

УДК 629.197

Макаров А.Л.<sup>1</sup>, Мозговой Д.К.<sup>2</sup>, Кулабухов А.М.<sup>2</sup>, Хорошилов В.С.<sup>1</sup>, Балашов В.Н.<sup>1</sup>, Попель В.М.<sup>1</sup><sup>1</sup> Государственное предприятие "Конструкторское бюро "Южное" им. М.К. Янгеля".

Украина, г. Днепропетровск

<sup>2</sup> Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара. Украина, г. Днепропетровск

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЪЕМКИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВ

*Приведен анализ методов управления процессом съемки протяженных территорий сложной конфигурации с применением спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с оптико-электронными сканерами высокого пространственного разрешения. Описаны результаты моделирования съемки береговой линии с использованием фактических данных об облачности, реализуемой с помощью программного управления угловым движением спутника во время съемки.*

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, оптико-электронный сканер, спутниковая съемка протяженных территорий, программное управление угловым движением спутника.

На первых спутниках ДЗЗ отечественной разработки «Сич-1», «Океан-О» и «Сич-1М» с бортовыми сканерами низкого и среднего пространственного разрешения с широкой полосой захвата использовалась съемка без перенацеливания [1] (рис. 1).

сканеры высокого пространственного разрешения с узкой полосой захвата, использовалась съемка с перенацеливанием по крену (рис. 2).

Поле зрения сканера высокого разрешения обычно составляет единицы градусов, а угол пере-

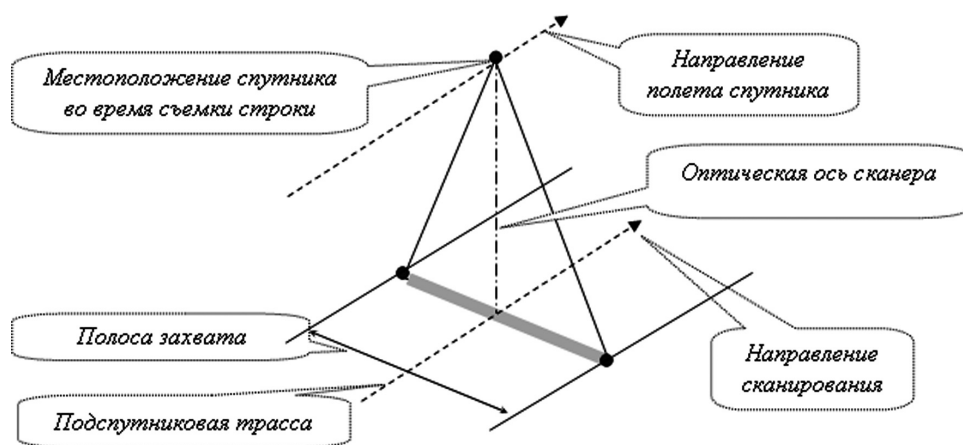


Рис. 1. Съемка без перенацеливания

Оптическая ось сканера при такой съемке обычно направлена в надир, т.е. съемка ведется при нулевых углах и скоростях ориентации. Скорость и направление сканирования определяются орбитальным движением спутника [2].

В настоящее время съемка без перенацеливания используется на спутниках ДЗЗ низкого пространственного разрешения Terra и Aqua [3, 4].

На спутниках отечественной разработки «Egypstat-1», «Сич-2» [5, 6], имеющих бортовые

нацеливания десятки градусов (т.о. ширина полосы обзора превышает примерно на порядок ширину полосы захвата). Съемка ведется при фиксированном угле крена и близких к нулю углах тангажа и рыскания [7].

Перенацеливание по крену позволяет несколько повысить технические характеристики спутников высокого пространственного разрешения, например, выполнять многовитковую съемку объектов, находящихся в стороне от подспутниковой трассы

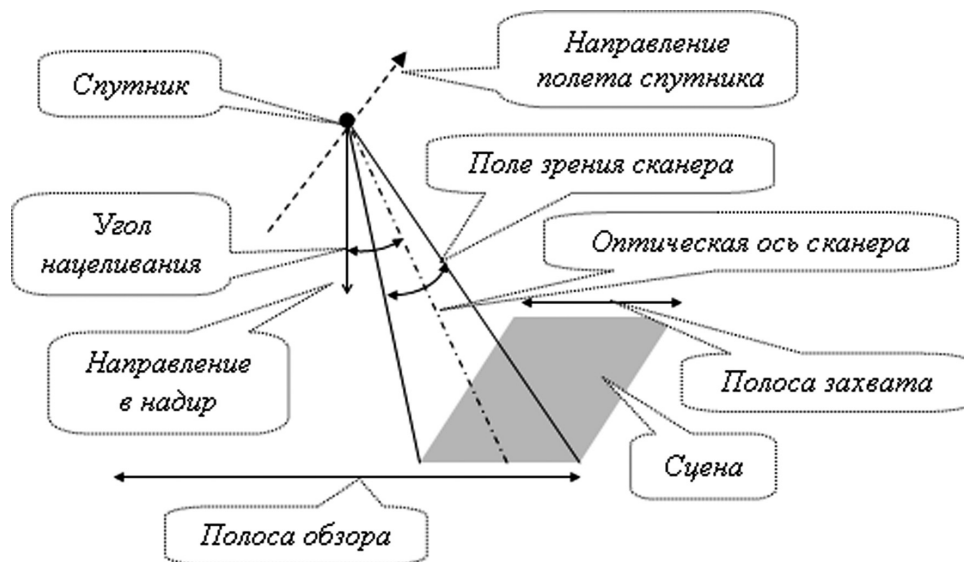


Рис. 2. Съемка с перенацеливанием по крену

или вести стереосъемку одной территории с соседних витков [8].

Пример съемки протяженной береговой линии за три витка с перенацеливанием по крену приведен на рис. 3.

Кроме того, перенацеливание по крену позволяет выполнять на одном витке съемку объектов, находящихся с разных сторон от подспутниковой трассы (рис. 4).

При этом требуется высокая скорость перенацеливания и малое время стабилизации спутников т.е. повышаются требования к системе ориентации [9, 10].

