1 доба.

Після ряду перетворень отримуємо, що відсоток випарованої летючої фракції нафти E_{fr} за крок часу Δt дорівнює

$$E_{fr} = C_e / K_e \ln(e^{K_e / C_e E_0} + K_e \Delta t), \quad (4.17)$$

де $K_e = 1/60$; E_0 – відсоток нафти, випарованої за попередній крок в часі, $C_e = \frac{K_e}{100}(C_1 + C_2 T)$. Тоді кількість маси, втраченої через випаровування за крок в часі, так само $m_e = M_{e_{\max}} E_{fr}$. Сумарная втрата маси M_e розраховується як сума втрат за кожен крок в часі.

Зміна густини і в'язкості нафти. Склад нафти і її фізичні властивості змінюються через процеси випаровування, емульгації і т.і. Оскільки емульгована нафта складається з води і нафти, то густина нафти розраховується на кожному кроці за формулою

$$\rho_n = \frac{(1 - M_W)}{M} \rho_n + \frac{M_W}{M} \rho_B. \quad (4.18)$$

В'язкість також розраховується на кожному кроці за формулою

$$\nu_{nn} = \left[\nu_{n0} \exp \left(\frac{C_{m1}(M_{W0}/M)}{1 - C_{m2}(M_{W0}/M)} \right) \right] \times \left[\exp \left(\frac{1}{10} \frac{m_e}{M_0} \right) \right] \quad (4.19)$$

де M – маса нафти; ν_{n0} , M_{W0} , m_e , M_0 – початкова в'язкість нафти, маса води в нафті (в результаті емульгування), маса випарованої нафти і початкова маса нафти, відповідно, на даному етапі, константи $C_{m1}=2,5$; $C_{m2}=0,65$.

Як видно з (4.19), перший співмножник у виразі враховує вплив емульсифікації на в'язкість нафти [138], а другий пов'язаний із залежністю в'язкості від випаровування нафти.

В кінці кожного кроку в часі розраховується сумарна зміна об'єму плівки через процеси витікання нафти з джерела (перший чинник) і процесів «вивітрювання» - випаровування, дисперсії і емульгування (другий чинник):

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV_S}{dt} + \frac{dV_\omega}{dt}. \quad (4.20)$$

Далі розраховується сумарна зміна товщини плівки через процеси витікання нафти h_1 , її розтікання h_2 (див. формулу(4.8)) і за рахунок випаровування, дисперсії та інших процесів h_3 (див. формули (4.13)–(4.19)):

$$\Delta h = \Delta h_1 - \Delta h_2 - \Delta h_3 = h \Delta t \frac{1}{V} \frac{dV_S}{dt} - \Delta h_2 - \Delta h_3. \quad (4.21)$$

4.3 Результати апробації та валідації багатокутного методу

Роботи з перевірки достовірності оцінки товщини нафтової плівки на морській поверхні за допомогою методу БКМ проводилися у два етапи: апробація [69, 70] та валідація [71, 72, 73, 74, 75] методу.

4.3.1 Апробація багатокутного 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 [62]. Основний недолік обох методів - неможливість відокремити на морській поверхні нафтову пляму від вітрового сіліку - усувався вибором акваторії, у якій постійно присутня розлита нафта. Такою акваторією був обраний район видобутку нафти Нафтові Камені у Каспійському морі, у якому, як правило, видобуток нафти завжди супроводжується технологічними витоками [141].

Аналіз багаторічних радіолокаційних даних Європейського космічного агентства (ESA) по цьому району, вільно наданих ESA через сервер-каталог EO-LI-SA [142], підтвердив його підвищену забрудненість і показав, що найбільш контрастно нафтові забруднення спостерігаються у РЛЗ супутників ERS-1,2 і смугах IS1 - IS4 ($\theta = 15.0^\circ \div 36.3^\circ$), РЛЗ Envisat-1 у режимах зйомки Image Mode (IM) і Wide Swath Mode (WSM). Геометрія супутникової зйомки показана на рисунку 4.2.

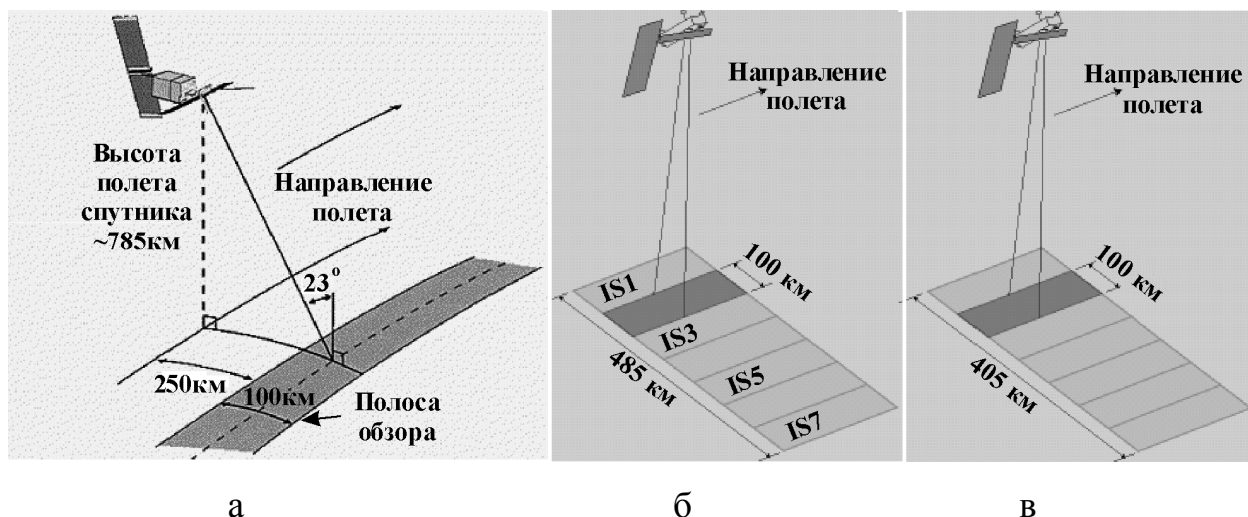


Рисунок 4.2 - Геометрія зйомки PCA зі супутників ERS-1/2 (а) і Envisat-1 у режимах IM (б) і WSM (в)

Найбільш придатними для багатокутової діагностики нафтових забруднень виявилися РЛЗ, отримані за допомогою PCA супутника Envisat-1. Оскільки зйомки проводилися на висхідних і низхідних витках, затримка між зйомками може варіюватися від 12 годин до декількох діб. Приклад геометрії регулярних зйомок і РЛЗ, отримані за допомогою PCA супутника Envisat-1 представлені на рисунку 4.3. На рисунку 4.3 також наведені значення кутів

спостереження θ і час прольоту точки умовного центру спостережуваної нафтової плями з координатами $40.334^{\circ}N, 50.75^{\circ}E$.

