

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Aeronautikas institūts

Vladislavs Žavtkēvičs
Doktora studiju programmas “Transports” doktorants

**TĀLVADĪBAS GAISA KUĢU PIELIETOŠANA JŪRAS
AKVATORIJAS EKOĻOGISKAJĀ MONITORINGA
UZDEVUMU RISINĀŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. habil. sc. ing.*
ALEKSANDRS URBAHS

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

Žavtkēvičs, V. Tālvadības gaisa kuģu pielietošana jūras akvatorijas ekoloģiskajā monitoringa uzdevumu risināšanai. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 47 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-22" 2017. gada 29. jūnija lēmumu, protokols Nr. 01/2017.

ISBN 978-9934-22-260-3 (print)
978-9934-22-261-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 30. aprīlī Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātes Aeronautikas institūtā, Lauvas ielā 8, 218. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

*Asoc. professor Dr. sc. ing. Eduardas LASAUSKAS,
Head of Aeronautical Engineering department,
Antanas Gussyaitis Aviation Institute
of Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania*

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Vladimirs ŠESTAKOVŠ,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Zbigniew KORUBA,
Kielces Tehnoloģiju universitāte, Polija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Vladislavs Žavtkēvičs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, trīs pielikumi, 38 attēli, kopā 137 lappuses. Literatūras sarakstā ir 59 nosaukumi.

LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

SAR – Synthetic Aperture Radar – radiolokators ar sintezēto apertūru

EMSA – European Maritime Safety Agency – Eiropas Jūras drošības aģentūra

CSN – Clean Sea Net – pavadonu novērošanas sistēma

HELCOM – Helsinki Commission – Helsinku komisija

IK – infrared – infrasarkanais

SLAR – Side-Looking Airborne Radar – sānu apskates radars

CEPCO – Coordinated Extended Pollution Control Operation – koordinētā izvērsta piesārņojuma kontroles operācija

TGK – tālvadības gaisa kuģis

IMO – International Maritime Organization – Starptautiskā Jūrniecības organizācija

GIS – Graphic Information System – grafiskā informācijas sistēma

AUV – Automated Underwater Vehicle – automātiskais zemūdens līdzeklis

AMK – automātiskais monitoringa komplekss

ASV – Automated Surface Vehicle – automātiskais virsūdens līdzeklis

TAS – tālvadības naviācijas sistēmas

LIDAR – aerolāzerskenēšanas sensors

GPS – Global Positioning System – globālā pozicionēšanas sistēma

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	6
PĒTĪJUMA MĒRĶIS UN UZDEVUMI	7
PĒTNIECĪBAS METODES	7
PĒTĪJUMU OBJEKTI	7
DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE	7
AIZSTĀVAMĀS TĒZES	8
DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME	8
PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA	8
PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN SATURS	10
1. JŪRAS VIDES NAFTAS PIESĀRŅOJUMA MONITORINGA AR ATTĀLO ZONDĒŠANU GALVENO UZDEVUMU UN METOŽU ANALĪZE	11
1.1. Jūras vides piesārņojuma problēmas analīze.....	11
1.2. Jūras virsmas naftas piesārņojuma monitoringa galveno uzdevumu identificēšana	11
1.3. Esošo jūras virsmas naftas piesārņojuma monitoringa ar attālo zondēšanu sistēmu efektivitātes analīze	12
1.4. Baltijas jūras akvatorijas piesārņojuma līmeņa un avotu analīze	14
2. TĀLVADĪBAS GAISA KUĢA LIDOJUMA MARŠRUTA, VEICOT JŪRAS AKVATORIJAS MONITORINGA MISIJU, OPTIMIZĀCIJA	16
2.1. Optimālas maršrutēšanas uzdevuma formulēšana tālvadības gaisa kuģa vadīšanai.....	16
2.2. TGK optimālo lidojuma maršrutu sastādīšanas procedūras matemātiskā modelēšana	18
2.3. Optimālā maršruta meklēšanas algoritmu un programmu izstrāde	20
3. JŪRAS AKVATORIJAS NAFTAS PIESĀRŅOJUMA NEPĀRTRAUKTA MONITORINGA METODOLOĢIJAS IZSTRĀDE	24
3.1. Funkcionālas prasības bezpilota lidojošai platformai.....	24
3.2. Bezpilota platformas lidojuma optimāla maršruta un profila raksturojumu izvēle	25
3.3. Naftas piesārņojuma izplatīšanās uz ūdens virsmas matemātiskā modelēšana	26
3.4. Naftas piesārņojuma monitoringa algoritms	28
3.5. Monitoringa tehnoloģijas izstrāde, izmantojot TGK grupu	32
4. BEZPILOTA LIDOJOŠAS PLATFORMAS IZSTRĀDE JŪRAS AKVATORIJAS NAFTAS PIESĀRŅOJUMA MONITORINGAM	37
4.1. Monitoringa uzdevumu un prasību formulējums bezpilota platformai	37
4.2. Bezpilota platformas komponentu funkcionālās iespējas un tehniskās raksturlīknes	38
4.3. Ūdens provju ņemšanas no tālvadības gaisa kuģa borta ierīču un tehnoloģijas izstrāde ...	38
SECINĀJUMI	44
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI.....	46

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Baltijas jūras ekoloģiskais stāvoklis rada nopietnas bažas ekoloģiem. Galvenie iemesli ir naftas piesārņojuma pieaugums jūras naftas un gāzes industrijas paplašināšanās rezultātā un kuģu satiksmes intensitāte. Līdz ar naftas produktu transportēšanas apjoma pieaugumu pieaug arī jūras akvatorijas naftas piesārņojuma risks. Saskaņā ar *HELCOM (Helsinki Commission)* statistikas datiem Baltijas jūrā notiek trīs smagas avārijas gadā, un to rezultātā rodas naftas vai naftas produktu noplūde.

Naftas produktu patēriņa pieaugums, jēlnaftas ražošana, jaunu transporta koridoru veidošana un kuģu satiksmes palielināšana paaugstina jūras akvatorijas piesārņojuma risku. Baltijas jūra ir aktīvākais jūras ceļš pasaulē, kas savieno aptuveni 40 ostu un termināļu. Saskaņā ar automātiskās identifikācijas sistēmas (AIS) statistikas datiem Baltijas jūrā ikdienā atrodas vairāk nekā 2000 kuģu. Veicot noplūžu statistikas analīzi, tika secināts, ka kuģi ir galvenie piesārņojuma avoti.

Kuģniecība, ieskaitot naftas produktu transportēšanu, negatīvi ietekmē jūras vidi un piekrastes zonas. 2004. gadā *IMO (International Maritime Organization)* provizoriski nolēma piešķirt Baltijas jūrai īpaši jutīga jūras rajona (*PSSA – Particularly Sensitive Sea Area*) statusu. Īpaši jutīgs rajons nozīmē, ka teritorija ir īpaši jutīga un to apdraud cilvēku aktivitātes, kas saistītas ar kuģošanas un jūrniecības darbību. Īpašā rajona statuss starptautiskā līmenī nosaka aizsargāt jūras vidi vietējā līmenī. Apzīmējums ĪJR (īpaši jutīgs jūras rajons) paredz, ka reģiona valstīm ir jāvienojas par konkrētiem atbilstošiem aizsardzības pasākumiem, lai mazinātu videi nodarītā kaitējuma risku, ko izraisa kuģniecība.

Ņemot vērā nacionālo tautsaimniecības attīstības programmu, kas paredz ostu kravas apgrozījuma un naftas produktu pārvadājumu apjoma palielināšanu, cīņa pret jūras akvatorijas naftas un naftas produktu piesārņojumu ir viena no prioritārām problēmām arī Latvijā.

Atrisināt problēmu kopumā ļaus piesārņojumu savlaicīga atklāšana, izmantojot efektīvas jūras akvatorijas monitoringa sistēmas.

Lielu akvatorijas platību operatīvo monitoringu ar mērķi konstatēt naftas produktu piesārņojumu veic, izmantojot dažādas tehniskās ierīces – satelītus, jūras kuģus un dažādus lidaparātus. Šobrīd akvatorijas monitoringa uzdevumu pildīšanai tiek intensīvi attīstīta tālvadības gaisa kuģa (TGK) izmantošana.

TGK izmantošanai ir virkne priekšrocību: pacelšanās un nosēšanās iespēja, neizmantojot lidlauku, zema cena, zemas ekspluatācijas izmaksas, nav riska pilotam un ir iespēja izmantot pusautomātisko vai automātisko vadības sistēmu.

Lidmašīnu un helikopteru tipa TGK izmantošanas veiksmīgai attīstībai un iespēju paplašināšanai jūras akvatorijas monitoringa nolūkam, pirmkārt, nepieciešams izveidot inovatīvas metodes, metodoloģijas un līdzekļus, ņemot vērā monitoringa tehnoloģiskās īpatnības. Saistībā ar monitoringa procedūras automatizācijas nepieciešamību īpaša uzmanība tiek veltīta arī TGK lidojuma plāna optimizācijai.

PĒTĪJUMA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Promocijas darba mērķis

Inovatīvas bezpilota lidojošas platformas un metodoloģijas izstrāde jūras akvatorijas naftas piesārņojuma nepārtraukta monitoringa uzdevumu risināšanai.

Pētījuma uzdevumi

1. Veikt jūras vides naftas piesārņojuma monitoringa ar attālo zondēšanu galveno uzdevumu un metožu analīzi un noformulēt promocijas darba mērķi un pamatuzdevumus.
2. Izstrādāt TGK optimālo lidojuma maršruta, veicot monitoringa uzdevumu, sastādīšanas procedūras matemātisko modeli.
3. Izstrādāt TGK lidojuma maršruta, veicot monitoringa uzdevumu, optimizācijas algoritmu un programmatūru monitoringa datu apstrādei un analīzei.
4. Izstrādāt jūras akvatorijas naftas piesārņojuma nepārtraukta monitoringa metodoloģiju.
5. Izstrādāt naftas plankuma izplatīšanās uz ūdens virsmas matemātisko modeli.
6. Izstrādāt bezpilota lidojošo platformu jūras akvatorijas naftas piesārņojuma monitoringam.
7. Izstrādāt speciālas ierīces un tehnoloģiju jūras akvatorijas ūdens provju ņemšanai no tālvadības gaisa kuģa borta.

PĒTNIECĪBAS METODES

Veikto pētījuma daļu metodoloģija un izmantotās pētniecības metodes:

- a) literatūras avotu analīze;
- b) matemātiskā modelēšana;
- c) matemātiskā programmēšana;
- d) naftas piesārņojuma īpašību eksperimentālie pētījumi;
- e) eksperimentālo rezultātu statistiskā apstrāde.

PĒTĪJUMU OBJEKTI

- Baltijas jūras akvatorija;
- jūras akvatorijas naftas piesārņojums;
- tālvadības gaisa kuģi.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Promocijas darbā veikto pētījumu zinātniskā novitāte

Promocijas darba rezultātā tika izstrādāti šādi inovatīvi risinājumi un ir radīti inovatīvi produkti:

- TGK optimālo lidojuma maršruta, veicot monitoringa uzdevumu, sastādīšanas procedūras matemātiskais modelis;
- naftas plankuma izplatīšanās uz ūdens virsmas matemātiskais modelis;
- jūras akvatorijas naftas piesārņojuma nepārtraukta monitoringa metodoloģija;
- ūdens provju ņemšanas ar TGK palīdzību tehnoloģija;
- ierīce jūras akvatorijas ūdens provju ņemšanai no tāl vadības gaisa kuģa borta.

AIZSTĀVAMĀS TĒZES

Autors šajā darbā aizstāv:

- TGK optimāla lidojuma matemātisko modeli;
- TGK lidojuma maršruta optimizācijas algoritmu;
- jūras akvatorijas naftas piesārņojuma monitoringa datu apstrādes un analīzes programmatūru;
- naftas plankuma izplatīšanās uz ūdens virsmas matemātisko modeli;
- jūras akvatorijas naftas piesārņojuma nepārtraukta monitoringa metodoloģiju;
- izstrādāto bezpilota lidojošu platformu;
- ūdens provju ņemšanas ar TGK palīdzību tehnoloģiju un šīs tehnoloģijas īstenošanas algoritmu;
- ierīci jūras akvatorijas ūdens provju ņemšanai no tāl vadības gaisa kuģa borta.

DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Promocijas darba rezultātiem ir plašs praktiskais nozīmīgums un lietojums uzņēmumos un organizācijās, kas atbild par jūras akvatorijas ūdens kvalitāti. Promocijas darbā izstrādāta jauna un augsti efektīva jūras akvatorijas naftas piesārņojuma monitoringa metodoloģija, kas dod iespēju noteikt naftas piesārņojuma raksturojumus. Šo metodoloģiju un izstrādātās ierīces ir iespējams lietot, lai veiktu ūdens piesārņojuma monitoringu un naftas noplūdes likvidāciju. Šī metodoloģija var tikt izmantota arī iekšējo ūdeņu un ostas akvatorijas monitoringam.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Par darba rezultātiem ziņots piecās starptautiskās zinātniskās konferencēs.

1. 17th International Conference Transport Means, 23–24 October 2014, Kaunas, Lithuania (Urbahs, A., Zavtkevics, V. Oil pollution monitoring of sea aquatorium features with using unmanned aerial vehicles).

2. 16th International conference “Mechanika – 2011”, April 8–9, 2011, Kaunas, Lithuania (Urbach A., Carjova K., Zavtkevics V., Vulans P, Ozols I.(2012) Analysis of buoyancy and design features of the underwater vehicle).
3. RTU 56th International Scientific Conference, 14–17 October, 2015, Riga, Latvia (D. Goreļikovs, V. Žavtkēvičs UAV implementation features for maritime surveillance and safety missions).
4. 21th International Conference Transport Means, 20–22 September 2017, Kaunas, Lithuania (Urbahs, A., Zavtkevics, Remote Piloted Aircraft Using for Sampling of Oil Spill).
5. 22th International Conference Transport Means, 03–05 October 2018, Kaunas, Lithuania (Urbahs, A., Zavtkevics, Unmanned aerial platform using for monitoring of oil pollution of sea aquatorium).

Darba rezultāti publicēti sešos zinātniskos rakstos, ir saņemts viens starptautisks patents.

1. Urbahs, A., Žavtkēvičs, V. (2017). Remotely Piloted Aircraft route optimization when performing oil pollution monitoring of the sea aquatorium. Aviation, 21 (2), pp. 70–74. SOURCE: Scopus. DOI: 10.3846/16487788.2017.1344139.
2. Urbahs, A., Zavtkevics V. (2017). Remote Piloted Aircraft Using for Sampling of Oil Spill. In: Transport Means 2017: Proceedings of the 21st International Scientific Conference, Lithuania, Kaunas, 20–22 September, 2017, Kaunas: Kaunas University of Tehnology, pp. 489–492. ISSN 1822-296X. SOURCE: Scopus.
3. Urbahs, A., Zavtkevics, V. (2014). Oil pollution monitoring of sea aquatorium features with using unmanned aerial vehicles. – In Book: Transport Means, ISSN 1822-296x, – Proceedings of the International Conference, 2014-January, pp. 75–78. SOURCE: Scopus.
4. Urbahs, A., Zavtkevics V. (2018). Oil spill detection using multi Remote Piloted Aircrafts for environmental monitoring of sea aquatorium. – Environmental and Climate Technologies SOURCE: Scopus (iesniegta publicēšanai).
5. Urbahs, A., Zavtkevics V. (2018). Oil spill remote monitoring by using remote piloted aircraft, Aircraft Engineering and Aerospace Technology. SOURCE: Scopus (tiešsaistes publikācija).
6. Urbahs A., Žavtkēvičs V. Unmanned aerial vehicle for collecting samples from the surface of water. Eiropas patents EP3112840 (A1), 2017-01-04 (Application Nr. EP20150174649 20150630, saņemšanas datums: 05.12.2018).
7. Urbahs, A., Zavtkevics, V. (2018). Unmanned aerial platform using for monitoring of oil pollution of sea aquatorium. – In Book: Transport Means, ISSN 1822-296x, – Proceedings of the International Conference, 2018-October, pp. 1061–1064. SOURCE: Scopus.

Promocijas darba rezultāti izmantoti vienā zinātniskā projektā.

1. Eiropas Reģionālā attīstības fonda finansētais projekts “Lielas lidojuma distances daudzfunkcionāla bezpilota lidaparāta vides monitoringam eksperimentāla parauga izstrāde (LARIDAE)” 2014/0029/2DP/2.1.1.1/14/APIA/VIAA/088, līdzdalība projekta īstenošanā.