При съемке слабоосвещенных и слабоконтрастных объектов для повышения чувствительности съемочной аппаратуры в современных спутниках ДЗЗ сверхвысокого пространственного разрешения OrbView, Ресурс-ДК, EROS и др. [11, 12] используется режим съемки с накоплением (т.н. асинхронный режим). Он позволяет увеличить время

экспозиции строки за счет снижения скорости перемещения проекции строки фотоприемника (линейки ПЗС) по поверхности Земли путем перенацеливания спутника во время съемки по тангажу (рис. 5).

Благодаря этому возрастает отношение сигнал/шум для получаемых снимков при одних и тех же параметрах оптико-электронной системы (рис. 6).

Режим съемки с накоплением позволяет:  
 производить съемку при меньших углах места Солнца с заданным отношением сигнал/шум;  
 обнаруживать на снимках слабоосвещенные и слабоконтрастные объекты в заданных условиях освещенности;

выполнять более качественно процедуры классификации снимка, использующие радиометрические и спектральные признаки [13-15].

При такой съемке необходимо учитывать множество факторов, основными из которых являются:

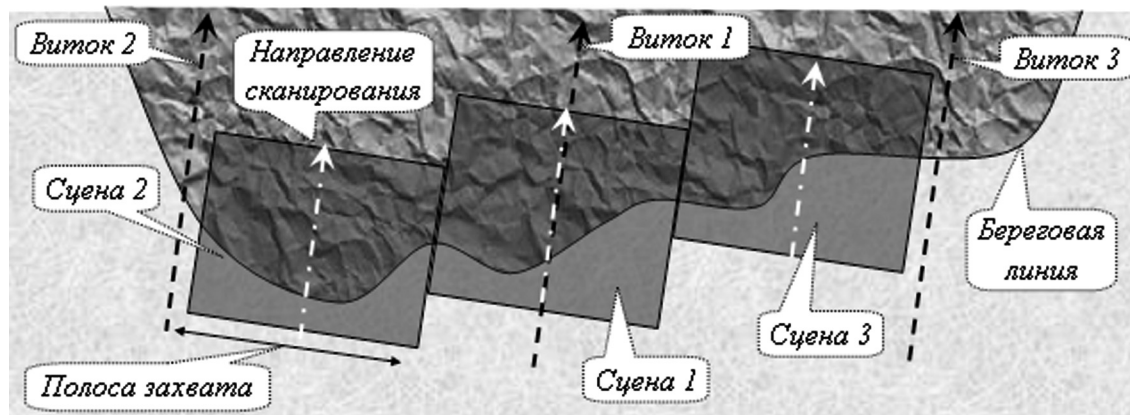


Рис. 3. Съемка протяженной береговой линии за три витка

