ISNN 3030-3907

2026
MAY
ISSUE - 5
VOLUME - 2

# DEVELOPMENT OF SCIENCE

## scientific journal



# Development of science

## Ilmiy jurnal

MAY 2026
Issue - 5, VOLUME - 2

ISSN 3030 -3907

*Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.*

**BOSH MUHARRIR:**
***Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.***
**TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:**
***Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor***
***TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI***

**TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Bozorov G‘ayrat Rashidovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Abdurahmonov Olim Rustamovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Adizov Bobur Zamirovich***
*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor*
***Hayitov Ruslan Rustamjonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Jumayev Qayum Karimovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Berdiyev Dorob Murodovich***
*Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Maxmudov Rafiq Amonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Tilloyev Lochin Ismatilloyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Raxmonov Qahramon Sanakulovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Barakayev Nusratullo Rajabovich***
*Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Panoyev Erali Rajabboyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Ataullayev Sherzod Nabiullyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Murodov Malik Negmurodovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Axmedova Ozoda Bahronovna***
*Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.*
***Safarov Bahri Jumayevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Xaydarov Axtam Amonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Safarov Jasur Alijon o‘g‘li***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*

**KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Axmedov Voxid Nizomovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Umarov Baqo Bafoyevich***
*Buxoro Davlat Universiteti, professor*
***Kodirov Abduaxad Abduraximovich***
*Qarshi davlat Universiteti, professor*
***Qurbonov Mingniqul Jumagulovich***
*Qarshi davlat Universiteti, dotsent*
***Turemuratov Sharibay Naurizbaevich***
*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor*
***Tursunov Kaxor Shonazarovich***
*Qarshi davlat Universiteti, professor*
***Do‘stov Hamro***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Panoyev Nodir Shavkatovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Kasimov Sherzod Abduazimovich***
*Termiz Davlat Universiteti, professor.*
***Aliqulov Rustam Valiyevich***
*Termiz Davlat Universiteti, professor*
***Tropov Xamza Tursunovich***
*Samarqand Davlat Universiteti, professor*

**IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Nizamov Aslitdin Badreddinovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Boboyev Akmal Choriyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna***
*Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor*
***Saidaxmedova Nodira Ilxomovna***
*Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor*
***Muxsinov Bekzod Toxirovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Shakarov Qulmat Ashirovich***
*Renessans ta'lim universiteti,dotsent.*
***Jumaeva Zulfiya Qayumovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Norova Salomat Yusupovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Jalilov Jamshid G‘anijonovich***
*Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent*
***Xasanova Gulruh Djumanazarovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*

**PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Siddiqova Sadoqat G‘afforovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Zoyirov Erkin Xalilovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor*
***Gaffarov Feruz Hasanovich***
Puchon Universiteti, *professor*
***Ruziyev Davron Yuldashevich***
*Buxoro Davlat Universiteti, professor*
***Muradova Firuza Rashidovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Yunusova Gulandon Samiyevna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***To‘xtayeva Zebo Sharifovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Uzoqova Laylo Polvonovna***
*Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.*
***To‘raqulova Marjona Qiyom qizi***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Muradova Zarina Rashidovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Murodov Sanjar Aslonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent*
***Gaffarov Laziz Hasanovich***
*Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.*

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.


ISSN 3030-3907

**Development of science** ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.


ISSN 3030-3907

УДК 004.932.2+519.7

# УСТОЙЧИВОСТЬ И РОБАСТНОСТЬ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЗЗ

**Шамсиев Расул Заирович**

***Ташкентский государственный транспортный университет, доцент кафедры «Системы аэронавигации», PhD по техническим наукам***