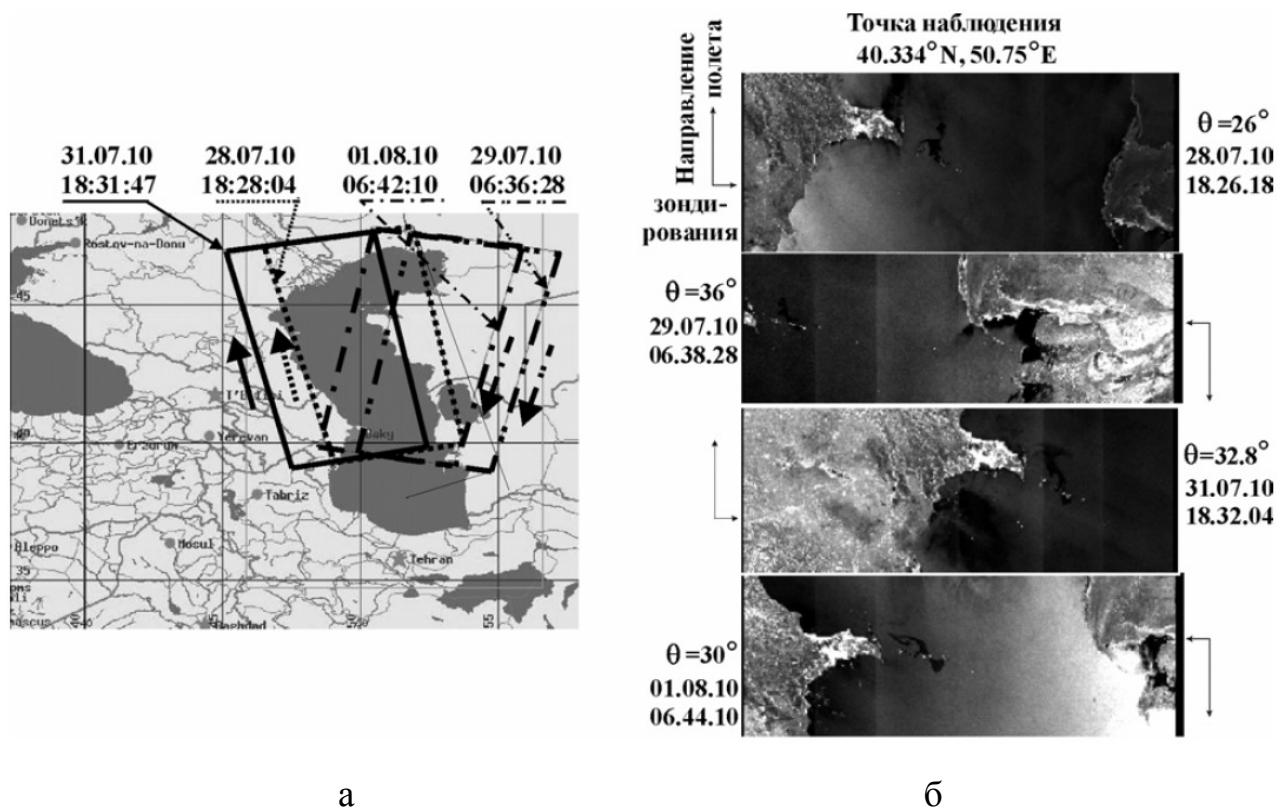


Рисунок 4.3 - Смуги зйомки ASAR Envisat-1 в режимі WSM (а) та фрагменти РЛЗ (квік-луки) ASAR/WSM, поляризація HH (© ESA)

В рамках даної роботи для перевірки багатокутного методу були використані значення експериментальних радіоконтрастів, отримані за допомогою одночастотного методу для однієї товщини нафтової плівки при різних кутах падіння θ і пройшли апробацію в експериментах на Чорному, Каспійському, Баренцевому і Карському морях [62]. У таблиці 4.2 наведені з цієї роботи значення радіоконтрастів $D_{експ.}(k_C(\theta), p, h)$ морської поверхні, вкритою нафтовою плівкою товщиною $h=1\text{мм}$, при швидкості приводного вітру 5 м/с для кутів зондування, характерних при спостереженні нафтових забруднень РСА супутників ERS-1/2 і Envisat-1.

Таблиця 4.2 - Залежність радіоконтрастів $D_{\text{експ.}}(k_C(\theta), p, h)$ від кута зондування θ для морської поверхні, вкритою нафтовою плівкою $h=1\text{ мм}$

Товщина плівки нафти $h=1\text{ мм}$, швидкість приводного вітру 5 м/с				
Кут зондування θ , град.	20	22	26	30
Радіоконтраст, дБ	5.6	7	11.6	16

Різні комбінації пар експериментальних контрастів з таблиці 4.2 були використані для розрахунків за формулою (4.2) теоретичних значень $D_{\text{теор.}}(k_C(\theta), p, h)$ для знаходження товщини нафтової плівки. Теоретичні радіоконтрасти розраховувалися для відомих значень параметрів Каспійської нафти: коефіцієнти поверхневого натягу на границі розділу вода-нафта $\alpha=13$ дін/см, на границі розділу повітря-нафта $\alpha_1=60$ дін/см; коефіцієнти кінематичної в'язкості: води $\nu=10^{-2}$ см²/с, нафти $\nu_1=0.3$ см²/с; густина води $\rho=1$ г/см³, густина нафти $\rho_1=0.8$ г/см³. Як приклад, на рисунку 4.4 наведені результати таких розрахунків.

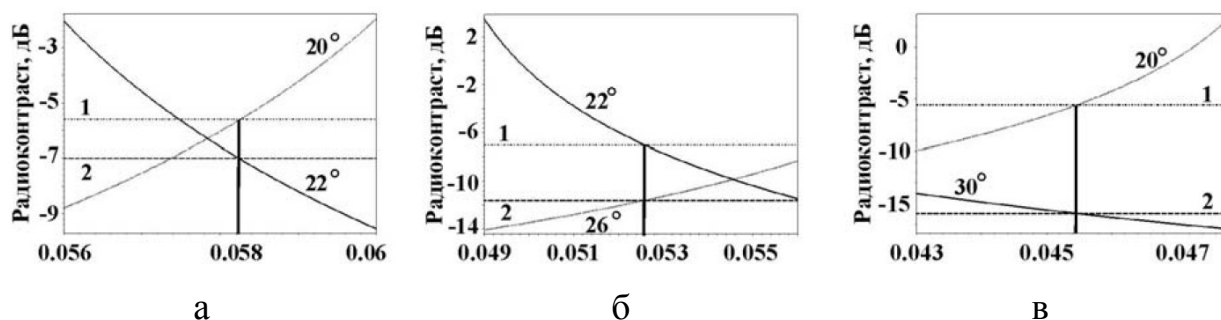


Рисунок 4.4 - Залежність теоретичних радіоконтрастів $D_{\text{теор.}}(k_C(\theta), p, h)$ (криві) від товщини плівки h . Штриховими лініями показані експериментальні значення радіоконтрастів $D_{\text{експ.}}(k_C(\theta), p, h)$. а – для пари кутів зондування $\theta=20^\circ, 22^\circ$; б – для пари кутів зондування $\theta=20^\circ, 26^\circ$; в - для пари кутів зондування $\theta=20^\circ, 30^\circ$. Вертикальна лінія вказує на шукану товщину нафтової плівки

Як видно з рисунку 4.4 при варіації пар кутів зондування θ_1, θ_2 шукана товщина нафтової плівки становить $h=0.45-0.6$ мм. При підстановці в (4.2) значень параметрів нафтової плівки, використаних в розрахунках товщини плівки за одночастотним методом [62], отримані 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 багатокутового методу.

4.3.2 Валідація багатокутового методу

Для повної перевірки можливостей багатокутового 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 (з інтервалом $0,5 \div 4$ доби при кутах зондування $\theta \approx 15^\circ \div 40^\circ$) РЛЗ PCA Envisat-1 різних років з розрізненням 150 м (ASA_WSM_1P). В даний час ведеться обробка отриманої радіолокаційної інформації і підбір відповідних альтиметричних, радіометричних та інших даних для оцінки стану атмосфери і моря в досліджуваній акваторії на момент зйомки.

Обробка РЛЗ. Розглянемо особливості обробки на прикладі аналізу пари РЛЗ, знятих 09.09.04 р в 18-35UTS на висхідному витку (рисунок 4.5 а) і 10.09.04 р в 06-46 UTS на низхідному витку (рисунок 4.5 б) з інтервалом ~ 12 годин.

Обробка зображень (калібрування, поворот, перерізу по рядах, суміщення контрольних точок для вимірювання радіоконтрастів) проводилася за допомогою стандартної програми NEST 4B-1.0 [80] за наступною методикою. Радіоконтрасти визначалися як різниця значень ЕПР забрудненої нафтою і чистої морської поверхні при однакових кутах зондування. Для цього оригінальні зображення перетворювалися програмою NEST 4B-1.0 в зображення з відомої ЕПР в кожному пікселі (калібровані). Переріз по ряду в

такому каліброваному зображенні дає одночасно значення ЕПР моря і нафти в дБ при однаковому куті зондування. Для зменшення помилки вимірювань ЕПР проводилося усереднення значень по сусіднім пікселям 3-х рядів (усереднення по рядку) і фільтрація (усереднення по ряду).

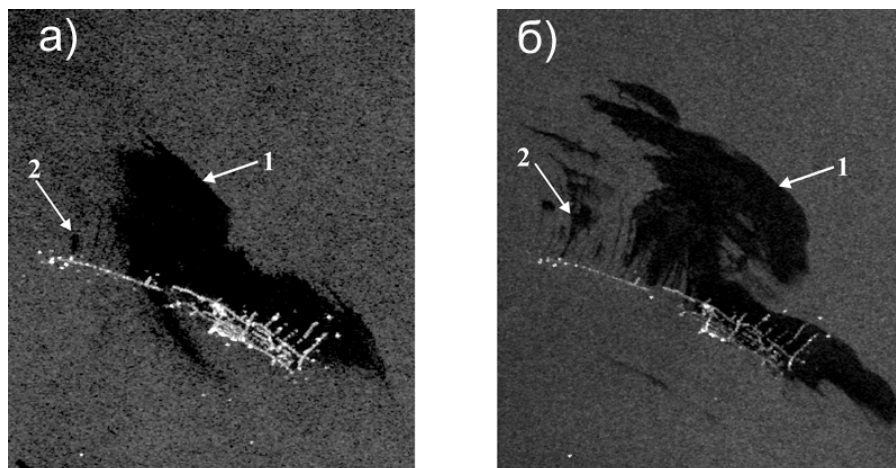


Рисунок 4.5 - Суміщені фрагменти РЛЗ розливів нафти в акваторії родовища Нафтові Камені в Каспійському морі, отримані за допомогою PCA Envisat-1 (ASA-WSM-1P, поляризація BB) з розрізненням 150 м (© ESA). Стрілками 1, 2 вказані області аналізу, а) - 09.09.04 о 18.35 UTC , б) - 10.09.04 о 06.46 UTC

Отримані величини радіоконтрастів використовувалися для розрахунку товщини плівки за формулами (4.2). Визначення товщини проводилося як за даними кожної зйомки (при цьому вибиралися різні точки нафтової плями), так і зйомок за два дні. Приклади перерізів по ряду каліброваних РЛЗ морської поверхні для визначення радіоконтрастів і результати розрахунків товщини плівки в співпадаючих до пікселя (75 м) точках зображень наведені на рисунку 4.6.