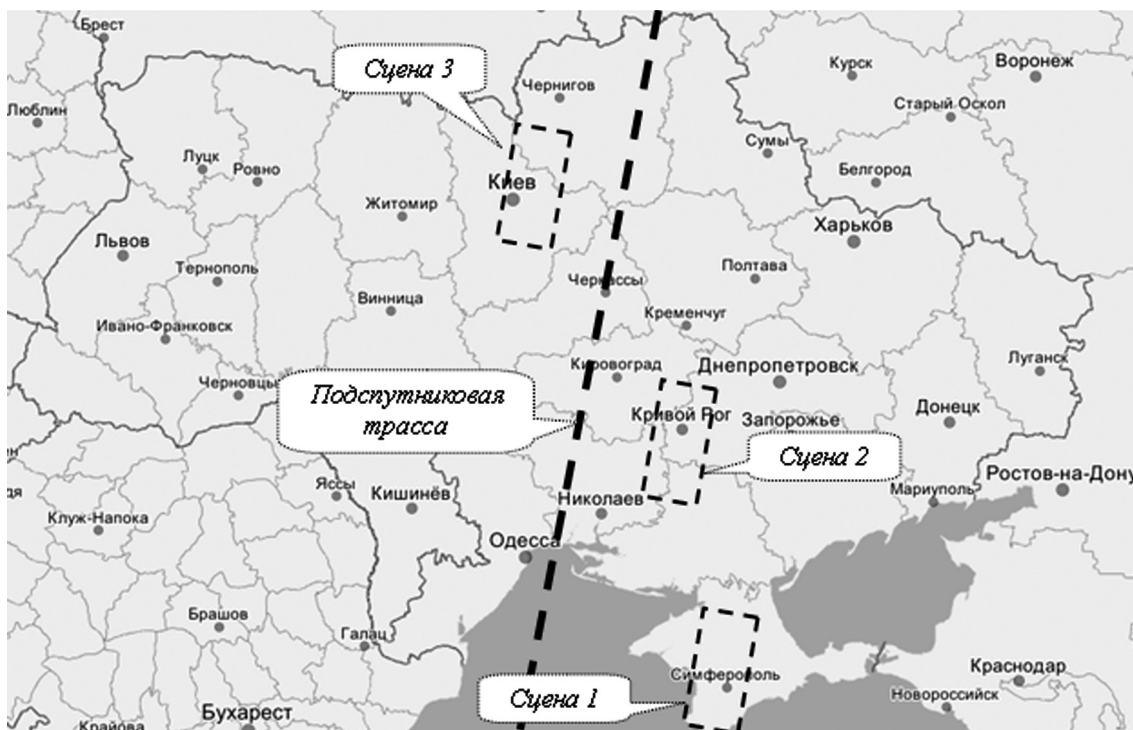


Рис. 4. Съемка с разных сторон от подспутниковой трассы

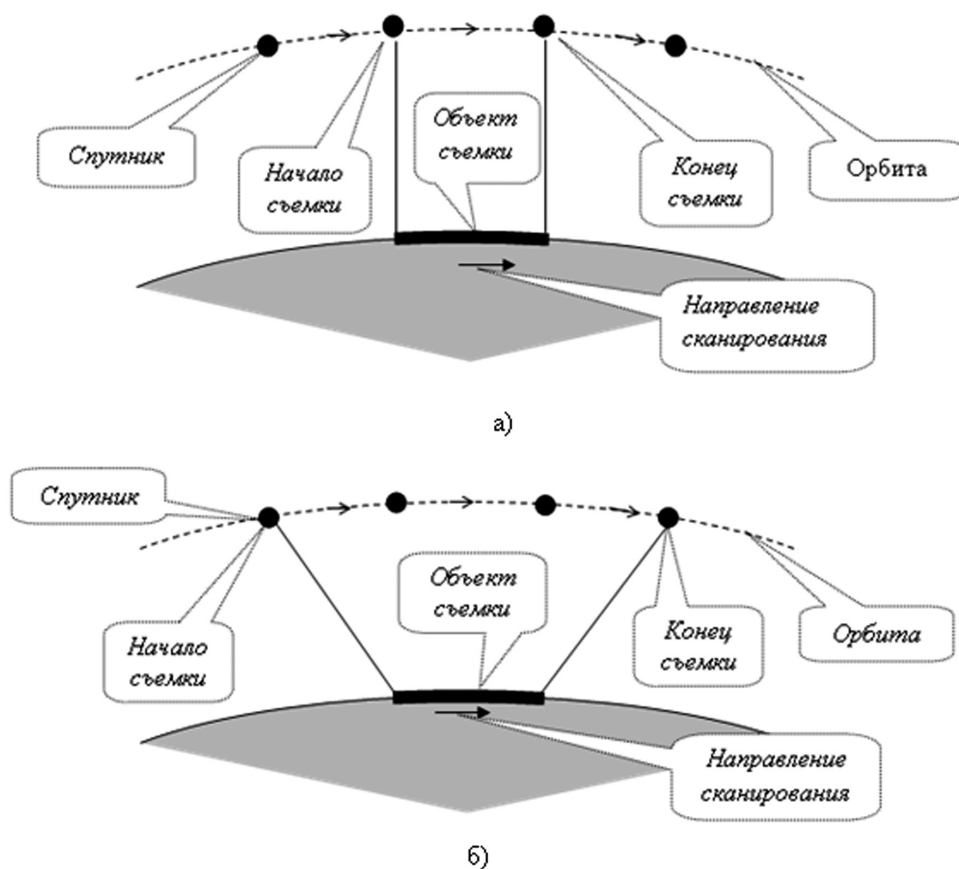


Рис. 5. Виды спутниковой съемки: а) съемка без накопления; б) съемка с накоплением

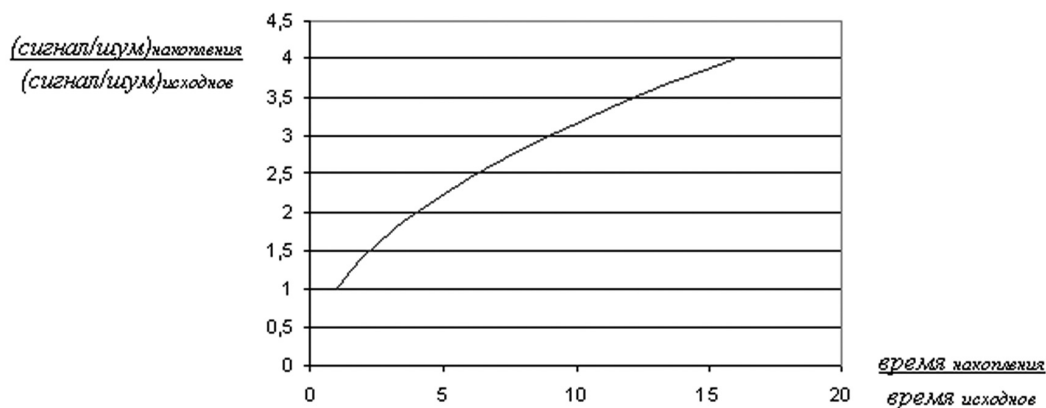


Рис. 6. Зависимость отношения сигнал/шум от коэффициента накопления

— различная наклонная дальность и угол съемки для строк, соответствующих началу, середине и концу сцены, что приводит к соответствующим различиям в размерах проекции линейки ПЗС на поверхности Земли (рис. 7);

Кроме того, при съемке с накоплением увеличивается длительность сеанса связи в режиме непосредственной передачи без хранения на борту (для одной и той же снимаемой территории), что позволяет использовать приемные станции с меньшими

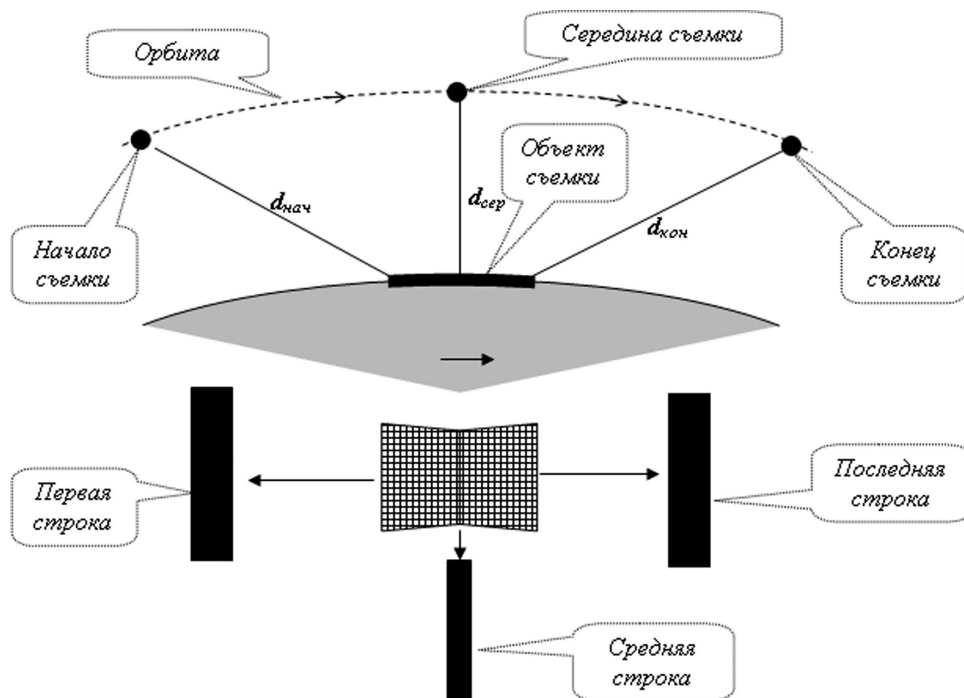


Рис. 7. Влияние различной наклонной дальности на геометрию съемки

— значительное отклонение от надира оптической оси спутника в начале и в конце съемки, необходимое при больших значениях коэффициента накопления (отношения времени съемки с накоплением к времени съемки без накопления), что приводит к необходимости учета высоты рельефа и атмосферной рефракции.