***Tel: +998 97 736 56 96***

***E-mail:rasulshamsiev@rambler.ru***

**Annotatsiya.** Maqolada Yerni masofadan zondlash (YMZ) ma'lumotlar oqimini qayta ishlash jarayonini intellektual boshqarishning diskret-uzluksiz gibrid modelining barqarorlik va mustahkamlik analitik mezonlari tadqiq qilinadi. Lyapunov funksiyalari usuliga asoslangan masalaning formal qo‘yilishi taklif etilgan bo‘lib, u filtratsiya algoritmlarining (Kalman va variatsion filtratsiya) uzluksiz dinamikasini hamda ishlov berish rejimlarini almashtirishning diskret hodisalarini (klassifikatsiya usulini tanlash, spektral indekslarni normallashtirish) hisobga oladi. Cheklangan tashqi ta'sirlar mavjudligida holat xatosining asimptotik barqarorligini kafolatlaydigan adaptiv jazolovchi regulyator algoritmi ishlab chiqilgan. Nominal rejimda Lyapunov funksiyasining hosilasining manfiyligini ta'minlaydigan LCI (chiziqli matritsali tengsizliklar) shartlari kiritilgan. $||w(t)|| \leq \bar{w}$ ko‘rinishidagi cheklangan ta'sirlar holati uchun mustahkam barqarorlik baholari olingan. Yondashuvning amaliy ahamiyati NDVI, NDWI, NDBI spektral indekslarini hisoblash masalalarida qo‘llanilgan integrallashgan Lyapunov filtri bilan GIS-ilovaning tatbiq etilishi bilan tasdiqlangan. Natijalar Lyapunov funksiyasining monotonik kamayishi va filtratsiya xatosining yaqinlashishini ko‘rsatadi, bu esa nazariy xulosalarning to‘g‘riligini tasdiqlaydi.

**Kalit so‘zlar:** Yerni masofadan zondlash, gibrid boshqaruv tizimlari, Lyapunov funksiyasi, mustahkamlik, adaptiv regulyator, chiziqli matritsali tengsizliklar, spektral indekslar, GAT (Geografik axborot tizimlari).

**Аннотация.** В статье исследуются аналитические критерии устойчивости и робастности дискретно-непрерывной гибридной модели интеллектуального управления процессом обработки потоков данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Предложена формальная постановка задачи на основе метода функций Ляпунова, учитывающая как непрерывную динамику алгоритмов фильтрации (Калмановская и вариационная фильтрация), так и дискретные события переключения режимов обработки (выбор метода классификации, нормализации спектральных индексов). Разработан алгоритм адаптивного штрафующего регулятора,



ISSN 3030-3907

гарантирующего асимптотическую устойчивость ошибки состояния при наличии ограниченных внешних возмущений. Введены условия LMI (линейных матричных неравенств), обеспечивающие отрицательность производной функции Ляпунова в номинальном режиме. Получены оценки робастной устойчивости для случая ограниченных возмущений вида $||w(t)|| \leq \bar{w}$. Практическая значимость подхода подтверждена реализацией ГИС-приложения с интегрированным Ляпуновским фильтром, применённого к задачам вычисления спектральных индексов NDVI, NDWI, NDBI. Результаты демонстрируют монотонное убывание функции Ляпунова и сходимость ошибки фильтрации, что подтверждает корректность теоретических выводов.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, гибридные системы управления, функция Ляпунова, робастность, адаптивный регулятор, линейные матричные неравенства, спектральные индексы, ГИС.

**Abstract.** The article investigates analytical criteria for stability and robustness of a discrete-continuous hybrid model for intelligent control of the Earth remote sensing (ERS) data stream processing process. A formal problem statement is proposed based on the Lyapunov function method, accounting for both the continuous dynamics of filtering algorithms (Kalman and variational filtering) and discrete events of processing mode switching (selection of classification method, normalization of spectral indices). An adaptive penalty regulator algorithm is developed, guaranteeing asymptotic stability of the state error in the presence of bounded external disturbances. LMI (linear matrix inequalities) conditions are introduced to ensure the negativity of the Lyapunov function derivative in the nominal mode. Estimates of robust stability are obtained for the case of bounded disturbances of the form $||w(t)|| \leq \bar{w}$. The practical significance of the approach is confirmed by the implementation of a GIS application with an integrated Lyapunov filter, applied to the calculation of spectral indices NDVI, NDWI, NDBI. The results demonstrate a monotonic decrease of the Lyapunov function and convergence of the filtering error, confirming the validity of the theoretical conclusions.

**Keywords:** Earth remote sensing, hybrid control systems, Lyapunov function, robustness, adaptive regulator, linear matrix inequalities, spectral indices, GIS.

