

<https://doi.org/10.15407/knit2021.03.028>  
УДК 520.88

**О. М. КОЖУХОВ**, нач. лаб., канд. техн. наук  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3858-9389>  
E-mail: a.m.kozhukhov@gmail.com

Центр прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України  
с. Залісці, Дунаєвецький р-н, Хмельницька обл., Україна, 32444

## ПЕРЕПУСКНА СПРОМОЖНІСТЬ ОПТИЧНОГО ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

*Спостереження низькоорбітальних космічних об'єктів оптичними засобами (телескопами) є досить складним завданням, що потребує апаратури з відповідними характеристиками. Однією з головних характеристик оптичних засобів для спостережень низькоорбітальних космічних об'єктів може вважатися перепускна спроможність.*

*У роботі запропоновано підхід до теоретичної оцінки перепускної спроможності оптичного телескопа при спостереженні низькоорбітальних космічних об'єктів. В його основі лежить уявлення про телескоп як систему масового обслуговування. Дана система масового обслуговування може бути різного типу, в залежності від методів спостережень. Вхідним потоком заявок в даній системі масового обслуговування є потік проходжень низькоорбітальних космічних об'єктів через зону огляду даного телескопа, а вихідним — потік проходжень, що спостерігалися. Як середній час обслуговування використовується середній загальний час, витрачений на спостереження одного низькоорбітального космічного об'єкта. Кількісні характеристики цих величин можуть бути отримані в результаті моделювання проходжень низькоорбітальних космічних об'єктів через зону огляду конкретного телескопа. За головну оцінювану характеристику обрано абсолютну перепускну спроможність системи масового обслуговування.*

*Наведено приклад оцінки характеристик подібної системи масового обслуговування на базі квантово-оптичної станції «Сажень-С» Центру прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України. Запропоновано можливі шляхи підвищення перепускної спроможності квантово-оптичної станції «Сажень-С» при спостереженні низькоорбітальних космічних об'єктів.*

**Ключові слова:** низькоорбітальні космічні об'єкти, оптичні спостереження, системи масового обслуговування.

### ВСТУП

Спостереження низькоорбітальних космічних об'єктів (НОКО) оптичними телескопами можна виділити як окремий підвид астрономічних оптичних спостережень.

Основними особливостями НОКО як об'єктів спостереження є значна кількість таких об'єктів, що одночасно перебувають в зоні спостереження телескопа [17], висока швидкість їхнього видимого руху (до 2°/с) і порівняно мала тривалість

перебування в зоні спостереження [7, 17]. Все це висуває дуже специфічні вимоги до характеристик апаратури, методів спостережень і навіть до місць розташування телескопів для спостереження НОКО [17].

Одним з параметрів, що характеризують оптичний телескоп як інструмент для спостереження НОКО, є його перепускна спроможність. В даному випадку під перепускною спроможністю розуміється кількість НОКО, яка може спо-

Цитування: Кожухов О. М. Перепускна спроможність оптичного телескопа для спостереження низькоорбітальних космічних об'єктів. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 3 (130). С. 28—38. <https://doi.org/10.15407/knit2021.03.028>

стерігатися телескопом за заданий інтервал часу. Зазвичай за такий інтервал використовується ніч спостережень. Найчастіше оцінка перепускної спроможності здійснюється емпірично, на основі аналізу роботи телескопа за тривалий період часу [7, 16, 18].

Такий варіант оцінки можна використати не завжди. Наприклад, при створенні нових телескопів, основним завданням яких буде саме спостереження НОКО, необхідно знати основні параметри, що впливають на перепускну спроможність, щоб врахувати їх ще на етапі проектування. Таким чином, виникає необхідність створення методу теоретичної попередньої оцінки перепускної спроможності телескопа для спостереження НОКО на підставі його технічних характеристик і режимів (методів) спостережень, а також особливостей спостережуваних гаються об'єктів.

Такі підходи, що базуються на моделях розподілу об'єктів і на характеристиках обладнання, неодноразово використовувалися при оцінці можливостей наявних і перспективних астероїдних оглядів [13—15, 20]. Робіт, які б розглядали попередню оцінку можливостей оптичних телескопів зі спостереження НОКО, знайдено не було.

## 1. ОСНОВНІ РЕЖИМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Телескопи для спостереження НОКО, в залежності від режиму спостережень умовно можна поділити на два основних типи (рис. 1).

**Телескопи для спостереження низькоорбітальних космічних об'єктів, що працюють в режимі механічного супроводу.** Телескоп супроводжує НОКО при його прольоті через зону огляду (режим С, рис. 1, а). Механічний супровід (далі просто супровід) НОКО може здійснюватися протягом всього часу перебування НОКО в зоні огляду телескопа або якогось фіксованого відрізка часу. Даний режим спостережень висуває найжорсткіші вимоги до монтування — воно повинне не тільки мати порівняно високу швидкість руху (не менше  $1.5^\circ/\text{с}$  для впевненого супроводу НОКО), але і високу точність відстеження положення телескопа. Режим супроводу дозволяє отримувати як координатну (по-