Розрахунки товщини нафтової плівки проводилися за формулами (4.2) для великої плями 1 (див. область 1 на рисунку 4.5) і для малої плями 2 (див. область 2 на рисунку 4.5).

Як показали розрахунки, усереднена по площі нафтової плями 1 товщина плівки на кожному з РЛЗ склала 0.25 мм, а для плями 2 - 0.1 мм.

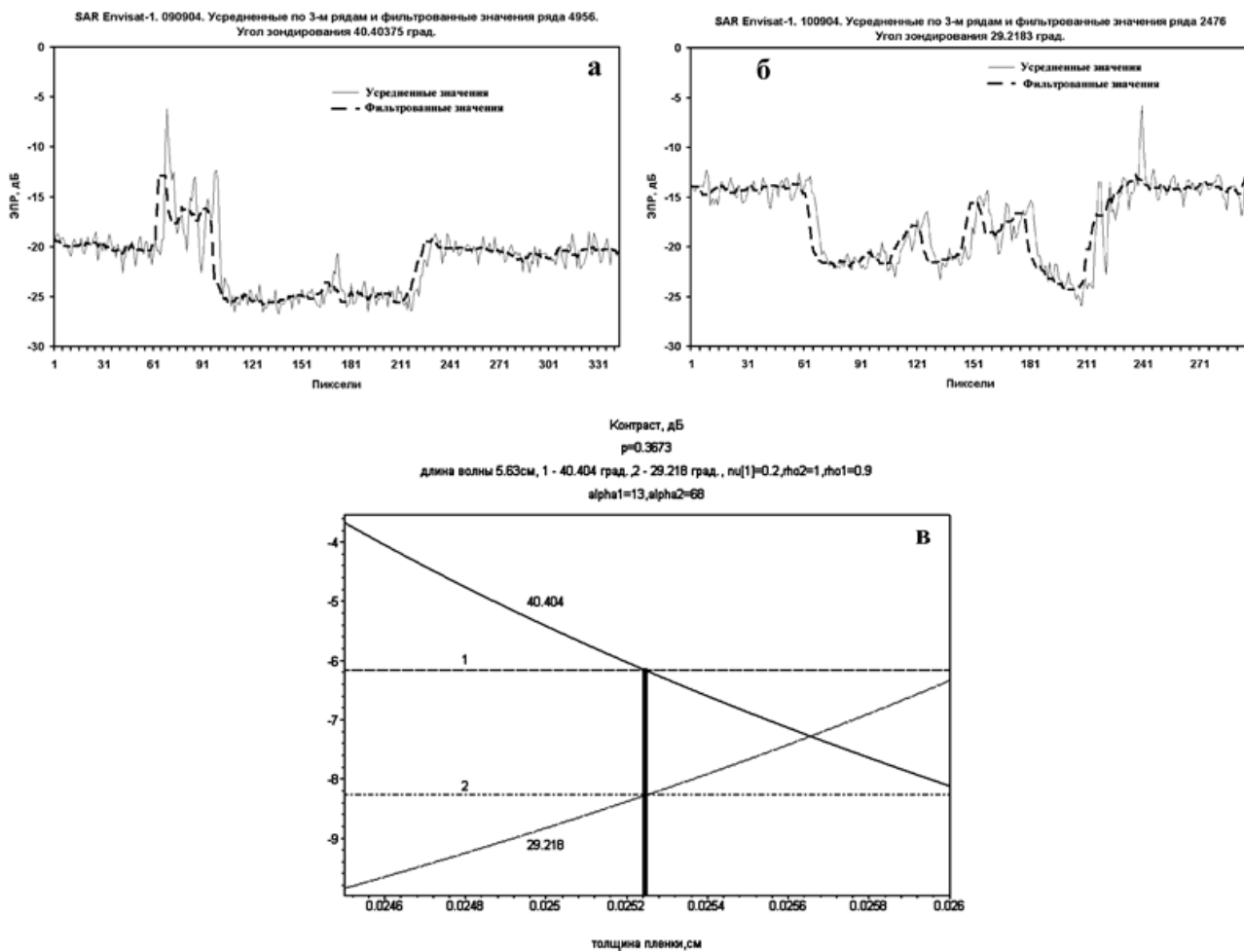


Рисунок 4.6 - Пример обработки РЛЗ РСА Envisat-1: **а** та **б** - значення ЕПР морської поверхні у відповідних рядах каліброваних РЛЗ 09.09.04 та 10.09.04; **в** - розрахункова товщина плівки (жирна лінія) для експериментальних значень радіоконтрастів, отриманих з **а** та **б**

Для оцінки об'ємів розлитої нафти була визначена за допомогою програми NEST 4B-1.0 площа нафтових плям (див. рисунок 4.7). Визначення площі плям проводилося за оригінальними зображеннями для виключення можливих помилок, що виникають при повороті зображень. Як показали оцінки, площа великої плями на двох послідовних РЛ-знімках відрізняється незначно (приблизно на $\sim 2.3 \text{ км}^2$) і становить приблизно 120 км^2 (див. рисунок 4.7а), тоді об'єм нафти дорівнює:

$$V = S_1 \cdot h = 123.426 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \cdot 0.25 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 30500 \text{ м}^3,$$

а вага нафти P при густині $\rho = 0.9 \text{ т/м}^3$ складе $P = V\rho = 27450 \text{ тонн}$. Відповідно, при площі малої плями 2 $S = 4.673 \text{ км}^2$ (див. рисунок 4.5б) об'єм розлитої нафти дорівнює $V = 467.3 \text{ м}^3$, а вага $P = V\rho = 420.6 \text{ т}$.

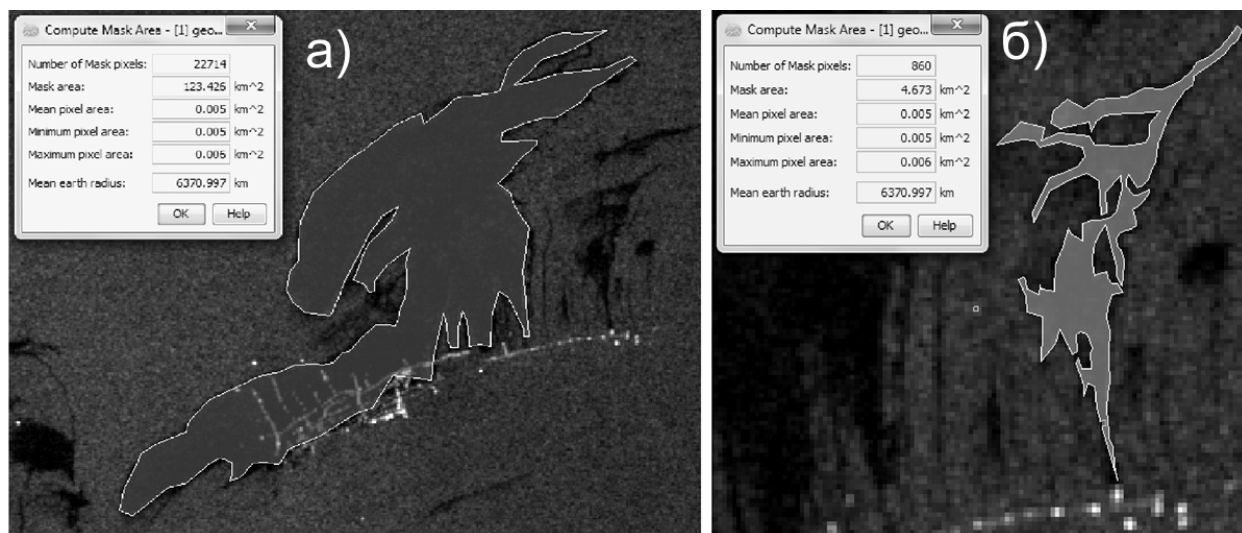


Рисунок 4.7 - Визначення площі нафтових плям за допомогою програми NEST 4B-1.0 за РЛЗ 10.09.04. **а)** - для великої плями 1; **б)** - для малої плями 2

Моделювання динаміки забруднення. Моделюванню передував аналіз форми плями та маси розлитої нафти, а також сейсмічних і погодних умов в досліджуваному районі до радіолокаційних зйомок і в інтервалі між ними. Дані радіолокаційних оцінок форми і маси плям нафти показали, що моделювання можна проводити окремо для великої і малої кількості розлитої нафти, а саме для великої і малої плям (див. рисунок 4.5, стрілки 1 і 2, відповідно).