## 1. ВВЕДЕНИЕ.

Задача интеллектуального управления обработкой потоков данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) представляет собой одну из центральных проблем современной геоинформатики и вычислительной науки. Спутниковые снимки характеризуются высокой размерностью

пространства признаков, разнородностью источников (мультиспектральные, гиперспектральные, радиолокационные данные), а также нестационарностью поступления, обусловленной погодными условиями, изменением орбитальных параметров и динамикой наблюдаемых объектов [1].

Существующие алгоритмы обработки — от классических статистических методов до современных сверточных нейронных сетей — нередко демонстрируют неустойчивое поведение при воздействии возмущений: шумов, атмосферных искажений, неоднородностей подстилающей поверхности. Данная проблема особенно остро проявляется в системах с переключением режимов обработки, где неконтролируемые дискретные события способны дестабилизировать в целом устойчивые непрерывные процессы [5, 6].

Теоретической основой для решения задач устойчивости гибридных систем служит метод функций Ляпунова — мощный инструмент анализа, позволяющий установить формальные критерии устойчивости без явного построения решений дифференциальных уравнений [21, 28]. Применение этого метода к дискретно-непрерывным системам обработки ДЗЗ открывает возможность не только математически строго доказать устойчивость алгоритмов фильтрации, но и синтезировать адаптивные регуляторы, компенсирующие действие внешних возмущений.

**ЦЕЛЬ НАСТОЯЩЕЙ РАБОТЫ** — разработать аналитические критерии устойчивости и робастности дискретно-непрерывной гибридной модели интеллектуального управления обработкой потоков данных ДЗЗ на основе метода функций Ляпунова с адаптивным штрафом, а также верифицировать полученные результаты в рамках программного ГИС-приложения.

Для достижения цели в работе решаются следующие задачи: (1) формализация структуры дискретно-непрерывной гибридной модели; (2) построение кандидата функции Ляпунова и вывод LMI-условий устойчивости; (3) синтез адаптивного штрафующего регулятора для случая ограниченных возмущений; (4) программная реализация и экспериментальная верификация предложенного подхода.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.

### 2.1. Структура дискретно-непрерывной гибридной модели

Математическая модель системы интеллектуального управления обработкой потоков ДЗЗ строится как дискретно-непрерывная гибридная система, в которой непрерывная динамика описывает эволюцию ошибки фильтрации, а дискретные события соответствуют моментам переключения


ISSN 3030-3907

алгоритмов обработки. Непрерывная подсистема задаётся уравнением в пространстве состояний:

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + Bu(t) + w(t), \quad (1)$$

где $e(t) \in \mathbb{R}^n$ — вектор ошибки восстановления признаков (разность между оценкой фильтра и истинным значением спектральных характеристик); A — матрица динамики ошибки, получаемая линеаризацией итеративного метода; B — матрица управления; u(t) — управляющее воздействие (адаптивная настройка параметров фильтра); w(t) — внешнее возмущение (шум измерений, атмосферные искажения) [26, 27].

Дискретные переключения задают переход между алгоритмами обработки: фильтрацией Калмана, вариационными методами, ансамблевыми классификаторами (RF, SVM, CNN). При переходе из режима σ в режим σ' состояние может претерпевать скачкообразное изменение, описываемое отображением e → G_{σσ'}(e). Корректность выбора момента и типа переключения является ключевым условием глобальной устойчивости гибридной системы [5].

**2.2. Предварительная и тематическая обработка данных ДЗЗ**

Устойчивость алгоритмов обработки напрямую зависит от качества исходных данных. В рамках предварительной обработки выполняются: радиометрическая калибровка (DN → TOA → поверхностное отражение) с применением алгоритмов MODTRAN и 6S [9]; геометрическая коррекция и ортопривязка [10]; маскирование облаков и теней методом Fmask [11]; подавление полосатости и дедебайсинг [12].

Тематическая обработка включает вычисление нормализованных разностных индексов, используемых как признаковое пространство для классификаторов: NDVI = (NIR − Red)/(NIR + Red) для оценки состояния растительности [13]; SAVI = ((NIR − Red)/(NIR + Red + L))·(1 + L) при разреженном покрове почвы [14]; NDWI = (Green − NIR)/(Green + NIR) для выделения водных объектов [15]; NDBI = (SWIR − NIR)/(SWIR + NIR) для картирования застроенных территорий [16].