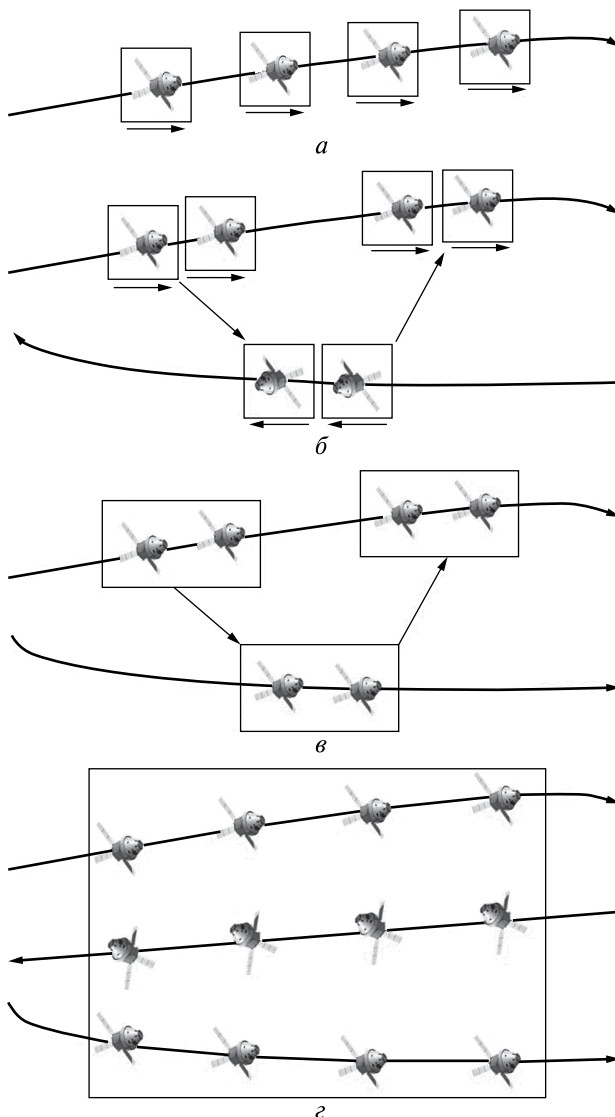


Рис. 1. Можливі режими роботи телескопів для спостереження НОКО: а — «супровід», режим С, б — «супровід з перенаведенням», режим СП, в — «на проліт з перенаведенням», режим ПП, з — «оптичний бар'єр», режим П

зиційну), так і некоординатну інформацію про НОКО. Мабуть, тільки в цьому режимі можливе отримання якісної некоординатної інформації, тому що він забезпечує найбільше відношення «сигнал/шум» (ВСШ) для НОКО без додаткової обробки. Крім того, такий режим дозволяє проводити спостереження НОКО зі слабким блиском через можливість використання порівняно довгих експозицій. При цьому такі телескопи

можуть мати порівняно невеликі поля зору та вимагають заздалегідь розрахованих цілєвказівок (ЦВ) за якими ведеться спостереження НОКО. Компенсація похибок ЦВ у таких телескопах здійснюється через корекцію параметрів руху монтування.

Прикладами вітчизняних телескопів спостереження НОКО є квантово-оптична станція «Сажень-С» Центру прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля (ЦПОСІ та КНП, с. Залісці, Дунаєвецький район, Хмельницька обл.) [6] і телескоп КТ-50 науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова (НДІ АО ОНУ) [19].

Слід також додати, що при отриманні тільки координатної інформації такі телескопи можна використовувати в режимі з перенаведенням — на трасі проходження НОКО спостереження здійснюються на окремих ділянках. Після закінчення спостережень на одній ділянці здійснюється перехід на ділянку спостережень іншого НОКО, а після його спостережень — перенаведення на наступний НОКО або на наступну ділянку спостереження попереднього (режим СП, рис. 1, б).

**Телескопи для спостереження НОКО, що працюють в режимі «на проліт»**, фіксують проходження НОКО через своє поле зору, залишаючись нерухомими. Для підвищення ВСШ НОКО, що спостерігаються, застосовуються спеціальні методи попередньої обробки спостережень, наприклад метод синхронного накопичення телевізійних кадрів [8, 10]. Такі телескопи, при наявності автоматичної системи керування і планування спостережень [7], мають можливість досить швидко пересуватися у нове положення для спостережень наступних НОКО (режим ПП, рис. 1, в). Вони також вимагають цілєвказівок для спостережень НОКО, але їхнє поле зору має бути більшим, ніж у телескопів, що працюють в режимі супроводу. У такому режимі можливо тільки отримання позиційних спостережень (або тільки відповідних фрагментів некоординатної інформації). Прикладом телескопів, що працюють в такому режимі, є телескопи Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (НДІ МАО) [7, 8, 10].

Різновидом таких телескопів є телескопи спостереження НОКО в режимі «оптичний бар'єр». Вони зазвичай спостерігають одну ділянку неба протягом всієї ночі, фіксуючи усі прольоти НОКО через своє поле зору (режим П, рис. 1, г). Даний режим роботи телескопа характеризується мінімальною проникною силою (але її також можна спробувати підвищити за рахунок спеціальних методів обробки) і дозволяє проводити тільки позиційні спостереження (хоча зараз вже є спроби отримання некоординатної інформації у такому режимі [11, 12]) на порівняно короткому часовому інтервалі, але не вимагає ЦВ, і може серйозно перевершувати вищенаведені режими за кількістю НОКО, які спостерігаються за ніч. Для забезпечення останньої переваги телескопи, які працюють у режимі «оптичний бар'єр», повинні мати великі поля зору [9], або навіть складатися з декількох об'єктивів [12].

Наведена вище класифікація є дещо умовною. Наприклад, телескопи, які спостерігають НОКО в режимі супроводу, можуть використовуватися і в інших режимах («на проліт», «оптичний бар'єр») при відповідних налаштуваннях системи управління. В свою чергу, телескопи спостереження НОКО, що працюють в режимі «на проліт», можуть використовуватися і в режимі «оптичний бар'єр».

## 2. МОДЕЛЬ ОПТИЧНОГО ТЕЛЕСКОПА ЯК СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НИЗЬКООРБИТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

**2.1. Короткі відомості про системи масового обслуговування.** Теорія масового обслуговування (теорія черг) — розділ теорії ймовірностей, що займається вивченням випадкових процесів у системах обслуговування (системах масового обслуговування, СМО) із застосуванням до їхньої раціональної побудови [3]. Також теорія черг використовується для вирішення відповідних завдань в теорії дослідження операцій.

Як СМО зазвичай виступає математична модель, яку можна охарактеризувати набором термінів, які беруться від реальних систем [3]. Модель СМО включає опис потоку вхідних заявок (вимог, споживачів), які потребують обслугову-

вання, каналів обслуговування (приладів, ліній), кожен з яких одночасно обслуговує одну заявку, опис розподілу часу обслуговування і дисципліни обслуговування. Більш детальна інформація про характеристики і класифікації СМО викладена, наприклад, у роботах [1–3, 5].