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN SATURS

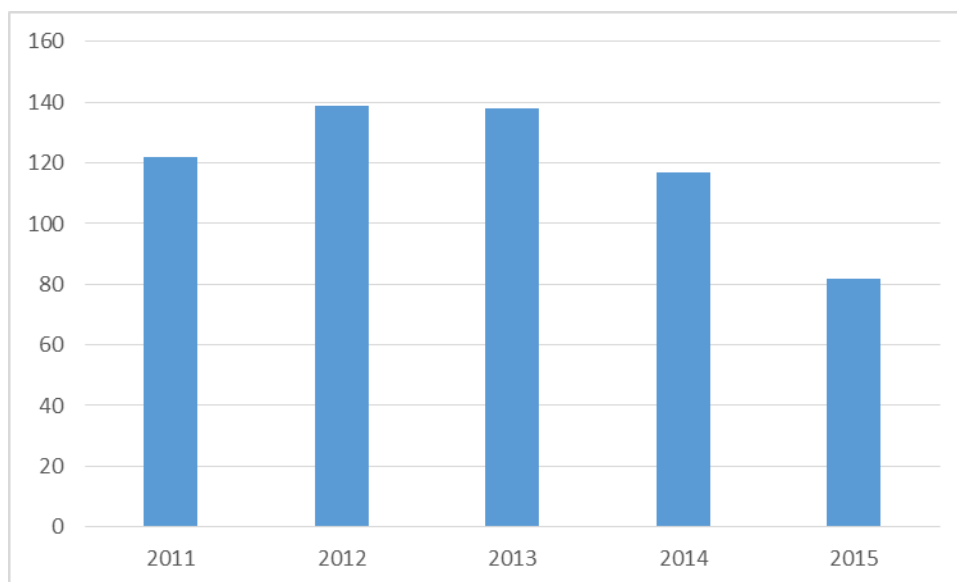
Promocijas darbā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi un literatūras saraksts.

1. JŪRAS VIDES NAFTAS PIESĀRŅOJUMA MONITORINGA AR ATTĀLO ZONDĒŠANU GALVENO UZDEVUMU UN METOŽU ANALĪZE

1.1. Jūras vides piesārņojuma problēmas analīze

Katru gadu Pasaules okeānā nokļūst vidēji 13–14 milj. t naftas produktu. Naftas piesārņojums ir bīstams divu iemeslu dēļ: pirmkārt, uz ūdens virsmas izveidojas plēve, kas neļauj skābeklim piekļūt jūras florai un faunai; otrkārt, nafta pati par sevi ir toksisks savienojums. Ja jūras ūdenī ir bīstama naftas koncentrācija, bojā iet planktons un zivju mazuļi.

Lai noteiktu Baltijas jūras naftas piesārņojuma sadalījuma likumsakarību, tika izmantoti HELCOM ikgadējo pārskatu dati no 2011. līdz 2015. gadam par naftas piesārņojumiem, kas tika konstatēti ar attālas zondēšanas palīdzību. Tie rāda, ka organizētā monitoringa rezultātā samazinājās naftas piesārņojuma gadījumu skaits.



1.1. att. Baltijas jūras naftas piesārņojuma sadalījuma likumsakarība 2011.–2015. gadā.

1.2. Jūras virsmas naftas piesārņojuma monitoringa galveno uzdevumu identificēšana

Ņemot vērā situāciju ar dažādiem akvatorijas piesārņojuma avotiem, galvenie monitoringa uzdevumi ir akvatorijas stāvokļa pārvaldība, datu iegūšana un apstrāde. Naftas piesārņojuma monitoringam ir jāveic informācijas par galveno apkārtējās vides komponentu faktiskajiem parametriem vākšana un uzkrāšana un to kvalitātes izmaiņu laikā prognozes sastādīšana.

Naftas piesārņojuma monitoringa programmai ir jāietver šādi uzdevumi:

- sensoru diennakts darbības iespēja, turklāt – attēla raksturlīknēm jābūt neatkarīgām no diennakts laika;
- uzņemšanas spēja neatkarīgi no laikapstākļiem;
- piesārņojoša produkta tipa noteikšana;
- naftas plankuma izplatīšanās dinamikas monitoringa nodrošināšana;
- paraugu ņemšana ar speciāli projektēta TGK palīdzību;
- lielu jūras akvatorijas rajonu, kuros pastāv nelegāla piesārņojuma risks, monitorings;
- naftas piesārņojumu kvantitatīvais novērtējums pēc parametriem, kas iegūti ar TGK sensoru palīdzību;
- naftas piesārņojuma no kuģiem pierādījumu atklāšana un ievākšana;
- operatīvas informācijas nodrošināšana atbildīgajiem dienestiem gadījumā, ja ir notikusi avārija ar naftas piesārņojumu;
- regulāra paraugu ņemšana naftas produkcijas fona piesārņojuma noteikšanai.

1.3. Esošo jūras virsmas naftas piesārņojuma monitoringa ar attālo zondēšanu sistēmu efektivitātes analīze

1.3.1. Jūras virsmas naftas piesārņojuma monitoringa satelītu sistēmas

Naftas piesārņojuma monitoringa uzdevumi pasaulē tiek risināti, pamatojoties uz satelītu monitoringa tehnoloģijām, ko realizē ātrās reaģēšanas sistēmas Norvēģijā, Kanādā, ASV, Somijā u. c. [1].

Akvatorijas naftas piesārņojuma monitoringa uzdevumu izpilde mūsdienās nav iespējama, neizmantojot informāciju, kas iegūta ar attālās diagnostikas ierīcēm, ko uzstāda uz kosmiskā segmenta satelītiem un kas veic zemes attālo zondēšanu [2]. Aktīvus mikroviļņu devējus, tādus kā radiolokatori ar sintezēto apertūru (SAR) 2D attēla iegūšanai, izmanto naftas piesārņojuma monitoringam.

Uz satelītiem uzstādītie SAR šodien ir svarīgs naftas izplūdumu monitoringa instruments lielas platības aptveršanai, ko iespējams izmantot gan dienā, gan naktī jebkādos laikapstākļos [3].

Galvenās kosmiskā monitoringa metožu un sistēmu priekšrocības ir liela pārredzamība, iespēja strādāt jebkuros grūti pieejamos rajonos un informācijas saņemšana praktiski jebkurā mērogā ar dažādu telpas un laika izšķirtspēju, plašs klāsts reģistrējamo parametru, augsta datu iegūšanas ticamība un operatīvums, iespēja vairakkārt novērot pētāmos rajonus un strādāt topogrāfiska pamata daļējas vai pilnīgas neesamības apstākļos, informācijas relatīvs lētums (īpaši, strādājot lielās platībās) [4].

Galvenais negatīvais faktors ir mākoņainums. Infrasarkanie devēji un redzamā un ultravioletā starojuma devēji nebūs spējīgi konstatēt naftu sliktos laikapstākļos, piemēram, stiprā lietū vai miglā [5]. Redzamā un ultravioletā starojuma devējus parasti izmanto, lai izveidotu naftas izplūduma bāzes karti. Naftas piesārņojuma veiksmīgu atklāšanu ar satelītu radiolokācijas

līdzekļiem zināmā mērā nosaka laikapstākļi [6]. Neskatoties uz būtiskām priekšrocībām, salīdzinot ar citiem novērošanas līdzekļiem, satelītu sistēmām ir ierobežots viena un tā paša jūras rajona uzņemšanas periodiskums (vienreiz trīs diennaktīs, ņemot vērā novērošanas leņķu mainīšanas iespēju). Augstas izšķirtspējas radiolokācijas dati tiek nogādāti atbildīgajām organizācijām ar aizturi, kas saistīta ar laika izmaksām attēlu sintezēšanai datu apstrādes virszemes centros un informācijas piegādi patērētājam. Kartes izgatavošanai pēc radiolokācijas uzņemšanas datiem var būt nepieciešamas 1–2 diennaktis no naftas piesārņojuma brīža. Šie nosacījumi piesārņojuma likvidēšanā izraisa nepieciešamību veikt operatīvo monitoringu, izmantojot mobilos līdzekļus.

1.3.2. Jūras vides naftas piesārņojuma monitorings, izmantojot pilotējamos gaisa kuģus

Jūras vides piesārņojuma monitoringam plaši izmanto arī aviācijas novērojumus. Saskaņā ar konvencijas *HELCOM* prasībām gaisa monitoringu veic, lai kontrolētu naftas piesārņojumus no kuģiem [7]. Naftas piesārņojuma gaisa monitoringu veic, izmantojot lidmašīnas, helikopterus, deltaplānus, dirižablus.

Galvenā pilotējamo lidaparātu izmantošanas problēma ir to ierobežota izmantošana laikapstākļu (mākoņainuma un miglas) dēļ. Turklāt pilotējamo lidaparātu izmantošanas gadījumam ir raksturīgs samērā ilgs reaģēšanas laiks (līdz trīs stundām) un ļoti augstas ekspluatācijas izmaksas. Novērtējuma precizitāte ir atkarīga no virsmas viļņošanās, apgaismojuma intensitātes, novērošanas leņķiem. Pastāv arī virkne uz lidojumiem attiecināmo normatīvo aktu ierobežojumu saistībā ar piekrastes objektu (militārie objekti, bīstamo ķīmisko vielu glabātuves u. c.) atrašanās vietas slepenību, kā arī citi aizliegumi, ko nosaka valsts administrācija.

Ilgs reaģēšanas laiks ir ļoti bīstams, ņemot vērā dinamiku, kādā nafta izplatās pa jūras virsmu.

1.3.3. Naftas piesārņojuma monitoringa automātiskie kompleksi

Jūras akvatorijas naftas piesārņojuma kontrolei izmanto arī automātiskās sistēmas.

Vairākums sarežģītos meteoroloģiskajos apstākļos izmantojamo attālo metožu ir neefektīvas. Lai novērstu attālās zondēšanas trūkumus, ir izstrādāta naftas izplūdumu monitoringa sistēma, kuras novērošanas modulis sastāv no fluorescējošiem lidariem un automatizētām kontakta tipa monitoringa stacijām. Stacijas var atrasties gan virs, gan zem ūdens. Lai izveidotu naftas un naftas produktu izplūdumu agrīnas atklāšanas un monitoringa automatizēto sistēmu, tika izstrādāta specializēta iekārta AMK (automātiskais monitoringa komplekss) [8].

Jūras novērošanas sistēma ir novērojumu komplekss, ko veic no dažādām novērošanas platformām ar unificētiem mērīšanas līdzekļiem uz vienotas normatīvi metodiskās un tiesiskās bāzes [9]. Šī sistēma sastāv no divām apakšsistēmām: virszemes un attālās. Virszemes apakšsistēmā ietilpst: jūras krasta hidrometeoroloģisko novērojumu tīkls; monitoringa programmas noteikto kuģu novērojumu tīkls; okeanogrāfijas novērojumu un darbu tīkls; automātisko boju staciju – noenkuroto un dreifējošo – tīkls, nacionālās jūru piesārņojuma

novērošanas administrācijas tīkls. Bojas un zemūdens aparātus uzstāda un ekspluatē, ņemot vērā jūras kuģošanas drošības prasības, tāpēc jāsniedz informācija par to atrašanās vietu [9].

1.3.4. Naftas piesārņojuma monitorings, izmantojot kuģus

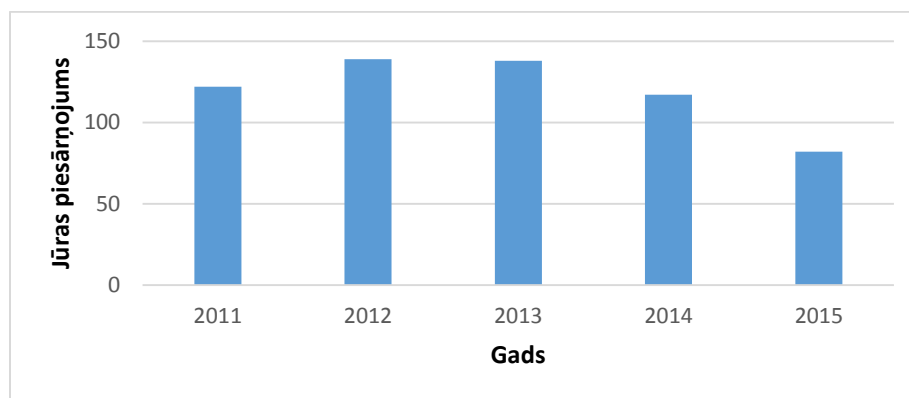
Monitoringu, izmantojot peldlīdzekļus, lieto, lai apstiprinātu satelītu novērojumus un atsijātu viltus signālus. Kuģu novietošanas fluorescējošie lidari ļauj pietiekami ātri un efektīvi noteikt dažādus piesārņojumus, piemēram, naftas, lielās ūdens virsmas platībās [8].

Ar optiskajām un digitālajām kamerām un lidariem aprīkoti kuģi var analizēt un novērot naftas plankuma dinamiku. Galvenais trūkums kuģu izmantošanā monitoringam ir zems ātrums: vidējais ātrums ir 15 jūdzes stundā, maksimālais – 30 jūdzes stundā.

Mobilās jūras platformas atšķirībā no attālās zondēšanas līdzekļiem nodrošina paraugu ņemšanu no ūdens virsmas. Jūras kuģus izmanto, lai ievāktu naftas plēves ar spīdumu paraugus no ūdens virsmas un veiktu ķīmisko analīzi naftas izplūduma agrīnos posmos.

1.4. Baltijas jūras akvatorijas piesārņojuma līmeņa un avotu analīze

Baltijas jūras akvatorijas piesārņojuma līmeņa un avotu novērtējums ir veikts, pamatojoties uz *HELCOM* ikgadējo informācijas analīzes pārskatu par periodu no 2011. līdz 2015. gadam, izmantojot faktus, kas fiksēti ar naftas piesārņojumu attālās zondēšanas līdzekļu palīdzību (1.2. att.).



1.2. att. Baltijas jūras akvatorijas naftas piesārņojumu dinamika.

Veiktā analīze norāda, ka jūras akvatorijas piesārņojuma līmenis ir būtiski samazinājies attālās zondēšanas līdzekļu ieviešanas rezultātā.

Konstatēto naftas piesārņojumu datu analīzes rezultātā pēdējo 10 gadu laikā ir noteikti Baltijas jūras rajoni ar paaugstinātu piesārņojuma risku, kas atrodas gan tuvu krastam, gan būtiskā attālumā.

Lai konkretizētu izstrādājamā attālās zondēšanas kompleksa, izmantojot tālvadības gaisa kuģus, uzdevumus un funkcionālās iespējas, tika veikta arī Baltijas jūras akvatorijas

piesārņojuma produktu tipu analīze. Tās rezultātā tika atklāti trīs galvenie piesārņojuma produktu veidi: nafta, dīzeļdegviela un mazuts.

Tātad jūras akvatorijas naftas piesārņojuma monitoringa misijas teritorijai ir jāaptver gan piekrastes zonas, gan rajoni, kas atrodas tālu no piekrastes, kā arī iekšējie ūdeņi un ostas. Ņemot vērā jūras akvatorijas monitoringa, izmantojot TGK, specifiku un nepieciešamību nepārtraukti saņemt informāciju, kā arī kuģu kustības maršrutus, kas dinamiski mainās, visa kontrolējamā teritorija ir jāiedala rajonos ar īsu un garu darbības rādiusu. Īsa rādiusa rajona diapazons ir 50–80 km, gara rādiusa rajona diapazons – 150–200 km.

Kontrolējamās teritorijas iedalīšana monitoringa zonās ir jāveic, ņemot vērā TGK, kas ietilpst monitoringa sistēmas sastāvā, un to tehniskās raksturlīknes.

2. TĀLVADĪBAS GAISA KUĢA LIDOJUMA MARŠRUTA, VEICOT JŪRAS AKVATORIJAS MONITORINGA MISIJU, OPTIMIZĀCIJA

2.1. Optimālas maršrutēšanas uzdevuma formulēšana tālvadības gaisa kuģa vadīšanai

Galvenā jūras akvatorijas monitoringa problēma ir saistīta ar nepieciešamību veikt jūras virsmas novērošanu, aptverot lielas platības ar mainīgu ģeometriju, un prasībām kontrolēt lielu skaitu kuģu ar dažādiem parametriem (mainīgu ātrumu, kustības trajektoriju). Galvenais uzdevums ir TGK maršruta optimizācijas algoritma izstrāde ar iespēju nepārtraukti koriģēt lidošanas parametrus atkarībā no reālas situācijas un dinamiski mainīgiem kontroles parametriem.

Optimizācijas uzdevumu risināšanai izmantojamas lineārās programmēšanas metodes var tikt realizētas tikai nelielam skaitam statisko objektu un nav piemērotas aplūkotajam gadījumam.

TGK lidojuma maršruta optimizācijas uzdevums var tikt atrisināts, pamatojoties uz dinamiskās programmēšanas metodi, piemēram, izmantojot Deikstras algoritmu [10].

Maršrutizācijas uzdevuma vispārināto uzstādīšanu TGK, kas veic naftas piesārņojuma misiju, vadīšanai var attēlot šādi: definēts grafs, kas attēlo TGK novērošanas misiju $G = (V, E)$, kur V ir misijas maršruta virsotņu (elementu) kopa, E ir šķautņu (saišu) starp maršruta elementiem kopa; katram no šī grafa parametriem ir laika atkarība, proti, $V = \{V_i(t)\}$, kur $i = (\bar{i}, n)$ un $t = (0, 1)$, un $E = \{e_j(t)\}$, kur $j = (\bar{j}, m)$ un $t = (\bar{t}, 1)$. Nepieciešams optimizēt monitoringa misijas grafu, piemēram, pēc laika parametra.

Lai attēlotu kuģu un naftas plankumu dinamisko kustību, var izmantot karti ar aprēķinātām mērķu varbūtības pozīcijām [11]. Varbūtības pozīcijas aprēķina, izmantojot datus, kas iegūti no automātiskās identifikācijas sistēmas (AIS). Misijas plānošana, integrējot informāciju no AIS un krasta radiolokācijas novērošanas sistēmām, dos iespēju maksimāli samazināt monitoringa misijas lidojuma laiku un TGK ekspluatācijas uzdevumus. Galvenā funkcija jebkurai jūras novērošanas sistēmai ir spēja precīzi prognozēt kuģa kustības trajektoriju un ekstrapolēt kuģa trajektoriju konkrētā laika periodā.