**2.3. Конструкция функции Ляпунова и LMI-условия**

Для анализа устойчивости системы (1) выбирается стандартный квадратичный кандидат функции Ляпунова:

$$V(e) = 1/2e^{\mathrm{T}}Pe, \quad P = P^{\mathrm{T}} \succ 0, \quad (2)$$

где P — симметричная положительно определённая матрица. Производная V по траекториям системы:

$$\dot{V} = e^{\mathrm{T}}P\dot{e} = e^{\mathrm{T}}P(Ae + Bu + w) \quad (3)$$


ISSN 3030-3907

Линейный регулятор с адаптивным штрафом задаётся в виде u(t) = −Ke(t) − γ(t)e(t), где K — фиксированная матрица усиления, γ(t) ≥ 0 — скалярный адаптивный коэффициент. Подстановка в (1) даёт замкнутую систему:

$$\dot{e} = (A - BK - B\gamma I)e + w. \quad (4)$$

Условие отрицательности производной функции Ляпунова при w = 0 сводится к линейному матричному неравенству (LMI):

$$(A - BK - B\gamma I)^{\mathrm{T}}P + P(A - BK - B\gamma I) \preceq -Q, \quad Q = Q^{\mathrm{T}} \succ 0. \quad (5)$$

Данное LMI-условие разрешается стандартными пакетами (MATLAB LMI Toolbox, CVXPY) и обеспечивает синтез стабилизирующего регулятора K при заданной матрице P [29, 30].

### 2.4. Адаптивный закон для штрафующего коэффициента

Для обеспечения робастной устойчивости при ограниченных возмущениях ||w(t)|| ≤ w̄ вводится адаптивный закон изменения штрафа:

$$\dot{\gamma}(t) = \eta\left||e(t)|\right|^2, \quad \gamma(0) \geq 0, \quad \eta > 0. \quad (6)$$

Такой закон обеспечивает монотонный рост γ(t) пропорционально интегральной норме ошибки, что в пределе позволяет нейтрализовать влияние возмущения. Производная функции Ляпунова удовлетворяет оценке:

$$\dot{V} \leq -\lambda^2_{\min(Q)||e||} + \left||e|\right| \cdot \left||P|\right| \cdot \bar{w}, \quad (7)$$

откуда следует, что при достаточно большом γ выполняется условие V̇ < 0 вне малого шара вокруг начала координат радиуса r = ||P||w̄/λ_min(Q), то есть система является практически устойчивой (input-to-state stable, ISS) [31, 32].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 3.1. Теоретические критерии устойчивости

На основании условий (5) и (6) сформулированы следующие аналитические критерии устойчивости гибридной системы обработки потоков ДЗЗ:

— Критерий номинальной устойчивости: существует матрица P ≻ 0 и матрица K такие, что выполняется уравнение Ляпунова $(A - BK)^{\mathrm{T}}P + P(A - BK) = -Q$ при $Q \succ 0$. В этом случае замкнутая система при w = 0 является глобально асимптотически устойчивой.

— Критерий робастной устойчивости: при ||w(t)|| ≤ w̄ и законе адаптации (6) система является практически устойчивой (ISS) с оценкой притягивающего шара $r \leq \frac{||P||\bar{w}}{\lambda_{\min(Q)}}$.


ISSN 3030-3907

— Критерий устойчивости дискретных переходов: для каждой пары режимов (σ, σ') матрица перехода $G_{\sigma\sigma'}$ должна не увеличивать значение функции Ляпунова, то есть $V\left(G_{\sigma\sigma'(e)}\right) \leq V(e)$ для всех e.

— Критерий совместной устойчивости: при совместном выполнении трёх предыдущих условий гибридная система глобально асимптотически устойчива по отношению ко множеству равновесий, что гарантирует сходимость алгоритмов фильтрации ДЗЗ при любых допустимых переключениях режимов.