антеннами с теми же параметрами бортовой передающей аппаратуры.

Режим съемки с накоплением предъявляет соответствующие требования к спутнику в части обеспечения требуемой переориентации в процессе съемки.

Большинство современных спутников ДЗЗ сверхвысокого пространственного разрешения (Ikonos,



QuickBird и др.) позволяют получать снимки с заданной ориентацией сцены (например, в направлении север-юг), а также снимать произвольно ориентированные протяженные объекты за один виток (рис. 8).

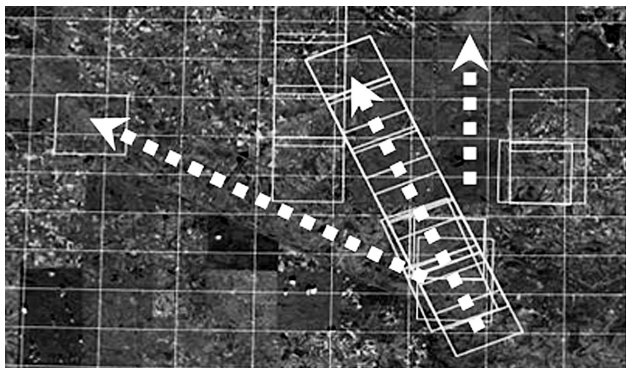


Рис. 8. Съемка с заданной ориентацией сцены (QuickBird)

При такой съемке направление сканирования не совпадает с направлением движения подспутниковой точки (рис. 9), что требует непрерывного изменения углов крена, тангажа и рыскания непосредственно во время съемки.

Запущенные в последние годы спутники ДЗЗ сверхвысокого пространственного разрешения (GeoEye, WorldView, Pleiades и др.) совмещают режим съемки с аппаратным накоплением TDI (Time Delay and Integration) и режим съемки с произвольной ориентацией сцены. Режим TDI использует матричный ПЗС-датчик вместо линейного, и съемка одной и той же территории производится последовательно несколькими строками матрицы с последующим суммированием по столбцам.

Это позволяет одновременно повысить радиометрическое качество снимков и увеличить полезную площадь сцены, снимаемую за один пролет.

На рис. 10 приведен пример комбинированной съемки за один виток территории Днепропетровска и Днепродзержинска.

Комбинированная съемка в процессе перенацеливания требует программного управления угловым движением спутника непосредственно во время съемки.

Данный режим съемки не был реализован на отечественных спутниках ДЗЗ, так как он требует специальной методики планирования съемки, использующей программное управление угловым движением

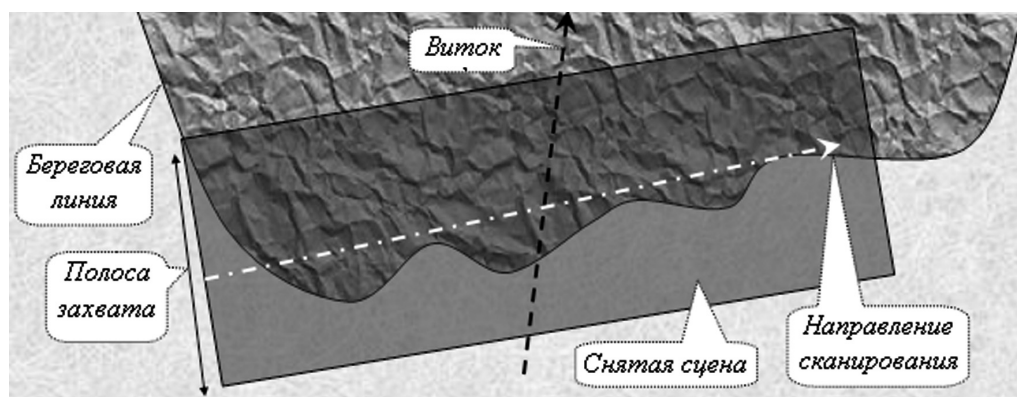


Рис. 9. Одновитковая съемка протяженного объекта



Рис. 10. Пример комбинированной съемки за один виток

спутника непосредственно во время съемки. Разработка такой методики позволит использовать данный режим съемки на перспективных спутниках высокого пространственного разрешения отечественной разработки («Сич-3» и другие спутники).

С целью анализа эффективности метода съемки, использующего программное управление угловым движением спутника, проводилось моделирование для следующих видов съемки:

– многовитковая съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы и нулевыми угловыми скоростями во время съемки;

– многовитковая съемка с произвольной ориентацией сцены и ненулевыми угловыми скоростями во время съемки;

– одновитковая съемка сцены сложной конфигурации с ненулевыми угловыми скоростями во время съемки.

Выбранный снимаемый участок – южное побережье Крыма от Севастополя до Феодосии (протяженность около 160 км). Тип орбиты спутника – солнечно-синхронная, высота 700 км. Полоса захвата сканера в надире – 25 км.

Моделирование проводилось для съемки в режиме «без накопления» при отсутствии погрешностей ориентации и стабилизации КА.

Для получения фактических данных об облачности по данной территории использовались снимки спутников Aqua и Terra (прибор MODIS) [3, 4].

Результаты моделирования показаны на рис. 11...20.

В заданный 5-дневный период снимаемая территория была доступна для съемки полностью 1 день, частично – 2 дня, недоступна – 2 дня.