Problēmas formulēšanai tiek noteikts, ka pastāv mērķu kopa ar tādiem konkrētiem parametriem kā mērķa tips, kustības vienādojums, pēdējās pozīcijas, kas iegūtas no jūras kuģniecības monitoringa sistēmām, attēlošanas formulējums (punkts, līnija un platība). Lai optimizētu jūras objektu naftas piesārņojumu monitoringa novērošanas misiju, ko veic TGK, tiek analizēta mērķu matrica. Nākamajā posmā tiek plānota naftas piesārņojumu varbūtība un to mērķu noskaidrošana, kuriem naftas piesārņojuma monitorings var būt nepieciešams. Izvēlētie mērķi tiks iedalīti klasēs pēc piesārņojuma riska līmeņa: augsta (tankkuģi ar naftu/ķīmikālijām un kuģu maršruti), vidēja (kravas kuģi), maza (zvejas kuģi). Sekmīga TGK uzdevuma plānošana ir jāprojektē kā dinamiskā sistēma, kas nodrošina atgriezenisko saiti – informāciju par TGK un mērķu pozīcijām. Pastāv daudzi TGK izmantošanas algoritmu tipi, kas tiek izmantoti statisko

mērķu ar ātrumu $V = 0$ monitoringa un novērošanas uzdevumiem. Izpildot statistisko mērķu monitoringu ar vienu vai vairākiem kustīgiem objektiem, šo algoritmu risinājums un rezultāti noteiktai problēmai ar dinamiskiem objektiem nebūs optimāli. Mērķi dinamiskajā vidē var attēlot kā punktus ar galvenajiem parametriem, tādiem kā sākotnējais ātrums un kurss. Mērķi tiks iedalīti četrās grupās ar ātrumu $V = 0$, $0 < V < 14$, $14 < V < 23$, $23 < V$ [11]. Labus rezultātus nodrošinās koordināšu sistēmas, kas ietver attāluma starp TGK un novērošanas objektiem mērīšanu, taču ļoti svarīgi ir izstrādāt automātisko aprēķinu un datu savākšanas sistēmu, kas izpilda TGK relatīvās kustības aprēķinu, ņemot vērā vēja ātruma ietekmi. Šajā pieejā abu mērķu tipu relatīvā kustība – dinamiskā un statiskā – ir attēlota plaknē ar diviem vienādojumiem: $x = TGK_N - T_N$, $y = TGK_E - T_E$, kur T_N un T_E ir mērķa Dekarta koordinātas plaknē [11].

Objekta, piemēram, kuģa, kustību atrisina ar zināmu objekta pārvietošanās parametru palīdzību. Šai gadījumā uzskatāms, ka mērķis pārvietojas ar pastāvīgu kursu un ātrumu. Šī metodika dod iespēju atrast tikšanās punktu, kur TGK sasniedz pārvietojošos objektu. Tikšanās punkta noteikšanai izmanto šādas funkcijas: funkciju, kas nosaka laiku, ar kuru objekts pārvietojas līdz vienam no punktiem uz taisnes, gar kuru kustās objekts; funkciju, kas nosaka TGK kustību uz minēto punktu. Objekta kustības attēlošanai izmanto traversas peldēšanas metodi. Šī metode ļauj aprēķināt objekta stāvokli, izmantojot kursu nākamajā punktā un attālumu. Šajā gadījumā jūras mērķa attālumu no sākumpunkta aprēķina pēc formulas [11]:

$$D = Vt, \quad (2.1.)$$

kur V – kuģa ātrums mezglos no AIS retranslatora informācijas;

t – laiks.

Punktam P_2 (φ_2 , λ_2) platumu φ_2 nosaka pēc formulas [11]

$$\varphi_2 = \varphi_1 + Vt \cos Course, \quad (2.2.)$$

kur φ_1 – sākumpunkta P_1 platums,

$Course$ – kuģa kurss no AIS retranslatora informācijas.

Punkta P_2 garumu λ_2 nosaka pēc formulas [11]

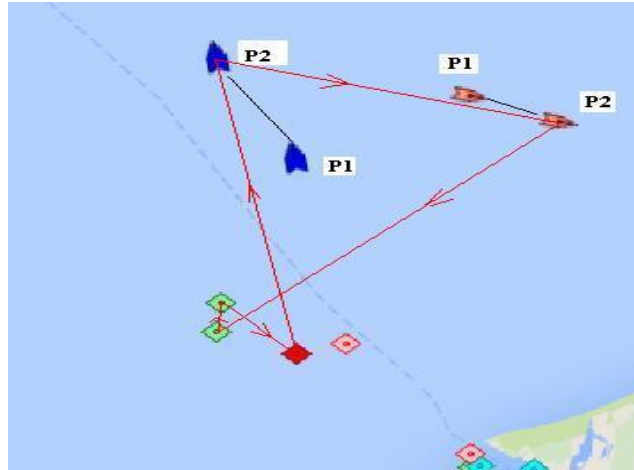
$$\lambda_2 = \lambda_1 + Vt \sin Course \cdot \frac{1}{\cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}}. \quad (2.3.)$$

Galvenais TGK modeļa vadības princips vektoru formā:

$$x = f(x, u, t), \quad (2.4.)$$

kur $t \in [t_0, t_k]$, $x(t_0) = x_0$.

Šajā vienādojumā $x_2 = (x_1, x_2, x_3)$ ir TGK stāvokļa vektors (koordināšu vektors), $f_u = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ ir vadības vektors, $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ ir funkcijas argumentu vektors, $[t_0, t_k]$ ir laika intervāls, kurā tiek izpildīts TGK lidojums [11].



2.1. att. Kustošo objektu prezentācija [11].

TGK vadībai misijas plānošanas laikā programmnodrošinājumam ir jāņem vērā ierobežojums [11]:

$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}, \quad (2.5.)$$

kur $t \in [t_0, t_k]$.

2.2. TGK optimālo lidojuma maršrutu sastādīšanas procedūras matemātiskā modelēšana

2.2.1. Dinamiskās programmēšanas metode TGK monitoringa misijas uzdevumā

Dinamiskās programmēšanas metodē visu iespējamo problēmas risinājumu salīdzinājums netiek veikts visu iespējamo variantu kopas konstruēšanas beigās, bet katrā konstruēšanas variantu secības solī [10]. Optimālās vadības (risinājuma) noteikšanas procedūra balstās uz rekurentas attiecības analīzi [11].

$$f_{n-1}(S_l) = \text{optimum}[R_{l+1}(S_l, U_{l+1}) + f_{n-(l+1)}(S_{l+1})], \quad (2.6.)$$

kur $l = \overline{0, n-1}$,

$U_l = (u_l^1, \dots, u_l^m)$ – 1. solī izvēlētais risinājums;

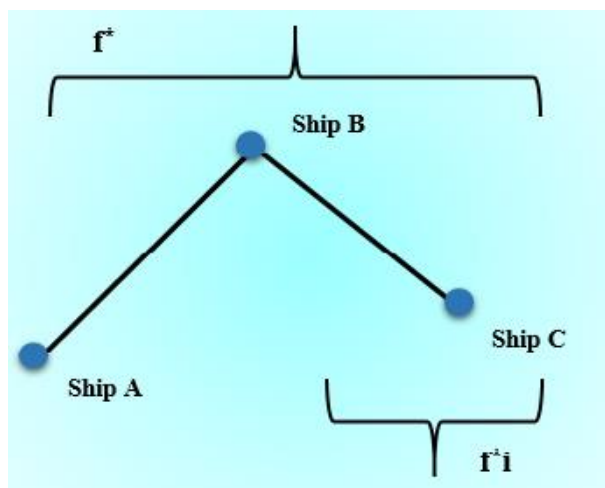
$S_l = (s_l^1, \dots, s_l^m)$ – sistēmas stāvoklis l. solī;

R_l – 1. solī sasniegtais efekts;

f_{n-1} – optimālā efekta vērtība, kas sasniegta pēc $n - 1$ soļiem.

n – soļu (posmu) skaits.

Jūras mērķu novērošanas misiju, ko veic TGK, lietojot dinamiskās programmēšanas principu, var attēlot ar turpmāk aplūkotā piemēra palīdzību (2.2. att.).



2.2. att. Dinamiskās programmēšanas princips [11].

Dinamiskās programmēšanas metodē TGK lidojuma uzdevuma algoritms solī k (piemērs ceļam, kas savieno $(k + 1)$ virsotnes) ir tāds, ka esošais TGK novērošanas maršruts “garums k ” (kas savieno k virsotnes) paplašinās līdz 1. Maršruta optimizācijas attēlošanai tiek ņemts vērā, ka TGK, kas izpilda novērošanas misiju, ir optimāls maršruts [11]. Algoritmā tiks analizēts maršruta posms, kas sākas 0 un beidzas virsotnē i , šis posms ietver k starpposma virsotņu. Ja L ir minimālais ceļš, tad daļas garums, kas savieno virsotnes no 0 līdz i noteiktā secībā, ir minimāls. Īsākā maršruta, kas savieno virsotnes 0 un i un iet tikai caur katru k virsotni tikai vienu reizi, garums ir optimāls.

2.2.2. Zaru un robežu metode

Novērošanas misijas maršruta diskretās optimizācijas uzdevumiem ir galīga pieļaujamo risinājumu kopa, ko teorētiski var pārskatīt un izvēlēties risinājumu, kas dod mērķa funkcijas minimumu vai maksimumu.

TGK maršruta optimizācijas uzdevumu risināšanai izmanto zaru un robežu metodi [12], [13]. Viens no galvenajiem principiem tās pamatā ir uzdevuma pieļaujamās jomas sadalīšana apakšjomās, izmantojot pieļaujamo punktu kopas galīgumu. Katrā tādā apakšjomā uzdevums izskatāms atsevišķi. Turklāt pilnīgu pieļaujamo punktu uzskaitījumu aizvieto ar saīsinātu, veicot uzdevuma optimālās vērtības apakšējā un augšējā novērtējuma analīzi šajā apakšjomā. Apakšjomā neesošos pieļaujamos punktus un iespējamus risinājumus turpmāk neapskata.

2.2.3. TGK optimālo lidojuma maršrutu sastādīšanas procedūras matemātiskā modelēšana

Sadaļas mērķis ir izstrādātā TGK maršrutu konstruēšanas procedūru modeļa efektivitātes novērtējums naftas monitoringa misiju izpildei, kas balstās uz varbūtību analīzi. Šī matemātiskā modelēšana ir objektu dinamiskā informācijas modeļa realizācijas piemērs, ņemot vērā galvenās sastāvdaļas: objekta varbūtību pozīcijas modeli un TGK optimālās pārvietošanās modeli.

Piedāvāto algoritmu savstarpējai salīdzināšanai tika veikts skaitļošanas eksperiments ar šādām raksturlīknēm:

- 1) n virsotnes tika ģenerētas kā punkti plaknes xOy vienības kvadrātā ar neatkarīgām vienmērīgi sadalītām koordinātām;
- 2) daļa punktu tika ģenerēta kā objekts, kas pārvietojas ar pastāvīgu kursu un ātrumu;
- 3) iegūtā risinājuma kvalitātes novērtējums tika aprēķināts kā visu maršrutu kopējā garuma attiecība pret vispārīga maršruta apakšējo novērtējumu pa visām virsotnēm.

TGK maršrutam tika piedāvāti optimizācijas modeļa divi scenāriji: pirmais – visas mērķu koordinātas tika ieliktas matricā; otrais – daži objekti pārvietojas ar pastāvīgu ātrumu un kursu [11]. Kā piemērs tika piedāvāts grafs ar 11 objektiem. Tika pieņemts, ka ir pieci mērķi ar 12 mezglu ātrumu, trīs mērķi ar astoņu mezglu ātrumu un trīs statistiski mērķi. Salīdzinot 2. scenārija risinājumu ar 1. scenārija risinājumu, optimālais maršruta attālums samazinājās par 7 %. Tas nozīmē, ka maršruts būtiski uzlabojās [11]. Par mazāko novērtējumu izmantoja minimuma šķautņu garumu summu. TGK maršrutu uzdevuma aprēķināšanai naftas piesārņojuma monitoringam algoritma starpposma soļos tika izmantota viena un tā pati secība.

Pētāmajā nostādnē tiek pieņemts, ka pastāv ieejas punkts, kas sakrīt ar izejas punktu. Realitātē tas var būt, piemēram, TGK, kas veic naftas piesārņojuma monitoringu, atrašanās vieta.

Optimizācijas uzdevums tika atrisināts, izmantojot trīs dažādas metodes (koka algoritmu, dinamisko programmēšanu un zaru un robežu metodi). Pamatojoties uz to darbības ātrumu un aprēķināmo risinājumu precizitāti, tika secināts, ka optimālais darbības rezultāts tiek panākts, kombinējot dinamiskās programmēšanas metodes un zaru un robežu metodi. Matemātiskā modelēšana parādīja, ka objektīvā vērtība 2. scenārijam būtiski uzlabojās. Matemātiskā modelēšana pierādīja, ka piedāvātā optimizācijas metode TGK maršruta plānošanai ir efektīva.

2.3. Optimālā maršruta meklēšanas algoritmu un programmu izstrāde

2.3.1 Uzdevums par norīkojumiem

Uzdevuma par norīkojumiem risināšanas algoritmi

Kad monitoringa teritorijā ir atklāti un izvēlēti atsevišķi objekti (punkti), uzdevums ir visu punktu apmeklēšana. Šo uzdevumu savukārt var atrisināt TGK. Misijas izpildes uzdevums ir izplānot un noteikt TGK objektu apsekošanas kārtību. Turklāt ir nepieciešams minimizēt noteikto funkciju, kas var ietvert kopējo uzdevuma izpildes laiku, kopējo ceļu u. c. Šā tipa uzdevumi ir “uzdevumi par norīkojumiem” [14].

Pastāv vairākas dažādas pieejas šo uzdevuma risināšanai. Populārākās ir:

- koka algoritms;
- dinamiskā programmēšana;
- zaru un robežu metode.

Katrā laika brīdī TKG atrodas dažādā attālumā no monitoringa punktiem, un tam ir nepastāvīga energoresursa rezerve, tāpēc maršruta optimalitāti var novērtēt, izmantojot noteiktu optimalitātes funkciju.

2.3.2 Koka algoritms

Meklēšanas platumā algoritms [15] ir vienkāršākais maršruta meklēšanas uz grafa algoritms, kura galveno ideju izmanto citos algoritmos. Tā ir Deikstras un Prima algoritmu pamatā.

Šāda algoritma trūkums ir pilnīgs visu grafa virsotņu uzskaitījums un atrastie ceļi. Algoritma trūkums ir arī tas, ka operāciju secība, risinot uzdevumu, uzreiz nav orientēta uz gala virsotni, bet iet secīgi caur visām virsotnēm.

Novērošanas misijas uzdevumu var attēlot kā visu grafa $G(V, E)$ virsotņu apmeklēšanu, sākot no sākuma punkta un atgriežoties sākuma punktā. Mērķis ir atrast optimālo TKG maršrutu, kas sasniegtu visus uzdevumā minētos objektus minimāli iespējamā laikā ar minimālām izmaksām. Grafu teorijā tas ir divu vai vairāku virsotņu saistīšanas ceļu meklēšana, izmantojot optimalitātes kritērijus [16]. Koka algoritms ir saistīts ar heuristikajām metodēm. Heuristikajās metodēs risinājuma elementu izvēlei izmanto zināmu dabiskās atlases noteikumu rekomendāciju – heuristiku. Šā algoritma laiks ir vienāds ar $\Theta(E) = \Theta(V^2)$.

Algoritma realizācijai tika uzrakstīta programmēšanas valodā *Pascal*.

2.3.3. Dinamiskā programmēšana

Risinājumu atrašanās optimizācija dinamiskās programmēšanas metodēm tiek veikta divos posmos. Ņemot vērā TKG kustības parametrus (x_0, y_0, V_0) un tādus objektu parametrus kā ātrums V un kurss, tiek aprēķināts attālums starp objektiem un TKG. Optimizācijas risinājuma atrašanai definētajiem uzdevumiem TKG maršrutam mērķi no AIS elektroniskās kartes, piekrastes radiolokācijas novērošanas sistēmām un jūras virsmas rajoniem tiks attēloti kā grafs ar virsotnēm un šķautnēm ar svariem. Grafa šķautņu svars ir katra objekta misijas cena. Cenu dinamiskajā sistēmā attēlo laika funkcija [12]. Šķautnes svara noteikšanai izmanto formulu [11]:

$$w_{ij} = t_{\text{flight}_{ij}} + t_{\text{surveillance}}, \quad (2.7.)$$

kur $t_{\text{flight}_{ij}}$ – lidojuma no iepriekšējā objekta laiks;

$t_{\text{surveillance}}$ – objekta novērošanas misijas izpildes laiks.

Visiem objektiem saskaņā ar klasifikāciju ir jāaprēķina novērošanas laiks pēc formulas [11]

$$t_{\text{surveillance}} = \frac{l_{\text{trajectory}}}{V_{\text{flight}}}, \quad (2.8.)$$

kur $l_{\text{trajectory}}$ – novērošanas trajektorijas garums;

V_{flight} – TKG ātrums novērošanas režīmā.

Uzdevuma risināšanas rezultātā iegūstam incidenču matricu, kurā ir ierakstīti īsākie maršruti. Šis algoritms balstās uz dinamisko programmēšanu.