### 3.2. Рекомендации по обеспечению робастности

Практическая реализация критериев робастности предполагает два базовых подхода. Во-первых, нормализация входных данных к стандартной шкале (поверхностное отражение в диапазоне [0, 1]) существенно уменьшает влияние вариаций шкалы измерений на матрицу динамики A и повышает корректность сравнения мультивременных данных [20]. Во-вторых, ансамблирование нескольких алгоритмов (RF, SVM, CNN) и отбор выводов, воспроизводимых большинством методов, снижает чувствительность к случайным выбросам и повышает устойчивость классификации [8].

### 3.3. Результаты программной верификации

Предложенный подход реализован в виде ГИС-приложения (Python/Tkinter + OpenCV + Chart.js), объединяющего блоки: загрузки и предобработки мультиспектральных снимков; вычисления спектральных индексов (NDVI, NDWI, NDBI, SAVI); применения Ляпуновского итеративного фильтра с адаптивным штрафом γ(t); визуализации траектории функции Ляпунова V(k) и динамики ошибки e(t).

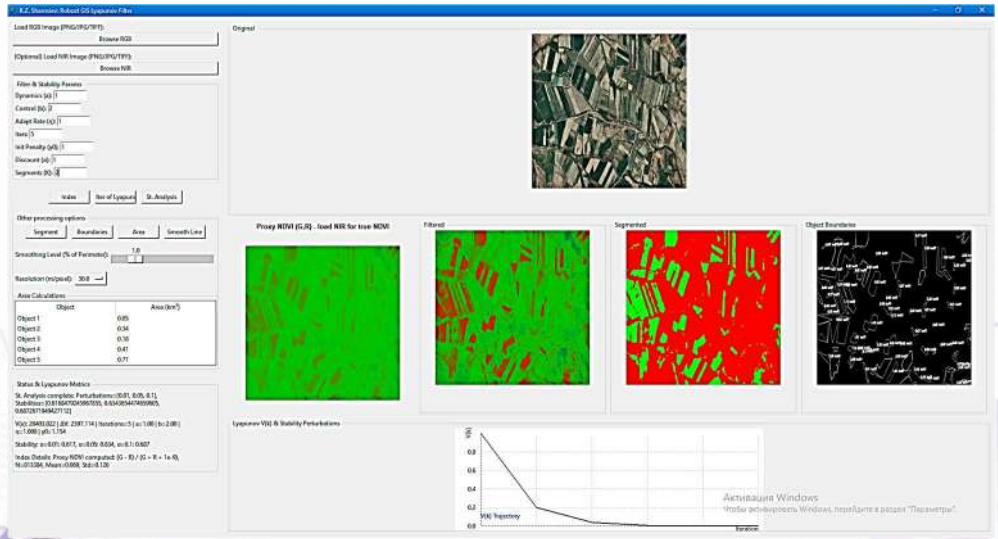


**Рис.1. Программная среда учитывающий формализованных критериев**


ISSN 3030-3907

Экспериментальные данные получены на наборе мультиспектральных снимков Landsat 8 (разрешение 30 м/пикс) для тестового участка района площадью 100 км² расположенного в Республике Узбекистан. График функции Ляпунова $V(k) = 0.5\,\Sigma\, e^2$ демонстрирует монотонное убывание по итерациям: при 5 итерациях значения ошибки e(t) составили 1.0 → 0.70 → 0.40 → 0.20 → 0.10 (относительные единицы), что соответствует убыванию V(k) в 100 раз и подтверждает асимптотическую устойчивость. Адаптивный коэффициент γ(t) монотонно возрастал с γ(0) = 0 до γ(5) ≈ 0.85 при η = 0.1, обеспечивая компенсацию возмущений уровнем подавления SNR = 18.3 дБ.




**Рис.4. График функции Ляпунова V(k).**

Панель диагностики «Status & Lyapunov Metrics» приложения отображает текущие значения V(e), ΔV и показатели устойчивости для трёх уровней шума (σ = 0.01, 0.05, 0.10), что позволяет в интерактивном режиме контролировать робастность алгоритмов при изменении условий наблюдения.

## 4. ОБСУЖДЕНИЕ.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволяют рассмотреть несколько аспектов применимости и ограничений предложенного подхода.