Як вхідний потік заявок у найпростіших СМО найчастіше розглядається дискретний ординарний (ймовірність того, що в конкретний момент часу прийде більше однієї заявки, наближається до нуля), стаціонарний (характеристики потоку не змінюються в часі) потік без післядії (ймовірність появи наступної заявки не залежить від попередніх), який вважається розподіленим за законом Пуассона [1, 2, 5]:

$$P_n = \frac{\lambda \tau^n}{n!} e^{-\lambda \tau},$$

де  $P_n$  — ймовірність того, що за час  $\tau$  з'явиться рівно  $n$  заявок,  $\lambda$  — інтенсивність потоку заявок за одиницю часу.

У цьому випадку інтервал між заявками розподіляється за показовим (експоненціальним) законом:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (t > 0).$$

Час обслуговування заявок у СМО також вважається розподіленим за показовим законом:

$$f(t) = \mu e^{-\mu t}, \quad (t > 0),$$

де  $\mu = 1/\bar{t}_{об}$  — інтенсивність обслуговування заявок,  $\bar{t}_{об}$  — середній час обслуговування однієї заявки.

Як було зазначено вище, теорія черг має справу із випадковими процесами. На перший погляд, спостереження відомих НОКО за ЦВ не можуть вважатися випадковим процесом. Але ЦВ навіть для НОКО із добре відомою орбітою мають похибки (у першу чергу за рахунок похибок моделей, що використовуються під час їхнього розрахунку). Такі величини, як час входу НОКО у зону огляду телескопа та час його проходження через дану зону відомі не точно, й можуть вважатися випадковими. Окремо слід відмітити дуже велику кількість НОКО [17], що рухаються по дуже різних, до того ж збурених орбітах. Це є ще одним аргументом розглядати процес їхнього спостереження як випадковий

для спостерігача. Безумовно, це деяка ідеалізація, як і застосування будь-якої моделі є лише наближенням до дійсності. Тому автор вважає, що процес проходження НОКО через зону огляду телескопа та процес їхнього спостереження теж можливо вважати випадковими та аналізувати (щонайменше у першому наближенні) за допомогою математичного апарату теорії черг.

**2.2. Оптичний телескоп як система масового обслуговування для спостереження низькоорбітальних космічних об'єктів.** Найбільш простим випадком є телескопи, які працюють в режимі «оптичний бар'єр» (режим П). Вони можуть розглядатися як багатоканальні СМО з безліччю каналів (тобто одночасно може спостерігатися практично будь-яка реально можлива кількість НОКО), а їхня перепускна спроможність визначається тільки кількістю НОКО, що проходять через поле зору та мають видимий блиск рівний або яскравіший ніж проникна сила даних інструментів.

З точки зору теорії масового обслуговування телескопи, які працюють в режимі супроводу (режим С), можна вважати *одноканальними СМО*. Вхідним потоком заявок в цьому випадку є потік проходжень НОКО через зону огляду телескопа, а середнім часом обслуговування — сума середнього часу  $\bar{t}_c$  спостереження, який дорівнює середньому часу проходження НОКО через зону огляду телескопа, середнього часу  $\bar{t}_p$  прийняття рішення, який НОКО буде спостерігатися наступним, та середнього часу  $\bar{t}_{пн}$  перенаведення на новий НОКО:

$$\bar{t}_{об} = \bar{t}_p + \bar{t}_{пн} + \bar{t}_c, \quad (1)$$

де  $\bar{t}_{пн} = \bar{t}_{оч} + \bar{t}_{пн}$ ;  $\bar{t}_{оч}$  — середній час очікування НОКО перед початком спостережень (входу НОКО у зону огляду телескопа),  $\bar{t}_{пн}$  — безпосередньо середній час перенаведення на новий НОКО.

Якщо супровід здійснюється протягом всього часу перебування НОКО в зоні огляду, то такий телескоп може розглядатися як *одноканальна СМО з відмовами* [2]. Якщо супровід здійснюється протягом фіксованого відрізка часу  $\bar{t}_c = \text{const}$  (режим С'), то телескоп може розглядатися як *СМО з необмеженою чергою і обмеженим часом очікування* [1, 2, 5], де середній час очікування в

черзі становить

$$\bar{t}_{\text{оч}} = \bar{t}_c - \bar{t}'_{\text{об}}. \quad (2)$$

Тут  $\bar{t}'_{\text{об}} = \bar{t}_p + \bar{t}_{\text{пн}} + \bar{t}'_c$ . Тобто, НОКО буде перебувати в черзі на спостереження, поки залишок його часу знаходження в зоні огляду не стане меншим від середнього часу обслуговування  $\bar{t}'_{\text{об}}$ .

Складніше визначити модель СМО для телескопів, що працюють в режимі почергового спостереження декількох НОКО, що одночасно перебувають в зоні огляду (з перенаведенням). Це можливо як в режимі супроводу, так і в режимі «на проліт» (режими СП та ПП, рис. 1, б, в). Нижче будуть дані пропозиції з оцінки перепускної спроможності й таких телескопів.

### 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

**3.1. Вихідні дані.** Для визначення вихідних даних використовуються результати імітаційного моделювання, отримані у роботі [17]. З рис. 10–12 і табл. 3, 4 цитованої роботи можна побачити, що вхідний потік НОКО за ніч в загальному випадку є нестационарним.

Але у «класичних» СМО, як було вказано вище, як вхідний потік заявок частіше за все намагаються розглянути дискретний ординарний стаціонарний потік без післядії (ймовірність появи наступної заявки не залежить від попередніх), який вважається розподілений за законом Пуассона [1, 2, 5].

Не дивлячись на загальну нестационарність потоку НОКО за ніч спостережень, для оцінки перепускної спроможності телескопа «зверху» можна обрати окрему частину ночі, коли інтенсивність потоку практично не змінюється та є максимальною. У даній роботі за інтенсивність вхідного потоку було обрано інтенсивність потоку низькоорбітальних космічних апаратів (НОКА — LEO SC) для телескопа-1 (оптичного засобу спостереження-1 — OSF-1), координати якого відповідають координатам КОС «Сажень-С» ЦПОСІ і КНП ([17], табл. 4), у ніч літнього сонцестояння. Середній час перебування НОКА в зоні огляду телескопа також взято з табл. 4 роботи [17]. Дані величини дорівнюють

290 НОКА/год і 7.61 хв відповідно. Крім того, для розрахунку значення  $\bar{t}_{\text{пн}}$  необхідно визначити максимальну швидкість руху телескопа  $V_{\text{max}}$ , з якою зазвичай здійснюється наведення на НОКО. Для КОС «Сажень-С»  $V_{\text{max}} = 2.5^\circ/\text{с}$  [6]. При цьому  $\bar{t}_{\text{пн}}$  було визначено як час, необхідний для повороту телескопа на  $120^\circ$ .