Для першого випадку моделювання дозволяє вказати на першопричини появи в акваторії такого великого об'єму нафти ($V \approx 30000 \text{ м}^3$). 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: 08.09.04 в 16-16 UTC магнітудою 3.8, в 20-22 UTC - магнітудою 3.7 і в 22-20 UTC - магнітудою 4.7. 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, які видно на РЛЗ як яскраві точки в кінці білих ліній - платформ бурових, об'єднаних в естакаду нафтовидобувного комплексу.

Спираючись на ці міркування, було проведено моделювання динаміки розтікання нафтової плями 1, початок моделювання якого прив'язано до початку сейсмічної активності. На рисунку 4.8 показані траєкторії центрів мас частинок, випущених одночасно з 50 джерел, рівномірно розподілених уздовж штриховий лінії, показаної на рисунку 4.8 а, б. Час початку розливу відповідає часу першого землетрусу, а кінцевий час - часу другої радіолокаційної зйомки, тобто загальний інтервал аналізу з 08.09.2004 16-20 UTC по 10.09.2004 06-28 UTC. При цьому був обраний "середній тип нафти", характеристики якого відповідають типовим характеристикам нафти в цьому районі Каспійського моря [143].

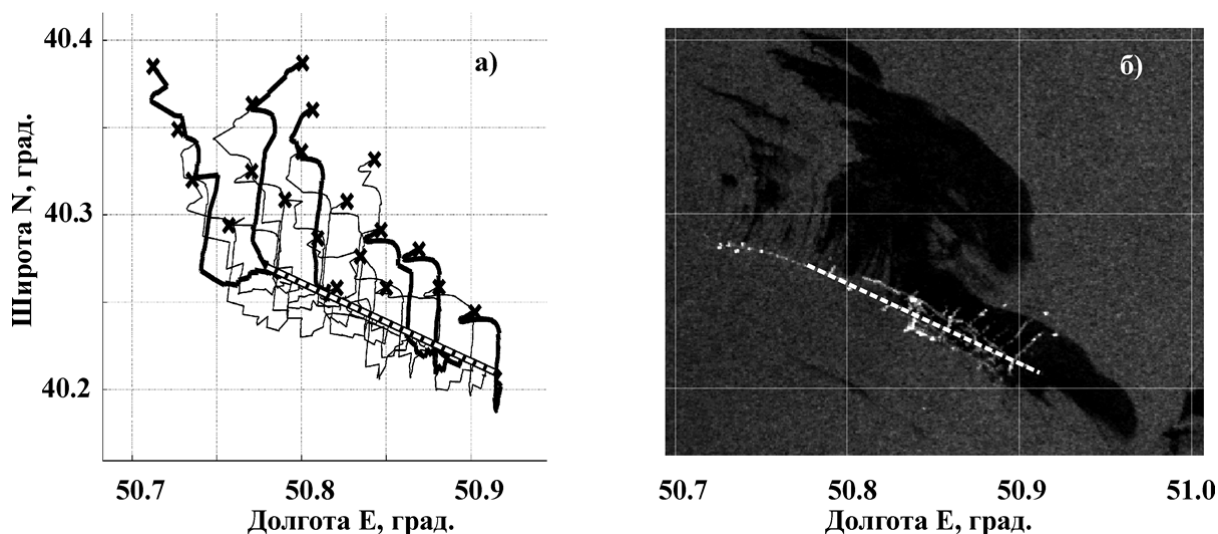


Рисунок 4.8 - Результати моделювання (а) поширення великої плями 1 (див. рис. 4.5) і фрагмент (б) РЛЗ РСА Envisat-1 10.09.04. Лінія початку моделювання вказана штриховою білою лінією, траєкторії деяких частинок для наочності виділені жирним, кінці траєкторій центрів мас частинок показані хрестами

Як видно з рисунку 4.8а, спочатку нафта рухалася на південь (до 09.09.2004, 5:00 UTC) під дією дрейфових течій, викликаних північно-східним вітром. Після цього вітер змінює свій напрямок на південно-східний і пляма

рухається на північ. При цьому південний край зміщується на північ набагато слабкіше, ніж північний край плями через неоднорідність вітру (див. рисунок 4.5). Північний край пересувається на північний захід, а потім повертає вправо на північний схід, що узгоджується з переміщенням межі нафтової плями, що визначається за послідовними радіолокаційними знімками. Така траєкторія пов'язана в першу чергу зі зміною напрямку і швидкості вітру. Вітри слабшали і оберталися на захід в кінці розрахунку, що і викликало поворот в русі плями. Відзначимо, що швидкості вітру в інтервалі між РЛ-зйомками були невисокі - від 3 до 5 м/с. Геострофічні швидкості не змінювали свого напрямку, були невеликі ~ 0.05 м/с і спрямовані на південний схід.

Так само, як і для великої плями 2, можна промодельовати і появу малої плями нафти 2 (див. рисунок 4.5). На рисунку 4.5а ця пляма спостерігається зі слабким контрастом навіть зі зміненим динамічним діапазоном РЛЗ. Це пов'язано з тим, що при зйомці пляма знаходилася в дальній зоні смуги огляду РСА (кут спостереження $\theta \approx 40^\circ$). Оскільки нафтовий розлив спостерігається на обох РЛЗ, то ми припустили, як і в разі розливу великої плями 1 (див. рисунок 4.5), що можливим джерелом розливу також є серія землетрусів 08.09.04. Моделювання імпульсного розливу нафти об'ємом $V \approx 610 \text{ м}^3$ з 08.09.2004 22-20 UTC (моменту останнього землетрусу) показало (см. рисунок 4.9в, крива 1), що на момент 2-ої РЛ-зйомки нафта може мати об'єм $V \approx 460 \text{ м}^3$ і розлитися до товщини $h = 0.09$ мм, що добре узгоджується з радіолокаційними оцінками ($V \approx 467.3 \text{ м}^3$, $h = 0.10$ мм). При моделюванні передбачалося, що джерелом забруднення був район бурової вишки з координатами $40,283^\circ N$, $50,743^\circ E$ (див. рисунок 4.9б, стрілка «и»). Траєкторії переміщення центрів мас частинок, випущених з точки з такими координатами (див. рисунок 4.9а), добре узгоджуються з формою РЛЗ, наведеного на рисунку 4.9б.