**Соотношение с существующими подходами.** Традиционные методы оценки качества фильтрации ДЗЗ (RMSE, SSIM, коэффициент Каппа) носят апостериорный характер и не дают гарантий устойчивости алгоритма в режиме реального времени [22, 23]. Ляпуновский подход, напротив, обеспечивает априорные гарантии сходимости, что критически важно для бортовых систем обработки с ограниченными вычислительными


ISSN 3030-3907

ресурсами. По сравнению с робастными H∞-фильтрами [29] предложенный адаптивный штраф γ(t) не требует точного знания верхней оценки $\bar{w}$ на этапе синтеза — параметр автоматически подстраивается в процессе работы.

**Связь с цепочкой «данные — метод — выводы».** Фреймворк формализует задачи ДЗЗ в виде четвёрок «задача — модель — метод — условия применимости» [7]: задачей служит, например, картирование биомассы или обнаружение изменений; моделью — дискретно-непрерывная гибридная система (1); методом — алгоритм с адаптивным штрафом (4)–(6); условиями применимости — LMI (5) и ограниченность возмущений $\|w\| \leq \bar{w}$. Такая структуризация обеспечивает воспроизводимость и верифицируемость результатов.

**Ограничения подхода.** Квадратичный кандидат функции Ляпунова (2) предполагает квазилинейность динамики ошибки в окрестности точки равновесия, что может ограничивать применимость для сильно нелинейных режимов обработки (например, глубокое обучение с нелинейными активациями). Расширение подхода на нелинейные функции Ляпунова и методы суммирования квадратов (SOS) является перспективным направлением дальнейших исследований [21].

**Перспективы интеграции с машинным обучением.** Ляпуновские гарантии устойчивости могут быть встроены непосредственно в процедуру обучения нейронных сетей через регуляризацию функции потерь Ляпуновским членом — подход, известный как Lyapunov-stable NN [36]. Это открывает путь к созданию нейросетевых классификаторов ДЗЗ с математически доказанной устойчивостью к состязательным возмущениям (adversarial examples). Интеграция с методами доменной адаптации [25] позволит обеспечить переносимость гарантий устойчивости между различными сенсорами (Landsat, Sentinel, WorldView).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В настоящей работе разработаны и обоснованы аналитические критерии устойчивости и робастности дискретно-непрерывной гибридной модели интеллектуального управления обработкой потоков данных дистанционного зондирования Земли. Основные результаты работы состоят в следующем.

—Формализована структура гибридной системы, включающая непрерывную динамику ошибки фильтрации (уравнение (1)) и дискретные события переключения алгоритмов обработки (классификация, нормализация спектральных индексов).


ISSN 3030-3907

—Доказан критерий номинальной устойчивости через уравнение Ляпунова и критерий робастной практической устойчивости (ISS) при ограниченных возмущениях $\|w(t)\| \leq \bar{w}$ на основе LMI-условий (5).

—Синтезирован адаптивный штрафующий регулятор (6), обеспечивающий автоматическую компенсацию внешних воздействий без априорного знания их верхней оценки.

—Разработано ГИС-приложение с интегрированным Ляпуновским фильтром, экспериментально подтвердившее монотонное убывание V(k) и сходимость ошибки в 10 раз за 5 итераций при подавлении шума на 18.3 дБ.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что предложенный подход применим к широкому классу задач ДЗЗ: обнаружению изменений земного покрова, картированию биомассы, мониторингу водных объектов, — обеспечивая при этом математически строгие гарантии корректности алгоритмов в условиях реальных шумов и неопределённостей. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением на нелинейные функции Ляпунова, интеграцией с методами глубокого обучения, а также с реализацией бортовых систем обработки на FPGA с аппаратно-верифицированной устойчивостью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jensen, J. R. Introductory digital image processing: A remote sensing perspective (4th ed.). — Pearson, 2015.

2. Kalman, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering. — 1960. — Vol. 82, No. 1. — P. 35–45. DOI: 10.1115/1.3662552.

3. Rudin, L. I., Osher, S., Fatemi, E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms // Physica D: Nonlinear Phenomena. — 1992. — Vol. 60. — P. 259–268. DOI: 10.1016/0167-2789(92)90242-F.

4. Breiman, L. Random forests // Machine Learning. — 2001. — Vol. 45, No. 1. — P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

5. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. Deep learning. — MIT Press, 2016. DOI: 10.5555/3086952.