Belmana–Forda algoritma darbības laiks ir $P(F \cdot W)$, inicializācijas cena $P(W)$, pārbaudes uz negatīva svara ciklu cena $P(F)$, kur W – grafa virsotņu skaits, F – grafa šķautņu skaits. Grafam ar maršrutu dinamisko maiņu, ar virsotņu skaitu, kas ir lielāks par 15 un bez negatīvām svaru vērtībām, lietderīgāk ir izmantot Deikstras algoritmu. Pretējā gadījumā, ja virsotņu skaits ir mazāks par 15 un ir atļauta negatīvo svaru esamība, ieteicams izmantot Belmana–Forda algoritmu.

2.3.4. Zaru un robežu algoritms

Zaru un robežu algoritms balstās uz pieļaujamo risinājumu kopas secīgas dekompozīcijas ideju. Katrā metodes posmā tiek analizēti sadalīto apakškopu elementi, lai noteiktu, vai tos var iekļaut optimālo risinājumu apakškopā [17]. Ja problēma ir minimuma meklēšana, pārbaudi veic, salīdzinot mērķa funkcijas apakšējās robežas vērtības šajās apakškopās ar funkcijas augšējo robežu. TKG novērotāju misijas maršrutu var formulēt šādi: $f(x) \rightarrow \min_{x \in S}$, kur $f(x)$ – reāla funkcija, S – galīga pieļaujamo risinājumu kopa. Lai $s \subseteq S$. Funkciju $b(s)$, kas atbilstoši sadala kopu s apakškopās $s_1, \dots, s_N$, $N > 1$, saucim par sazarošanos.

Reālu funkciju $H(s)$ sauc par apakšējo robežu, ja:

- 1) $H(s) \leq \min_{x \in s} f(x)$;
- 2) vienelementa kopā $\{x\}$ pareiza ir vienādība $H(\{x\}) = f(x)$.

Algoritms, kas realizē zaru un robežu metodi, sastāv no viena tipa soļu secības. Katrā solī ir zināms rekords un neizskatīto risinājumu apakškopas $t_1, t_2, \dots, t_L$. Algoritma darbības sākumā $L = 1$, $t_1 = S$, x^0 ir kopas S patvaļīgs elements vai tukša kopa (tukšā kopā noteiksim funkcionāla vērtību, kas ir vienāda ar bezgalību) [11].

Katrā solī algoritms sāk darbību no sadalīšanas elementu pārbaudes, lai tiktu pārbaudīta kopa t_j . Kopa t_j tiek izslēgta vienā no diviem secīgi pārbaudāmiem gadījumiem:

- a) ja $H(t_j) \geq f(x^0)$;
- b) ja $H(t_j) < f(x^0)$ un atrasts tāds elements $y_j \in t_j$, ka $f(y_j) = \min_{x \in t_j} f(x) = H(t_j)$.

Otrajā gadījumā notiek rekorda maiņa $x^0 = y_j$, lai $t_1, t_2, \dots, t_M$ ($M \leq L$) ir neizslēgtas kopas (uzskatīsim, ka ir izslēgtas kopas ar numuriem $M + 1, \dots, L$).

Gadījumā $M = 0$ algoritms beidz darbību, un par uzdevuma risinājumu pieņem rekordu x^0 .

Ja $M \geq 1$, kopu $t_1, \dots, t_M$ starpā izvēlas kopu jaunai sazarošanai, piemēram, kopu t_1 . Tad tiek veikta sazarošana $b(t_1) = (s_1, \dots, s_N)$, kā rezultātā iegūstam kopu sarakstu $s_1, \dots, s_N, t_2, \dots, t_M$. Šīs kopas numurē ar skaitļiem no 1 līdz L , un sākas jauns algoritma solis.

Aprakstītais algoritms atrod optimālo risinājumu galīgā soļu skaitā.

Šajā lietojumā ir jāatrod minimālais maršruts. Misijas plāns ir definēts kā pilnīgs orientētais grafs $G = (V, E)$ ar virsotņu skaitu $V = \{1, \dots, n\}$ un šķautņu kopu E . Katrai šķautnei $(i, j) \in E$ ir definēts garums $c_{ij} \geq 0$. Vienkāršs maršruts no i_1 līdz i_k ir $\{i_1, \dots, i_k\}$ un maršruta garums $\{i_1, \dots, i_n, i_1\}$ ir $f(i_1, \dots, i_n)$, ņemot vērā, ka $i_1 = 1$. Pieļaujamo risinājumu apakškopas nosaka kā kopu pāri (I, J) , kur $I = \{i_1, \dots, i_k\}$ ir daļējais maršruts (pirmo k mezglu apmeklējumu secība),

$J = \{j_1, \dots, j_q\} \subset V \setminus I$ ir ierobežojumu uz daļējā maršruta I pēdējā punkta i_k kopa. Sadalīšanas kopas attēlošanai $V' = V \setminus I \cup J$ ir izvēlēts kāds elements i . Ja V elementam i ir tikai viens elements p , izvēlamā kopa ir $I = \{i_1, \dots, i_k, i\}$, $J = \emptyset$ ($I = \{i_1, \dots, i_p, k\}$, $J = \emptyset$)[11]. Nākamais posms ir atrast apakšējo robežu $H(I, J)$ apakškopai (I, J) . Kad ir izskatīti visi elementi, dekompozīcijas algoritms beidz darbību, un pašreizējais ieraksts ir labākais risinājums. Pretējā gadījumā nepārbaudītajos elementos tiks izvēlēta kopa, kas ir perspektīva. Tā ir pakļauta sadalīšanai (sazarošanai). Process turpinās, līdz tiks pārbaudīti visi sadaļas elementi. Šim algoritmam ir augsta precizitāte [11].

3. JŪRAS AKVATORIJAS NAFTAS PIESĀRŅOJUMA NEPĀRTRAUKTA MONITORINGA METODOLOĢIJAS IZSTRĀDE

3.1. Funkcionālas prasības bezpilota lidojošai platformai

3.1.1. Bezpilota lidojošas platformas veids un struktūra

Divu tipu gaisa nesēju ar unikālām iespējām un raksturojumiem izmantošana ūdens kvalitātes un naftas piesārņojuma monitoringam ļaus vienlaikus īstenot lielu platību monitoringu un paņemt ūdens paraugus. Monitoringa pirmais nesēju tips – “lidmašīnas” tipa bezpilota lidaparāts ar multifunkcionālu lietderīgo slodzes sistēmu, kas orientēta uz maksimālu komplektāciju ar novērošanas, datu analīzes un pārraides metodēm jebkuros apstākļos un situācijās. Lietderīgās slodzes sistēma nodrošina maksimāli precīzas informācijas saņemšanu par ūdens kvalitāti, ļauj vienlaikus izmantot VNIR videokameru, siltuma kameru un hiperspektrālo vai multispektrālo kameru [1]. Nesējs tiek orientēts uz ilgstošu atrašanos gaisā. Otrais nesēju tips – multirotora platforma ar vertikālu pacelšanās un nolaišanās iespēju un ilgstošu atrašanos gaisā noteiktā pozīcijā. Šis platformas tips ļauj atteikties no laikietilpīgām un neefektīvām piesārņojuma monitoringa metodēm, izmantojot mobilas stacijas un kuterus. Speciāls algoritms ļauj izmantot platformu naftas un bakteriāla piesārņojuma monitoringam, kā arī paraugu ņemšanai no ūdens virsmas ūdenskrātuves noteiktā rajonā, izmantojot speciālu ierīci, kas ir aprīkota ar 10 konteineriem, kas ļauj noteikt naftas plēves biezumu. Platforma paredzēta akvatorijas monitoringam un provju ņemšanai, lai noteiktu piesārņojumu.

Vadības kompleksā realizēta intelektuālās automātiskās monitoringa vadības sistēma, kas nodrošina iespēju saņemt datus reāllaikā un pieņemt lēmumus, kāds nesēju tips ir nepieciešams monitoringam un provju ņemšanai ikdienas režīmā un avārijas situācijā virszemes ūdenskrātuves teritorijā konkrētu uzdevumu risināšanai. Vadības sistēma īsteno pacelšanos, maršruta veidošanu, lidojumu noteiktā maršrutā, monitoringu, provju ņemšanu un nolaišanos automātiskā režīmā [1]. Vadības sistēma pieļauj pilnīgu automātisko vadību, reaģē uz situācijas izmaiņām monitoringā, pieļaujot iespēju nodot vadību operatoram.

3.1.2. Prasības attiecībā uz pacelšanās un nosēšanās vietu

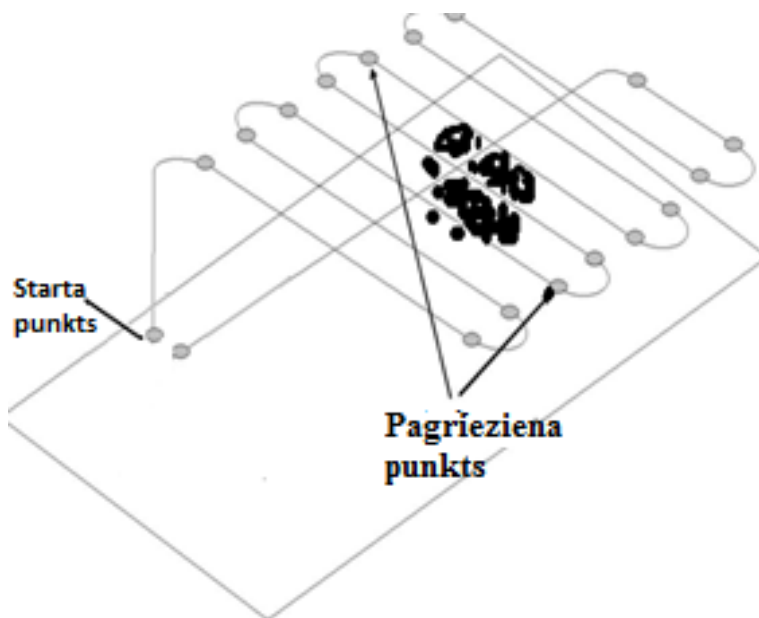
Pirmais nesēju tips bezpilota lidaparāta “lidmašīnas” tipa monitoringam izmantots, lai saņemtu datus par lielu platību ūdens piesārņojumu, un tām ir liels darbības rādiuss [18]. Šis risinājums ļauj iegūt operatīvus datus par ūdens virsmas stāvokli. Izmantojot algoritmu, ir iespējams novērtēt novirzi no tīra ūdens ar spektrālā un video attēla palīdzību; automātiski vai ar operatoru režīma vadību var izmantot otrā nesēja tipu – multirotora platformu ar vertikālās pacelšanās/nolaišanās iespēju (šis nesējs spēj arī ilgstoši atrasties noteiktā pozīcijā, lai saņemtu un precizētu informāciju par piesārņojuma raksturu [1]).

3.2. Bezpilota platformas lidojuma optimāla maršruta un profila raksturojumu izvēle

Pirmā un otrā tipa gaisa nesēju lidojumam ir trīs pamatfāzes, kas tiek veiktas automātiskā režīmā, kā arī ir iespēja nodot vadību operatoram. Lidojuma pamatfāzēs: pacelšanās un augstuma uzņemšana, monitoringa misiju un uzdevumu izpilde saskaņā ar lidojuma plānu, gaisa nesēja tipu un daudzfunkcionālo lietderīgās slodzes sistēmu, nolaišanās un nosēšanās. Pēc lidojuma izpildes konkrētā maršrutā automātiskā sistēma vai operators īsteno videonovērošanas, termālās novērošanas, spektrālās novērošanas režīmu, novirzot kameru uz paredzētiem ūdenskrātuves rajoniem vai īstenojot TGK lidojuma kursa izmaiņas.

Lidojuma maršrutu nepieciešams plānot tā, lai garantētu visas teritorijas apskati, kurā tiek veikta naftas piesārņojuma un ūdens kontrole. Akvatorijas teritorija attēlota kā rajons ar objektiem (mērķiem).

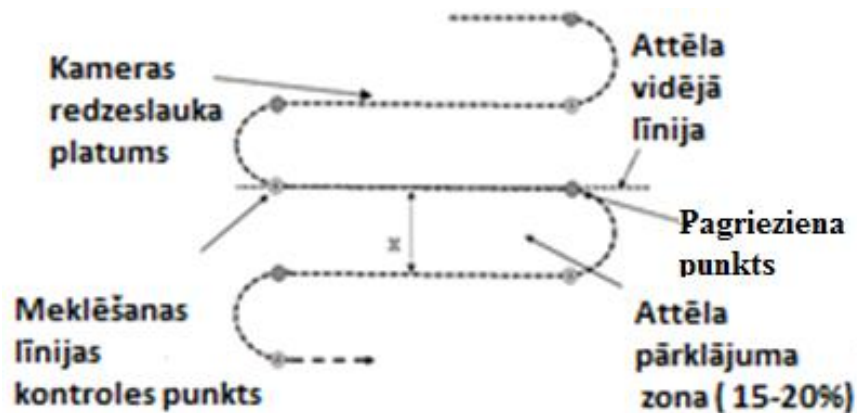
Laukumu mērķa apsekošanas optimālo trajektoriju raksturo tas, ka no visām trajektorijām tai ir minimāls garums, kā arī minimāls pagriezienu skaits virs mērķa (3.1. att.).



3.1. att. Laukumu mērķa apsekošanas optimālā trajektorija.

Lidojuma automātiskā plānošanas sistēma precīzākas informācijas saņemšanas nepieciešamības gadījumā un ciparu apvidus modeļa sastādīšanai, ieskaitot 3D modeli, ļauj izmantojot programmas interfeisu, ievērojot ārējos faktorus (redzamību, miglu, droša lidojuma augstumu), mainīt pārklājuma zonas platumu. Programmas algoritms, veicot kameras redzes attāluma starp tuvām leņķa malām noteikšanas aprēķinus, ņem vērā nepieciešamo 15 % pārklājumu. Lai izpildītu TGK pagriezienu līdz nepieciešamajam rādiusam un iziešanu uz taisni,

nākamajā pagrieziena punktā, ņemot vērā lidojuma raksturojumus TGK, pagriezienam pievieno papildu punktu, kas ir vienāds X m elektroniskās kartes mērogā (3.2. att.).



3.2. att. Lidojuma trajektorija.

Automātiskā plānošanas programma uzdevumu veidošanai izmanto trajektorijas ģeometrisko ciklu – nosacītu taisnstūri ar pastāvīgu platumu, bet mainīgu garumu un stāvokli. Šis ģeometriskais cikls tiek projicēts uz noteiktu jūras rajonu.

Novērošanas laukums, kas tiek pārklāts lidojuma taisnos posmos, tiek noteikts pēc formulas

$$\sum_{i=1}^{n(\theta)} h_i 2x, \quad (3.1.)$$

kur h – lidojuma augstums;

x – novērošanas kameras redzes leņķis.

Novērošanas laukums, kas tiek pārklāts, veicot pagriezienus, tiek noteikts pēc formulas

$$\sum_{i=1}^{n(\theta)} \pi 4x^2. \quad (3.2.)$$

3.3. Naftas piesārņojuma izplatīšanās uz ūdens virsmas matemātiskā modelēšana

Naftas piesārņojuma izplatīšanās uz ūdens virsmas ir sarežģīts process, ko iespaido, pirmkārt, iekšējie faktori:

- naftas produkta veids;
- blīvums, fizikālie un ķīmiskie raksturojumi;
- pagaidu emisijas raksturojumi – diskrēts vai pastāvīgs,

un, otrkārt, ārējie faktori:

- naftas plankuma dreifs, viļņu augstums, vēja ātrums;
- ūdenskrātuves ūdens temperatūra;
- naftas-oksidējošo baktēriju esamība ūdenskrātuvēs;
- akvatorijas sāļums;
- saules radiācija.

Naftas plankuma izkļiedēšanai metodoloģijā tiek pieņemts šāds modelis (hipotēze): normāls izkļiedēšanas ātrums ir proporcionāls plankuma biezumam.

Naftas izkļiedēšanās uz ūdens virsmas galvenais rādītājs ir naftas plēves rādiusa r atkarība no laika t , proti, $r(t)$.

Ja negaidītas avārijas rezultātā notiek jebkāda naftas apjoma lokāla izplūšana, šo procesu shematiski var iztēloties šādi: pirmais etaps – notiek naftas izplūšana uz ūdens virsmas gravitācijas spēku iedarbībā (ūdens blīvums ir lielāks nekā naftas blīvums, tādēļ nafta peld virs ūdens); otrais etaps (spēka etaps) – naftas izplūšana uz ūdens virsmas spēka iedarbībā.

Līdzko ar analītiskā aprēķina algoritma palīdzību ir atrasts naftas plankums, ir nepieciešams īstenot tā kustības korekciju. Šim nolūkam monitoringa dati tiek pārveidoti par informāciju uz kartes, un caur lietotāja noteiktajos laika intervālos tie tiek projicēti uz plankuma formu. Naftas plankuma sadalīšanās gadījumā katram no tā fragmentiem tiek atsevišķi noteikti kustības parametri (ātrums un kustības vektors pie bāzes koordinātu sistēmas) un naftu plankuma rādiusa izmaiņas.