В загальному випадку СМО має велику кількість характеристик, які можуть бути визначені у процесі досліджень. У даній роботі головну увагу буде приділено абсолютній перепускній спроможності  $A$  — середній кількості заявок, що обслуговуються за одиницю часу [2].

**3.2. Перепускна спроможність телескопа, який працює в режимі механічного супроводу НОКО протягом усього часу перебування в зоні огляду.** Моделлю такого телескопа, як було вказано вище, є *одноканальна СМО з відмовами*. Для отримання оцінки перепускної спроможності «зверху», вважатимемо, що час на прийняття рішення не витрачається ( $\bar{t}_p = 0$ ), а спостереження починаються безпосередньо після наведення телескопа ( $\bar{t}'_{\text{оч}} = 0$ ). В такому випадку та з врахуванням викладеного п. 3.1, вихідні дані отримують такі значення:

$$\lambda = \frac{290}{60} = 4.83 \text{ хв}^{-1},$$

$$\bar{t}_{\text{пн}} = \bar{t}'_{\text{пн}} = \frac{120^\circ}{V_{\text{max}}} = 48 \text{ с} = 0.8 \text{ хв},$$

$$\bar{t}'_{\text{об}} = \bar{t}_{\text{пн}} + \bar{t}_c = 8.41 \text{ хв}.$$

Абсолютна перепускна спроможність для одноканальної СМО із відмовами визначається згідно із виразом [1, 2, 5]

$$A = \lambda Q, \quad (3)$$

де  $Q = \mu / (\lambda + \mu)$  — відносна перепускна спроможність,  $\mu = 1 / \bar{t}'_{\text{об}}$ .

Після підстановки вихідних даних абсолютна перепускна спроможність такого телескопа дорівнює

$$A = 0.116 \text{ хв}^{-1} = 6.96 \text{ год}^{-1},$$

тобто 6-7 НОКА за годину спостережень.

Якщо є кілька телескопів, що розташовані поряд і працюють у такому режимі, то має місце *багатоканальна СМО із відмовами*. Загальна абсолютна перепускна спроможність такої СМО

також визначається за допомогою (3), але вираз для відносної перепускної спроможності має дещо інший вигляд [1, 2, 5]:

$$Q = 1 - \frac{\rho^n}{n!} p_0,$$

де

$$p_0 = 1 / \sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!}$$

— ймовірність того, що усі канали СМО вільні,  $\rho = \lambda / \mu$  — приведена інтенсивність потоку заявок,  $n$  — кількість каналів.

При використанні двох телескопів абсолютна перепускна спроможність становить

$$A = 0.232 \text{ хв}^{-1} = 13.92 \text{ год}^{-1},$$

тобто 13-14 НОКА за годину спостережень.

Зрозуміло, такого результату можна досягти тільки при відповідному плануванні спостережень, щоб одне проходження НОКА не спостерігалось одночасно кількома телескопами. Ще більш складним є завдання планування роботи телескопів, розташованих у різних географічних точках.

**3.3. Абсолютна перепускна спроможність оптичного телескопа, що працює в режимі механічного супроводу НОКО протягом фіксованого відрізка часу.** В цьому випадку необхідно додатково задати значення середнього часу спостереження  $\bar{t}'_c$  та визначити середній час очікування у черзі за виразом (2). Нехай  $\bar{t}'_c = 2$  хв. Тоді, з урахуванням вихідних даних з п. 3.2:

$$\bar{t}'_{ог} = \bar{t}'_{пн} + \bar{t}'_c = 2.8 \text{ хв},$$

$$\bar{t}_{оч} = \bar{t}_c - \bar{t}'_{ог} = 7.61 - 2.8 = 4.81 \text{ хв}.$$

Абсолютна перепускна спроможність і в даному випадку визначається з виразу (3). У загальному випадку відносна перепускна спроможність багатоканальної СМО з  $n$  каналами, необмеженою чергою і обмеженням на час перебування в черзі дорівнює [1, 2, 5]:

$$Q = 1 - \frac{\beta}{\mu} \bar{N}_{оч},$$

де

$$\beta = \nu / \mu, \quad \nu = 1 / \bar{t}_{оч}, \quad \bar{N}_{оч} = \sum_{s=1}^{\infty} s p_{n+s}$$

— середня кількість заявок у черзі,  $s$  — довжина черги,

$$p_0 = \left( \sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\rho^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)} \right)^{-1};$$

$$p_{n+s} = \frac{\rho^{n+s}}{n!} p_0, \quad s \geq 1$$

$$\prod_{m=1}^s (n+m\beta)$$

— ймовірність того, що усі канали СМО та  $s$  каналів черги зайняті.

Щоб уникнути необхідності обчислювати нескінченну суму при нескінченній довжині черги, звичайно обчислення здійснюють, обмеживши цю довжину першими  $r$  позиціями. Похибки при відкиданні наступних членів нескінченного ряду становлять [2]:

$$\sum_{s=r}^{\infty} \frac{\rho^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)} < \frac{(\rho/\beta)^r}{r!} e^{\rho/\beta},$$

$$\sum_{s=r}^{\infty} \frac{s \rho^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)} < \frac{(\rho/\beta)^r}{(r-1)!} e^{\rho/\beta}.$$

Розрахунки показали, що для вихідних даних при  $r \geq 100$  цими залишками можна знехтувати. При цьому абсолютна пропускна здатність одного телескопа, що працює в такому режимі ( $n = 1$ ), становить

$$A' = 0.357 \text{ хв}^{-1} = 21.43 \text{ год}^{-1},$$

тобто приблизно 21-22 НОКА за годину, а у випадку використання двох таких телескопів у одному місці ( $n = 2$ ) —

$$A' = 0.714 \text{ хв}^{-1} = 42.86 \text{ год}^{-1},$$

тобто 42-43 НОКА за годину.