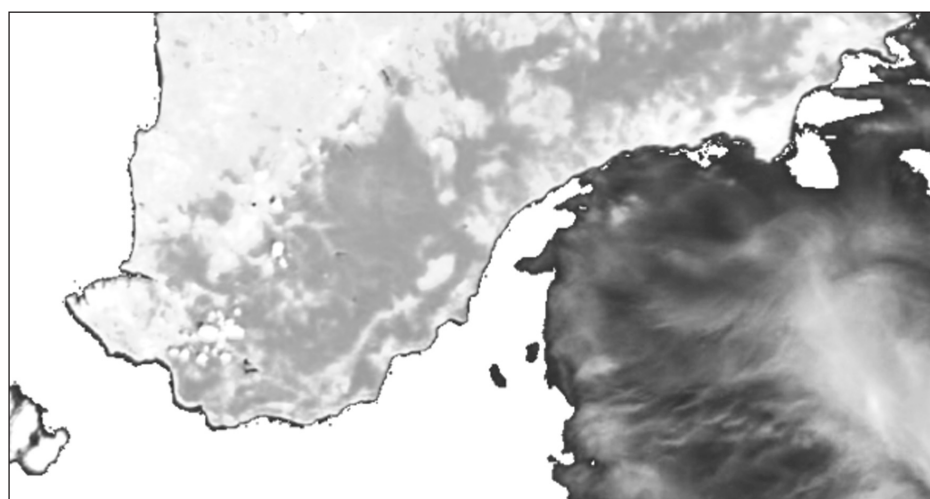


Рис. 11. Состояние облачности 19.05.2012 на время съемки (облачность ~2% – снимаемая территория доступна для съемки)



Рис. 12. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы (за 1-й виток снято ~15% площади территории)



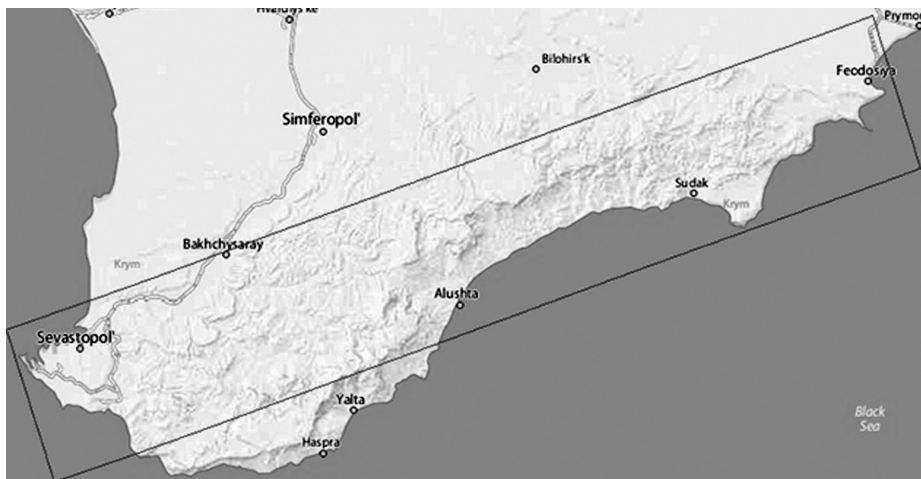


Рис. 13. Съемка с произвольной ориентацией сцены  
(за 1-й виток снято ~80% площади территории)

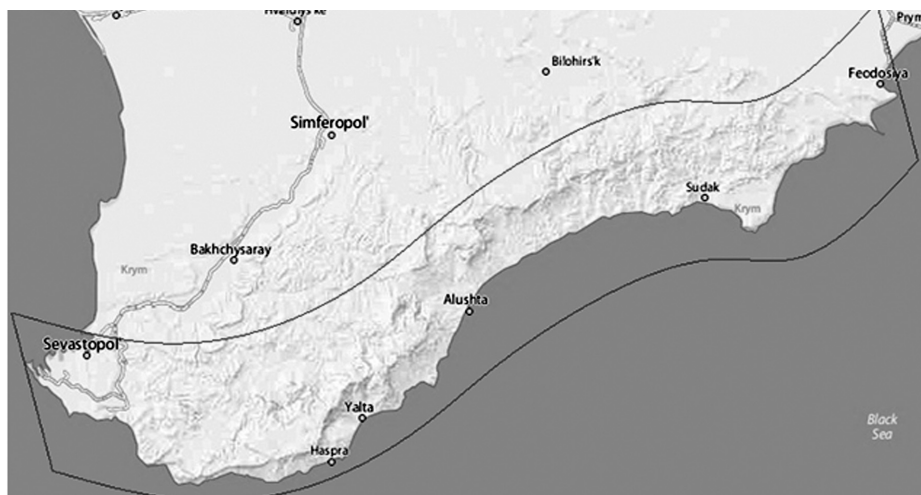


Рис. 14. Съемка сцены сложной конфигурации  
(за 1-й виток снято ~98% площади территории)