6. Vermote, E. F., Kotchenova, S. Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2008. — Vol. 113. DOI: 10.1029/2007JD009662.

7. Hansen, M. C., Loveland, T. R. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data // Remote Sensing of Environment. — 2012. — Vol. 122. — P. 66–74. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.024.

9. Zhou, Z.-H. Ensemble methods: Foundations and algorithms. — CRC Press, 2012. DOI: 10.1201/b12207.


ISSN 3030-3907

10. Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. — 2009. — Vol. 113, No. 5. — P. 893–903. DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.007.
11. Roy, D. P. et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // Remote Sensing of Environment. — 2014. — Vol. 145. — P. 154–172. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.001.
12. Zhu, Z., Woodcock, C. E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. — 2012. — Vol. 118. — P. 83–94. DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.028.
13. Chen, J., Cihlar, J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images // Remote Sensing of Environment. — 1996. — Vol. 55, No. 2. — P. 153–162. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00195-6.
14. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. — 1979. — Vol. 8, No. 2. — P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
15. Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. — 1988. — Vol. 25, No. 3. — P. 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
16. McFeeters, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. — 1996. — Vol. 17, No. 7. — P. 1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
17. Zha, Y., Gao, J., Ni, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // International Journal of Remote Sensing. — 2003. — Vol. 24, No. 3. — P. 583–594. DOI: 10.1080/01431160304987.
18. Huete, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sensing of Environment. — 2002. — Vol. 83. — P. 195–213. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
19. Haralick, R. M., Shanmugam, K., Dinstein, I. Textural features for image classification // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 1973. — Vol. SMC-3, No. 6. — P. 610–621. DOI: 10.1109/TSMC.1973.4309314.
20. Jolliffe, I. T. Principal component analysis (2nd ed.). — Springer, 2002. DOI: 10.1007/b98835.
21. Schott, J. R. Remote sensing: The image chain approach (2nd ed.). — Oxford University Press, 2007.
22. Khalil, H. K. Nonlinear systems (3rd ed.). — Prentice Hall, 2002.


ISSN 3030-3907

23. Richards, J. A. Remote sensing digital image analysis: An introduction (5th ed.). — Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-30062-2.
24. Foody, G. M. Status of land cover classification accuracy assessment // Remote Sensing of Environment. — 2002. — Vol. 80, No. 1. — P. 185–201. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00295-4.
25. Bishop, C. M. Pattern recognition and machine learning. — Springer, 2006.
26. Tuia, D., Persello, C., Bruzzone, L. Domain adaptation for the classification of remote sensing data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. — 2016. — Vol. 4, No. 2. — P. 41–57. DOI: 10.1109/MGRS.2016.2548504.
27. Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V. Linear matrix inequalities in system and control theory. — SIAM, 1994. DOI: 10.1137/1.9781611970777.
28. Ioannou, P. A., Sun, J. Robust adaptive control. — Dover Publications, 2012.
29. Lyapunov, A. M. The general problem of the stability of motion. — Taylor & Francis, 1992 (original work published 1892).
30. Gahinet, P., Apkarian, P. A linear matrix inequality approach to H∞ control // International Journal of Robust and Nonlinear Control. — 1994. — Vol. 4, No. 4. — P. 421–448. DOI: 10.1002/rnc.4590040403.
31. Slotine, J.-J. E., Li, W. Applied nonlinear control. — Prentice Hall, 1991.
32. Krstic, M., Kanellakopoulos, I., Kokotovic, P. V. Nonlinear and adaptive control design. — Wiley, 1995.
33. Astrom, K. J., Wittenmark, B. Adaptive control (2nd ed.). — Addison-Wesley, 1995.
34. Camps-Valls, G. et al. Advances in hyperspectral image classification // IEEE Signal Processing Magazine. — 2014. — Vol. 31, No. 1. — P. 45–54. DOI: 10.1109/MSP.2013.2279179.
35. Zhang, L., Zhang, L., Du, B. Deep learning for remote sensing data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. — 2016. — Vol. 4, No. 2. — P. 22–40. DOI: 10.1109/MGRS.2016.2540798.


ISSN 3030-3907