Значення абсолютної перепускної спроможності для більшої кількості телескопів приведено на рис. 2.

На жаль, через відсутність адекватної моделі для телескопів, що працюють в режимі з перенаведенням, коректно оцінити їхню абсолютну перепускну спроможність в загальному випадку

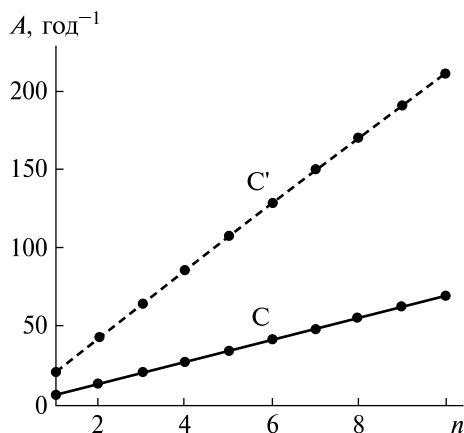


Рис. 2. Абсолютна перепускна спроможність телескопів, які працюють у режимах С і С' при швидкості  $V_{\max} = 2.5^\circ/\text{с}$

неможливо. Головні труднощі при створенні такої моделі пов'язані з тим, що її внутрішні характеристики мають вплив на вихідні дані. Наприклад, кількість НОКО, що паралельно спостерігаються, у таких режимах (кількість каналів СМО) залежить від швидкості наведення і констант алгоритму проведення спостережень (кількість спостережень на одній ділянці, експозиція).

Найближчими до них, напевно, можна вважати *одноканальні СМО з динамічним пріоритетом і запам'ятовуванням* (в залежності від алгоритму управління різні НОКО в зоні огляду отримують по черзі максимальний пріоритет, і на них наводиться телескоп, після чого може здійснюватися повернення до попереднього НОКО).

Більш простим варіантом оцінки є спроба уявлення їх у вигляді «квазібагатоканальних» СМО з відмовами. Кількість каналів  $n'$  в цьому випадку може визначатися таким чином:

$$n' = \left\lceil \frac{\bar{t}_c}{k\bar{t}_{ог}^n} \right\rceil, \quad (4)$$

де  $E[\cdot]$  — виокремлення цілої частини,  $k$  — кількість ділянок спостережень для одного проходження НОКО (зазвичай 5-6 [7]),  $\bar{t}_{ог}^n$  — середній час спостереження однієї ділянки з урахуванням часу на прийняття рішення, перенаведення та очікування.

Конкретний приклад реалізацій подібного режиму наведено нижче.

#### 4. МОЖЛИВІ ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ АБСОЛЮТНОЇ ПЕРЕПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ТЕЛЕСКОПІВ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НОКО

Для підвищення абсолютної перепускної спроможності телескопів, що працюють в режимі «оптичний бар'єр», можна позначити два основні шляхи: поліпшення технічних характеристик (в першу чергу збільшення розмірів поля зору і підвищення проникної сили) і поліпшення якості планування спостережень. Перший шлях збільшує кількість НОКО, які можуть бути виявлені при проходженні через зону огляду телескопа. Другий шлях дозволяє наводити телескоп в області небесної півсфери, де проходить максимальна кількість НОКО. Дані області можуть бути визначені за допомогою імітаційного моделювання.

Результати, отримані в розділі 3, свідчать про те, що телескоп, який працює в режимі механічного супроводу, при заданих вихідних даних не може навіть виконати спостереження усіх прольотів НОКА, що проходять через його зону огляду. Фактично підвищення абсолютної перепускної спроможності одного такого телескопа можливе тільки за рахунок зменшення  $\bar{t}_{ог}$ , чого можна досягти зменшення окремих складових. При цьому слід згадати, що результати попереднього розділу отримано за умови, що дві складових часу обслуговування (час прийняття рішення і час очікування входу НОКО в зону огляду) вже були прийняті рівними нулю. Таким чином, додаткового зменшення часу обслуговування можна домогтися тільки зменшенням часу наведення і часу супроводу. Саме за рахунок значного зменшення  $\bar{t}_{ог}$  (в наведених вище прикладах майже в чотири рази) абсолютна перепускна спроможність телескопа з фіксованим часом супроводу значно перевищує цей показник для телескопа з супроводом по всій трасі. Наприклад, у роботі [16]  $\bar{t}_{ог}$  було зменшено до 1 хв, що дозволило, на думку авторів, довести абсолютну пропускну здатність майже до 60 год<sup>-1</sup>. Але таке серйозне зменшення часу супроводу може призвести до значного погіршення якості позиційних вимірювань за рахунок зменшення довжини вимірюваної дуги [4]. Крім того, слід зазначити, що проводити некоординатні спостереження НОКО доцільно тільки при супроводі на всій

трасії прольоту. З іншого боку, якщо стоїть завдання отримання тільки позиційних спостережень, а за рахунок відповідного планування даний НОКО на цьому ж витку спостерігатимуть ще кілька телескопів, розташованих в інших географічних точках, то стратегія спостережень, викладена у роботі [16], може мати місце.

Зменшення часу наведення навіть у чотири рази ( $V_{\max} = 10^\circ/\text{с}$ ) дає не настільки ж значне збільшення абсолютної перепускної спроможності (рис. 3):

$$\begin{aligned} A &= 0.125 \text{ хв}^{-1} = 7.48 \text{ год}^{-1} (7.5 \%), \\ A_2 &= 0.249 \text{ хв}^{-1} = 14.94 \text{ год}^{-1} (7.3 \%), \\ A' &= 0.455 \text{ хв}^{-1} = 27.27 \text{ год}^{-1} (27.3 \%), \\ A'_2 &= 0.909 \text{ хв}^{-1} = 54.55 \text{ год}^{-1} (27.3 \%). \end{aligned}$$

Більш суттєве підвищення ефективності дає використання додаткового телескопа. Але, як було сказано вище, для отримання максимального ефекту від такого кроку необхідне ретельне планування спостережень.