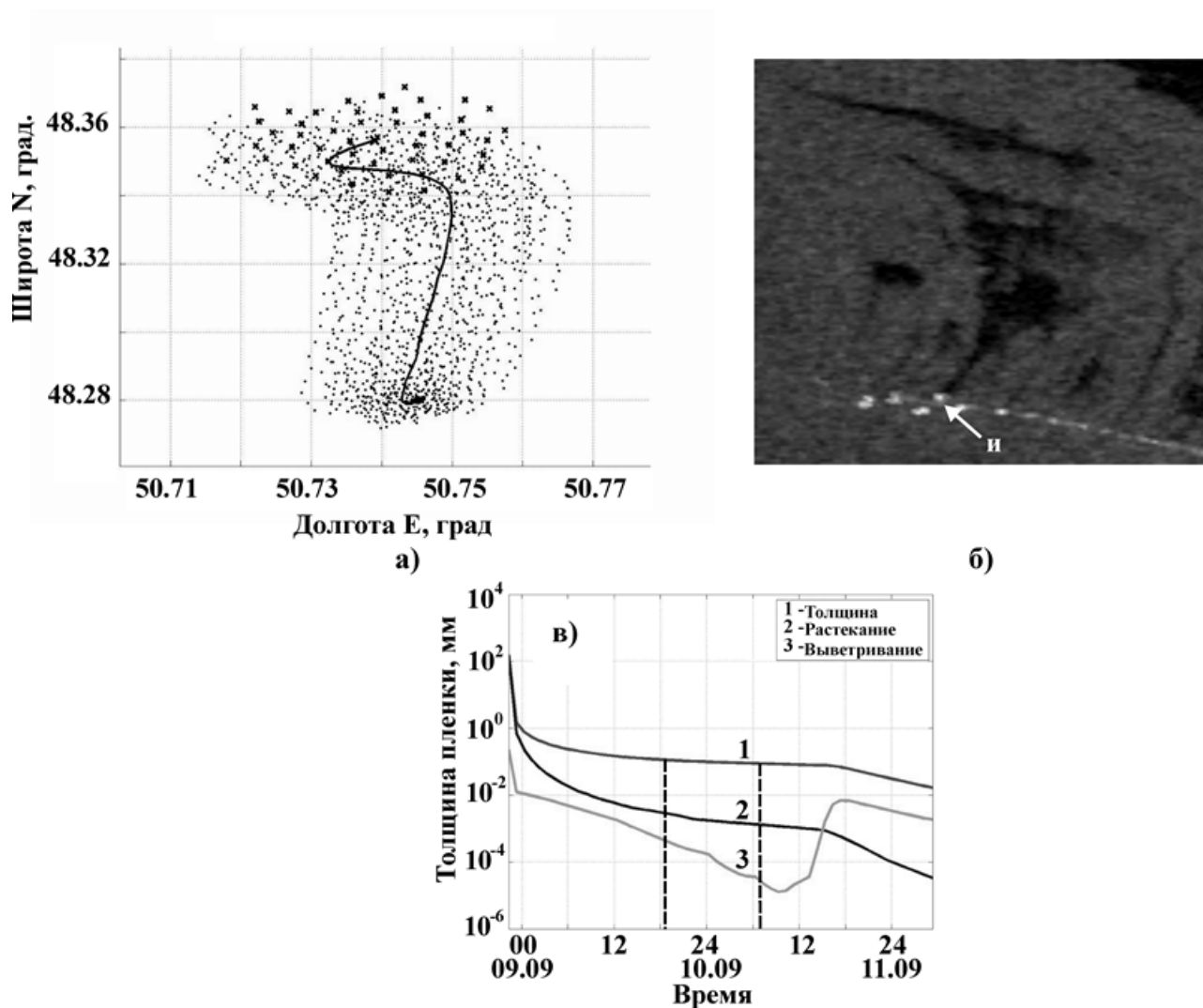


Рисунок 4.9 - Результати моделювання малої плями 2 (див. рис. 4.5). а) - суміщена з координатною сіткою траєкторії переміщення центрів мас частинок плями (суцільна лінія); б) - фрагмент РЛЗ РСА Envisat-1 (10.09.04); в) - часова залежність зміни товщини малої плями, де вертикальними штриховими лініями зазначено час 1-ї і 2-ї РЛ-зйомок; и - місце ймовірного розливу нафти

На рисунку 4.9в представлені тимчасова мінливість товщини нафтової плями і вкладів процесів розтікання і вивітрювання. Штриховими лініями на цьому графіку зазначено час 1-ї і 2-ї РЛ-зйомок. Для ілюстрації подальшої еволюції товщини плівки розрахунок був продовжений ще на добу. Радіолокаційні вимірювання, підтверджені моделюванням, показали, що вже через 32 години після розливу нафти об'ємом $V \approx 610 \text{ м}^3$ товщина плівки складає не більше 100 мкм, а ще через добу - близько 40 мкм. У нашому

випадку моделювання показало, що можливо ще більш швидке зменшення товщини плівки (рисунок 4.9в, крива 1), пов'язане з посиленням швидкості вітру до 10-15 м/с в кінці 10.09.2004. Під дією штормових вітрів маса і, отже, товщина плівки різко зменшується, в першу чергу, під впливом диспергування. Це ілюструють криві 2, 3 на рис. 4.9в, що показують внесок зазначених процесів в зменшення сумарної товщини плівки. Висока тимчасова динаміка процесів розтікання нафти, пов'язана з процесами розвитку морського хвилювання також відзначалася в роботах [141, 144].

Таким чином, при вимірах товщини нафтової плівки радіолокаційними і іншими методами істотне значення має час затримки вимірів відносно початку розливу. Такий висновок важливий для розуміння відмінностей в оцінках товщини нафтової плівки різними авторами. Як приклад, в таблиці 4.3 наведені значення товщини нафтових плівок, отримані під час моніторингу ступеня забрудненості акваторії родовища Нафтові Камені в різні роки.

Таблиця 4.3 - Результати моніторингу акваторії родовища Нафтові Камені

№ п/п	Тип вимірювань	Апаратура вимірювань	Дата вимірювань	Товщина плівки, мм	Посилання на літературу
1	РМ +контактні виміри	Літаковий радіотепловий багаточастотний комплекс (0.8, 2.0, 3.0, 8 и 18 см)	1976 г.	0.25 - 0.5	[141, 44, 45]
2	РЛ багаточастотний метод	Літаковий багаточастотний радіолокаційний комплекс «МАРС» (0.8, 3.0, 23 и 180 см)	1989-1990 гг.	0.1 - 1.7	[145, 58, 42, 146]
3	РЛ одночастотний метод +контактні виміри	Багаточастотний радіолокаційний комплекс на морській платформі (Ka-, Ku-, X-, C-band) PCA Envisat-1 (5.6 см)	2007-2008 гг.	1 - 5	[62]
4	РЛ багатокутковий метод	PCA Envisat-1 (5.6 см)	2004, 2009, 2010 гг.	0.1 - 0.6	[69 - 75, 147]
5	РЛ+оптика	PCA Radarsat-2 (5.6 см)	2009 г.	0.3 - 5 мкм	[148]

З таблиці 4.3 можна зробити висновок, що найбільші відмінності товщини нафтової плівки спостерігаються при використанні даних супутникових вимірювань, оскільки радіолокаційні зйомки забруднених акваторій проводяться тільки під замовлення. При цьому найчастіше реєструється кінцева фаза розливу, в якій присутні тільки тонкі плівки (товщиною 30 мкм і менше).

Висновки до розділу 4

1. Запропоновано метод багатокутового 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 багатокутового 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 зниження об'ємів розлитої 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

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 ІЧ–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, ІЧ 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 ІЧ + 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 багатокутового 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 багатокутового радіолокаційного зондування, що полягає у врахуванні результатів модельних розрахунків розтікання нафтопродуктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. The OFDA/CRED International Disaster Database [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.emdat.be/>.
2. Болота України сайт. URL: <http://molodan.org.ua/boloto.html>.
3. Горная энциклопедия. Подземный пожар [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.mining-enc.ru/s/samovozgoranie-torfa>.
4. SAR FOR AGRICULTURE - Research and Development at AAFC [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.jecam.org/0920_SAR_Agricultural_Applications_JECAM_2014.pdf.
5. Шилин Б. В. Об использовании инфракрасной аэросъемки при выявлении участков избыточного увлажнения и выходов подземных вод/ Шилин Б. В., Гусев Н. А., Кариженский Е. Я. // Сов. Геология. 1971. № 1. С. 155–160.
6. Goward S. N. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements An exploration with the simplified simple biosphere model / S. N. Goward, Xue Y., Czajkowski K. P. // Remote Sensing of Environment. -2002. - Vol.79. - P. 225–242.
7. Becker R. Coast guard evaluates oil spill detection schemes / R. Becker // Microwaves. – 1972. – May. – P. 12–14.
8. Pilon R. O. Radar imagery of oil slicks / R. O. Pilon, C. G. Purves // IEEE Trans. Aerosp. and Electron. Syst. – 1973. – Vol. 9, № 5. – P. 630–636.
9. Радиолокационные обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности / Ю. М. Галаев, А. И. Калмыков, А. С. Курекин, Ю. А. Лемента, Б. А. Нелепо, И. Е. Островский, А. П. Пичугин, В. В. Пустовойтенко, Ю. В. Терехин // Известия. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1977. – Т.13, № 4. – С. 406–414.
10. Калмыков А. И. Особенности обнаружения неоднородностей морской поверхности радиолокационным методом / А. И. Калмыков, А. П. Пичугин // Известия АН СССР. ФАО. – 1981. – Т.17, №7. – С.754–761.