Exel programma analizē divus naftas plankuma izplatīšanās gadījumus. Pirmkārt, pie vēja un straumes neesamības nafta izplūda uz visām pusēm vienādi, veidojot apli, kura rādiuss izmainās laikā. Noteiktā laika posmā tiek veikti plankuma rādiusa aprēķini. Otrkārt, ja ir zināms vēja un straumes ātrums upē vai jūras akvatorijā, kas saņemts ar meteoroloģiskās novērošanas palīdzību (anemometra izmantošanu), aprēķina dreifu. Plankuma dreifa virziens tiek noteikts straumes un vēja vektoru saskaitīšanas rezultātā.

Divu komplanāro vektoru saskaitīšanas rezultējošais vektors ir aprēķināms ar kosinusu teorēmas palīdzību

$$V_{\text{rez}} = [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos(180^\circ - \alpha)]^{1/2}, \quad (3.3.)$$

kur V – ātruma vektora skaitliskā nozīme;

α – leņķis starp vektoriem 1 un 2.

Leņķis starp rezultējošo vektoru un vienu no izejošajiem vektoriem var tikt aprēķināts ar sinusu teorēmu

$$\beta = \arcsin[V_2 \sin(180^\circ - \alpha) / V_R], \quad (3.4.)$$

kur α – leņķis starp izejošajiem vektoriem.

Matemātiska modeļa radīšanas vienkāršošanai, ņemot vērā to, ka monitorings tiek veikts reāllaikā, izmantojot TGK, kas aprēķina veikšanai nodod galvenos parametrus reāllaika režīmā, pieņemts, ka naftas plankuma izplūšana uz jūras virsmas notiek spēku iedarbībā, kas ir atkarīgi no gravitācijas un berzes. Naftu plankumu galvenie raksturojumi ir rādiuss un biezums. Naftas plankuma elementāram apjomam, izmantojot masas saglabāšanas vienādojumu un kustības vienādojumu, tiek aplūkots procesa matemātiskais modelis, ko simetriskā gadījumā var iztēloties kā masas saglabāšanas vienādojumu

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rvh)}{r} = 0. \quad (3.5.)$$

Kustības vienādojums

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} = -g\delta \frac{\partial h}{\partial r} - \frac{\tau}{\rho_0 h}, \quad (3.6.)$$

kur h – naftas plēves biezums;

v – kustības ātrums vidēji pēc plēves biezuma;

τ – tangenciālais spriegums plankuma apakšējā robežā;

g – brīva kritiena paātrinājums;

$\delta = (p_w - p_0)p^{-1}$; p_w, p_0 – attiecīgi ūdens un naftas blīvums;

r – radiālā koordināta;

t – laiks.

Naftas plēves sākotnējo izvietojumu momentānas sakoncentrētas naftas noplūdes gadījumā attēlo grafika veidā: naftas plēves izvietojuma atkarība no apjoma ar nosacījumu $h(r, 0) \neq 0, r \neq 0$.

$$2\pi \int_0^\infty (h(r, 0))r(d(r)) = Q_0, \quad (3.7.)$$

kur Q_0 – izplūdošas naftas sākotnējais apjoms.

Uz radītā matemātiskā modeļa pamata reāllaikā naftas plēvei ir galīgs rādiuss $r_k(t)$.

$$r_k(t) = \varepsilon_0 \left(\frac{Q_0 \alpha t}{8\pi^3} \right)^{\frac{1}{8}}. \quad (3.8.)$$

$$\alpha = \rho_0 \delta \frac{g}{4\mu}. \quad (3.9.)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{4}{\sqrt[8]{162}}. \quad (3.10.)$$

Maksimāls plēves biezums atkarībā no laika tiek noteikts pēc formulas

$$h(0, t) = \frac{\sqrt[3]{3}}{4} \left(\frac{Q_0}{2\pi \alpha t} \right)^{\frac{1}{4}} \varepsilon_0^{\frac{2}{3}}. \quad (3.11.)$$

Metodoloģijas modelī tiek izmantots aprēķins līdz korekcijas momentam, kad tiks saņemti dati no TGK. Iespējamais piesārņojuma kustības un izplatīšanās process tiek noteikts analītiski. Izmantojot datus no video, multispektrālām, termālām un hiperspektrālām kamerām, piesārņojuma plankuma izmērus un naftas produktu definēto krāsu kodu bāzi uz ūdens virsmas un spektru līmeņus, kā arī definēto krāsu kodu bāzi un plēves biezumu spektru, tiek noteikts naftas produkta veids. Atbilstoši viskozitātei un blīvumam tiek aprēķināts Q_0 izplūdušas naftas sākotnējais apjoms pēc formulas

$$Q_0 = Sh. \quad (3.12.)$$

3.4. Naftas piesārņojuma monitoringa algoritms

Monitoringa īstenošanai jūras ostu un naftas produktu pārkraušanas termināļu akvatorijās un rajonos, kur pastāv kuģu avārijas iespēja, ilgstošas emisijas gadījumā tiek noteikts emisijas sākotnējais ātrums un emisijas ātrums pēc noteikta laika posma (t. i., ātruma laika gradients).

Avārijas gadījumā programmā ievada izliešanas parametrus: emisijas koordinātas (ģeogrāfiskās), emisijas datums un laiks, naftas produkts (lietotājam piedāvā izvēlēties vajadzīgo

naftas produktu no datubāzes, kurā ietvertas naftas produktu – iespējamo piesārņotāju – fiziskās un ķīmiskās īpašības, plankuma izmēri un plēves blīvums), emisijas tips – ilgstošs vai acumirkļīgs.

Līdz korekcijas momentam aprēķins tiek veikts pie pastāvīga emisijas ātruma (pie divu ātrumu vienādības) vai pie lineāri krītošas/augošas emisijas ātruma (pie ātrumu nevienādības). Modelī ir paredzēts gadījums, kad piesārņojuma avots turpina pārvietoties. Šajā gadījumā patvaļīgi nosaka avota ātrumu mezglos un virzienu, kas tiek uzskatīti par pastāvīgiem līdz korekcijas momentam. Acumirkļīgas emisijas gadījumā ir jānosaka un jāievada emisijas apjoms.

Izpildot naftas izplūšanas vietas definēšanas pirmo fāzi, automātiskā vadības sistēma nosūta TKG akvatorijas monitoringa rajonā. Monitorings ir izveidots kā kompleksveida atklāšanas metode, kas ietver video kameras, termālās kameras un multispektrālās kameras izmantošanu. Iespējamā naftas piesārņojuma rajona definēšanai tiek izmantotas piesārņojuma monitoringa trīs papildinošas pieejas:

- iespējamās izplūšanas krāsas un krāsas koda salīdzinājums ar blakus piesārņojumam esošo ūdeni;
- piesārņotā rajona videonovērojuma datu salīdzinājums ar tīro ūdenskrātuvju rajoniem;
- paredzamā naftas plankuma izmaiņu monitorings noteikta laikā periodā t .

Tiek noteiktas tipveida plankuma formu koordinātas un dekarta koordinātas.

Otrā fāze – piesārņojuma parametru definēšana.

Naftas plankuma un tā parametru monitorings ir nepieciešams piesārņojuma izplatīšanās prognozēšanai ūdenskrātuves teritorijā, izejošo datu definēšanas naftas plankuma izplatīšanai analītiskam aprēķinam uz ūdens virsmas, lai noteiktu operatīvās reaģēšanas stratēģiju. Plankuma formas tipveida figūras pārklājuma procents un biežums ir nepieciešami sākumu apjoma aprēķinam.

Iespējamā piesārņojuma plēves aptuvenā biezuma definēšanai tiek izmantota paredzamā naftas plankuma krāsu kodu tabula. Tabulas izmantošana rajona novērojumam ar VNIR kameru ļauj noteikt paredzamo piesārņojumu fiksācijas sākuma etapā un radīt naftas plankuma izplatīšanās modeli.

Lai palielinātu precizitāti un novērstu iespējamo viltus piesārņojumu fiksēšanu, ko izraisa ārējie faktori, tiek izmantots eļļas biezuma mērījuma algoritms ar multispektrālo attēlu palīdzību, kas nodrošina augstu precizitāti un ir universāls jebkādām akvatorijām un dažādos meteoroloģiskos un atmosfēras apstākļos.

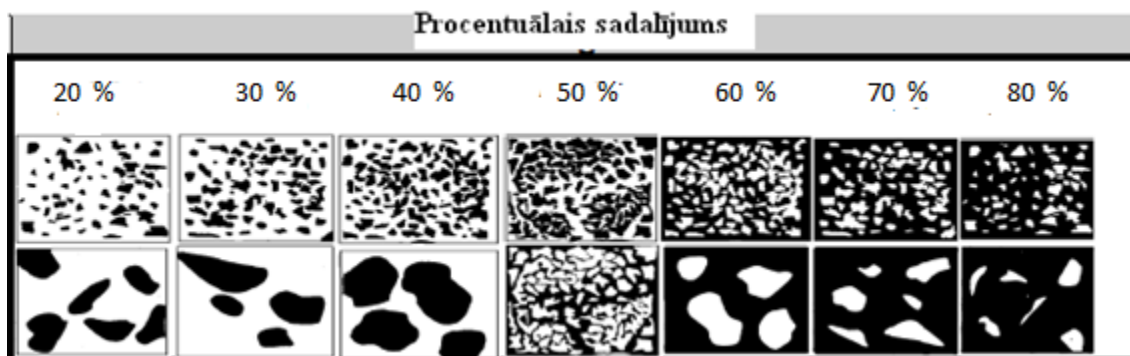
Izmantojot multispektrālos attēlus, kas saņemti, izmantojot TKG lietderīgo slodzi ar multispektrālo kameru, lai definētu naftas biežumu, tiek izmantota multispektrālā klasificēšanas metode, kurā naftu plēves spektru rezultāti tiek kalibrēti atbilstoši biežumam, lietojot ar provju atlases palīdzību saņemtos datus [1].

Izmantojot multispektrālo kameru, ir iespējams saņemt augstas precizitātes rezultātus, ja var definēt maza un liela biezuma plēves (3.1. tab.).

Krāsu kodi

Kods	Apraksts / ārējais izskats	Slāņu biezuma intervāls (μm)
1	Blāzma (sudrabs/pelēks)	No 0,04 līdz 0,30
2	Varavīkšņains	No 0,3 līdz 5,0
3	Metālisks	No 5,0 līdz 50
4	Vienlaidu īstā naftas krāsa	No 50 līdz 200
5	Vienlaidu īstā naftas krāsa	No 200 un vairāk

Nākamajā etapā notiek novērtējums un relatīvu proporciju reģistrācija (tipveida plankuma seguma procenti), tiek noteikta tīra ūdens un plankuma krāsa (vai biezums) uz izplūšanas rajona virsmas. Vizualizēšanai tiek izmantota procentuāla seguma grafiskais attēls ar sadalījumu 10 % (3.3. att.).



3.3. att. Procentuāla seguma grafiskais attēls.

Lai definētu liela apjoma plankumu ar dažādiem krāsu kodiem un biezumiem, metodoloģijā tiek izmantota pilna naftas apjoma definēšanas programma. Plankums tiek iedalīts atsevišķos rajonos. Katrai zonai tiek aprēķināti rajoni ar atbilstošu krāsas kodu pēc formulas

$$S_k = \%P \cdot S_r, \quad (3.13.)$$

kur $\%P$ – zonas seguma procents ar atbilstošu krāsas kodu;

S_r – rajona laukums.

Tālāk, reizinot laukumu S_k ar naftas plēves biezumu katrā krāsā, tiek aprēķināts katra koda (krāsas) naftas plankuma apjoms. Aprēķini tiek veikti, izmantojot *Exel* programmu.

Analoģisks algoritms tiek izmantots, veicot monitoringa misiju, izmantojot termālo, multispektrālo un hiperspektrālo kameru. Pēc aptuvena izplūdušās naftas apjoma definēšanas automātiskā programma īsteno naftas plankuma izplatīšanas prognostiskus aprēķinus akvatorijas virsmā.

Trešā fāze ietver sākotnējās informācijas par piesārņojumu precizējumu, izmantojot TGK. Atrašanās vietas un naftas izplatīšanās prognostisks uzdevums ūdens virsmā tiek risināts, analītiski izmantojot vēja un straumes datus, jo šie faktori ietekmē naftas izplatīšanos.

Pēc šī etapa notiek korekcija analītiski aprēķinātās izplatīšanās prognozē, un tiek noteikti naftas plankuma fizikālie un ķīmiskie raksturojumi, parametri, kas aprēķināti, izmantojot TGK saņemtos datus reāllaika režīmā (naftas plankuma rādiuss).

Pēc datu, kas saņemti no TGK, apstrādes lidojuma plāna izpildē korekcijas algoritms īsteno izplūduša naftas produkta apjoma pārrēķinu. TGK derīgā slodze iekļauj GPS uztvērēju, ar kura palīdzību tiek noteiktas naftas plankuma malu robežpunktu koordinātas definētajās laika atstarpēs. Automātiski tiek izrēķinātas rādiusa izmaiņas Δr laika atstarpes posmā

$$\Delta t = t_2 - t_1, \quad (3.14.)$$

$$\Delta r = r(t_2) - r(t_1). \quad (3.15.)$$

Tāpat tiek aprēķināta atšķirība starp naftas plankuma analītisko prognozi un faktisko rādiusu, ja ir nepieciešama prognozes uzticības pakāpes definēšana vai pārrēķināšana ar citiem parametriem (viskozitāte, naftas plēves biezums).

Tālāk ar saņemto datu palīdzību tiek noteikts naftas produktu precizētais apjoms pēc formulas

$$Q_0 = \frac{8\pi^{3/8} \sqrt{r_k(t)}}{\sqrt{\varepsilon_0} at}. \quad (3.16.)$$

Apjoms, kas iegūts analītiskā ceļā, tiek salīdzināts ar apjomu, kas iegūts pēc novērojumu rezultātiem. Pamatojoties uz reāliem un aprēķinātiem datiem, tiek veikta korekcija un naftas izplatīšanās jaunā prognoze. Ja plēve ir īpaši plāna vai ir nepieciešams pārbaudīt piesārņojuma ticamību, tiek veidots TGK lidojuma plāns, lai ņemtu proves, un lidiekārta tiek aprīkota ar lietderīgu slodzi un konteineru. Pēc lidojuma plāna izpildes konteiners tiek nosūtīts uz laboratoriju, un tiek noteikts naftas produkta veids un plēves biezums.

Izmantojot modeli, tiek aprēķināts sākotnējais naftas apjoms, kas tiek precizēts uz reālu datu bāzes pēc formulas

$$Q_0 = 2\pi at^{1/4} \sqrt{\frac{4h(0,t)}{3\varepsilon_0^{2/3}}}. \quad (3.17.)$$

Veicot jūru akvatorijas monitoringu, avārijas gadījumā TGK reāllaika režīmā nodod avārijas objekta koordinātu izmaiņas, emisijas izbeigšanos un naftas izkliedēšanos uz ūdens virsmas. Piemēram, avota likvidācijas rezultātā, emisijas ātruma izmaiņas rezultātā un avota kustības ātruma vai virziena izmaiņas rezultātā.

Ceturtnā fāze ietver naftas plankumu kustības novērošanu, izmantojot TGK reāllaika režīmā.

Naftas plankuma kustību var shematiski attēlot kā vektoru naftas piesārņojuma zonas ģeometriskā centrā. Šis vektors parāda summāras plūsmas ātrumu (dreifs no vēja).

Pēc datu apstrādes, kas saņemti ar TGK, izpildot lidojuma plānu, korekcijas algoritms īsteno naftas plankuma centra korekciju reāllaika režīmā. Izmantojot TGK lietderīgo slodzi un GPS ierīci, tiek noteikts svarīgs parametrs, kas tiek izmantots naftas plankuma izplatīšanās korekcijas analītiskajos aprēķinos – plankuma priekšējā mala. Tādējādi, balstoties uz informācijas bāzi, kas

saņemta, izmantojot TGK, lai ņemtu vērā dominējošo vēju un straumes ietekmi, var prognozēt ātrumu un peldošās naftas pārvietojuma virzienu un izmantot prognozējamā vektora korekciju.

Piektā fāze ietver izmaiņu novērtējumu un saņemto datu analīzi definētajās laika atstarpēs.

Pēc TGK izpildīto lidojumu plānu rezultātiem tiek izvērtēti kritēriji, lai noteiktu dažādas izplūšanas fāzes ilgumu.

TGK ar lietderīgo slodzi un dažādiem sensoru veidiem izmantošana ļauj saņemt precīzu informāciju par dinamiskiem procesiem reāllaika režīmā.

Izmaiņu novērtējumam tiek izmantotas trīs metodes, kas ir savstarpēji saistītas, izpildot monitoringa lidojumu plānu:

- datu, kas saņemti pirms un pēc izplūšanas, salīdzinājums;
- datu no piesārņotajām un nepiesārņotajām (kontroļu) vietām salīdzinājums;
- izmaiņu monitorings laika gaitā.

Sestā fāze ietver atklāšanas kļūdas izslēgšanu. Kļūdu var izraisīt viltus attēli, kuru pamatā ir mākoņu ēnas, aukstā un siltā ūdens masu sajaukums, duļķains un silts ūdens, peldošas aļģes, smilšu sēkļi. Kļūdu pārbaudi veic, izmantojot tipveida algoritmu. TGK lidojuma uzdevumā tiek ietverts proves ņemšanas algoritms. Proves ņemšanas process un transportēšana notiek automātiskā režīmā.