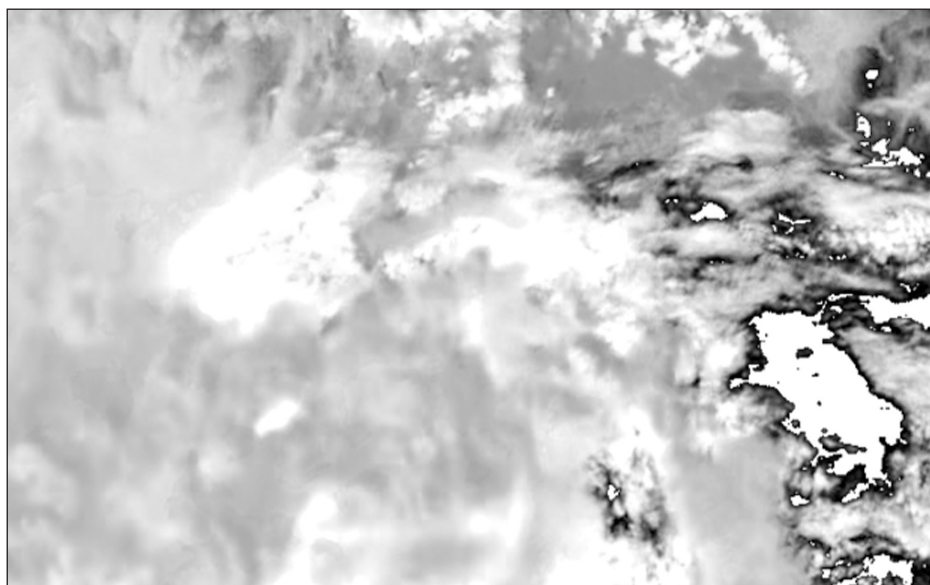
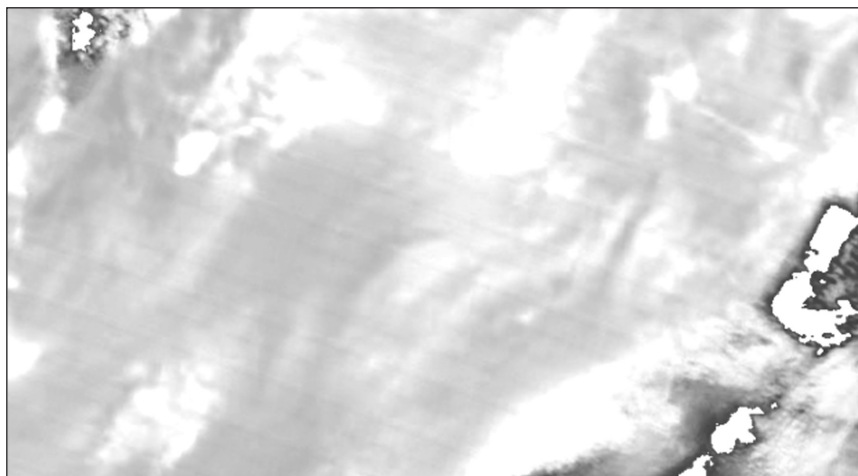
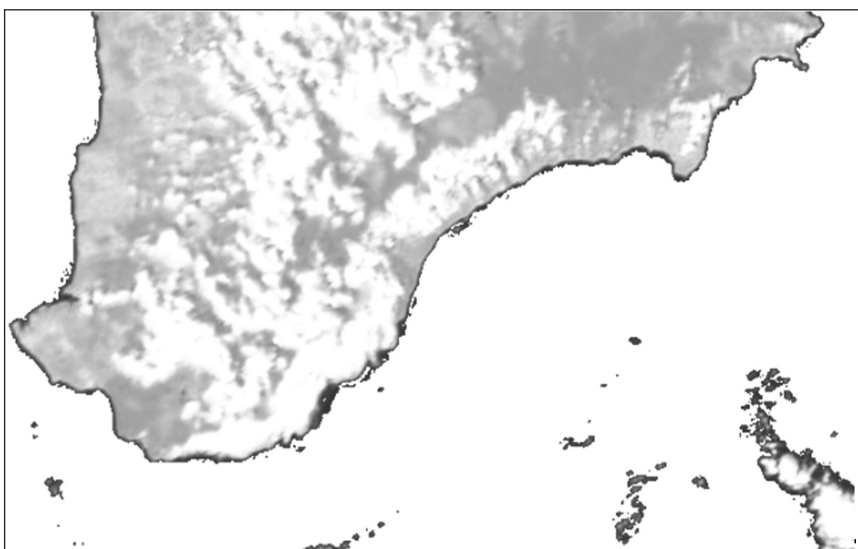


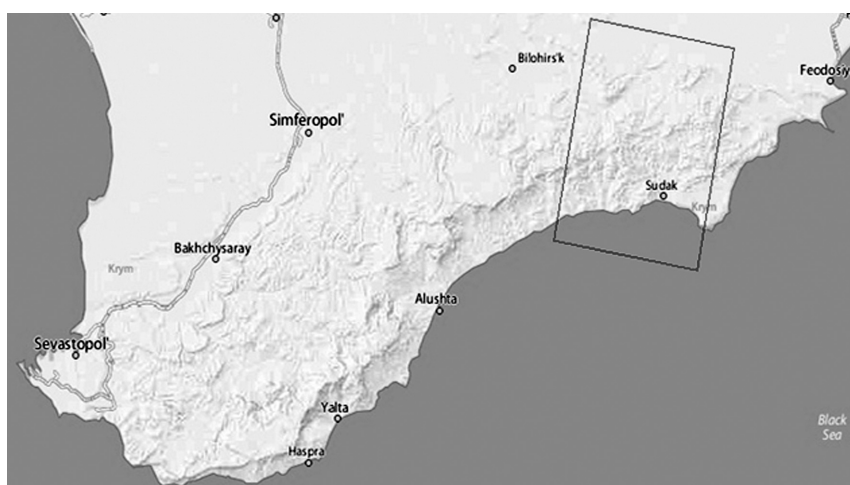
Рис. 15. Состояние облачности 20.05.2012 на время съемки  
(облачность ~70% – снимаемая территория недоступна для съемки)



**Рис. 16.** Состояние облачности 21.05.2012 на время съемки  
(облачность ~98% – снимаемая территория недоступна для съемки)



**Рис. 17.** Состояние облачности 22.05.2012 на время съемки  
(облачность ~15% – снимаемая территория частично доступна для съемки)



**Рис. 18.** Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы  
(за 2-й виток снято ~17% площади территории)



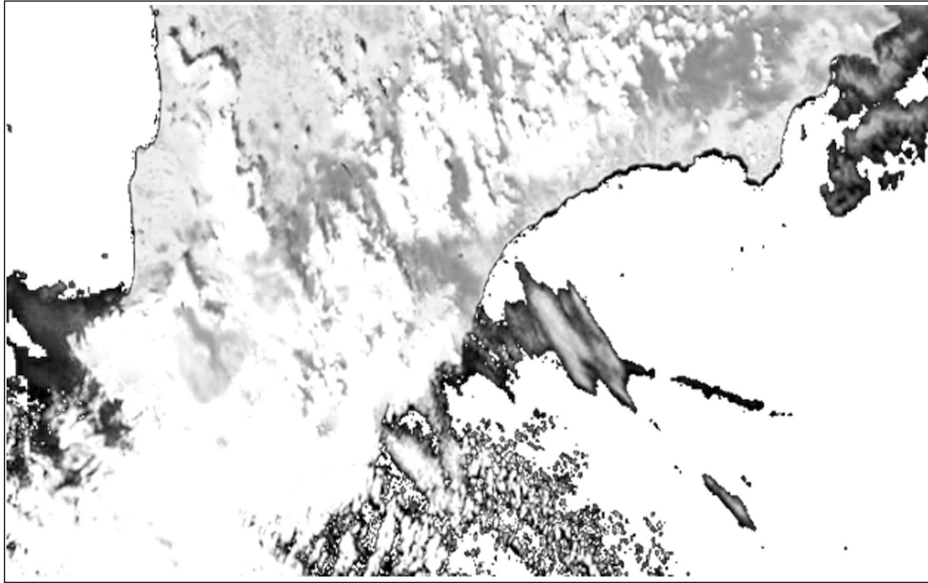


Рис. 19. Состояние облачности 23.05.2012 на время съемки (облачность ~20% – снимаемая территория частично доступна для съемки)