Що стосується телескопів, які працюють в режимах з перенаведенням, то для них можна очікувати значно більшого ефекту від зменшення часу наведення через значно більшу кількість перенаведень під час спостережень. Але найбільший ефект для таких телескопів може мати повна автоматизація проведення спостережень. Наприклад, згідно з результатами [7] після початку використання методу автоматичного планування спостережень НОКО на телескопі ТВТ НДІ МАО його абсолютна перепускна спроможність зростає з 20...25 проходжень спостережуваних НОКО до 70...80 за ніч. При цьому технічні характеристики телескопа не змінювалися і становили: швидкість наведення —  $20^\circ/\text{с}$ , цикл наведення і спостереження однієї ділянки — 11...14 с. Такі показники приблизно збігаються з можливостями двох телескопів, що працюють в режимі механічного супроводу, і наближаються до абсолютної пропускної здатності телескопа з фіксованим часом супроводу (див. вище). Необхідно відзначити, що в цих модельних випадках швидкість руху телескопа була набагато меншою ( $2.5^\circ/\text{с}$ ).

Але теоретична оцінка потенційної перепускної спроможності такого телескопа «зверху» за виразом (4) становить еквівалент 5...8-канальної

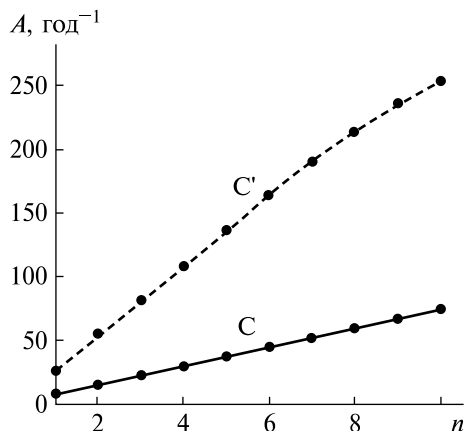


Рис. 3. Абсолютна перепускна спроможність телескопів, що працюють у режимах C і C' при швидкості  $V_{\max} = 10^\circ/\text{с}$

СМО з відмовами. З одного боку, це може свідчити про надто оптимістичну оцінку (4), з іншого — це може бути наслідком того, що реальні спостереження проводилися за значно меншою вибіркою НОКО, ніж використовується в даній роботі, тобто й з меншою інтенсивністю вхідного потоку об'єктів.

Також необхідно додати, що дуга спостережень телескопа, що працює в режимі з перенаведенням, в загальному випадку є довшою, ніж дуга спостережень телескопа з фіксованим часом механічного супроводу, що веде до кращої потенційної точності орбіти, яка визначається або уточнюється за такими спостереженнями (з перенаведенням).

## ВИСНОВКИ

1. Телескопи, що спостерігають НОКО, можуть бути описані як СМО, в яких потоком вхідних заявок є потік проходжень НОКО через зону огляду телескопа за ніч спостережень, а вихідним потоком заявок, що були обслужені — потік проходжень НОКО, що спостерігалися в дану ніч.

2. Можлива абсолютна перепускна спроможність телескопів, що працюють в режимі «оптичний бар'єр», обмежена тільки їхніми технічними характеристиками (проникна сила, ширина поля зору тощо).

3. Телескопи, що працюють в режимі механічного супроводу, можуть бути описані як СМО з



відмовами або СМО з обмеженим часом перебування в черзі.

4. Телескоп, що рухається з максимальною швидкістю 2.5°/с, здатний проводити не більше 6-7 сеансів спостережень НОКО на годину в режимі повного механічного супроводу по трасі, або 21-22 сеансів спостережень на годину в режимі фіксованого часу механічного супроводу у 2 хв, чого явно недостатньо для спостереження усіх НОКА, що проходять через його зону огляду за ніч. Найбільше зростання абсолютної перепускної спроможності спостерігається не при зміні технічних характеристик або режимів спостережень телескопів (наприклад, швидкості наведення або часу супроводу), але при введенні додаткових засобів спостереження.

5. Більшої перепускної спроможності (без зниження якості уточнення параметрів орбіти) можна досягти на телескопах, здатних працю-

вати в режимах з почерговим перенаведенням (як в режимі «на проліт», так і в режимі механічного супроводу). Але це можливо тільки при проведенні позиційних спостережень та в умовах повної автоматизації процесу їхнього отримання.

6. Максимальної перепускної спроможності мережі телескопів для спостереження НОКО можна досягти тільки за рахунок єдиного ефективного планування та повної автоматизації проведення спостережень кожним телескопом.

7. Отримані результати можуть бути використані при оцінці характеристик телескопів для спостереження НОКО, як наявних, так й тих, що проектуються.