3.5. Monitoringa tehnoloģijas izstrāde, izmantojot TGK grupu

3.5.1. Monitoringa tehnoloģijas, izmantojot TGK grupu, uzdevuma risināšanas metožu analīze

Galvenais TGK grupas sistēmas uzdevums ir naftas noplūdes konstatēšana un novērošana, ņemot vērā parametru izmaiņas laika gaitā. Galvenā prasība – uzdevums ir jārisina reāllaika režīmā. TGK grupas sistēmas ieviešana ļauj efektīvi plānot resursus jūras telpā un laika ierobežojumos. Multiāģentu sistēmai ir priekšrocības salīdzinājumā ar vienu TGK. Galvenā priekšrocība ir uzdevumu sadale TGK grupā. Lielas jūras akvatorijas platības monitoringa laikā viens TGK nespēj pildīt misiju šādu ierobežojumu dēļ:

- monitoringa zonā ir divi vai vairāki naftas izplūdumi;
- liela maršruta garuma dēļ lidojuma misija ir jāizpilda, izmantojot autopilotu;
- gadījumā, ja tiks iegūta informācija par naftas izplūdumu, TGK tiks nosūtīts monitoringa veikšanai tikai uz tām zonām, ko aptver virszemes vadības stacija;
- naftas izplūduma kontroles misijas ilgums ir ierobežots ar TGK autonomitāti;
- viena TGK izmantošana ļauj realizēt tikai vienu monitoringa platformas tipu, kas padara neiespējamu dažādu lietderīgo slodžu efektīvu izmantošanu. Piemēram, TGK platformas ar nekustīgiem spārniem nevar izmantot naftas paraugu ņemšanai [19].

Vairāku āģentu vadības metode šajā gadījumā balstās uz vairāklīmeņu vadības sistēmu, kas sastāv vismaz no diviem līmeņiem: augsta un zema. Augsts līmenis saņem globālo informāciju un informāciju par statistiskiem un dinamiskiem objektiem no AIS.

Kontroles realizēšana augstā līmenī pēc vizuālās informācijas saņemšanas no aģenta ļauj mainīt rajonu un TGK grupas pozīciju.

Ņemot vērā misijas specifiku augstā līmenī pēc informācijas saņemšanas par piesārņojumu reāllaika režīmā, TGK grupa uzdevumu efektīvai izpildei var tikt iedalīta apakšgrupās. Šajā gadījumā informācija no viena TGK devēja tiek nodota citiem grupas locekļiem. Naftas izplūdumu izplatīšanās modelis ļauj nosūtīt TGK informāciju navigācijai uz konkrēto pozīciju. Šī pozīcija tiek aprēķināta, pamatojoties uz varbūtību pieeju, un pēc informācijas saņemšanas no TGK devējiem tiks korigēta. Šī stratēģija ļauj paaugstināt TGK grupas efektivitāti. Augstā līmenī no TGK devējiem saņemtā informācija tiks izmantota naftas izplatīšanās modeļa pārrēķinam. Pozīcija, kas ir iegūta no pārrēķinātā naftas izplatīšanās pa ūdens virsmu modeļa, tiks nosūtīta konkrētai TGK grupai.

Sistēma iekļauj n TGK, $n > 1$, un vadības sistēmu. Mērķu matricu var attēlot kā objektu kopu, izmantojot ģeogrāfiskās koordinātas. Uzdevumu var formulēt kā m punktu, kas nodrošina minimālo lidojuma laiku katram TGK, atrašanos no punktu kopas N :

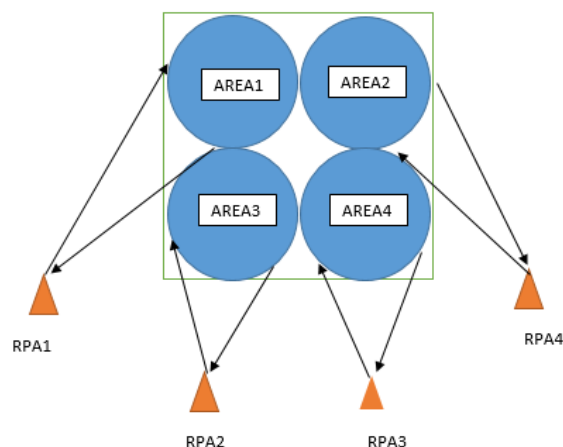
$$T = \min_{m < N} i \sum_{i=1}^m T_i, \quad (3.18.)$$

kur T – laiks.

Tādējādi gadījumiem, kad naftas izplūdumu konstatēšanai tiek izmantota multiaģentu sistēma, šajā darbā tika izstrādāts speciāls algoritms (sk. 3.5.2. Monitoringa tehnoloģijas izstrāde, izmantojot TGK grupu).

3.5.2. Monitoringa tehnoloģijas izstrāde, izmantojot TGK grupu

Monitoringa apgabalu var attēlot kā virsmas platību, kas iekļauj visus iespējamus mērķu tipus. Lai veiktu uzdevumu, ir TGK grupa, kas aprīkota ar devējiem un atrodas punktos ar ģeogrāfiskajām koordinātām, kur R ir TGK kopa $R = \sum_{i=1} R_i$, ko var izmantot monitoringa laikā (3.4. att.).



3.4. att. TGK grupas sistēma, lai veiktu naftas izplūduma konstatēšanu.

Monitoringa objektu aplidošanas laiku maršruta optimizēšanas uzdevuma atrisināšanai, izmantojot optimizācijas kritērijus, analizē, izmantojot divas dažādas metodes.

Pirmā pieeja ir optimālā maršruta meklēšana, izmantojot Deikstras algoritmu grafā. Daudzas nekustīgu objektu aplidošanas maršruta problēmas var izskatīt kā komivojažiera problēmu (*TSP*), kas gadu desmitiem tika novērtētas pēc daudziem kritērijiem, un risinājums tika izstrādāts kā integrēta lineārā programmēšana [18], [20].

Šo algoritmu var realizēt tikai vienam TKG kā grupas daļai, jo tas ir determinēts. Šo algoritmu var izmantot multiaģentu sistēmā ar nosacījumu, ka pastāv noteiktas monitoringa objektu kopas, bet katram TKG ir vienmērīgi sadalīta objektu apakškopa. Šis nosacījums var tikt realizēts, izmantojot centralizētā monitoringa sistēmu.

Otrā pieeja ir multiaģentu sistēmas izmantošana ar aģentu decentralizēto kontroli. Parasti sistēmas arhitektūra ir tāda pati kā biogēnajā sistēmā, piemēram, “spietā” un citās. Galvenā priekšrocība ir atsevišķu TKG darbības autonomija, struktūrvienību apmācības iespēja un kolektīvās komunikācijas sistēma. “Skudru kolonijas” algoritms ir viena no veiksmīgākajām metodēm, ko izmanto “spieta” intelektam [21], [22]. Ir ierobežojums, ka pirms rezultātu izmantošanas tiks izveidots matemātiskais modelis, kas ir jātestē ar noteiktu eksperimentu skaitu. “Skudru kolonijas” algoritmu TKG var attēlot kā TKG kopu R :

$$R_m = \{R_1, \dots, R_m\}, \quad (3.19.)$$

kur m ir TKG skaits.

TKG mērķis ir atrast optimālo maršrutu. Šim mērķim izmanto mērķu matricas attēlošanu kā grafu $G(V, E)$. Lai atrisinātu šo problēmu, ir jādefinē feromona lielums maršrutā. Tiek ņemts vērā, ka TKG, kas pārvietojas pa grafa šķautni E , atstāj noteiktu feromonu. Šis feromons ir saistīts ar izvēles piemērotību. Feromons, kas paliek uz šķautnes ij , iztvaiko laika gaitā. Feromona izmaiņas laikā t kā likumsakarību var attēlot ar formulu

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \quad (3.20.)$$

kur

$$\tau_{ij} = \sum_{R=1}^m \Delta\tau_{ij}^R(t), \quad (3.21.)$$

kur R – katrs TKG;

m – TKG skaits katrā iterācijā;

$\rho \in (0, 1]$ – feromona iztvaikošanas koeficients, ko nosaka TKG darbības aktivitāte.

TKG pārlidojuma no virsotnes i līdz virsotnei j varbūtību var attēlot ar formulu

$$P_{ij}(t) = \frac{\tau_{ij}(t)^\lambda \left(\frac{1}{t_{ij}}\right)^\beta}{\sum \tau_{ij}(t)^\lambda \left(\frac{1}{t_{ij}}\right)^\beta}, \quad (3.22.)$$

kur τ_{ij} – feromona līmenis;

λ un β – konstantes, kas nosaka risinājuma meklēšanas tipu;

λ – objekta izvēle ar minimālām laika izmaksām;

β – risinājums ar feromona līmeni;

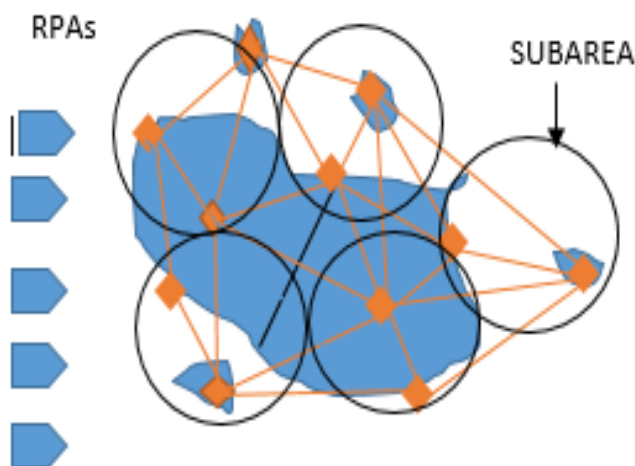
t_{ij} – laika maksa starp virsotnēm i un j .

Laika maksa starp virsotnēm t_{ij} ir proporcionāla feromona daudzumam uz šķautnes, tas nozīmē, ka minimālā laika maksa būs šķautnei ar maksimālo feromona daudzumu. Galvenā priekšrocība ir labākā risinājuma meklēšana ar lielu skaitu eksperimentu ar piemērotības kritēriju τ . Šī īpašība padara algoritmu par labāko lielām dinamiskām objektu matricām. Galvenā problēma ir tā, ka risinājuma atrašanai ir nepieciešama augsta sistēmas resursu ietilpība. No otras puses, šī pieeja dod iespēju atrast racionālu risinājumu.

3.5.3. Monitoringa tehnoloģijas algoritma efektivitātes novērtējums

Risinājumu koka algoritma un “skudru kolonijas” algoritma novērtējums parāda, ka tos var realizēt sistēmai ar vairākiem TGK. Ņemot vērā, ka naftas izplūduma dinamiku apraksta matemātiskais modelis ar pastāvīgi mainīgām koordinātēm, efektīvu monitoringa misiju var efektīvi izpildīt TGK $n > 1$. Risinājumu koka algoritmu var izmantot tikai vienam TGK. Vispirms tam ir jāuzbūvē centralizētā sistēma, kurā rajoni ir sadalīti apakšrajonos vienam TGK. Šā algoritma realizēšanai tika izstrādāta augsta līmeņa sistēma ar diviem sadales līmeņiem. “Skudru kolonijas” algoritmu var izmantot decentralizētajā sistēmā ar laika izmaksu matricu, kas ietver lielu skaitu objektu.

Tātad efektīvākais risinājums ir šajā darbā piedāvātā kompleksā pieeja efektīva monitoringa uzdevuma atrisināšanai, izmantojot TGK grupu. Šajā gadījumā naftas izplūdumu konstatēšanas misiju, izmantojot vairākus TGK, var plānot, izmantojot gan koka algoritmu, gan “skudru kolonijas” algoritmu (3.5. att.).



3.5. att. Kompleksa pieeja naftas izplūdumu konstatēšanai.

Naftas konstatēšanas misijas praktiskai realizēšanai ir nepieciešams optimāls risinājums definētajā varbūtības intervālā. Šis ierobežojums ļauj atrisināt problēmu ar reģentiem bez sarežģīta programnodrošinājuma resursu izmantošanas. Šāda pieeja ļauj vienkāršot taisņu garuma un TGK lidojuma laika aprēķinu. Kompleksās pieejas algoritmam augstā līmenī ir

jāaprēķina laika maksas matrica visiem objektiem. Šī matrica tiks izmantota gan centralizētajam algoritmam, gan “skudru kolonijas” algoritmam. Objektu sadalīšana TGK grupas starpā ir jāveic, izmantojot abus algoritmus. Galvenais ierobežojuma kritērijs TGK sadalīšanai augstā līmenī ir objektu skaits n . Abu algoritmu lietošana daudzlīmeņu sistēmā ļauj kombinēt efektu augstā līmenī. Ņemot vērā objektu matricas lielo izmēru, pēc objektu analīzes un matricas izmēra samazināšanas dinamiskajā sistēmā atrod risinājumu, izmantojot heuristisko algoritmu vienam TGK.

Centralizētā sistēma, kad vadības centrs sadala uzdevumus katram TGK, var būt efektīva, ja TGK autonomitāte netiek izmantota optimāli. Ņemot vērā koka algoritma risinājumu augsto precizitāti, to var izmantot objektu skaitam $n < 20$ vai rajonu sadala apakšrajonos, kur objektu skaits ir $n < 20$. Saskaņā ar piedāvāto modeli var tikt aprēķinātas naftas izplūduma dinamiskās izmaiņas. Naftas izplūdumu monitoringam un konstatēšanai, izmantojot dažādus autonomus aģentus, ir vairāki risinājumi. Augstā līmenī tiek izveidots naftas piesārņojumu konstatēšanas maršruts TGK grupai. Šī informācija tiek nosūtīta grupai, kas iekļauj TGK. Optimālo risinājumu var iegūt ar algoritma, kurā izmanto risinājumu koka un “skudru kolonijas” algoritmus, palīdzību. Šajā algoritmā ir realizēti divi scenāriji. Pirmajā scenārijā monitoringa objektu sadali aprēķina, atrisinot laika maksas dinamiskās matricas objektu grafu. Šajā scenārijā monitoringa objektu kopu var iedalīt apakškopās. “Spieta” uzvedības izstrādei ir jāparedz matemātiskais modelis gan atsevišķiem aģentiem, gan visam spietam [23].

Otrajā scenārijā laika izmaksu dinamiskās matricas objektu sadalīšanai TGK starpā izmanto “skudru kolonijas” algoritmu. Šajā algoritmā var tikt lietots ierobežojums feromona iztvaikošanai. Ar šādu pieeju feromona daudzums ir atkarīgs no TGK skaita, kas izmanto grafa taisno līniju. Nelielā laika intervālā var ņemt vērā feromona iztvaikošanu. Šis parametrs dod iespēju augstā līmenī reāllaikā realizēt jaunu pārrēķinātu matricu, ja situācija mainīsies. Abos scenārijos iegūtie risinājumi tiks salīdzināti. Salīdzināšanai tiks izmantots sarežģītības kritērijs. Sarežģītības kritēriju var attēlot kā otrā scenārija rezultātus, kas dalīti ar pirmā scenārija rezultātiem. Ja sarežģītības kritērijs > 1 , pēc pirmā scenārija iegūtais risinājums tiek izmantots kā optimālie maršruti TGK grupai.

Šī pieeja ļauj izmantot abu algoritmu stipros parametrus un izslēgt vājos parametrus. Iespēja pārslēgties no viena algoritma uz otro ļauj iegūt risinājumu atbilstoši misijas uzdevuma izmēriem un minimizēt problēmu.

4. BEZPILOTA LIDOJOŠAS PLATFORMAS IZSTRĀDE JŪRAS AKVATORIJAS NAFTAS PIESĀRŅOJUMA MONITORINGAM

4.1. Monitoringa uzdevumu un prasību formulējums bezpilota platformai

4.1.1. Monitoringa uzdevumu formulējums

Automātiskā sistēma, izmantojot TGK, nodrošinās šādu uzdevumu atrisināšanu:

- lielu jūras akvatoriju platību monitorings;
- nepārtraukta jūras akvatorijas ekoloģiskā monitoringa nodrošināšana;
- naftas plankuma izplatīšanās monitorings dinamikā;
- paraugu ņemšana, izmantojot piesārņojuma identifikācijai speciāli projektēto TGK;
- piesārņojuma produkta tipa noteikšana;
- naftas piesārņojuma no kuģiem pierādījumu atrašana un savākšana;
- operatīvās informācijas nodrošināšana atbildīgajiem dienestiem avārijas, kas izraisīja naftas piesārņojumu, gadījumā.

4.1.2. Prasības bezpilota lidojošas platformas izveidei

Izvēloties TGK jūras misijām, pirmkārt, ir jāņem vērā šādi principi: ticamība; atbilstība jūras novērošanas prasībām; vadības vienkāršums un, visbeidzot, cena [24]. Izstrādājot prasības TGK kompleksa sastāvā, tika ņemti vērā šādi galvenie parametri, kas nepieciešami jūras akvatorijas naftas piesārņojuma monitoringa misijas veikšanai.