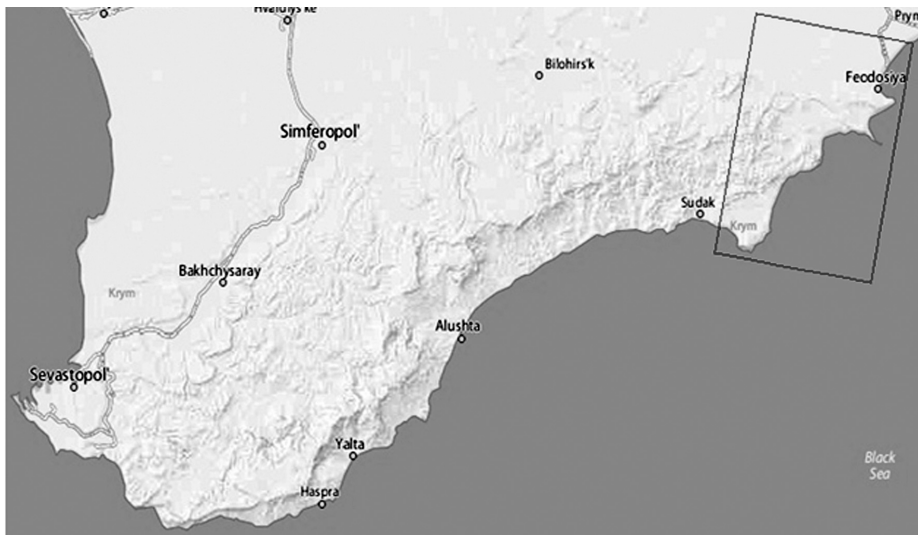


Рис. 20. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы (за 3-й виток снято ~20% площади территории)

## Выводы

В таблице 1 приведены показатели эффективности различных видов съемки, полученные в результате моделирования.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что одновитковая съемка сцены сложной конфигурации с ненулевыми угловыми скоростями во время съемки является наиболее эффективной в части оперативности и площади покрытия.

Для других сезонов съемки (осеннее-зимний период) и других регионов Украины влияние погодных условий еще более существенное, и сравнительная эффективность разработанного метода съемки будет еще выше.

## Литература

- [1] Мозговой Д.К. Методика супутникової зйомки мало-розмірних слабоконтрастних об'єктів // Програма наук. конф. за підсумками наук.-досл. роботи університету за 2010 рік. – Д.: ДНУ, 2010. – С. 108.
- [2] Технология спутниковой съемки в процессе перенацеливания / Макаров О.Л., Мозговой Д.К., Кулабухов А.М. и др. // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17. № 6. С. 3–9.
- [3] Долинец Ю.С., Мозговой Д.К. Использование снимков со спутников Terra и Aqua для решения актуальных прикладных задач // VI Міжнар. наук.-техн. конф. "Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаціно-космічної техніки". Збірник



- довідей. Частина II . - К.: НТУ КПП, 2007. – С. 97–103.
- [4] Кравець О.В., Мозговой Д.К. Использование данных MODIS для экологического мониторинга и контроля ЧС // X Міжнародна молодіжна наук.-практ. конф. «Людина і космос»: Збірник тез. – Д.: НЦАОМ, 2008. – С. 500.
- [5] Долинець Ю.С., Мозговой Д.К. Технология спутниковой съемки с ненулевыми угловыми скоростями // X Міжнар. молодіжна наук.-практ. конф. «Людина і космос»: Збірник тез. – Д.: НЦАОМ, 2008. – С. 495.
- [6] Мозговой Д.К., Волошин В.И., Бушуев Е.И., Салтыков Ю.Д. Использование новых технологий съемки для повышения эффективности КА МС-2-8 // VII Українська конф. по космическим исследованиям. Сб. тезисов. 3 – 8 сентября 2007г., НЦУИКС, Евпатория. – С. 182–183.
- [7] Мозговой Д.К., Волошин В.И. Технология съемки прибрежных зон // Современные проблемы рационального природопользования в прибрежных морских акваториях Украины. Тезисы докладов Междунар. конф. молодых ученых (Кацивели, 12–14 июня 2007). – Севастополь, 2007. – С. 21–22.
- [8] Мозговой Д.К., Волошин В.И. Спутниковая съемка протяженных объектов // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Ракетно-космічна техніка. Вип. 10, т. 2. № 9/2, 2006 г. – С. 239-241.
- [9] Мозговой Д.К. Технология съемки протяженных объектов // IX Міжнар. молодіжна наук.-практ. конф. «Людина і космос»: Зб. тез. – Д., 2007. – С. 439.
- [10] Мозговой Д.К. Управление ориентацией КА ДЗЗ высокой разрешающей способности // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Ракетно-космічна техніка. Вип. 13, т. 1. № 17/4, 2009 г. – С. 59–65.
- [11] Повышение эффективности съемки с помощью космического аппарата земных объектов произвольной конфигурации / Макаров А.Л., Мозговой Д.К., Хорошилов В.С. и др. // Технологические системы, № 2(55)/2011. – С. 66–70.
- [12] Методы повышения эффективности спутниковой съемки произвольно расположенных протяженных участков Земли / Макаров А.Л., Мозговой Д.К., Хорошилов В.С. и др. // 21-я Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. (Севастополь, 12–16 сент. 2011 г.). Севастополь: Вебер, 2011. С. 182–183.
- [13] Д.К. Мозговой, О.В. Кравець. Классификация малоразмерных объектов на спутниковых снимках. // Екологія та ноосферологія. Науковий журнал. Том 20, №3-4. – Київ – Дніпропетровськ, 2009. – С. 26–30.
- [14] Д.К. Мозговой. Применение комбинированных масок для фильтрации периодических помех. Міжвідомчий науково-технічний збірник „Прикладна геометрія та інженерна графіка”. – К.: Українська асоціація з прикладної геометрії, 2008. – С. 175–179.
- [15] Д.К. Мозговий, В.М. Корчинський, О.В. Кравець. Використання вейвлетів в обробці супутникових знімків високого просторового розрізнення. // Вісник ДНУ. Ракетно-космічна техніка. – 2009. – Вип. 13, т. 1. № 17/4. – С. 65–71.