8. Одним з напрямків подальших досліджень може бути визначення типів СМО, які точніше відповідають особливостям роботи оптичних телескопів для спостереження НОКО.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Вентцель Е. С. *Теория вероятностей* (4-е изд., стер.). Москва: Наука, 1969. 576 с.
2. Вентцель Е. С. *Исследование операций: задачи, принципы, методология* (2-е изд., стер.). Москва: Наука, 1988. 208 с.
3. *Вероятность и математическая статистика*: Энциклопедия. Гл. ред. Ю. В. Прохоров. Москва: Большая Российская энциклопедия, 1999. 910 с.
4. Каневський Л. Б., Ковбасюк С. В. Застосування оптичних засобів спостереження з метою контролю космічного простору в Україні. *Вісн. Житомир. держав. технол. ун-ту. Сер. Техн. науки*. 2014. № 1. С. 44—49.
5. Климов Г. П. *Теория массового обслуживания* (2-е изд., перераб.). Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 312 с.
6. Кожухов А. М., Рыщенко С. В., Дементьев Т. А., Епишев В. П., Мотрунич И. И., Найбауэр И. Ф. и др. Оценка состояния космических аппаратов типа CubeSat по оптическим наблюдениям (на примере КА ARKYD 6A). *Наук. вісн. Ужгород. ун-ту. Сер. Фізика*. 2019. **45**. С. 141—148.
7. Козырев Е. С., Кожухов А. М., Сибирякова Е. С. Метод автоматического планирования наблюдений низкоорбитальных космических объектов на неподвижном телескопе. *Космічна наука і технологія*. 2017. **23**, № 4. С. 71—77. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.071>.
8. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Телевизионные наблюдения низкоорбитальных космических объектов с использованием способа накопления кадров со смещением. *Космічна наука і технологія*. 2011. **17**, № 3. С. 71—76. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2011.03.071>.
9. Сухов П. П., Волков С. К., Карпенко Г. Ф. Использование широкопольных линзовых объективов для контроля космического пространства. *Космічна наука і технологія*. 2010. **16**, № 3. С. 55—58. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2010.03.055>.
10. Шульга А. В., Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Халалей М. И., Чернозуб В. М. Мобильный комплекс телескопов НИИ НАО для наблюдений объектов околоземного космического пространства. *Космічна наука і технологія*. 2012. **18**, № 4. С. 52—58. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2012.04.052>.
11. Blake J. A., Chote P., Pollacco D., Veras D., Ash A., Feline W., et al. Optical imaging of faint geosynchronous debris with the Isaac Newton Telescope. Proceedings from Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), September 2019. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2019/Orbital-Debris/Blake.pdf> (дата звернення 17.03.2020).
12. Chote P., Blake J. A., Pollacco D. Precision Optical Light Curves of LEO and GEO Objects. Proceedings from Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), September 2019. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2019/Non-Resolved-Object-Characterization/Chote.pdf> (дата звернення 17.03.2020).

13. Denneau L., Kubica J., Jedicke R. The Pan-STARRS Moving Object Pipeline. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI ASP Conference Series*, Vol. 376, proceedings of the conference held 15–18 October 2006 in Tucson, Arizona, USA. Ed. by R. A. Shaw, F. Hill and D. J. Bell. 2007. P. 257–260.
14. Grav T., Jedicke R., Denneau L., Chesley S., Holman M. J., Spahr T. B. The Pan-STARRS Synthetic Solar System Model: A tool for testing and efficiency determination of the Moving Object Processing System. URL: <https://www.ifa.hawaii.edu/users/jedicke/MOPS/papers/Grav.2008.Pan-STARRSSyntheticSolarSystemModel.pdf> (дата звернення 17.03.2020).
15. Jedicke R., Morbidelli A., Spahr T., Petit J.-M., Bottke W. F. Earth and space-based NEO survey simulations: prospects for achieving the Spaceguard Goal. *Icarus*. 2003. **161**. P. 17–33. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-1035\(02\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0019-1035(02)00026-X).
16. Kaminski K., Wnuk E., Golebiewska J., Krużyński M., Kankiewicz P., Kamińska M. *High Efficiency Robotic Optical Tracking of Space Debris From PST2 Telescope in Arizona*. Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18–21 April 2017, published by the ESA Space Debris Office. Ed. T. Flohrer, F. Schmitz (URL: <http://spacedebris2017.sdo.esoc.esa.int>, June 2017). URL: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc7/paper/740/SDC7-paper740.pdf> (дата звернення 17.03.2020).
17. Kozhukhov O. M., Dementiev T. O., Rischenko S. V., Koshkin N. I., Shakun L. S., Strahova S. L., Piskun O. M., Kozhukhov D. M., Iluchok O. M., Moskalenko S. S., Korniyevskiy S. M. Observation of LEO Objects Using Optical Surveillance Facilities: The Geographical Aspect. *Artificial Satellites*. **54**, № 4. P. 113–128. DOI: <https://doi.org/10.2478/arsa-2019-0009>.
18. Lederer S. M., Stansbery E. G., Cowardin H. M., Hickson P., Pace L. F., Abercromby K. J. et al. The NASA Meter Class Autonomous Telescope: Ascension Island. Proceedings from Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), September 2013. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/POSTER/LEDERER.pdf> AMOS-2013 (дата звернення 17.03.2020).
19. Shakun L., Korobeynikova E., Koshkin N., Melikyants S., Strakhova S., Terpan S., et al. The observations of artificial satellites and space debris using KT-50 telescope in the Odessa University. *Odessa Astron. Publs.* 2016. **29**. P. 217–220. DOI: <http://dx.doi.org/10.18524/1810-4215.2016.29.85234>.
20. Stevenson K. B., Fabrycky D., Jedicke R., Bottke W., Denneau L. NEOKepler: Discovering Near-Earth Objects Using the Kepler Spacecraft. URL: <https://arxiv.org/abs/1309.1096> (дата звернення 17.03.2020).

Стаття надійшла до редакції 17.03.2020; після доопрацювання 20.04.2021

## REFERENCES

1. Ventsel' Y. S. (1969). *Probability theory* (4th ed.). M.: Nauka [in Russian].
2. Ventsel' Y. S. (1988). *Operations research: tasks, principles, methodology* (2<sup>nd</sup> ed.). M.: Nauka [in Russian].
3. Prohorov Y. V. (1999). (Ed. in chief). *Probability and Mathematical Statistics: Encyclopedia*. M.: Big Russian Encyclopedia [in Russian].
4. Kanevs'ky L. B., Kovbasuk S. V. (2014). The Use of Optical Sensors for Monitoring of Outer Space in Ukraine. *Zhytomyr State Technological University Herald. Ser. Technical Sci.*, **1** (68), 44–49 [in Ukrainian].
5. Klimov G. P. (2011). *Queueing theory* (2<sup>nd</sup> ed., revised). M.: Moscow University Press [in Russian].
6. Kozhukhov O. M., Rishchenko S. V., Dementiev T. A., Yepishev V. P., Motrunich I. I., Neubauer I. F., et al. (2019). State Identification of CubeSat-Type Satellites by Optical Observations (on the Example of ARKYD 6A Spacecraft). *Uzhhorod University Scientific Herald. Ser. Phys.*, **45**, 141–148 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.24144/2415-8038.2019.45.141-148>.
7. Kozryyev Y. S., Kozhukhov O. M., Sybiryakova Y. S. (2017). Method for automatic scheduling for LEO object's observations at fixed telescope. *Space science and technology*, **23**(4), 71–77 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.071>.
8. Kozryyev Y. S., Sybiryakova Y. S., Shulga A. V. (2011). TV observations of low Earth orbit objects using frame accumulation with shift. *Space science and technology*, **17**(3), 71–76 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2011.03.071>.
9. Sukhov P. P., Volkov S. K., Karpenko G. F. (2010). The Use of the Wide-Field Lens Optics for Space Surveillance Systems. *Space science and technology*, **16**(3), 55–58 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2010.03.055>.
10. Shulga O. V., Kozryyev Y. S., Sybiryakova Y. S., Khalaley M. I., Chernozub V. M. (2012). The Mobile Telescope Complex of RI MAO for Observation of Near-Earth Space Objects. *Space science and technology*, **18**(4), 52–58 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2012.04.052>.
11. Blake J. A., Chote P., Pollacco D., Veras D., Ash A., Feline W., et al. (2019). *Optical imaging of faint geosynchronous debris with the Isaac Newton Telescope*. Proceedings from Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), September 2019. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2019/Orbital-Debris/Blake.pdf> (Last accessed 17.03.2020).
12. Chote P., Blake J. A., Pollacco D. (2019). *Precision Optical Light Curves of LEO and GEO Objects*. Proceedings from Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), September 2019. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2019/Non-Resolved-Object-Characterization/Chote.pdf> (Last accessed 17.03.2020).