1. TGK lidošanas ātrums un tālums, ņemot vērā plašu monitoringa diapazonu. Monitoringa izpildes nodrošināšanai TGK ātrumam ir jābūt diapazonā no 0 km/h līdz 180 km/h. Saskaņā ar *HELCOM* statistisko datu analīzi lielākais daudzums avāriju un nesankcionēto naftas noplūžu notiek piekrastes tuvumā. TGK ar darbības rādiusu 95 km izmantošana atrisina monitoringa problēmu. Turklāt TGK, izmantojot pacelšanās iespēju no kuģiem, papildus palielina to operatīvo mobilitāti.
2. Iespēja veikt monitoringu relatīvi neatkarīgi no laika un apkārtējās vides apstākļiem. Vēja ātrums vai jūras viļņošanās nedrīkst būtiski ietekmēt naftas piesārņojuma konstatēšanu. TGK ir jābūt iespējai veikt monitoringa misiju ar vēja ātrumu līdz 15 m/s lietūs un miglas apstākļos [1]. TGK ir jābūt aprīkotam ar iekārtām, kas ir noturīgas pret agresīvas vides (sāļš jūras ūdens) iedarbību.
3. TGK iekārtām ir jānodrošina iespēja ņemt paraugus no ūdens virsmas lidojuma režīmā. Lai nodrošinātu piesārņojuma dinamikas kontroli, ir jānosaka naftas plēves biezums un jākontrolē tās izmaiņas laika gaitā.
4. Iespēja nodot informāciju par monitoringa rezultātiem reāllaika režīmā. Komunikācijas sistēmai ir jānodrošina iespēja nolasīt naftas plankuma izplatīšanās dinamikas novērošanas datus reāllaika režīmā. Turklāt datu pārraides kanāli tiek pakļauti dažādu

traucējumu iedarbībai. Tātad ir svarīgi noteikt datu pārraides kanālu konfigurāciju un vadību, lai pastiprinātu spēju nepakļauties traucējumu iedarbībai [25].

4.2. Bezpilota platformas komponentu funkcionālās iespējas un tehniskās raksturlieknes

Katra konkrēta TGK izmantošana naftas piesārņojuma monitoringam, ņemot vērā ārējos faktorus, prasa dažādas lietderīgās slodzes kombinācijas. Viena no galvenajām problēmām ir tā, ka TGK jau ir projektēts, ņemot vērā vispārinātas prasības. Rezultātā aparatūras atlase, kurai jānodrošina problēmas atrisināšana ar augstu konstatēšanas varbūtību, ir grūts uzdevums.

Risinot problēmu, TGK izstrādes stadijā nepieciešams noteikt lietderīgās slodzes svaru vairākfunkciju lietošanai. Šajā gadījumā efektīvs problēmas risinājums ir atsevišķa lietderīgās slodzes moduļa izveidošana. Modulim ir jānodrošina iespēja uzstādīt nepieciešamo aparatūru un devējus saskaņā ar TGK tehnisko specifikāciju. Devēji modulī ir jāuzstāda, ņemot vērā specifiskās monitoringa misijas prasības [26].

TGK lietderīgās slodzes devēju analīze parāda, ka ir jāizstrādā integrētā lietderīgā slodze. Analīzes laikā tika noteikts, ka konstatēšanas uzlabošanai un viltus trauksmes novēršanai ir jāattīsta noteikšanas metodes. SVID analīze noteica, ka tikai viens devējs nevar sniegt informāciju, ko pieprasa naftas izplūdumu monitoringa programma.

Izstrādājot integrēto lietderīgo slodzi, tika formulētas šādas prasības:

- iespēja izmantot vairākus devējus, lai novērstu viltus trauksmes;
- pagarināt novērošanas laiku līdz 24 stundām (dienā un naktī);
- savākt naftas paraugus, izmantojot speciālo ierīci.

TGK izmantošanas naftas piesārņojuma monitoringa misijas izpildes laikā optimizēšanai tika izstrādāta integrētā lietderīgā slodze ar multispektrālajiem siltuma devējiem un paraugu ņemšanas ierīci.

4.3. Ūdens provju ņemšanas no tālvadības gaisa kuģa borta ierīču un tehnoloģijas izstrāde

4.3.1 Provju ņemšanas galveno uzdevumu noteikšana, veicot naftas piesārņojuma monitoringu ar TGK palīdzību

Nacionālās vides aizsardzības normatīvie akti ietver prasības naftas piesārņojuma kontroles un to seku likvidācijas programmu izveidošanai. Galvenais mērķis ir esošā naftas izplūduma novērošana, lai noteiktu vides piesārņojuma avotu un ietekmi uz jūras vidi. Saskaņā ar starptautiskajām prasībām naftas piesārņojuma gadījumā ir nepieciešams veikt laboratorijas analīzes, lai noskaidrotu vainīgo kuģi vai piesārņojuma objektu. Veicot laboratorijas pētījumus, var noteikt starpību starp naftas produktu veidiem un izplūdušā naftas produkta saistību ar avotu.

Lai veiktu efektīvu monitoringu, ir nepieciešams izstrādāt teorētiski pamatotu un praktiski realizējamu metodoloģiju, kas ļauj risināt šādus uzdevumus:

- provju sākotnējā ņemšana un katras probes parametru reģistrācija;
- provju sekundārā ņemšana naftas plankuma robežas precizēšanai un paplašinātu laboratorijas analīžu veikšanai.

Metodoloģijas lietošana praksē ļaus atbildīgajām organizācijām nodrošināt naftas piesārņojuma kontroli un operatīvu likvidāciju.

4.3.2. Naftas piesārņojuma monitoringa ar attālo zondēšanas līdzekļu izmantošanu programmu trūkumu analīze

Izpildot naftas izplūdes monitoringa programmu, ir nepieciešams veikt novērojumus jebkurā laika brīdī. Naftas plēves biezuma izmērīšana uz ūdens virsmas var nodrošināt informāciju par naftas daudzumu un, ja izplūduma virsmas platība ir zināma, pamatojoties uz šo informāciju, var aprēķināt kopējo naftas tilpumu. Ķīmisko vielu un noturēšanas sistēmas lietošanas gadījumā tās ir jāizmanto uz naftas plankuma biezākās daļas. Provju ņēmēju izmantošana var sniegt noteiktu priekšstatu par naftas plankuma relatīvo biezumu un palīdzību, izveidojot notīrīšanas no naftas piesārņojuma metodoloģiju. Visi norādītie nosacījumi rada nepieciešamību izveidot TGK ar naftas piesārņojuma provju ņemšanas no ūdens virsmas ierīci. TGK izmanto dažādu vides monitoringa uzdevumu izpildei iegūto datu augstās aktualitātes dēļ.

4.3.3. Prasības provju ņemšanai izmantojamam TGK

Veicot naftas izplūduma monitoringu, lai noteiktu piesārņojuma smaguma pakāpi, ir nepieciešamas izmantot provju ņemšanas programmu, lai novērtētu kopējo ietekmi uz vidi. Proves ir jāņem telpiskajos rajonos ar definētām koordinātām visā piesārņojuma sektorā.

IMO ir izstrādājusi speciālu dokumentu ar ieteikumiem provju ņemšanai naftas piesārņojuma gadījumā. Divas galvenās provju ņemšanas metodes ir [19]:

- naftas plēves noņemšana, nosmeļot ar provju trauku;
- provju ņemšana, izmantojot speciālo teflona sīkšūnu sietu.

TGK izmantošana vizuālo datu iegūšanai par naftas piesārņoto zonu sniedz sākotnējo informāciju jaunas monitoringa un provju ņemšanas punktu programmas izstrādei. Ņemot vērā TGK naftas izplūdumu provju ņemšanas misijas specifiku, provju ņemšanas ierīces svars ir iekļaujams TGK svara līdzsvara vienādojumā. Sakarā ar to galvenā prasība lietderīgajai slodzei ir neliels provju ņēmēja svars.

Turklāt TGK, ko izmanto lidošanai virs ūdens, ir jāaprīko ar speciālu ierīci peldēšanai avārijas nosēšanās gadījumam [19].

Analīzes gaitā tika noteikti ārējie faktori, kas var traucēt TGK, kas paredzēts naftas probes ņemšanai, darbībai. Šie faktori ir vēja ātrums un viļņu augstums. TGK izmantošana naftas provju ņemšanas misijai ir ierobežota ar vēja ātrumu virs 14 m/s un viļņu augstumu virs 2 metriem [19].

Salīdzinot ar autonomajiem virsūdens un zemūdens kuģiem ar provju ņemšanas ierīcēm, TGK papildus sniedz aerofotografēšanu.

Lietderīgā slodze provju ņemšanai ir jāuzstāda uz TGK apakšējās malas ar speciālu ierīci atvienošanai avārijas gadījumā [19].

4.3.4. Ūdens provju ņemšanas no TGK borta ierīču un tehnoloģijas izstrāde

Izmantojot TGK, ir iespējams novērst trūkumus un ievērot mūsdienu monitoringa prasības. Šis risinājums ir komplekss un ļauj veikt piesārņojuma konstatēšanu un provju ņemšanu ar mērķi apstiprināt rezultātus.

Provju ņemšanai dažādos jūras akvatorijas rajonos, pamatojoties uz veikto SVID analīzi, tika izstrādāti divi provju ņemšanas ierīču tipi. Pirmais tips ir paredzēts izmantošanai vienreizējās ņemšanas gadījumā konkrētā rajonā un vizuālo novērojumu apstiprināšanai. Šāda tipa ierīces var uzstādīt lidmašīnas un helikoptera tipa TGK korpusā [19].

Esošo problēmu operatīvā monitoringa un novēšanas programmas īstenošanai pētījuma procesā tika izstrādāta metode un ierīce jūras akvatorijas un iekšējo ūdeņu naftas piesārņojuma kontrolei [19].

TGK kopējā lietderīgā slodze ir atkarīga no vilces, ko tā var nodrošināt. Tātad naftas piesārņojuma provju ņemšanas iespējas ir ierobežotas. Ņemot vērā prasības tālam lidojuma rādiusam, TGK ar nekustīgiem spārniem atrisina attālās zondēšanas uzdevumu no piekrastes attālos rajonos.

Ierīce, kas shematiski parādīta 4.1. attēlā, ietver TGK ar nekustīgiem spārniem, kas ir aprīkota ar speciālo provju ņemšanas ierīci (1), kas uzstādīta metāla turētājā uz TGK korpusa [27].

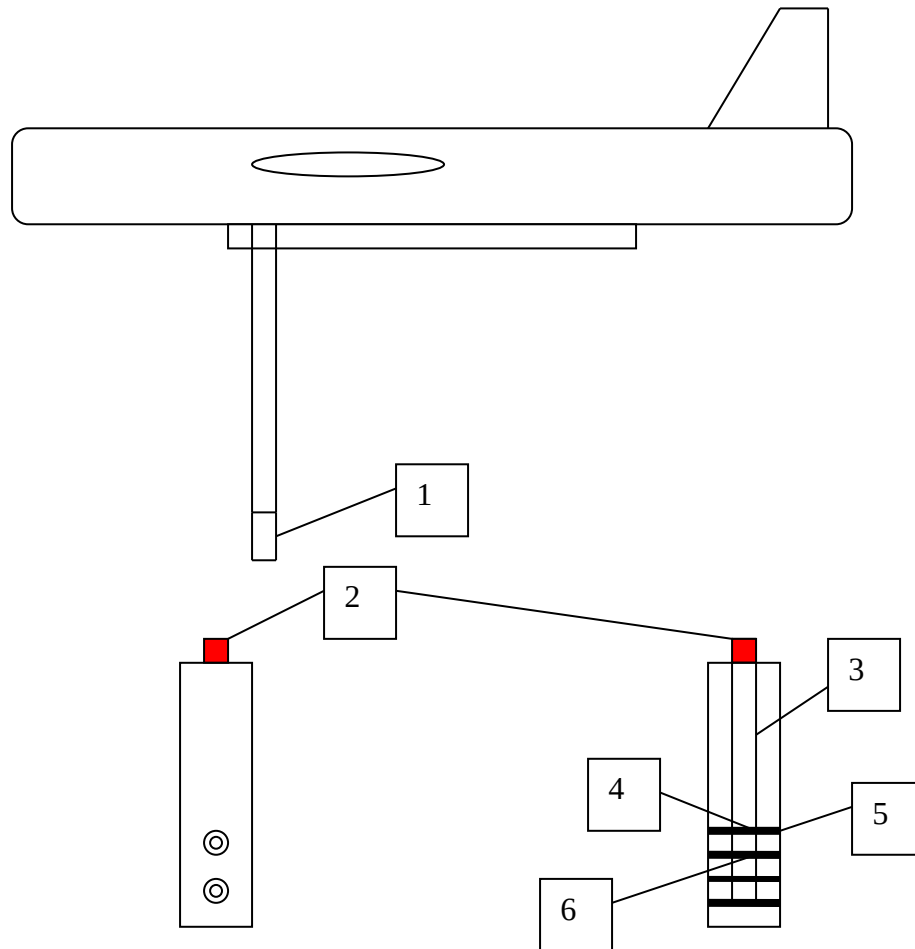
Izstrādājot provju ņemšanas ierīci, tika lietoti inovatīvi risinājumi. Lai nodrošinātu provju ņemšanu un iespējamu naftas piesārņojuma tūlītēju noteikšanu, tika izstrādāta ierīce ar tās korpusā iebūvētu piesārņojuma konstatēšanas devēju. Lai nodrošinātu kvalitatīvu informāciju par ūdens stāvokli, tiek paredzēta provju ņemšana dažādos līmeņos.

Provju ņemšanas ierīces konstrukcija iekļauj cilindrisku provju ņēmēju ar elektromagnētisku vārstu ar atsperi (2), kas savienots ar stangu (3), ar buksi un provju ņēmēja kameras virzuļiem (5). Provju ņēmēja cilindriskajā korpusā ir izveidoti atvērumi ūdens pieņemšanai proves ņemšanas laikā. Provju ņēmēja augšējās sekcijas augšējā virzulī ir uzstādīts fotorezistors (4), bet apakšējā virzulī – gaismas diode (6). Šis risinājums nodrošina iespēju pēc proves ņemšanas veikt ūdens proves kontroli naftas produktu un piesārņojuma klātbūtnei. Mēršūniņa, kas sastāv no fotoelementa un diodes, naftas produktu klātbūtnē (tiek reģistrētas optiskās izmaiņas) padod signālu uz TGK EVM un tālāk ar sakaru sistēmu signālu vadības centram [27].

Naftas vai naftas produktu izplūdumu konstatēšanas uz jūras akvatorijas virsmas metodes tehniskais rezultāts ir naftas produktu izplūdumu konstatēšanas uz ūdens objektu virsmas un savākšanas operatīvuma paaugstināšana, naftas vai naftas produktu izplūdumu koordināšu noteikšanas precizitātes paaugstināšana, naftas vai naftas produktu izplūduma izplatīšanās

prognozēšana īstermiņa un ilgtermiņa laika periodam, darba iespēja jebkuros klimatiskajos apstākļos un neatkarība no parametra diena/nakts.

Šis risinājums ļauj, izmantojot koordinātas, kurās TGK paņēma proves, attēlot piesārņojuma izplatīšanās dinamiku daudzlīmeņu elektroniskajā kartogrāfiskajā sistēmā.



4.1. att. TGK ar nekustīgiem spārniem un speciālo provju ņemšanas ierīci.

2. tipa ierīce ir izstrādāta, lai nodrošinātu provju pastāvīgu ņemšanu konkrētos jūras akvatorijas rajonos. Izveidojot ierīci, tika noteikts uzdevums ņemt plānu plēvju proves un identificēt piesārņojumus. Lai nodrošinātu monitoringa programmas prasības, tika izstrādāts inovatīvs risinājums, kas konteineru nolaišanai uz ūdens virsmas un atgriešanai korpusa nodalījumā izmanto mikrovinču [28].

Izgudrojums pieder pie kontroles metodēm, kas palīdz uzraudzīt baseina jūras ūdens un iekšējo ūdeņu piesārņojumu ar naftas produktiem un līdzekļiem. Pētījuma procesā tika piedāvāta metode ūdens provju ņemšanai, lai noskaidrotu naftas piesārņojuma esamību akvatorijā, kas

ietver proves ņemšanu no ūdens virsmas, provju sagatavošanu transportēšanai un piegādei uz norādīto vietu ar TGK palīdzību.

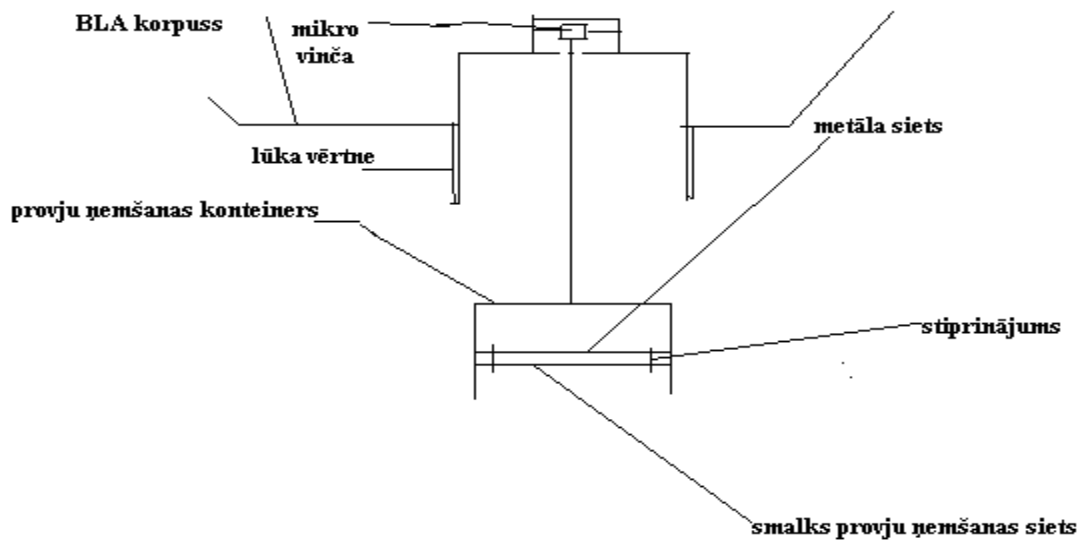
Provju ņemšanai piekrastes rajonos pētījuma procesā tika izstrādāta ierīce, kas sastāv no vertikālās pacelšanās un nolaišanās TGK, kas ir aprīkots ar speciālu ierīci provju ņemšanai provju ņēmējā (4.2. att.), kas veidots kā plastmasas konteiners ar pozitīvu peldspēju. Konteintera struktūra iekļauj metāla un speciālu plānu teflona sietu. Konteiners ir paredzēts provju ņemšanas no ūdens virsmas [28]. TGK komplekss veic proves ņemšanu no naftas izplūduma virsmas. Konteintera nolaišana uz ūdens virsmas un pacelšana TGK speciālajā nodalījumā tiek veikta, izmantojot kompakto vinču. Konteiners ar pozitīvu peldspēju nodrošina proves ņemšanu no ūdens virsmas, neņemot vērā jūras virsmas stāvokli un viļņu augstumu.