**Makarov A.L.<sup>1</sup>, Mozgovoy D.K.<sup>2</sup>, Kulabukhov A.M.<sup>2</sup>, Khoroshilov V.S.<sup>1</sup>, Balashov V.N.<sup>1</sup>, Popel V.M.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Yuzhnoye, State-owned Design Office named after M. K. Yangel. Ukraine, Dnepropetrovsk

<sup>2</sup> Dnepropetrovsk National University named after O. Gonchar. Ukraine, Dnepropetrovsk

## ANALYSIS OF CONTROL METHODS OF THE EARTH SURFACE SURVEY BY SATELLITES

*Provides an analysis of control methods of the shooting extended territories complicated configuration using remote sensing satellite with high spatial resolution optical-electronic scanners. Describes the results of coastline shooting simulation using actual data on clouds, implemented using software control angle motion of the satellite during the shooting.*

*Keywords:* remote sensing, optical-electronic scanner, satellite photography of extensive territories, software control of angular motion of the satellite.

### References

- [1] Mozgoviy D.K. Metodika sputnikovoy zjomki malorozmernih slabokontrastnih obyektiv // Programa nauk. konf. za pidsumkami nauk.-dosl. roboti universitetu za 2010 rik. – D.: DNU, 2010. – S. 108.
- [2] Tehnologiya sputnikovoy syemki v processe perenacelivaniya / Makarov O. L., Mozgovoy D. K., Kulabukhov A. M. i dr. // Kosmichna nauka i tekhnologiya. – 2011. – T. 17. № 6. S. 3–9.

- [3] Dolinec Y. S., Mozgovoy D. K. Ispolzovanie snimkov so sputnikov Terra i Aqua dlya resheniya aktualnykh prikladnykh zadach // VI Mizhnar. nauk.-tehn. konf. "Girotehnologiyi, navigaciya, keruvannya rukhom ta konstruyuvannya aviacino-kosmichnoi tekhniki". Zbirnik dopovidey. Chastina II. - K.: NTU KPI, 2007. – S.97-103.
- [4] Kravec O. V., Mozgovoy D. K. Ispolzovanie dannykh MODIS dlya ekologicheskogo monitoringa i kontrolja ChS // H Mizhnarodna molodizhna nauk.-prakt. konf. «Lyudina i kosmos»: Zbirnik tez. – D.: NCAOM, 2008. – S. 500.
- [5] Dolinec Y. S., Mozgovoy D. K. Tehnologiya sputnikovoy syomki s nenulevymi uglovymi skorostyami // X Mizhnar. molodizhna nauk.-prakt. konf. «Lyudina i kosmos»: Zbirnik tez. – D.: NCAOM, 2008. – S. 495.
- [6] Mozgovoy D. K., Voloshin V. I., Bushuev E. I., Saltykov Y. D. Ispolzovanie novyh tehnologiy syomki dlya povysheniya effektivnosti KA MS-2-8 // VII Ukrainskaya konf. po kosmicheskim issledovaniyam. Sb. tezisov. 3 – 8 sentjabrja 2007g., NCUIKS, Evpatoriya. – S. 182–183.
- [7] Mozgovoy D. K., Voloshin V. I. Tehnologiya syomki pribrezhnykh zon // Sovremennye problemy racionalnogo prirodopolzovaniya v pribrezhnykh morskikh akvatoriyakh Ukrainy. Tezisy dokladov Mezhdunar. konf. molodykh uchenykh (Kaciveli, 12 – 14 iyunya 2007). – Sevastopol, 2007. – S. 21–22.
- [8] Mozgovoy D. K., Voloshin V. I. Sputnikovaya syomka protyazhennykh obyektov // Visnik Dnipropetr. un-tu. Raketno-kosmichna tekhnika. Vip. 10, t. 2. № 9/2, 2006 g. – S. 239-241.
- [9] Mozgovoy D. K. Tehnologiya syomki protjazhennykh obyektov // IX Mizhnar. molodizhna nauk.-prakt. konf. «Ljudina i kosmos»: Zb. tez. – D., 2007. – S. 439.
- [10] Mozgovoy D. K. Upravlenie orientaciey KA DZZ vysokoy razreshayushhey sposobnosti // Visnik Dnipropetr. un-tu. Raketno-kosmichna tekhnika. Vip. 13, t. 1. № 17/4, 2009 g. – S. 59-65.
- [11] Povyszenie effektivnosti syomki s pomoshhyu kosmicheskogo apparata zemnykh obyektov proizvolnoy konfiguracii / Makarov A. L., Mozgovoy D. K., Khoroshilov V. S. i dr. // Tehnologicheskie sistemy, № 2(55)/2011. – S. 66-70.
- [12] Metody povysheniya effektivnosti sputnikovoy syomki proizvolno raspolozhennykh protyazhennykh uchastkov Zemli / Makarov A. L., Mozgovoy D. K., Khoroshilov V. S. i dr. // 21-ya Mezhdunar. konf. «SVCh-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii». Materialy konf. (Sevastopol, 12-16 sent. 2011 g.). Sevastopol: Veber, 2011. S. 182–183.
- [13] D. K. Mozgovoy, O. V. Kravec. Klassifikaciya malorazmernykh obyektov na sputnikovyx snimkakh. // Ekologiya ta noosferologiya. Naukoviy zhurnal. Tom 20, №3-4. – Kiyiv – Dnipropetrovsk, 2009. – S. 26-30.
- [14] D. K. Mozgovoy. Primenenie kombinirovannykh masok dlya filtratsii periodicheskikh pomekh. Mizhvidomchiy nauko-vo-tehnichnij zbirnik „Prikladna geometriya ta inzhenerna grafika”. – K.: Ukrayinska asociaciya z prikladnoy geometriyi, 2008. – S. 175–179.
- [15] D. K. Mozgoviy, V. M. Korchinskiy, O. V. Kravec. Viktoristannya veyvletiv v obrobcii suputnikovikh znimkiv visokogo prostорового rozrznenniya. // Visnik DNU. Raketno-kosmichna tekhnika. – 2009. – Vip. 13, t. 1. № 17/4. – S. 65–71.