13. Denneau L., Kubica J., Jedicke R. (2007). *The Pan-STARRS Moving Object Pipeline*. Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI, proceedings of the conference (15–18 October 2006, Tucson, Arizona, USA). Ed. by R. A. Shaw, F. Hill and D. J. Bell. *ASP Conf. Ser.*, **376**, 257–260.
14. Grav T., Jedicke R., Denneau L., Chesley S., Holman M. J., Spahr T. B. (2008). The Pan-STARRS Synthetic Solar System Model: A tool for testing and efficiency determination of the Moving Object Processing System. URL: <https://www.ifa.hawaii.edu/users/jedicke/MOPS/papers/Grav.2008.Pan-STARRSSyntheticSolarSystemModel.pdf> (Last accessed 17.03.2020).
15. Jedicke R., Morbidelli A., Spahr T., Petit J.-M., Bottke W. F. (2003). Earth and space-based NEO survey simulations: prospects for achieving the Spaceguard Goal. *Icarus*, **161**, 17–33. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-1035\(02\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0019-1035(02)00026-X).
16. Kaminski K., Wnuk E., Golebiewska J., Krużyński M., Kankiewicz P., Kamińska M. (2017). *High Efficiency Robotic Optical Tracking of Space Debris From PST2 Telescope in Arizona*. Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18–21 April 2017, published by the ESA Space Debris Office. Ed. T. Flohrer, F. Schmitz (URL: <http://space-debris2017.sdo.esoc.esa.int>, June 2017). URL: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc7/paper/740/SDC7-paper740.pdf> (Last accessed 17.03.2020).
17. Kozhukhov O. M., Dementiev T. O., Rischenko S. V., Koshkin N. I., Shakun L. S., Strahova S. L., et al. (2019). Observation of LEO Objects Using Optical Surveillance Facilities: The Geographical Aspect. *Artificial Satellites*, **54**(4), 113–128. DOI: <https://doi.org/10.2478/arsa-2019-0009>.
18. Lederer S. M., Stansbery E. G., Cowardin H. M., Hickson P., Pace L. F., Abercromby K. J., et al. (2013). *The NASA Meter Class Autonomous Telescope: Ascension Island*. Proceedings from Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), September 2013. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/POSTER/LEDERER.pdf> AMOS-2013 (Last accessed 17.03.2020).
19. Shakun L., Korobeynikova E., Koshkin N., Melikyants S., Strakhova S., Terpan S., et al. (2016). The observations of artificial satellites and space debris using KT-50 telescope in the Odessa University. *Odessa Astron. Publs*, **29**, 217–220. DOI: <http://dx.doi.org/10.18524/1810-4215.2016.29.85234>.
20. Stevenson K. B., Fabrycky D., Jedicke R., Bottke W., Denneau L. (2013). NEOKepler: Discovering Near-Earth Objects Using the Kepler Spacecraft. URL: <https://arxiv.org/abs/1309.1096> (Last accessed 17.03.2020).

Received 17.03.2020. Revised 20.04.2021

O. M. Kozhukhov, Head of Laboratory, Ph. D. in Tech.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3858-9389>

E-mail: [a.m.kozhukhov@gmail.com](mailto:a.m.kozhukhov@gmail.com)

Center of Special Information Receiving and Processing and Navigating Field Control,  
National Center of Space Facilities Control and Test, State Space Agency of Ukraine  
Zalistsi village, Dunaivtsi District, Khmelnytsky Region, 32444 Ukraine

## THROUGHPUT OF THE OPTICAL TELESCOPE FOR OBSERVATION OF LEO OBJECTS

Observations of Low-Earth-Orbit (LEO) space objects by optical sensors (telescopes) is a rather complex task that requires equipment with appropriate parameters. Among them, throughput can be considered as one of the main characteristics of optical sensors for observing LEO space objects.

In the paper, we propose an approach to the theoretical estimation of the optical telescope's throughput when observing LEO objects. It is based on the representation of the telescope as a queuing system. Such a system can be of various types depending on the used observational methods. The input flow in the queuing system is the flow of LEO objects' transits through the telescope field of view, and the output flow is the flow of observed transits. The average total time spent for observing one LEO object is taken as the average service time. Quantitative characteristics of these values can be assessed by simulating the LEO objects' transits through the telescope field of view. The throughput of the queuing system was chosen as the main estimated characteristic.

An example of estimating the parameters of such a queuing system is given. It is based on the "Sazhen-S" quantum optical station of the Centre for Special Data Reception and Processing and Navigating Field Control of the National Space Facilities Control and Test Center of State Space Agency of Ukraine. Possible ways of increasing the throughput of the "Sazhen-S" quantum optical station according to the observation of LEO space objects are proposed.

**Keywords:** Low-Earth Orbit space objects, optical observations, queuing systems.