11. Johnson J. W. Characteristics of 13.9 Ghz radar scattering from oil films on the sea surface / J. W. Johnson, W. F. Croswell // Radio Science. – 1982. – Vol.17, №3. – P. 611–617.
12. СНиП 2.01.15-90. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://libgost.ru/snip/68124>.
13. Болотные массивы Украины [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.photoukraine.com/russian/articles?id=24>.
14. Контроль состояния торфяников, лесных массивов и полигонов по захоронению бытовых отходов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.aerogeo.ru/in-dex.php?option=com...view....>
15. Чудновский А. Ф. Теплофизика почв / А. Ф. Чудновский // М.: Наука. – 1976. – 352 с.
16. Dubois P. C. Measuring Soil Moisture with Imaging Radars / P. C. Dubois, J. J. van Zyl, T. Engman // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1995. – Vol.33, №4. – P. 915–926.
17. Oh Y. Condition for precise measurement of soil surface roughness / Y. Oh, Y. C. Kay // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1998. – Vol.36, № 2. – P. 691–695.
18. Tassoudji M. A. Design consideration and implementation of the LCX polarimetric scatterometer (POLARSCAT) / M. A. Tassoudji, K. Sarabandi, F. T. Ulaby // Rep. 022486-T-2.- Radiation Lab.- Univ. Michigan.- Ann Arbor. – 1989. – June. – 79 p.
19. Fung A. K. Backscattering from a randomly rough dielectric surface / A. K. Fung, Z. Li, K. S. Chen // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1992. – Vol.30, № 2. – P. 356–369.
20. Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameter Using L-band SAR Image Data / J. Shi, J. Wang, A. Y. Hsu, P. E. O'Neil E. T. Engman// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1997. – Vol.35, № 5. – P. 1254–1266.

21. Goward, S. N. Observed relation between thermal emissions and reflected spectral reflectance from a complex vegetated landscape / S. N. Goward, G. C. Cruickshanks, A. S. Hope // *Remote Sensing of Environment*. – 1985. – Vol.18. – P. 137 – 146.
22. Price, J. C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration / J. C. Price // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1990. – Vol.28, № 5. – P. 940–948.
23. Curran, P. J. Multispectral remote sensing for estimation of green leaf area index / P. J. Curran // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. – 1983. – Series A. – № 309. – P. 257–270.
24. Jackson R. D. Spectral indices in n-space / R. D. Jackson // *Remote Sensing of Environment*. – 1983. – Vol.13. – P. 1401–1429.
25. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C. J. Tucker // *Remote Sensing of Environment*. – 1979. – Vol.8. – P. 127–150.
26. Hatfield J. L. Canopy temperatures: the usefulness and reliability of remote measurements / J. L. Hatfield // *Agronomy Journal*. – 1979. – № 71. – P. 889–892.
27. Hunt G. E. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infrared thermal wavelengths / G. E. Hunt // *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*. – 1973. – № 99. – P. 345–369.
28. Smith J. A. Thermal vegetation canopy model studies / J. A. Smith, K. J. Ranson, D. Nguyen, L. Balick // *Remote Sensing of Environment*. – 1985. – Vol.11. – P. 26-31.
29. Geiger R. *Climate near the ground* / R. Geiger // Cambridge, MA: Harvard University Press. – 1965. – 611 p.
30. A simplified biosphere model for global climate studies / Y. Xue, P. J. Sellers, J. L. Kinter, J. Shukla // *Journal of Climate*. – 1991. – Vol.4, Issue 3. – P. 345-364.
31. Use of Russian soil moisture and meteorological observations to validate soil moisture simulations with biosphere and bucket models/ A. Robock, K. Y. Vinnikov,

- C. A. Schlosser, N. A. Speranskaya, Y. Xue // *Journal of Climate*. – 1995. – Vol.8. – P. 15-35.
32. 18-year land-surface hydrology model simulations for a midlatitude grassland catchment in Valdai, Russia / C. A. Schlosser, A. Robock, K. Y. Vinnikov, N. A. Speranskaya, Y. Xue // *Monthly Weather Review*. – 1997. – №125. – P. 3279–3296.
33. A simplified Simple Biosphere Model (SSiB) and its application to land-atmosphere interactions / Y. Xue, F. J. Zeng, C. A. Schlosser, S. Allen // *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*. – 1998. – № 22. – P. 468–480.
34. Azad Hossain A. K. M. Mapping Spatial Variation in Surface Moisture Using Reflective and Thermal ASTER Imagery for Southern Africa / A. K. M. Azad Hossain, G. Easson, V. K. Boken // *ASPRS – Annual Conference*. – Reno, Nevada. – May 1-5, 2006.
35. Liang, S. Quantitative remote sensing of land surfaces / S. Liang // *John Wiley & Sons Inc*. – 2004. – P. 281–282.
36. Modified soil adjusted vegetation index (MSAVI) / J. Qi, A. Chehbouni, A. R. Huete, Y. H. Kerr, S. Sorooshian // *Remote Sensing of Environment*. – 1994. – Vol.48, Issue 2. – P. 119–126.
37. Lambin E. F. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis / E. F. Lambin, D. Ehrlich // *International Journal of Remote Sensing*. – 1996. – Vol.17. – P. 1087–1105.
38. Drought monitoring of crop using remote sensing and GIS / G. Tian, L. B. Jupp, F. Qiang, W. Bingfang, L. Qinhua // *International Journal of Remote Sensing*. – 2002. – Vol.6. – P. 145–152.
39. Изображения Земли из космоса: примеры применения // М.: ООО Инженерно-технологический центр «Сканекс». – 2005. – 100 с.
40. Kramer H. J. Observation of the Earth and its Environment. Survey of Missions and Sensors / H. J. Kramer // Berlin: Springer-Verlag. – 2002. – 1514 p..

41. Бондур В. Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса / В. Г. Бондур // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3–17.
42. 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.
43. NASA DC-8 Airborne Laboratory [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.nasa.gov/mission_pages/icebridge/instruments/dc8.html.
44. The Convair 580 SAR Facility – Recent Activities and Future Opportunities [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/~workshop/presentations_2010/Airborne%20-%20C%20Brown.pdf.
45. Using Air- and Spaceborne Remote Sensing Data for the Operational Oil Spill Monitoring of the German North Sea and Baltic Sea / L. Tufte, O. Trieschmann, T. Hunsanger, S. Kranz, U. Barjenbruch // ISPRS Archives. – Vol. XXXV, Part B7, 2004, XXth ISPRS Congress, Technical Commission VII. – Istanbul. – 2004. – P. 1006-1010.
46. Krishen K. Detection of Oil Spills Using a 13.3-GHz Radar Scatterometer / K. Krishen // Journal of Geophysical Research. – 1973. – Vol.78, No 12. – P. 1952-1963.
47. Радиолокационные обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности / Ю. М. Галаев, А. И. Калмыков, А. С. Курекин [и др.] // Известия АН СССР. ФАО. – 1977. – Т.13, № 4. – С. 406–414.
48. Многоцелевой радиолокационный самолетный комплекс исследования Земли “МАРС” / А. И. Калмыков, В. Н. Цымбал, А. С. Курекин [и др.] // Радиофизика и Радиоастрономия. – 1998. – Т.3, №2. – С. 119–129.
49. Оценка параметров нефтяной пленки на морской поверхности методом многочастотного радиолокационного зондирования / А. Г. Боев,

Г. Э. Карвицкий, А. Я. Матвеев [и др.] // Радиопизика и радиоастрономия. – 1998. – Т.3, №1. – С. 43–48.

50. Experimental Multifrequency Investigations into the Sea Surface Roughness Inhomogeneities Through the Use of the "MARS" Radar System / M. V. Belobrova, A. G. Boev, V. K. Ivanov [et al.] // Proc. 4-th European Conf. on Synthetic Aperture Radar, EUSAR 2002: 4-6 June 2002. – Cologne (Germany) . – VDE VERLAG GMBH *Berlin*Offenbach. – P. 733–736.

51. Результаты многочастотного радиолокационного мониторинга неоднородностей волнения морской поверхности / М. В. Белоброва, А. Г. Боев, В. К. Иванов [и др.] // Космічна наука і технологія. – 2002. – Т.8, №2/3. – С. 275–278.

52. Боев А. Г. Опыт оперативного мониторинга загрязненной нефтепродуктами морской поверхности радиолокационными средствами ДЗЗ аэрокосмического базирования / А. Г. Боев, А. Я. Матвеев, В. Н. Цымбал // Матеріали регіональної наради "Можливості сучасних ГІС/ДЗЗ – технологій у сприянні вирішення проблем причорноморського регіону", 11-14 листопада 2003 р., Одеса, Україна. – 2003. – С. 65–67.

53. Sharkov E. A. Passive Microwave Remote Sensing of the Earth. Physical Foundations / E. A. Sharkov // Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK. – 2003. – 611 p.

54. Нефтяные загрязнения восточной части Черного моря: космический мониторинг и подспутниковая верификация / К. Ц. Литовченко, О. Ю. Лаврова, М. И. Митягина [и др.] // Исследования Земли из космоса. – 2007. – №1. – С. 81–94.

55. Боев А. Г. К теории радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества / А. Г. Боев, Г. Э. Карвицкий // Радиопизика и радиоастрономия. – 1997. – Т.2, №3. – С. 281–291.

56. Боев А. Г. Коэффициент затухания поверхностных волн под пленкой поверхностно – активного вещества конечной гидродинамической толщины /

А. Г. Боев, Н. Н. Ясницкая // Прикладна гідромеханіка. – 2002. – Т.4, № 4. – С. 14–22.