Pēc ūdens provju ņemšanas no virsmas un konteintera pacelšanas uz TGK borta tas tiek novietots hermētiskā nodalījumā, kas ir paredzēts viena vai vairāku konteineru novietošanai. TGK hermētiskais nodalījums ir aprīkots ar automātiski vai ar tālvadības pults palīdzību aizveramām vārtņēm ar teflona blīvējumu.

Provju ņemšanas un transportēšanas process tiek veikti automātiski. Pēc TGK nolaišanās bāzēšanās iecirknī (piemēram, krastā vai uz kuģa borta) konteiners tiek nodots laboratorijā provju analīzei. Ja pēc monitoringa plāna ir nepieciešama provju ņemšana no virknes punktu hermētiskajā nodalījumā, tiek uzstādīti vairāki neatkarīgi moduļi ar konteineriem. Atšķirībā no esošajām provju ņemšanas metodēm vertikālās pacelšanās un nolaišanās provju ņemšanas TGK ir aprīkots ar speciālu kompakto vinču. Vinčas esamība ļauj veikt attālu zondēšanu ar provju ņemšanu neatkarīgi no laikapstākļiem. Inovatīvais risinājums ir tas, ka provju ņemšanas ierīce ir izveidota kā plastmasas konteiners ar pozitīvu peldspēju un ir aprīkota ar speciālu teflona sietu ar nelielām šūnām proves iegūšanai no ūdens virsmas. Metode, izmantojot TGK ar konteineriem, kas novietoti hermētiskajā nodalījumā, ļauj izpildīt juridiskās prasības naftas piesārņojuma provēm. Pētījuma procesā tika veikta esošo naftas piesārņojuma noteikšanas metožu un līdzekļu analīze. Izstrādātās ierīces galvenās priekšrocības ir šādas:

- proves ņemšanas no naftas izplūdumiem laikā TGK nevar tikt piesārņoti ar naftas produktiem vai naftas produktu plēvi. Pēc provju ņemšanas procedūras paņemtās proves saskaņā ar *IMO* standartiem un Bonnas vienošanos var izmantot analīzēm;
- šo provju ņemšanas ierīci var izmantot provju ņemšanai no naftas izplūdumu rajoniem un ūdens provju ar plānām naftas plēvēm (“varavīksnes spīdums”, “zils spīdums”, “sudrabains spīdums”) ņemšanai.

Analīze rāda, ka lietderīgajai slodzei ar provju ņemšanas ierīci ir lielas priekšrocības. Draudi tās izmantošanai ir tikai ļoti slikti laikapstākļi.



4.2. att. Vertikālās pacelšanās un nolaišanās TGK, kas ir aprīkots ar speciālu ierīci provju ņemšanai.

Ir realizēti divi scenāriji vidēja izmēra naftas izplūduma provju ņemšanai. Pirmajā scenārijā provju ņemšanu veica vides aizsardzības darbinieki, izmantojot laivu peldēšanai izplūduma zonā un automašīnu pārvadāšanai uz laboratoriju. Otrajā scenārijā naftas izplūdumu proves ņēma TGK ar iebūvētu provju ņēmēju.

Izmantojot TGK, naftas izplūdumu provju ņemšanas programmas laiks samazinājās par 80 % [19]. TGK var izmantot kā autonomās sistēmas platformu, kas palīdz naftas izplūdumu provju ņemšanai.

SECINĀJUMI

1. Tika veikta jūras vides naftas piesārņojuma monitoringa ar attālo zondēšanu galveno uzdevumu un metožu analīze. Tika analizēts Baltijas jūras akvatorijas piesārņojuma līmenis un avoti. Tika identificētas jūras virsmas naftas piesārņojuma problēmas un monitoringa galvenie uzdevumi. Tika novērtētas esošās jūras virsmas naftas piesārņojuma monitoringa ar attālo zondēšanu sistēmas, kas izmanto kuģus, satelītus, pilotējamus gaisa kuģus. Konstatēts, ka ir nepieciešams izstrādāt naftas piesārņojuma nepārtraukta monitoringa metodoloģiju ar TGK lietošanu. Lai novērstu viltus piesārņojuma indikācijas, nepieciešams izstrādāt paraugu ņemšanas ierīces.
2. Ir izstrādāts TGK optimālo lidojuma maršrutu, veicot monitoringa uzdevumu, sastādīšanas procedūras matemātiskais modelis. Problēmas formulēšanai tiek noteikts, ka pastāv mērķu kopa ar konkrētiem parametriem, tādiem kā mērķa tips, kustības vienādojums, pēdējās no jūras kuģniecības monitoringa sistēmām iegūtās pozīcijas, attēlošanas formulējums (punkts, līnija un platība). Jūras objektu naftas piesārņojumu monitoringa novērošanas misijai, ko izpilda TGK, optimizēšanai, ņemot vērā kritērijus, tiek analizēta mērķu matricas apmeklēšana. Mērķi dinamiskajā vidē attēloti kā punkti ar galvenajiem parametriem, tādiem kā sākotnējais ātrums un kurss. Objekta, piemēram, kuģa, kustību atrisina ar zināmu objekta pārvietošanās parametru palīdzību.
3. Tika izstrādāts TGK lidojuma maršruta, veicot monitoringa uzdevumu, optimizācijas algoritms un programmatūra. Algoritms, kas realizē zaru un robežu metodi, sastāv no viena tipa soļu secības un atrod optimālo risinājumu galīgā soļu skaitā. Kad visi elementi ir izskatīti, dekompozīcijas algoritms beidz darbību, un pašreizējais ieraksts ir labākais risinājums. Pretējā gadījumā nepārbaudītajos elementos tiks izvēlēta perspektīva kopa. Tā ir pakļauta sadalīšanai. Process turpinās, līdz tiks pārbaudīti visi sadaļas elementi. Šim algoritmam ir augsta precizitāte. Algoritmu var lietot kopā ar dinamisko programmēšanas algoritmu. Šī pieeja ļauj izmantot abu algoritmu stipros parametrus un izslēgt vājos parametrus. Iespēja pārslēgties no viena algoritma uz otro ļauj iegūt risinājumu atbilstoši misijas uzdevuma objektu skaitam un minimizēt monitoringa laiku.
4. Tika izstrādāta jūras akvatorijas naftas piesārņojuma nepārtraukta monitoringa metodoloģija. Monitoringa metodoloģiju īsteno atbilstoši algoritmam, kas ietver automātisko bezpilota lidojošas platformas (BLP) pacelšanu, nosēšanos un objektu aplidošanu. Šī pieeja ļauj iegūt informāciju par ūdens piesārņojumu reāllaikā režīmā. Metodoloģija ietver arī atklāšanas kļūdas izslēgšanu. Viltus attēli, ko rada mākoņu ēnas, peldošas aļģes, smilšaini sēkļi, tiks pārbaudīti, izmantojot tipveida algoritmu, kā iespējamais piesārņojums. TGK lidojuma uzdevumā tiek ietverts proves ņemšanas algoritms.
5. Tika izstrādāts naftas plankuma izplatīšanās uz ūdens virsmas matemātiskais modelis. Matemātiskajā modelī pieņemts, ka monitorings tiek veikts reāllaikā, izmantojot TGK, kas nodod galvenos parametrus reāllaika režīmā. Veicot aprēķinus, pieņemts, ka naftas plankuma

izplūšana uz jūras virsmas notiek spēku iedarbībā, kas ir atkarīgi no gravitācijas un berzes. Aplūkotā procesa matemātisko modeli simetriskas ass gadījumā var iztēloties kā masas saglabāšanas vienādojumu. Pēc datu apstrādes, kas saņemti ar TGK, izpildot lidojuma plānu, korekcijas algoritms īsteno naftas plankuma parametru korekciju reāllaika režīmā. Pēc TGK datu apstrādes tiek noteikti naftas produkta veids, viskozitāte, blīvums un izplūdušas naftas sākotnējais apjoms.

6. Tika izstrādāta bezpilota lidojoša platforma, kas ir aprīkota ar vairāku veidu sensoriem (video, multispektrālām, termālām, hiperspektrālām u. c.) un īpašu ierīci provju ņemšanai no ūdens virsmas. Jūras akvatorijas ūdens provju ņemšana notiek no tālvadības gaisa kuģa borta lidojuma režīmā.

Bezpilota lidojošā platforma sastāv no vertikālas pacelšanās un nosēšanās TGK, kas aprīkots ar speciālu provju paņemšanas iekārtu, izgatavotu no speciāla konteineru ar pozitīvu peldamību. Konteineru konstrukcija ietver metālisku un speciālu teflona sīkšūnu sietus. Pēdējais ir paredzēts provju ņemšanai no ūdens virsmas un iekļauts naftas produktu piesārņojuma provju ņemšanas komplektā.

Konteineru iegremdēšana ūdens virsmā un konteineru pacelšana uz TGK borta pēc proves uzņemšanas tiek veikta, izmantojot mazgabarīta vinču. Pēc provju paņemšanas no ūdens un pieņemšanas uz TGK borta konteineru izvieto hermētiskā nodalījumā, kas paredzēts viena vai vairāku konteineru izveidošanai. Ierīce nodrošina provju paņemšanu no ūdens virsmas, neņemot vērā jūras viļņošanos un viļņu augstumu. Bezpilota lidojošas platformas izmantošana jūras akvatorijas naftas piesārņojuma monitoringa organizēšanai ļaus novērst esošo attālās zondēšanas līdzekļu trūkumus, tai skaitā paaugstināt naftas piesārņojuma noteikšanas automatizētās monitoringa sistēmas ticamību.

7. Tika izstrādāta ūdens provju ņemšanas tehnoloģija ar TGK palīdzību un šīs tehnoloģijas īstenošanas algoritms. Provju ņemšanas process un transportēšana notiek automātiskā režīmā. TGK tiek nosūtīts uz ūdens provju ņemšanas zonu ar zināmām GPS koordinātām. Pēc TGK ierašanās noteiktajā zonā kontrolētais elektroniskais vadības modulis (EVM) dod komandu atvērt vārtes hermetizētā nodalījumā. Pēc vārtes atvēršanas EVM dod komandu mikrovinčai nolaist konteineru. Konteineram sasniedzot ūdens virsmu, EVM apstādina rotējošu vinčas spoli. Pēc konteineru saskarsmes ar ūdens virsmu iespējamā naftas noplūdes rajonā EVM dod komandu vinčai pacelt konteineru ar paņemto provi. Pabeidzot konteineru pacelšanu ar EVM, dod komandu apstādināt vinčas spoli un aizvērt nodaļas vārtes, veicot hermetizāciju. Pēc TGK nosēšanās bāzē (piemēram, krastā vai uz kuģa borta) konteineris tiek nodots paņemto provju analīzei laboratorijā. Nepieciešamības gadījumā ūdens proves ir iespējams ņemt dažādās akvatorijas vietās, tādā gadījumā nodalījumā tiek izvietoti vairāki autonomi moduļi ar konteineriem.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

- [1] Urbahs A., Zavtkevics V. Oil Pollution Monitoring of Sea Aquatorium Features with Using Unmanned Aerial Vehicles: Transport Means 2014: Proceedings of the 18th International Conference, pp. 75–78, October 23–24, 2014, Kaunas, Lithuania. Kaunas: Kaunas Technologija.
- [2] Witte, F. 1986. Oil slick detection with a side looking airborne radar. Proc. of IGARSS'86, Zurich, 8–11 Sept. 1986, 1369–1374.
- [3] Oil spill detection by satellite remote sensing Camilla Brekke^{a,b,*}, Anne H.S. Solberg^a Norwegian Defence Research Establishment, Postboks 25, 2027 Kjeller, Norway
^bDepartment of Informatics, University of Oslo, Postboks 1080 Blindern, 0316 Oslo, Norway.
- [4] Bondur, V.G., Modern approaches to processing large hyperspectral and multispectral aerospace data flows, *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, 2014, vol. 50, no. 9, 840–852. doi 10.1134/S0001433814090060.
- [5] Goodman R. Overview and Future Trends in Oil Spill Remote Sensing. *Spill Science & Technology Bulletin*.1994;1.1:11–21.
- [6] Brekke C., Solberg A. Oil spill detection by satellite remote sensing // *Remote Sensing of Environment*. 2005. No. 5. P. 1–13.
- [7] Annual 2012 HELCOM report on illegal discharges observed during aerial surveillance. 2012.
- [8] Barenboim, G. M.; Borisov, V. M.; Golosov, V. N.; Saveca, A. Yu. New problems and opportunities of oil spill monitoring systems Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, Volume 366, 2015, pp. 64–74.
- [9] Muttin F. Modeling of captive Unmanned Aerial System tele detecting oil pollution on sea surface, 2014. Available
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119003021.ch7/summary>.
- [10] Belmann, R. 1957. Dynamic programming. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press. 342 p.
- [11] Urbahs A., Zavtkevics V. Remotely Piloted Aircraft route optimization when performing oil pollution monitoring of the sea aquatorium: *Aviation*, Volume 21, No. 2, 2017, p. 70–74.
- [12] Nemhauser G. N., Wolsey L. A. Integer and Combinatorial Optimization. New-York: A Wiley-Interscience Publication, 1999.
- [13] Новиков, Д. А. Математические модели формирования и функционирования команд [Текст] / Д. А. Новиков. – М.: Физматлит, 2008. –188 с.
- [14] Guerin R; Orda A. 2002. Computing shortest paths for any number of hops. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Volume: 10, Issue: 5: 613–620.

- [15] Кормен, Т. Х. Алгоритмы: построение и анализ. / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн. – 2-е изд. – М.: «Вильямс», 2006. – 1296 с.
- [16] Hung M.; Divoky J. 1988. A computational study of efficient shortest path algorithms, Computers & operations research, Vol. 15, no. 6: 567–576.
- [17] Clausen, J.; Traff J. 1991. Implementation of parallel Branch-and-Bound algorithms – experiences with the graph partitioning problem, Annals of Operation Research Vol. 33, Issue 5: 331–349.
- [18] Urbahs A., Jonaite I. Features of the use of unmanned aerial vehicles for agriculture applications: Aviation, Volume 17, Nr. 4, 2013, p. 170–175.
- [19] Urbahs A., Zavtkevics V. Remote Piloted Aircraft using for sampling of oil spill. In: Transport Means 2017: Proceedings of the 21th International Conference, Lithuania, Kaunas, 20–22 September, 2017. Kaunas: Technologija, 2017, pp. 489–492. ISSN.
- [20] Dantzig G., Fulkerson R., Johnson S. Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. J. Oper. Res. Soc. Am. 1954:2:393–410.
- [21] 2014:1-4 Adubi, S., Misra, S. A comparative study on the ant colony optimization algorithms. Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 11th International Conference.
- [22] Walter B., Sannier A., Reiners D., Oliver J. UAV Swarm Control: Calculating Digital Pheromone Fields with the GPU. The Journal of Defense Modeling and Simulation Applications, Methodology, Technology. 2006:3:167–176.
- [23] Niccolini M., Pollini L., Innocenti L. Cooperative Control for Multiple Autonomous Vehicles Using Descriptor Functions. The Journal of Sensor and Actuator Networks ISSN 2224-2708 2014:3:26–43.
- [24] Gao, X., Mu, X., Sun, D., Liu, S., 2014, Study on Selection of Maritime Supervision Unmanned Aerial Vehicle and Mission Payloads, CICTP: Smart and Sustainable Multimodal Transportation Systems.
- [25] Lu, B. D., Liu, C. S and Huang Z. R., 2013, Research into the jamming methods to UAV measurement and control system, Shipboard electronic Countermeasure, 36, 24–27.
- [26] Gonzalez-Dugo V., Hernandez P., Solis I., Zarco-Tejada P. J. (2015). Using high-resolution hyperspectral and thermal airborne imagery to assess physiological condition in the context of wheat phenotyping. Remote Sensing 7, 13586–13605. 10.3390/rs71013586.
- [27] Urbahs A., Zavtkevics V. Water sampling method of oil pollution and for analysis using unmanned aerial vehicle with fixed wings and device for method perform. LV patent application P-15-88 2015-08-20.
- [28] Urbahs A., Zavtkevics V. Unmanned aerial vehicle for collecting samples from the surface of water. EU patent EP3112840 (A1), 2017-01-04 (Application Nr. EP20150174649 20150630, 30.06.2015).