57. Боев А. Г. Гашение морского волнения пленкой поверхностно-активного вещества конечной толщины / А. Г. Боев, Н. Н. Ясницкая // Известия РАН. ФАО. – 2003. – Т.39, № 1. – С. 132–141.

58. Боев А. Г. Радиолокационный метод оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности / А. Г. Боев, А. Я. Матвеев // Исследования Земли из космоса. – 2008. – №5. – С. 29–36.

59. Боев А. Г. Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла "Нефтяные камни" по данным многочастотного радиолокационного зондирования / А. Г. Боев, А. Я. Матвеев // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т.10, №2. – С. 178–188..

60. Матвеев А. Я. Радиолокационный метод оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности / А. Г. Боев, А. Я. Матвеев // Материалы международной научной конференции "Достижения в спутниковой океанографии: изучение и мониторинг окраинных морей Азии", 3-6 октября, 2007, Владивосток. – 2007. – Р. 83–85..

61. Evaluation of Oil Film Parameters on the Sea Surface Using Multifrequency Radar Data / A. G. Boyev, G. E. Karvitsky, A. Ya. Matveyev [et al.] // Telecommunications and Radio Engineering. – 1997. – Vol.51, №8. – P. 4–12.

62. Sandven S. Development of marine oil spills/slicks. Satellite monitoring system elements for the Black Sea, Caspian Sea and Kara/Barents Seas / S. Sandven, V. Kudriavtsev, V. Malinovsky // Proc. SEASAR 2008, the 2nd international workshop on advances in SAR oceanography from Envisat and ERS missions, 21-25 January, Rome, Italy [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://earth.esa.int/workshops/seasar2008/participants/301/pres_301_sandven.pdf.

63. Радиолокационное зондирование поверхностных загрязнений моря из космоса : модельные исследования и некоторые приложения [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.rshu.ru/files/2008_ivanova.pdf.

64. Sandven S. Marine oil spill control: SAR monitoring and model prediction (OSCSAR), ESA-IAF Call for Proposals / S. Sandven, V. Kudryavtsev // GMES Networking with Russia and Ukraine in 2004. – Bergen, NEASC, 2004. – 35 p.
65. Very high frequency radiowaves scattering by a disturbed sea surface. / F. G. Bass, I. M. Fuks, A. I. Kalmykov, I. E. Ostrovsky, A. D. Rosenberg // IEEE Trans. Antennas and Prop. – 1968. – Vol.AP-16. – P. 749-754.
66. Комплекс радиофизической аппаратуры для дистанционного зондирования природной среды: Препринт / А. С. Гавриленко, В. В. Крижановский, Ю. А. Кулешов и др. //АН УССР. Институт радиофизики и электроники, Харьков. – 1986. – № 321. – 39 с.
67. Радиолокатор бокового обзора ИСЗ «Космос-1500» / А. И. Калмыков, А. С. Курекин, В. Б. Ефимов и др.// Исследования Земли из космоса. – 1985. – №3. – С. 76-83.
68. Bass F. G. Detection of oil spills on the sea using radar measurements / F. G. Bass, S. A. Pusenko // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 1994. – Vol.8, № 7. – p. 859-870.
69. 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.
70. 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.
71. 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.

72. 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.

73. 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.

74. Radar remote sensing multiangular satellite radar diagnostics of oil spills on the sea surface: validation of the method / A. Ya. Matveyev, A. A. Kubriakov, A. G. Boyev, D. M. Bychkov, S. A. Velichko, V. K. Ivanov, S. V. Stanichny, V. N. Tsymbal // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. - Vol.75, № 4. - P. 313–331.

75. Modeling of Oil Spreading in a Problem of Radar MultiAngle Diagnostics of Sea Surface Pollutions / A. Ya. Matveyev, A. A. Kubriakov, A. G. Boyev, D. M. Bychkov, V. K. Ivanov, S. V. Stanichny, V. N. Tsymbal // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2016. - Vol.52, No. 9. - P. 940–950.

76. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич // Москва.:ГИТТЛ. – 1959. – 669 с.

77. 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.

78. Авіаційний комплекс АКДЗ-30 дистанційного зондування природного середовища / В. М. Цимбал, В. І. Лялько, О. С. Курекін, О. С. Гавриленко // Космічна наука і технологія. – 2002. – Т.8, № 2/3. – С. 36-40.
79. Earthnet OnLine Interactive [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://earth.esa.int/web/guest/eoli>.
80. ESA SAR Toolbox (NEST) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://earth.esa.int/web/nest/news/-/article/nest-4b-1-0-released>.
81. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии. Пер. с нем. / Под ред. В. Г. Трифонова // М.: Мир. - 1988. - 343 с.
82. 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.
83. Оперативний моніторинг підтоплень авіаційним комплексом дистанційного зондування АКДЗ-30. / В. М. Цимбал, Д. М. Бычков, А. С. Гавриленко, О. Я. Матвеев, В. І. Лялько, Г. П. Рожок, В. С. Оголенко // Нагальні проблеми запобігання та боротьби з регіональними підтопленнями земель: матеріали Третьої науково-практичної конференції "ПІДТОПЛЕННЯ -2005", Лазурне, Херсонської обл., 20-24 червня 2005. – НПЦ "Екологія наука техніка", 2005. – С. 28–30.
84. 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. - Т16, № 1. - С. 15-26.
85. The Energy Budget [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://scied.ucar.edu/longcontent/energy-budget>.
86. Метео Энциклопедия [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://meteorologist.ru/vstrechnoe-izluchenie.html>.

87. Кондратьев К. Я. Актинометрия / К. Я. Кондратьев // Л.: Гидрометеорол. – 1965. – 690 с.
88. Jones & Vaughan: Remote Sensing of Vegetation 3. Radiative properties of vegetation, soils, and water [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.oup.com/uk/orc/bin/9780199207794/ch03.pdf>.
89. Распределение температур типа излучения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.geochemmap.ru/ecologi/ecoteplo42.html>.
90. 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.
91. 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.
92. Суммарная радиация и радиационный баланс [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://geoinfoed.ru/ekoland/246-summarnaya-radiaciya-i-radiacionnyj-balans.html>.
93. Estimation of surface long wave radiation and broadband emissivity using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) land surface temperature/emissivity products / K. Wang, Z. Wan, P. Wang, M. Sparrow, J. Liu, X. Zhou, and S. Haginoya // J. Geophys. Res. – 2005. – Vol. 110. – D11109, doi:10.1029/2004JD005566.
94. Москаленко Н. И. Глобальное моделирование полей излучения и радиационного теплообмена / Н. И. Москаленко, Я. С. Сафиуллина, М. С. Садыкова // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». - НТЦ «ТАТА». – 2009. – № 6 (74) . – С. 89-98.
95. Рожок Г. П. Определение зон подтопления территорий с использованием влагоуровнемера радиоволнового диапазона / Г. П. Рожок, В. О. Гунченко,

В. Н. Цымбал // Нагальні проблеми запобігання та боротьби з регіональними підтопленнями земель: матеріали Третьої науково-практичної конференції "ПІДТОПЛЕННЯ -2005", Лазурне, Херсонської обл., 20–24 червня 2005. – С. 26-27.

96. Вульфсон Л. Д. Особенности формирования температуры и коэффициентов отражения земных покровов в тепловом ИК и СВЧ - диапазонах применительно к дистанционному зондированию в геологических и природоохранных целях : дис. канд. физ.-мат. наук 01.04.11/ Л. Д. Вульфсон // К. – 2000. – 236 с. [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.ukrdissers.info/disser_45822.html.

97. Attema E. P. W. Vegetation modeled as a water cloud / E. P. W. Attema, F. T. Ulaby // Radio Science. – 1978. – №13(2) . – P. 357-364.

98. Microwave dielectric behavior of Wet soil / M. T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. S. Dobson, M. A. EL-rayes, Lin-Kun Wu // IEEE Trans. Geosc. Remote Sens. – 1985. – Vol.23, № 1. – P. 25-34.

99. 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.

100. 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.

101. 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>.

102. Карты губерний подведомственных Управлению Первого Департамента Государственных Имуществ с приложением кратких статистических ведомостей. Атлас Грибовского рукописный. 1843 год [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://wiki.laser.ru/index.php/Черниговская губерния](http://wiki.laser.ru/index.php/Черниговская_губерния).

103. Fire resque. [Электронный ресурс] – Режим доступа:
http://firerescue.ru/magazine/pojar_po_priboram.

104. Janzhong ZHANG, DISSERTATION Spatial and Statistical Analysis of Thermal Satellite Imagery for Extraction of Coal Fire Related Anomalies, ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doctors der Naturwissenschaften, eingereicht an der Technischen Universität Wien. Wien. 2004-04-01 [Электронный ресурс] – Режим доступа:
http://www.ipf.tuwien.ac.at/phdtheses/diss_jz_04.pdf.

105. Атмосфера. - 1991 [Электронный ресурс] – Режим доступа:
http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-228175931.pdf.

106. 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.

107. 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..

108. 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.

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

110. Авиационная дистанционная радиолокационно-радиотепловая диагностика переувлажнения почв / В. К. Иванов, А. Я. Матвеев, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // Физические основы приборостроения. – 2012. – Т.1, № 2. – С. 91-106.

111. 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 // Радиофизика и электроника. - 2014. - Т.5, № 2. - С. 42-48.

112. 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.

113. Левковский, С. С. Водные ресурсы Украины: использование и охрана / С. С. Левковский // Київ : Вища шк., 1979. – 200 с.

114. Using Air- and Spaceborne Remote Sensing Data for the Operational Oil Spill Monitoring of the German North Sea and Baltic Sea / L. Tufte, O. Trieschmann, S. Hunsanger, S. Kranz, U. Barjen-burch // ISPRS Archives. XXth ISPRS Congress, Technical Commission VII, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey.– 2004. – Vol.XXXV, Part B7. – P. 1006-1010.

115. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова, А. Г. Костяной, С. А. Лебедев и др. // М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с.

116. DHI. 2011. MIKE 21/3 ecological modelling. MIKE 21/3 ECO Lab FM module. Short description. DHI Water Environment Health, Hørsholm, Denmark, 14 pp. [Электронный ресурс] – Режим доступа:
www.dhisoftware.com/Download/DocumentsAndTools/~/_media/Microsite_MIKEbyDHI/Publications/PDF/Short%20descriptions/MIKE213_FM_EL_Short_Description.ashx.
117. Guo W. J. A numerical oil spill model based on a hybrid method / W. J. Guo, Y. X. Wang // *Marine Pollution Bulletin*. – 2009. – Vol.58. – P. 726–734.
118. On the modeling of the 2010 Gulf of Mexico Oil Spill / A. J. Mariano, V. H. Kourafalou, A. Srinivasan, H. Kang, G. R. Halliwell, E. H. Ryan, M. Roffer // *Dynamics of Atmospheres and Ocean*. – 2011. – Vol.52. – P. 322–340.
119. Revisions of the ADIOS oil spill model / W. Lehr, R. Jones, M. Evans, D. Simecek-Beatty, R. Overstreet // *Environment Modelling & Software*. – 2002. – Vol.17. – P. 191-199.
120. Liungman O. Scientific Documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references. Seatrack Web. Official HELCOM oil drift forecasting system developed and administrated by SMHI and DAMSA with SINTEF oil weathering technology included / O. Liungman, J. Mattson // Norrköping. Sweden. – 2011. – 32 p.
121. Oil Spill Modelling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art / M. Reed, O. Jonansen, P. J. Brandvic, P. Daling, A. Lewis, R. Fiocco, D. Mackay, R. Prentki // *Spill Science & Technology Bulletin*. – 1999. – Vol.5, No. 1. – P. 3-16.
122. Kubryakov A. A. Mean Dynamic Topography of the Black Sea, computed from altimetry, drifter measurements and hydrology data / A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny // *Ocean Sci*. – 2011. – Vol. 7. – P. 745-753.
123. Revisions of the ADIOS oil spill model / W. Lehr, R. Jones, M. Evans et al. // *Environment Modelling & Software*. – 2002. – Vol.17, Iss. 2. – P. 189–197.

124. Chen H. Mathematical modeling of the oil spill on the sea and application of the modeling in Daya Bay / H. Chen, D. Li, L. Xiao // J. Hydrodynamics. Ser. B. – 2007. – Vol.19, Iss. 3. – P. 282-291.
125. Satellite Altimetry Data AVISO [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/my-aviso.html>.
126. 2007: Daily High-Resolution- Blended Analyses for Sea Surface Temperature / R. W. Reynolds, T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey and M. G. Schlax // J. Climate. – 2007. – P. 5473-5496.
127. 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) / M. Kanamitsu, W. Ebisuzaki, J. Woolen, M. Fiorino and J. Potter // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2002. – Vol.83, Iss. 11. – P. 1631-1643.
128. Weaver W. J. Characteristics of Spilled Oils, Fuels, and Petroleum Products: 1. Composition and Properties of Selected Oils. Oil Spill Report / W. J. Weaver // Athens: Ecosystems Research Division National Exposure Research Laboratory, 2003. – 72 p.
129. Fay J. A. The spread of oil slicks on calm sea / J. A. Fay // Oil on the sea. – N. Y.: Plenum Press, 1969. – P. 53–63.
130. Hoult D. P. Oil spreading on the sea / D. P. Hoult // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1972. – Vol.4. – P. 341–368.
131. Монин А. С. Явления на поверхности океана / А. С. Монин, В. П. Красицкий // Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 376 с.
132. Fu L.-L. Satellite Altimetry and Earth Sciences. A handbook of Techniques and Applications. International Geophysics series / L.-L. Fu, A. Cazenave // N. Y.: Academic Press, 2001. – Vol. 69. – 463 p.
133. Сезонная изменчивость климатических течений Каспийского моря, восстановленная ассимиляцией климатической температуры и солёности в модели циркуляции вод / В. В. Кныш, Р. А. Ибраев, Г. К. Коротаев, Н. В. Инюшина // Известия РАН. ФАО. – 2008. – Т.44 , №2. – С. 251-265.
134. Stanichny S. V. Parameterization of surface wind-driven currents in the Black Sea using drifters, wind, and altimetry data / S. V. Stanichny, A. A. Kubryakov,

- D. M. Soloviev // *Ocean Dynamics*. – 2016. – Vol.66, Iss. 1. – P. 1-10.
135. Delvigne G. A. L. Natural dispersion of oil / G. A. L. Delvigne, C. E. Sweeney // *Oil & Chemical Pollution*. – 1988. – Vol.4, № 4. – P. 281–310.
136. French-McCay D. P. Oil spill impact modelling: development and validation / D. P. French-McCay // *Environmental Toxicology and Chemistry*. – 2004. – Vol.23, Iss. 10. – P. 2441–2456.
137. Fingas M. F. The Evaporation of Oil Spills: Variation with Temperature and Correlation with Distillation Data / M. F. Fingas // *Proc. of the Nineteenth Arctic Marine Oil spill Program Technical Seminar*. – Ottawa: Environment Canada, 1996. – P. 27–72.
138. Schramm L. L. Emulsions Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry / L. L. Schramm // Washington: American Chemical Society, 1992. – 428 p.
139. Berry A. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea / A. Berry, T. Dabrowski, K. Lyons // *Marine pollution bulletin*. – 2012. – Vol.64, № 11. – P. 2489–2501.
140. Oil Spill Processes and Models / D. Mackay, I. Buist, R. Mascarenhas and S. Patterson // Ottawa: Environment Canada, 1980. – 86 p.
141. Шарков Е. А. Катастрофические разливы нефтепродуктов: взаимодействие с морской средой по данным спутникового и самолетного мониторинга / Е. А. Шарков, Н. Ю. Комарова // Третья всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 14-17 ноября 2005. – С. 173.
142. Earth Observation Catalogue and Ordering Services [electronic resource]. – access mode: <http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html>.
143. Суханов В. П. Переработка нефти. Учебник / В. П. Суханов // М.: Высшая школа, 1979. – 339 с.
144. Экспериментальные исследования загрязнений морской поверхности нефтепродуктами с помощью методов активной и пассивной СВЧ локации / Е. А. Беспалова, В. М. Веселов, К. И. Воляк и др. // *Водные ресурсы*. – 1983. –

№1. – С. 154 – 162.

145. Боев А. Г. Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла "Нефтяные камни" по данным многочастотного радиолокационного зондирования / А. Г. Боев, А. Я. Матвеев // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2005. – Т.10, №2. – С. 178-188.

146. Оперативное картографирование и диагностика нефтяных загрязнений морской поверхности по данным многочастотного радиолокационного зондирования / М. В. Белоброва, А. Г. Боев, А. В. Кабанов и др. // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т.15, №5. – С. 24-33.

147. 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.

148. Иванов А. Ю. Определение параметров нефтяных загрязнений по данным космической поляризационной радиолокационной съемки в районе нефтепромыслов "Нефтяные Камни" в Каспийском море / А. Ю. Иванов, М. Ю. Достовалов, А. А. Синева // Исслед. Земли из космоса. – 2011. – №5. – С. 31-44.

ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача

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 // Радиофизика 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 технологии» (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.